



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική εργασία:

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ



Υπεύθυνη καθηγήτρια: κα Κορωνάκη Ειρήνη

Φοιτήτρια: Καρκαλέτση Βασιλική

A.M.: 02109720

Αθήνα 2014

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η βιβλιογραφική ανασκόπηση πέντε βασικών κύκλων ψύξης. Κάθε Κεφάλαιο περιέχει τα ακόλουθα:

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον αντίστροφο κύκλο Brayton και στην εφαρμογή του κυρίως σε ψυκτικές εφαρμογές. Σε πρώτη φάση δίνεται η βάση του εν λόγω κύκλου που είναι ο κλασικός κύκλος Brayton και αναλύεται θερμοδυναμικά. Στη συνέχεια γίνεται μετάβαση στον αντίστροφο κύκλο, όπου αναφέρονται και πιο ειδικά χαρακτηριστικά του, όπως ο βαθμός απόδοσής του. Επιπλέον, δίνονται οι κύριες εφαρμογές με έμφαση στον τομέα της ψύξης, αλλά και χαρακτηριστικά παραδείγματά τους. Τέλος, παρουσιάζεται και η πιο σπάνια εφαρμογή του ως κύκλος υγροποίησης του φυσικού αερίου.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κύκλος Stirling και οι ποικίλες εφαρμογές του. Πιο ειδικά γίνεται αναφορά στα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του, τις κύριες συνιστώσες που τον απαρτίζουν και τις συνήθεις διαμορφώσεις που συναντώνται. Εξάλλου, ο κύκλος Stirling αποτελεί ενδεδειγμένη λύση τόσο στον τομέα της παραγωγής ενέργειας, ειδικά σε συστήματα ΣΗΘ (Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας), όσο και σε ψυκτικές εφαρμογές, ακόμη και σε διαστημικές αποστολές. Αξιοσημείωτες είναι και άλλες εφαρμογές μικρής κλίμακας της μηχανής Stirling όπως η ψύξη chip ή σαν σύστημα κίνησης υποβρυχίων.

Στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στα κρυογονικά αέρια, όπου παρουσιάζονται οι κύκλοι τους και οι συνήθεις εφαρμογές τους, ως επί το πλείστον στον τομέα της ψύξης. Τα κρυογονικά αέρια αρχικά απασχόλησαν αρκετά τους τομείς της Ιατρικής, της Χειρουργικής και της Βιολογίας και γι' αυτό δίνονται παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών. Συνήθης πρακτική τα τελευταία χρόνια είναι και η υιοθέτησή τους στον τομέα της συντήρησης τροφίμων Όμως λόγω της σημαντικής ψυκτικής τους ικανότητας καθίστανται ελκυστικά και σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπως η ψύξη του Επιταχυντή Αδρονίων στο CERN.

Στο 4^ο Κεφάλαιο η βιβλιογραφική ανασκόπηση εστιάζεται σε έναν πιο ειδικό κρυογονικό κύκλο που είναι η μέθοδος ψύξης Linde. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο θερμοδυναμικός της κύκλος, ενώ δίνονται και διάφορες παραλλαγές που έχουν υιοθετηθεί κατά καιρούς με σκοπό τη βελτίωση του βαθμού απόδοσής της. Επίσης, δίνονται οι κύριες εφαρμογές της μεθόδου Linde, όπως είναι η υγροποίηση αερίων.

Στο 5^ο και τελευταίο Κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται ο δεύτερος κρυογονικός κύκλος που είναι η μέθοδος Claude. Και αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως στην υγροποίηση αερίων. Έτσι πέρα από τα κύρια θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του εν λόγω κύκλου, δίνονται τροποποιήσεις που έχουν προκύψει ύστερα από έρευνα άλλων επιστημόνων για βελτίωση της απόδοσής του. Τέλος παρουσιάζεται μια ψυκτική μηχανή που βασίζεται στον κύκλο Claude.

Λέξεις κλειδιά: Αντίστροφος κύκλος Brayton, Κύκλος Stirling, Κρυογονικά αέρια, Μέθοδος υγροποίησης Linde, Μέθοδος υγροποίησης Claude, Ψυκτικές εφαρμογές.

Abstract

The subject of this thesis was the literature review of five key refrigeration cycles, so each chapter contains the following:

In Chapter 1 refers to the reverse Brayton cycle and its application mainly in refrigeration machines. At first, the classic Brayton cycle is presented and analyzed thermodynamically. Then, is the transition to the reverse cycle, highlighting more specific features, such as its efficiency. Moreover, the main applications are given with emphasis on cooling features. Lastly, the most rare application as cycle gas liquefaction is presented.

The Second chapter presents the Stirling cycle and its various applications. More specific reference is made to the thermodynamic characteristics, the main constituent components and the usual configurations encountered. Moreover, the Stirling cycle is an appropriate solution in the areas of energy, especially in CHP systems (Cogeneration of Heat and Electricity), and in refrigeration even in space missions. It is highly notable, and other small-scale applications of the Stirling engine as chip cooling or the driving system in submarines.

The third chapter of this thesis refers to cryogenic gases, their cooling cycles and their classic applications mainly in the refrigeration area. Cryogenic gases initially occupied several areas of Medicine, Surgery and Biology and therefore examples of such applications are presented. Another usual practice in recent years is the adoption in food preservation. However due to their significant cooling capacity, have become attractive in highly demanding applications, such as cooling the Large Hadron Collider at CERN.

In Chapter 4, the literature review focuses on a more specific cryogenic cycle as the Linde method. More specifically the thermodynamic cycle is shown and also presented several variations that have been adopted from time to time in order to improve its efficiency. Also the main applications of Linde method are given, such as the liquefaction of gases.

The fifth and last chapter concerns about the second cycle cryogenic method which is the Claude method. Also this method is mainly applied to the liquefaction of gases. So apart from the main thermodynamic characteristics of this cycle, changes are given that have been generated by other research scientists to improve its performance. Finally a refrigerator is shown which adopts the Claude cycle.

Keywords: Reverse Brayton cycle, Stirling cycle, Cryogenic gases, Linde liquefaction, Claude liquefaction, Cooling applications.

Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια ΕΜΠ κ. Κορωνάκη Ειρήνη, για τις πολύτιμες συμβουλές της, τις υποδείξεις της και την αμέριστη συμπαράστασή της στη σύνταξη και ολοκλήρωσή της.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αντίστροφος κύκλος Brayton και Εφαρμογές του	14
1.1 Κλασικός κύκλος Brayton	14
1.2 Ανάλυση του κύκλου.....	16
1.3 Βαθμός απόδοσης απλού κύκλου Brayton	17
1.4 Εισαγωγή στον αντίστροφο κύκλο Brayton	18
Βαθμός απόδοσης αντίστροφου Brayton.....	21
1.4.1 Πραγματικός αντίστροφος κύκλος Brayton.....	22
1.4.2 Σταθμισμένη θερμοκρασία ξηρού αέρα (Dry Air Rated Temperature - DART)	23
Εφαρμογές του αντίστροφου κύκλου Brayton	24
1.5 Συστήματα ψύξης αεροσκάφους	24
1.6 Παραδείγματα εφαρμογών	26
1.6.1.Σύστημα κλιματισμού αυτοκινήτων.....	26
1.6.1.1. Επίδραση του συστήματος στην απόδοση της μηχανής.....	30
1.6.1.2. Περιβαλλοντική επίδραση.....	30
1.6.2. Διαστημικές εφαρμογές.....	31
1.6.2.1. Περιγραφή του διβάθμιου κρυογονικού ψύκτη TURBO-BRAYTON	32
1.6.2.2. Απόδοση	34
1.7. Υγροποίηση φυσικού αερίου.....	36
1.7.1. Παρουσίαση των κύκλων.....	36
1.7.2. Αποτελέσματα έρευνας.....	38
2. Μηχανή Stirling και οι εφαρμογές της	39
2.6. Εισαγωγή στη μηχανή Stirling	39
2.7. Ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της μηχανής	43
2.8. Θερμοδυναμική ανάλυση του κύκλου Stirling.....	47
2.9. Συνιστώσες κύκλου Stirling	50
2.10. Διαμορφώσεις μηχανών Stirling.....	52
2.11. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μηχανής Stirling	55

2.12.	Θαλάσσιες εφαρμογές	56
2.13.	Ψυκτικές εφαρμογές	57
2.13.1.	Απόδοση ψυκτικής μηχανής Stirling.....	62
2.14.	Διαστημικές εφαρμογές	65
2.15.	Ειδικές μηχανές Stirling	71
2.15.1.	Ελευθέρων εμβόλων	71
2.15.2.	Χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας.....	73
2.15.3.	Ηλιακά συστήματα δίσκου/μηχανής	75
2.15.4.	Ψύξη chip.....	75
3.	Κρυογονικά αέρια και εφαρμογές τους	76
3.6.	Εισαγωγή	76
3.7.	Ιστορική εξέλιξη κρυογονικής.....	78
3.8.	Κρυογονικά ψυκτικά συστήματα	79
3.8.1.	Εφαρμογή σε υπεραγώγιμες συσκευές.....	79
3.8.2.	Εφαρμογή στον επιταχυντή LHC (Large Hadron Collider).....	82
3.8.3.	Κρυογονικό σύστημα με κύκλο πρόψυξης	83
3.8.4.	Για εργαστηριακές εφαρμογές	85
3.8.5.	Κρυογονικοί καταψύκτες τροφίμων	86
3.9.	Διαστημικές εφαρμογές	88
3.10.	Κρυογονικός διαχωρισμός αερίων	90
3.10.1.	Κρυογονική Αφυδάτωση	92
3.11.	Παραγωγή κρυογονικού υδρογόνου.....	92
3.12.	Κρυογονικές δεξαμενές	94
3.12.1.	Βασική αρχή της κρυογονικής λειτουργίας των δεξαμενών	95
3.13.	Άλλες εφαρμογές	96
3.13.1.	Κατεργασία μετάλλων	96
4.	Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Linde.....	103
4.6.	Εισαγωγή στη μέθοδο Linde	103
4.7.	Ο κύκλος Linde	105
4.8.	Θερμοδυναμική ανάλυση	107
4.9.	Κύκλος Linde με πρόψυξη	110
4.9.1.	Κλιμακωτή Μέθοδος Statoil/Linde.....	110

4.10.	Κύκλος Linde διπλής πίεσης	112
4.11.	Εφαρμογές	113
4.11.1.	Συστήματα Υγροποίησης	113
4.11.2.	Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή.....	117
5.	Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Claude.....	119
5.6.	Εισαγωγή	119
5.7.	Θερμοδυναμική ανάλυση κύκλου Claude.....	120
5.7.1.	Ο υγροποιητής Claude	122
5.8.	Παραλλαγές του κύκλου Claude	122
5.8.1.	Σύστημα υγροποίησης Kapitza	122
5.8.2.	Διαδικασία Heylandt	123
5.9.	Υγροποίηση υδρογόνου.....	125
5.10.	Ψύκτες κύκλου Claude	128
	Συμπεράσματα.....	130
	Βιβλιογραφία.....	132

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Μια μονάδα αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου (1. ΚΑΠΕ).....	14
Εικόνα 1.2: Διαγράμματα T-s και P-V του κύκλου Brayton (1. ΚΑΠΕ)	15
Εικόνα 1.3: Κύκλος Joule – Brayton (2. Μαθιουδάκης Κ.).....	16
Εικόνα 1.4: Πραγματικός κύκλος σε T-s (2. Μαθιουδάκης Κ.)	17
Εικόνα 1.5: Επίδραση θερμοκρασίας καύσης και λόγου πίεσης στην απόδοση (9. Cohen H.).....	18
Εικόνα 1.6: Αντίστροφος κύκλος Brayton σε διάγραμμα T-s (12. Kharagpur IIT).....	19
Εικόνα 1.7: Σύγκριση μεταξύ του αντίστροφου κύκλου Carnot και του αντίστροφου κύκλου Brayton σε διάγραμμα T-s (12. Kharagpur IIT).....	21
Εικόνα 1.8: Η συμπίεση σε ιδανικό και πραγματικό κύκλο Brayton σε διάγραμμα T-s (13. Shet U.S.P.).....	22
Εικόνα 1.9: Σχηματική απεικόνιση ενός απλού κύκλου ψύξης αεροσκάφους (8. Guzik Monica)	25
Εικόνα 1.10: Σύστημα κλιματισμού αυτοκινήτου με στροβιλοσυμπιεστή (4. Beatrice L. 2009).....	27
Εικόνα 1.11: Χάρτες στροβιλοσυμπιεστή του μοντέλου που επιλέχθηκε (4. Beatrice L.).....	29
Εικόνα 1.12: Αντίστροφος κύκλος Brayton δύο σταδίων (a) σχηματική απεικόνιση του κύκλου (b) διάγραμμα θερμοκρασίας- εντροπίας (14. Zagarola M.).....	33
Εικόνα 1.13: Απεικόνιση της διάταξης (14. Zagarola M.).....	34
Εικόνα 1.14: Μέγιστη ψύξη σε κάθε βαθμίδα για διαφορετικά επίπεδα ισχύος εισόδου (14. Zagarola M.)	35
Εικόνα 1.15: Αντίστροφοι κύκλοι Brayton, (I) Κλασσικός κύκλος με ένα στρόβιλο, (II - V) Τροποποιημένοι κύκλοι (5. Chang H.M.).....	37
Εικόνα 1.16: Διάταξη πρόψυξης του τυπικού αντίστροφου κύκλου Brayton (5. Chang H.M.).....	38
Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας μηχανής Stirling (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com).....	41
Εικόνα 2.2: Μηχανή Stirling και τα κύρια μέρη της (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com).....	41
Εικόνα 2.3: Μηχανή συμπαραγωγής Stirling και γεννήτρια με ηλεκτρική ισχύ 55 kW (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com).....	43
Εικόνα 2.4: Η γνήσια ευρεσιτεχνία της μηχανής(1790-1878) Stirling στα 1816 (Finkelstein 1959) - Σημειώνεται η απουσία του ψύκτη (27. Walker G.)	44
Εικόνα 2.5: Ηλεκτρική γεννήτρια της Philips (19. Hargreaves C.M.).....	46

Εικόνα 2.6: Ο θερμοδυναμικός κύκλος Stirling σε διάγραμμα πίεσης – όγκου (16. Χατζηδάκης Σ.)	48
Εικόνα 2.7: Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (20. Haywood D.)	49
Εικόνα 2.8: Ισόογκη θέρμανση (20. Haywood D.)	49
Εικόνα 2.9: Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (20. Haywood D.)	50
Εικόνα 2.10: Ισόογκη ψύξη (20. Haywood D.)	50
Εικόνα 2.11: Διαμόρφωση μηχανής Stirling τύπου Άλφα	53
Εικόνα 2.12: Διαμόρφωση μηχανής Stirling τύπου Βήτα	53
Εικόνα 2.13: Ο ρομβικός μηχανισμός οδήγησης των εμβόλων (18. Global Cooling BV)	54
Εικόνα 2.14: Η μηχανή ελευθέρων εμβόλων (18. Global Cooling BV)	54
Εικόνα 2.15: Διαμόρφωση μηχανής Stirling τύπου Γάμμα (18. Global Cooling BV)	55
Εικόνα 2.16: Σύγχρονο Σουηδικό υποβρύχιο κινούμενο με μηχανή Stirling (21. Hirata K.)	56
Εικόνα 2.17: Το Σύστημα Stirling AIP της Kockums (21. Hirata K.)	57
Εικόνα 2.18: Η αρχή του συστήματος Stirling AIP της Kockums (21. Hirata K.)	57
Εικόνα 2.19: Τέσσερα μεγέθη κρυογονικών μηχανών Stirling με διπλούς αντικριστούς γραμμικούς συμπιεστές (25. Radebaugh R.)	60
Εικόνα 2.20: Σχήμα ενός (α) γραμμικού συμπιεστή με (β) δυο τύπους εδράνων κάμψεως (25. Radebaugh R.)	61
Εικόνα 2.21: Ψυκτική μηχανή SPC-1 (25. Radebaugh R.)	62
Εικόνα 2.22: Κρυογονική μηχανή CryoTel (25. Radebaugh R.)	62
Εικόνα 2.23: Πρόβλεψη απόδοσης της ψυκτικής μηχανής Stirling ($T = 0 - 30^{\circ}\text{C}$) (μέγιστος βαθμός απόδοσης $\text{COP} = 3,1$) (18. Global Cooling BV)	64
Εικόνα 2.24: Stirling ελευθέρων εμβόλων για διαστημική χρήση (28. Walker G.)	65
Εικόνα 2.25: Τομή της υπάρχουσας διβάθμιας κρυογονικής μηχανής Stirling (26. Sato Y.)	67
Εικόνα 2.26: Γεωμετρική διαμόρφωση του κρυογονικού συστήματος SPICA (26. Sato Y.)	68
Εικόνα 2.27: Μεταβολή της ψυκτικής ικανότητας της κρυογονικής μηχανής λόγω του μολυσμένου εργαζόμενου μέσου (26. Sato Y.)	69
Εικόνα 2.28: Μηχανή Ελευθέρου Εμβόλου (28. Walker G.)	71
Εικόνα 2.29: Τομή της ψυκτικής μηχανής Stirling ελευθέρων εμβόλων (18. Global Cooling BV)	72

Εικόνα 2.30: Μηχανή χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com).....	74
Εικόνα 2.31: Κινητήρας Stirling χαμηλής θερμοκρασιακής διαφοράς της εταιρίας American Stirling Company που κινείται με τη θερμότητα της παλάμης (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com).....	74
Εικόνα 2.32: Σύστημα δίσκου/μηχανής Stirling (23. Moreno J.)	75
Εικόνα 3.1: Κρυογονική σύστημα ψύξης υπεραγωγίμης συσκευής (34. Ackermann).....	81
Εικόνα 3.2: Λεπτομερής ανάλυση του υπεραγωγίμου διπόλου, βασικού στοιχείου του επιταχυντή LHC, μαζί με το κρυογονικό σύστημα για την λειτουργία του σε εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία περίπου 1,9 K (41. Gazis E.).....	83
Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση της κρυογονικής διάταξης με σύστημα πρόψυξης (43. Hersey).....	84
Εικόνα 3.4: Κρυογονική συσκευή CRYOCOOL-G2b (20K) με μικροσκόπιο (36. Cryo Industries of America Inc.).....	86
Εικόνα 3.5: Κρυογονική κατάψυξη τροφίμων με υγρό άζωτο (56. Ιστοσελίδα: www.linde-gas.gr).....	88
Εικόνα 3.6: Τμήμα της κρυογονικής δεξαμενής του δορυφόρου Herschel (52. Ιστοσελίδα: www.airliquide.com).....	90
Εικόνα 3.7: Κρυογονικός διαχωρισμός CO ₂ (35. Anderson K.).....	91
Εικόνα 3.8: Κρυογονική αφυδάτωση με αναστολέα σχηματισμού υδριτών και ψύξη σε φρέαρ υψηλής πίεσης (32. Χριστοφορίδης Θ.).....	92
Εικόνα 3.9: Δεξαμενή αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου της εταιρίας Linde (55. Ιστοσελίδα: www.linde.com).....	93
Εικόνα 3.10: Τομή κρυογονικής δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου (55. Ιστοσελίδα: www.linde.com).....	94
Εικόνα 3.11: Δομικά στοιχεία κρυογονικών δεξαμενών διπλού κελύφους για την αποθήκευση υγροποιημένου Φ.Α. (32. Χριστοφορίδης Θ.)	96
Εικόνα 3.12: Εργαστηριακή διάταξη κρυογονικής κατεργασίας μετάλλων (37. Darwin) 97	
Εικόνα 3.13: Ενδεικτικός θερμικός κύκλος (37. Darwin).....	100
Εικόνα 3.14: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της κρυογονικής κατεργασίας (37. Darwin).....	101
Εικόνα 4.1: Ψυκτική συσκευή με κύκλο Linde (62. Perinić G.).....	103
Εικόνα 4.2: Συσκευή υγροποίησης Linde (1842-1934) (62. Perinić G.).....	104
Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου Linde (61. Papadopoulos M.).....	106
Εικόνα 4.4: Θερμοδυναμικός κύκλος Linde σε σχέση με τα επιμέρους τμήματα που τον αποτελούν (63. Refrigeration and Liquefaction).....	107

Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση επιμέρους συστημάτων ενός κύκλου Linde (63. Refrigeration and Liquefaction)	108
Εικόνα 4.6: Κύκλος Linde με σύστημα πρόψυξης (63. Refrigeration and Liquefaction)	110
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Ροής Κλιμακωτής Μεθόδου Statoil/Linde (55. Ιστοσελίδα: www.linde.com)	111
Εικόνα 4.8: Κύκλος Linde διπλής πίεσης (63. Refrigeration and Liquefaction)	112
Εικόνα 4.9: Διαδικασία Linde-Hampson (62. Perinić G.)	113
Εικόνα 4.10: Σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας Linde με περιγραφή των παροχών μάζας, των πιέσεων και των θερμοκρασιών (62. Perinić G.)	115
Εικόνα 4.11: Linde-υγραέριο-αναμορφωτής ατμού με CO μετατροπέα (58. Λάμπρου Ε.)	116
Εικόνα 4.12: Διαδικασία υγροποίησης αέριου υδρογόνου (58. Λάμπρου Ε.)	117
Εικόνα 4.13: Διεργασία υγροποίησης Claude (72. Ιστοσελίδα: http://catalysis.gr/thermodynamics/physicalprocesses/claudeprocesses-1.html)	119
Εικόνα 4.14: Σχηματική παράσταση διάταξης υγροποίησης αέρα με μερική αποτόνωση – Μέθοδος Claude (63. Refrigeration and Liquefaction)	120
Εικόνα 4.15: Κύκλος υγροποίησης αέρα με διάταξη μερικής αποτόνωσης (63. Refrigeration and Liquefaction)	121
Εικόνα 4.16: Τροποποιημένο σύστημα Claude με τον κύκλο Kapitza (68. Prasad S.) ...	123
Εικόνα 4.17: Εργοστάσιο Heylandt του 1928 (66. Jha R.)	124
Εικόνα 4.18: Κύκλος Heylandt (63. Refrigeration and Liquefaction)	124
Εικόνα 4.19: Απλός κύκλος Claude (69. Staats W.)	126
Εικόνα 4.20: Κύκλος Claude διπλής πίεσης (69. Staats W.)	127
Εικόνα 4.21: Διάγραμμα ροής εξέργειας για τους ψύκτες HERA (70. Wagner U.)	129

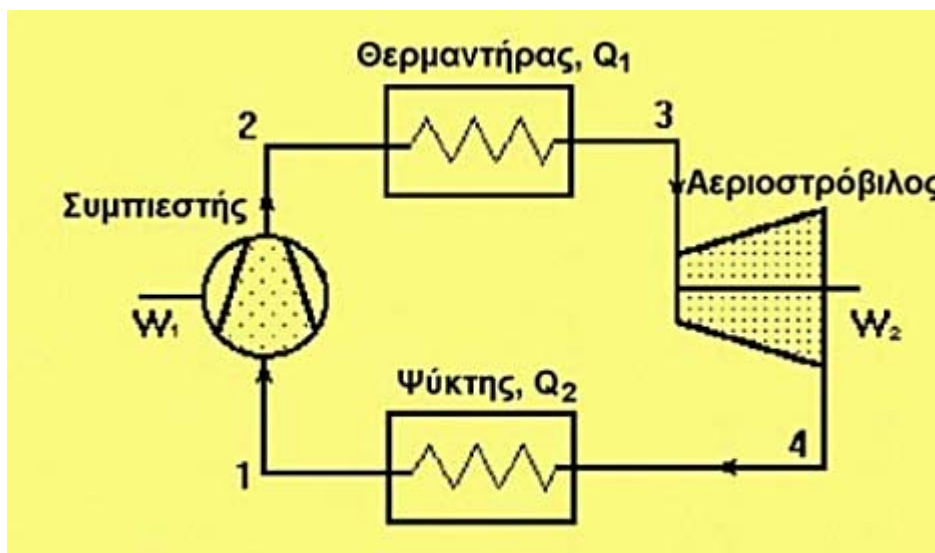
Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Παράμετροι για την εκτίμηση του ψυκτικού φορτίου (6. Forrest & Bhatti)	28
Πίνακας 1.2: Ιδιότητες ενθαλπίας και απόλυτης υγρασίας αέρα και νερού (6. Forrest & Bhatti).....	28
Πίνακας 2.1: Ειδικές σταθερές εργαζόμενων μέσων μηχανών Stirling (15. T.O.T.E.E. 2010).....	51
Πίνακας 3.1: Κανονικό σημείο βρασμού κρυογονικών αερίων.....	77
Πίνακας 4.1: Δυναμικότητα σχεδιασμού ψύκτη HERA (70. Wagner U.).....	129

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αντίστροφος κύκλος Brayton και Εφαρμογές του

1.1 Κλασικός κύκλος Brayton

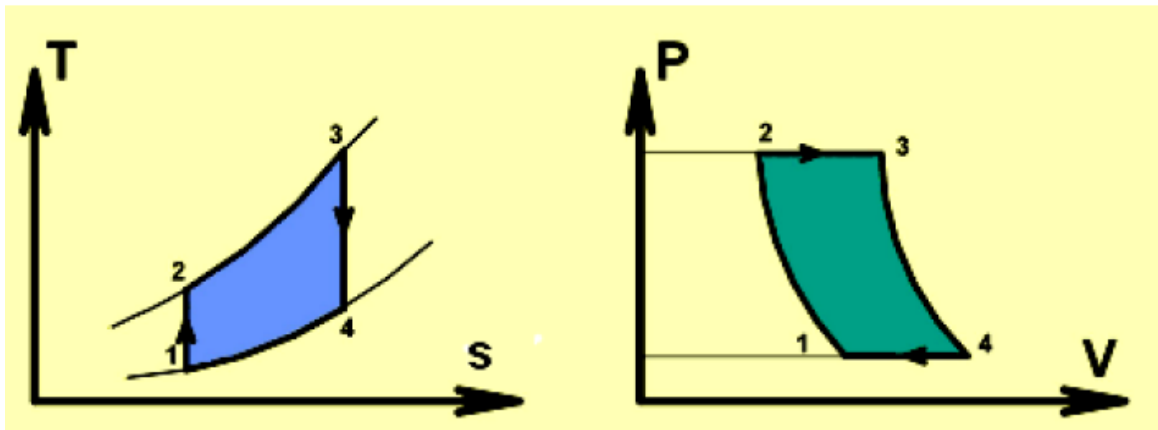
Ο θερμοδυναμικός κύκλος που σχετίζεται με την πλειοψηφία των συστημάτων αεριοστροβίλων είναι ο κύκλος Brayton, στον οποίο ο ατμοσφαιρικός αέρας, που είναι το εργαζόμενο μέσο, διέρχεται από τον στρόβιλο μόνο μία φορά. Οι θερμοδυναμικές διεργασίες του κύκλου Brayton περιλαμβάνουν τη συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, την εισαγωγή και ανάφλεξη του καυσίμου, και την εκτόνωση των θερμών καυσαερίων μέσω του στρόβιλου. Η αναπτυσσόμενη ισχύς χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή και της ηλεκτρογεννήτριας. Οι κύριες συνιστώσες ενός αεριοστροβίλου παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1 (1. ΚΑΠΕ).



Εικόνα 1.1: Μια μονάδα αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου (1. ΚΑΠΕ)

Τόσο η εισαγωγή όσο και η απόρριψη της θερμότητας στον κύκλο Brayton γίνεται υπό σταθερή πίεση, και για το λόγο αυτό ο κύκλος είναι επίσης γνωστός ως κύκλος σταθερής πίεσης. Ο κύκλος, του οποίου τα διαγράμματα T-s και P-V παρουσιάζονται παρακάτω στην Εικόνα 1.2, αποτελείται από τέσσερις διεργασίες (9. Cohen H.).

- 1 έως 2: Ισεντροπική συμπίεση
- 2 έως 3: Θέρμανση υπό σταθερή πίεση
- 3 έως 4: Ισεντροπική εκτόνωση
- 4 έως 1: Αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση



Εικόνα 1.2: Διαγράμματα T-s και P-V του κύκλου Brayton (1. ΚΑΠΕ)

Το εισαγόμενο έργο στον κύκλο (συμπιεστής) W_1 και το παραγόμενο έργο από τον κύκλο (στρόβιλος) W_2 είναι:

$$W_1 = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

και

$$W_2 = m \cdot (h_3 - h_4) \quad (1.2)$$

όπου m είναι η παροχή μάζας στον κύκλο. Η παρεχόμενη θερμότητα στον κύκλο Q_1 (θερμαντήρας) και η απορριπτόμενη θερμότητα Q_2 από τον κύκλο (ψυκτική μονάδα) είναι, αντίστοιχα:

$$Q_1 = m \cdot (h_3 - h_4) \quad (1.3)$$

και

$$Q_2 = m \cdot (h_4 - h_1) \quad (1.4)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου με ενεργειακό μέσο ένα τέλειο αέριο είναι:

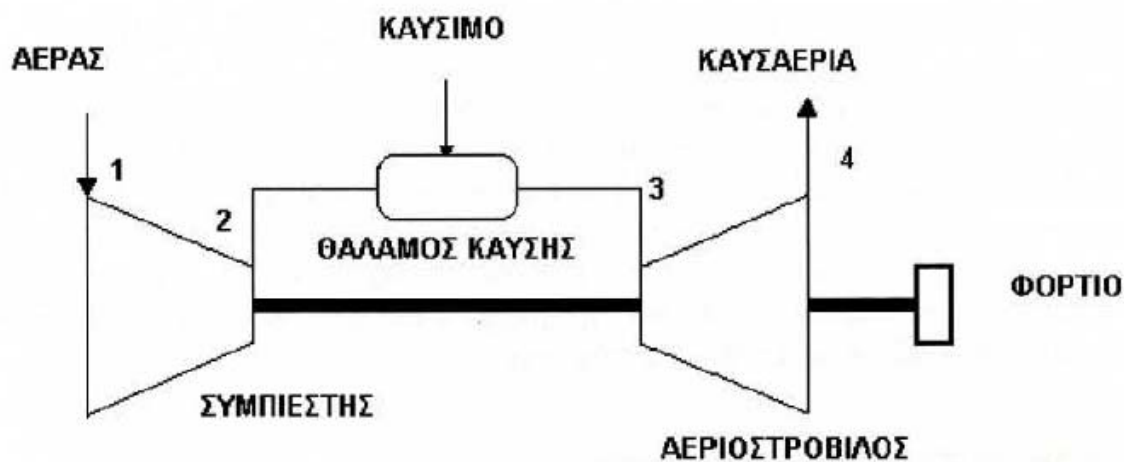
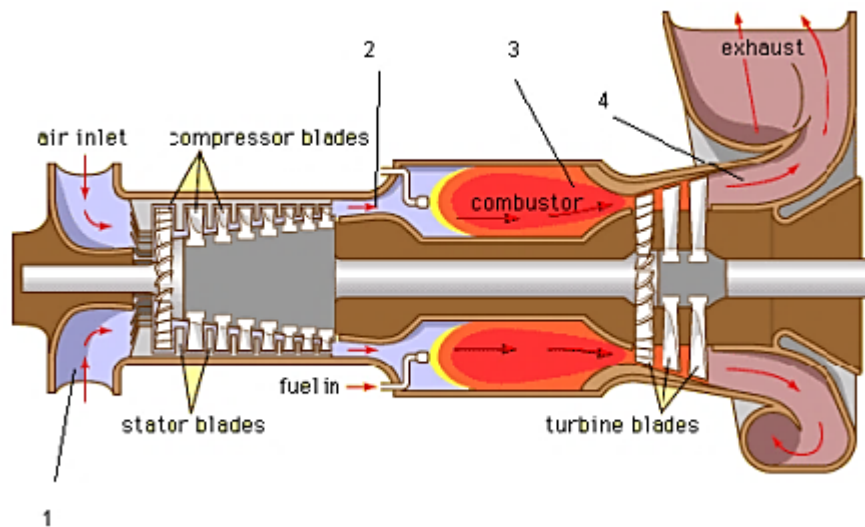
$$\eta = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2) \quad (1.5)$$

Αποδεικνύεται ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να αναχθεί στην εξής:

$$\eta = 1 - r^n \quad (1.6)$$

όπου $r = (P_2/P_1)$ είναι ο λόγος πίεσης και $n = -1 + (1/\gamma)$ μία σταθερά που εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα (2. Μαθιουδάκης Κ.).

1.2 Ανάλυση του κύκλου

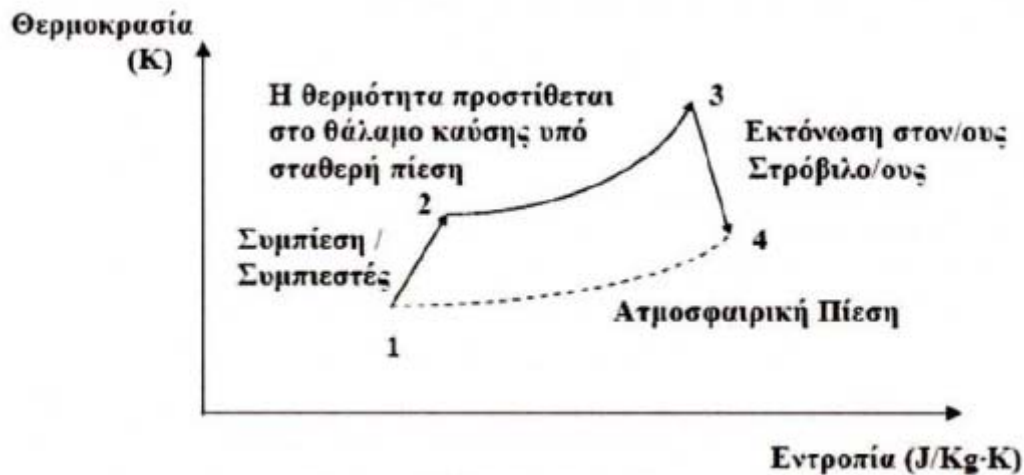


Εικόνα 1.3: Κύκλος Joule – Brayton (2. Μαθιουδάκης Κ.)

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στον απλό ιδεατό κύκλο Joule- Brayton (Εικόνα 1.3) είναι οι ακόλουθες: Ο αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος αναρροφάται στο συμπιεστή, όπου και συμπιέζεται (1-2), μετά οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται (2-3) και, τέλος, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στρόβιλο, όπου και εκτονώνονται μέχρι την τελική πίεση που είναι η ατμοσφαιρική (3-4). Η μεταβολή (4-1), που είναι ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας γίνεται μόνο στους αεριοστρόβιλους κλειστού κυκλώματος.

Η παραπάνω αρίθμηση μπορεί να γίνει θεωρώντας Ο την ατμόσφαιρα, 1 την είσοδο του αγωγού εισόδου, 2 την είσοδο του συμπιεστή και 3 την έξοδό του και παράλληλα είσοδο στον θάλαμο καύσης, 4 έξοδο από τον θάλαμο καύσης και είσοδο στον στρόβιλο και 5 έξοδο στρόβιλου, ενώ 6 έξοδο της μηχανής, οπότε ο κύκλος θα είναι 2-3 η συμπίεση, 3-4 η καύση και 4-5 η εκτόνωση. Στον απλό κύκλο θεωρείται ότι τόσο η συμπίεση όσο και η

εκτόνωση είναι ισεντροπικές και η καύση είναι ισόθλιπτη. Ωστόσο στην πραγματικότητα επειδή δεν υφίστανται μεταβολές χωρίς απώλειες η απόδοση ενός πραγματικού κύκλου είναι μικρότερη. Έτσι στον πραγματικό κύκλο έχουμε αδιαβατική συμπίεση, πρόσδοση θερμότητας σε, περίπου, σταθερή πίεση και αδιαβατική εκτόνωση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4 (2. Μαθιουδάκης Κ., 9. Cohen Η.).



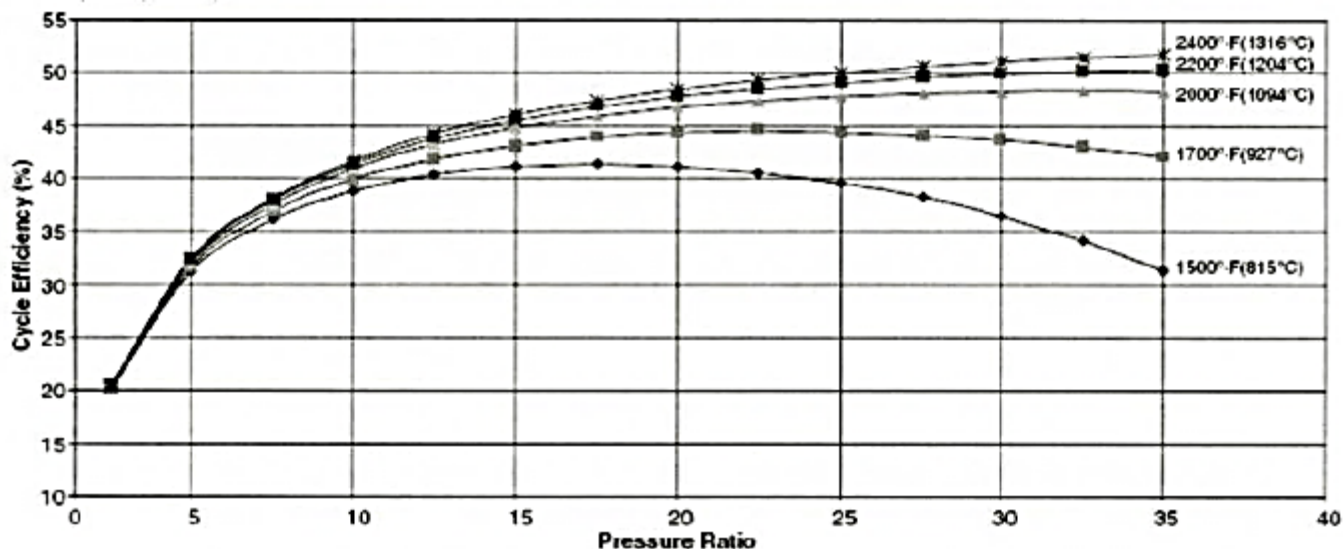
Εικόνα 1.4: Πραγματικός κύκλος σε T-s (2. Μαθιουδάκης Κ.)

1.3 Βαθμός απόδοσης απλού κύκλου Brayton

Ο βαθμός απόδοσης του απλού κύκλου εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, που αυτή είναι η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυτή, τόσο αυξάνεται και η απόδοση και η συγκέντρωση ισχύος. Ωστόσο υπάρχει περιορισμός που τίθεται από τα υλικά του στρόβιλου λόγω αντοχής στις συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά την σχέση λόγου πίεσης και βαθμού απόδοσης, υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος πίεσης που εξαρτάται από τις θερμοκρασίες εισόδου συμπίεστή και στρόβιλου και το βαθμό απόδοσής τους.

Περαιτέρω αύξηση του λόγου πίεσης οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης, εάν δεν χρησιμοποιηθεί ενδιάμεση ψύξη στο συμπίεστή. Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου οδηγεί σε μετατόπιση αυτού του βέλτιστου σημείου σε μεγαλύτερους λόγους πίεσης.

Μεγάλοι λόγοι πίεσης όμως καθιστούν το συμπίεστή ευαίσθητο σε μεταβολές φορτίου, περιορίζοντας την περιοχή λειτουργίας του με καλή απόδοση, ενώ ενδέχεται να προκληθούν φαινόμενα πάλμωσης (surge) που μπορεί να καταστρέψουν τον συμπίεστή. Τυπικοί βαθμοί απόδοσης σύγχρονων αεριοστρόβιλων είναι από 28-40%+ (οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης συναντώνται σε παράγωγους αεροπορικών) (9. Cohen Η.).

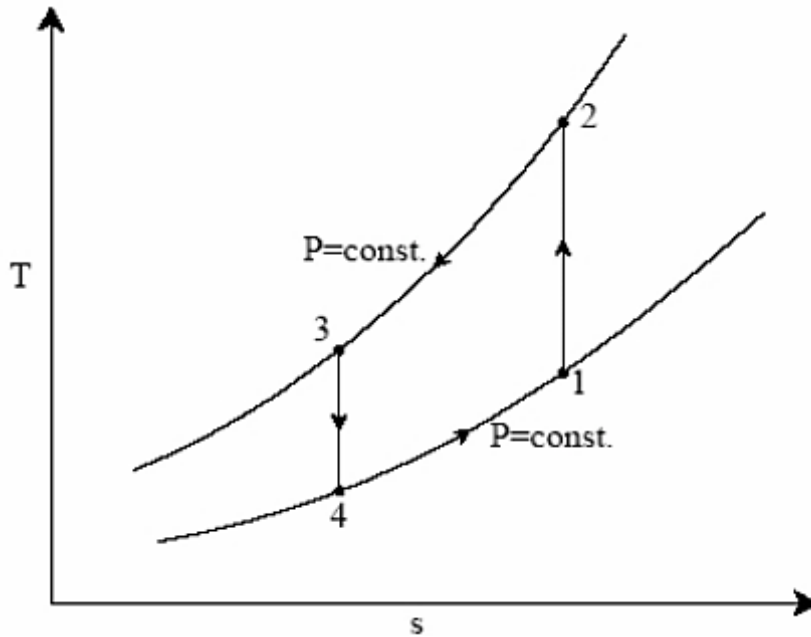


Εικόνα 1.5: Επίδραση θερμοκρασίας καύσης και λόγου πίεσης στην απόδοση (9. Cohen H.)

1.4 Εισαγωγή στον αντίστροφο κύκλο Brayton

Είναι ένας σημαντικός κύκλος που χρησιμοποιείται σε συστήματα ψυκτικών κύκλων αερίων. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια τροποποίηση του αντίστροφου κύκλου Carnot, καθώς οι δύο ισόθερμες διεργασίες του κύκλου Carnot αντικαθίστανται από δύο ισοβαρείς διεργασίες μεταφοράς θερμότητας. Ο κύκλος αυτός ονομάζεται επίσης κύκλος Joule ή Bell-Coleman. Η Εικόνα 1.6 δείχνει σχηματικά ένα κλειστό αντίστροφο κύκλο Brayton σε διάγραμμα T-s. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, ο ιδανικός κύκλος αποτελείται από τις ακόλουθες τέσσερις μεταβολές:

- Μεταβολή 1-2: Αντιστρεπτή, αδιαβατική συμπίεση σε ένα συμπίεστή
- Μεταβολή 2-3: Αντιστρεπτή, ισοβαρής απόρριψη θερμότητας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας
- Μεταβολή 3-4: Αντιστρεπτή, αδιαβατική εκτόνωση σε ένα στρόβιλο
- Μεταβολή 4-1: Αντιστρεπτή, ισοβαρής απορρόφηση θερμότητας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας



Εικόνα 1.6: Αντίστροφος κύκλος Brayton σε διάγραμμα T-s (12. Kharagpur IIT)

Μεταβολή 1-2: Το αέριο χαμηλής πίεσης συμπιέζεται ισεντροπικά από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2. Εφαρμόζοντας την μόνιμη εξίσωση μεταφοράς ενέργειας και αμελώντας τις μεταβολές στην κινητική και τη δυναμική ενέργεια, έχουμε (Shet U.S.P Ideal Reverse Brayton Cycle)

$$\begin{aligned}
 W_{1-2} &= \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) \\
 s_2 &= s_1 \\
 \text{και } T_2 &= T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_1 r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.7) \\
 \text{όπου } r_p &= (P_2 / P_1) = \text{λόγος πίεσης}
 \end{aligned}$$

Μεταβολή 2-3: Το αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ρέει μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και αποβάλλει αισθητή θερμότητα με ισοβαρή τρόπο σε μια καταβόθρα θερμότητας. Η ενθαλπία και η θερμοκρασία του αερίου μειώνονται κατά τη διάρκεια της μεταβολής λόγω της ανταλλαγής θερμότητας, δε λαμβάνει χώρα ανταλλαγή έργου και η εντροπία του αερίου μειώνεται. Εφαρμόζοντας ξανά την μόνιμη εξίσωση μεταφοράς ενέργειας και τη δεύτερη εξίσωση $T ds$ έχουμε:

$$\begin{aligned}
Q_{2-3} &= \dot{m}c_p(T_2 - T_3) = \dot{m}c_p(T_2 - T_3) \\
s_2 - s_3 &= c_p \ln \frac{T_2}{T_3} \\
P_2 &= P_3
\end{aligned} \tag{1.8}$$

Μεταβολή 3-4: Το αέριο υψηλής πίεσης που εξέρχεται από τον εναλλάκτη εισέρχεται στο στρόβιλο, υφίσταται ισεντροπική εκτόνωση και παράγει το καθαρό έργο εξόδου. Η θερμοκρασία του αερίου πέφτει κατά τη διάρκεια της μεταβολής από την T_3 στην T_4 . Από την μόνιμη εξίσωση μεταφοράς ενέργειας έχουμε:

$$\begin{aligned}
W_{3-4} &= \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m}c_p(T_3 - T_4) \\
s_3 &= s_4 \\
\text{και } T_3 &= T_4 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_4 r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Μεταβολή 4-1: Το αέριο χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης από το στρόβιλο εισέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας και απορροφά αισθητή θερμότητα και με ισοβαρή τρόπο από μια πηγή θερμότητας, παρέχοντας το επιθυμητό φαινόμενο ψύξης. Η ενθαλπία και η πίεση του αερίου αυξάνονται κατά τη διάρκεια της εναλλαγής θερμότητας, δε λαμβάνει χώρα μεταφορά έργου και η εντροπία του αερίου αυξάνεται. Εφαρμόζοντας ξανά την μόνιμη εξίσωση μεταφοράς ενέργειας:

$$\begin{aligned}
Q_{4-1} &= \dot{m}(h_1 - h_4) = \dot{m}c_p(T_1 - T_4) \\
s_4 - s_1 &= c_p \ln \frac{T_4}{T_1} \\
P_4 &= P_1
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις είναι εμφανές ότι :

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right) = \left(\frac{T_3}{T_4} \right) \tag{1.11}$$

Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο σε ολόκληρο τον κύκλο:

$$\int \delta q = (q_{4-1} - q_{2-3}) = \int \delta w = (w_{3-4} - w_{1-2}) = -w_{net} \tag{1.12}$$

Βαθμός απόδοσης αντίστροφου Brayton

Ο COP του αντίστροφου κύκλου Brayton δίνεται από τη σχέση (12. Kharagpur ΙΙΤ):

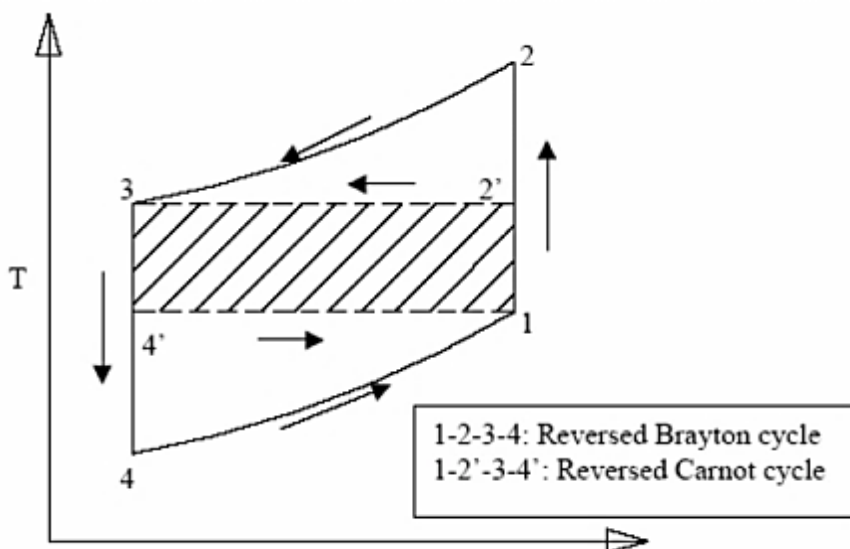
$$COP = \frac{|q_{4-1}|}{w_{net}} = \left(\frac{(T_1 - T_4)}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)} \right) \quad (1.13)$$

χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών και πιέσεων, ο COP μπορεί να γραφεί επίσης ως:

$$COP = \left(\frac{(T_1 - T_4)}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)} \right) = \left(\frac{T_4}{T_3 - T_4} \right) = \left(\frac{(T_1 - T_4)}{(T_1 - T_4) \left(r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)} \right) = \left(r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)^{-1} \quad (1.14)$$

Από την παραπάνω έκφραση για τον COP, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις (12. Kharagpur ΙΙΤ):

α) Για δεδομένη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας (T_3) και δεδομένη θερμοκρασία ψύξης (T_1), ο COP του αντίστροφου κύκλου Brayton είναι πάντα χαμηλότερος από τον COP του αντίστροφου κύκλου Carnot.



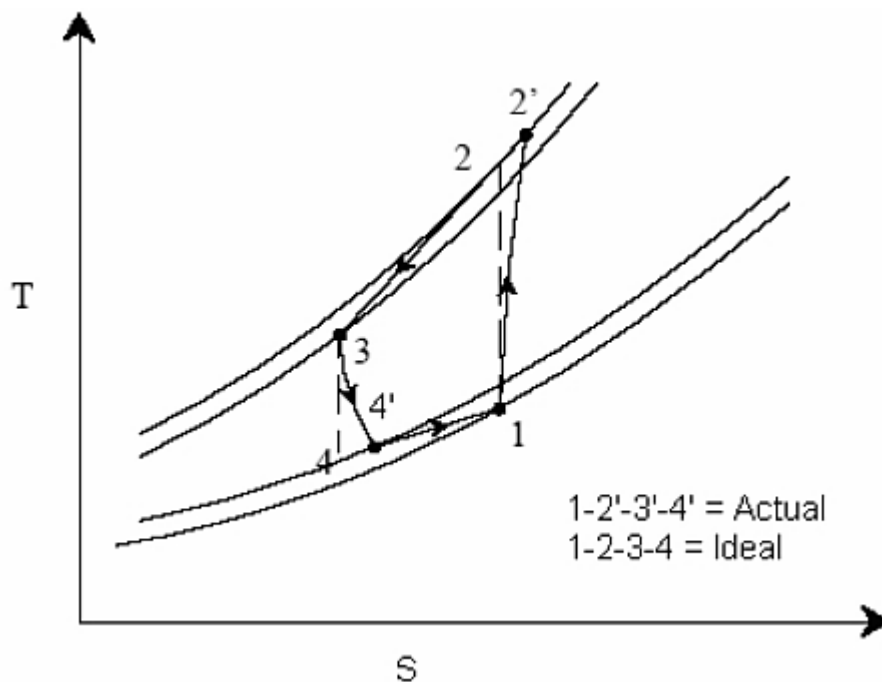
Εικόνα 1.7: Σύγκριση μεταξύ του αντίστροφου κύκλου Carnot και του αντίστροφου κύκλου Brayton σε διάγραμμα T-s (12. Kharagpur ΙΙΤ)

β) Ο COP του κύκλου Brayton προσεγγίζει τον COP του Carnot καθώς η T_1 προσεγγίζει την T_4 , όμως το ειδικό έργο ψύξης μειώνεται ταυτόχρονα.

γ) Ο COP του κύκλου Brayton μειώνεται καθώς ο λόγος πίεσης αυξάνεται.

1.4.1 Πραγματικός αντίστροφος κύκλος Brayton

Ο πραγματικός αντίστροφος κύκλος Brayton διαφέρει από τον ιδανικό λόγω της μη ισεντροπικής συμπίεσης και εκτόνωσης και λόγω της πτώσης πίεσης στον ψυχρό και τον θερμό εναλλάκτη θερμότητας.



Εικόνα 1.8: Η συμπίεση σε ιδανικό και πραγματικό κύκλο Brayton σε διάγραμμα T-s (13. Shet U.S.P.)

Η Εικόνα 1.8 δείχνει τον ιδανικό και τον πραγματικό κύκλο Brayton σε διάγραμμα T-s. Λόγω της μη αντιστρεψιμότητας, το έργο συμπίεσης αυξάνεται και το έργο της εκτόνωσης μειώνεται. Τότε, το πραγματικό έργο συμπίεσης και εκτόνωσης δίνεται από τις σχέσεις:

$$W_{1-2,act} = \frac{W_{1-2,is}}{\eta_{c,is}} \quad (1.15)$$

$$W_{3-4,act} = \eta_{t,is} W_{3-4,is}$$

όπου, $\eta_{c,is}$ και $\eta_{t,is}$ είναι οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου. Η παραγόμενη ψύξη επίσης μειώνεται λόγω της μη αντιστρεψιμότητας. Ως αποτέλεσμα, ο COP του πραγματικού αντίστροφου κύκλου Brayton είναι σημαντικά

μικρότερος σε σύγκριση με του ιδανικού. Ο σχεδιασμός αποδοτικών συμπιεστών και στροβίλων παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση του COP του συστήματος.

Στην πράξη, ο αντίστροφος κύκλος Brayton μπορεί να είναι ανοικτός ή κλειστός. Στα ανοικτά συστήματα, ο ψυχρός αέρας στην έξοδο του στροβίλου εισέρχεται σε ένα χώρο ή καμπίνα (ψυχρός χώρος) και ο αέρας για το συμπιεστή προέρχεται από τον ψυχρό αυτό χώρο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πλευρά της χαμηλής πίεσης είναι ατμοσφαιρική. Στα κλειστά συστήματα, είναι πιθανό στην πλευρά χαμηλής πίεσης, η πίεση να είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως *συστήματα υπερπληρωμένου αέρα*. Τα συστήματα αυτά έχουν το πλεονέκτημα της μείωσης του διαχειριζόμενου αέρα από τον συμπιεστή και το στρόβιλο σε υψηλή πίεση. Ο βαθμός απόδοσης είναι επίσης υψηλός λόγω των μικρότερων λόγων πίεσης. Στα κλειστά συστήματα είναι επίσης εφικτή η χρήση άλλων αερίων πέρα από τον αέρα (π.χ. ήλιο). (13. Shet U.S.P.)

1.4.2 Σταθμισμένη θερμοκρασία ξηρού αέρα (Dry Air Rated Temperature -DART)

Η έννοια της σταθμισμένης θερμοκρασία ξηρού αέρα χρησιμοποιείται για να συγκρίνει διαφορετικού κύκλους ψύξης αεροσκαφών. Η σταθμισμένη θερμοκρασία ξηρού αέρα ορίζεται ως η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του στροβίλου ψύξης, απουσία υγρασίας συμπίκνωσης. Για να μην εμφανιστεί συμπίκνωση κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης στο στρόβιλο, η θερμοκρασία σημείου δρόσου και κατά συνέχεια το περιεχόμενο υγρασίας του αέρα πρέπει να είναι πολύ χαμηλά, δηλ. ο αέρας πρέπει να είναι πολύ ξηρός. Τα συστήματα ψύξης αεροσκάφους σταθμίζονται με βάση της παροχή μάζας αέρα στο σχεδιασμό DART. Η ικανότητα ψύξης δίνεται τότε από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_i - T_{DART}) \quad (1.16)$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή μάζας αέρα, T_{DART} και T_i είναι η σταθμισμένη θερμοκρασία ξηρού αέρα και η θερμοκρασία της καμπίνας, αντίστοιχα (7. Gomes Jeff).

Μια σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων ψύξης αεροσκαφών βάσει του DART σε διαφορετικά αριθμούς Mach δείχνει ότι:

- ❖ Το DART αυξάνεται μονότονα με τον αριθμό Mach για όλα τα συστήματα, εκτός από το σύστημα μειωμένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος
- ❖ Το απλό σύστημα επαρκεί για χαμηλούς αριθμούς Mach
- ❖ Σε μεγάλους αριθμούς Mach μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε συστήματα εκκίνησης είτε αναγεννητικά συστήματα

- ❖ Τα συστήματα μειωμένης θερμοκρασία περιβάλλοντος ταιριάζουν καλύτερα σε πολύ μεγάλους αριθμούς Mach και σε υπερηχητικά αεροσκάφη. (7. Gomes Jeff).

Εφαρμογές του αντίστροφου κύκλου Brayton

1.5 Συστήματα ψύξης αεροσκάφους

Σε ένα αεροσκάφος απαιτούνται συστήματα ψύξης για να διατηρήσουν τη θερμοκρασία της καμπίνας σε επίπεδα άνεσης. Παρόλο που οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι πολύ χαμηλές σε μεγάλα υψόμετρα, απαιτείται η ψύξη της καμπίνας για τους ακόλουθους λόγους (8. Guzik Monica):

- ❖ Μεγάλη παραγωγή θερμότητας λόγω των επιβατών, του εξοπλισμού κλπ.
- ❖ Παραγωγή θερμότητας λόγω της επιδερμικής τριβής, η οποία προκαλείται από την ταχεία κίνηση του αεροσκάφους
- ❖ Σε μεγάλα υψόμετρα, η εξωτερική πίεση είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Όταν ο αέρας αυτής της χαμηλής πίεσης συμπιέζεται και παρέχεται στην καμπίνα σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά. Για παράδειγμα, όταν εξωτερικός αέρας πίεσης 0,2 bar και θερμοκρασίας 223K (σε υψόμετρο 10000m) συμπιέζεται στο 1 bar, η θερμοκρασία του αυξάνεται περίπου στους 353K. Αν η καμπίνα διατηρείται στα 0.8 bar, η θερμοκρασία θα είναι περίπου στους 332K. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επίδραση δυναμικής πίεσης. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμότητας που εισέρχεται στην καμπίνα, η οποία πρέπει να απομακρυνθεί μέσω ενός συστήματος ψύξης.
- ❖ Ηλιακή ακτινοβολία

Στα αεροσκάφη χαμηλής ταχύτητας που πετούν σε χαμηλό υψόμετρο, μπορεί να μην απαιτείται σύστημα ψύξης.

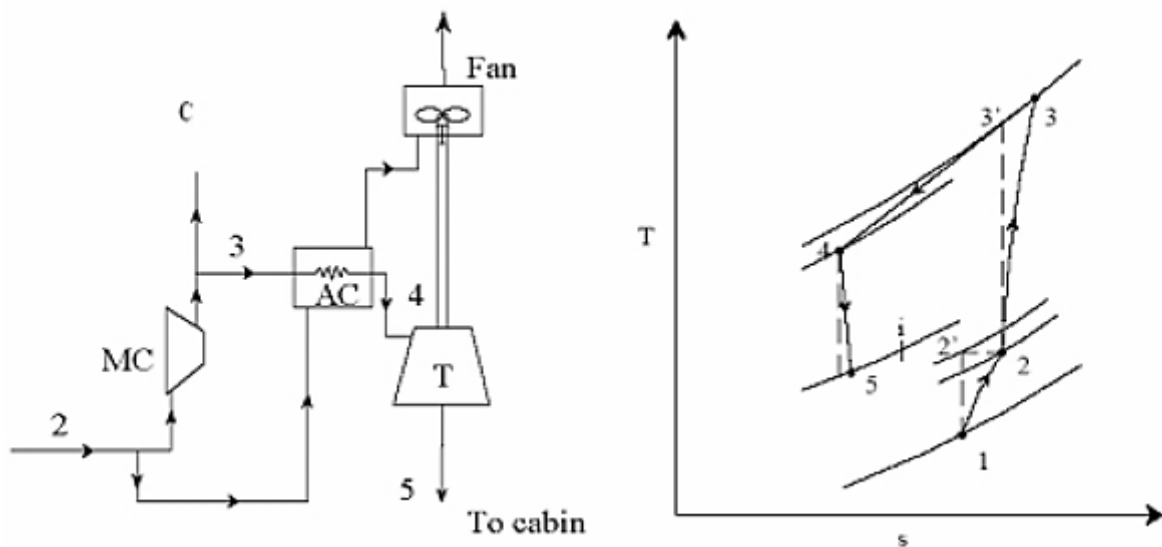
Παρόλο που ο COP ενός ψυκτικού κύκλου αέρα είναι πολύ χαμηλός σε σχέση με τα συστήματα ψύξης συμπίεσης ατμού, είναι καταλληλότερος για συστήματα ψύξης αεροσκαφών για τους ακόλουθους λόγους:

Ο αέρας είναι φτηνός, ασφαλής και μη τοξικός. Η διαρροή αέρα επίσης δεν αποτελεί πρόβλημα.

Ο ψυχρός αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για ψύξη, και άρα μπορεί να αποφευχθεί η χρήση εναλλάκτη χαμηλής θερμοκρασίας (χρήση ανοικτού συστήματος) με αντίστοιχη μείωση του βάρους

Η μηχανή του αεροσκάφους αποτελείται από στροβιλοσυμπιεστή υψηλής ταχύτητας, και κατά συνέπεια δεν απαιτείται ξεχωριστός συμπιεστής για το σύστημα ψύξης. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά το βάρος ανά kW ψύξης.

Ο σχεδιασμός του συνολικού συστήματος είναι πολύ πιο απλός λόγω των χαμηλών πιέσεων. Επίσης η συντήρηση είναι ευκολότερη.



Εικόνα 1.9: Σχηματική απεικόνιση ενός απλού κύκλου ψύξης αεροσκάφους (8. Guzik Monica)

Η Εικόνα 1.9 δείχνει τη σχηματική αναπαράσταση ενός απλού κύκλου ψύξης αεροσκάφους και τον κύκλο λειτουργίας σε διάγραμμα T-s. Πρόκειται για ανοικτό σύστημα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα T-s, ο εξωτερικός αέρας χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας (κατάσταση 1) συμπιέζεται λόγω της επίδρασης της δυναμικής πίεσης ως τη δυναμική πίεση (κατάσταση 2). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, η θερμοκρασία αυξάνεται από το 1 στο 2. Ο αέρας συμπιέζεται στον κύριο συμπιεστή ως την κατάσταση 3 και ψύχεται στην κατάσταση 4 στον ψύκτη αέρα. Η πίεση μειώνεται ως την πίεση της καμπίνας στο στρόβιλο (κατάσταση 5), ως αποτέλεσμα της πτώσης της θερμοκρασίας από το 4 στο 5. Ο ψυχρός αέρας κατάστασης 5 παρέχεται στην καμπίνα. Συλλέγει θερμότητα καθώς ρέει εντός της καμπίνας παρέχοντας την απαιτούμενη ψύξη. Η ισχύς εξόδου του στροβίλου χρησιμοποιείται για να κινήσει έναν ανεμιστήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την απαιτούμενη παροχή αέρα στον ψύκτη αέρα. Ο απλό σύστημα είναι καλό για ψύξη εδάφους (δηλαδή όταν το αεροσκάφος δεν κινείται) καθώς ο ανεμιστήρας μπορεί να συνεχίσει να διατηρεί την παροχή αέρα στον ψύκτη.

Εφαρμόζοντας τη μόνιμη εξίσωση ροής ενέργειας στη διαδικασία εισώθησης (ramming process), η θερμοκρασιακή ανύψωση στο τέλος του φαινομένου εισώθησης είναι :

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (1.17)$$

όπου M είναι ο αριθμός Mach, ο οποίος είναι ο λόγος της ταχύτητας του αεροσκάφους (C) προς την ταχύτητα του ήχου a ($a = \sqrt{\gamma RT_1}$), δηλ.

$$M = \frac{C}{a} = \frac{C}{\sqrt{\gamma RT_1}} \quad (1.18)$$

Λόγω μη αναστρεψιμότητας, η πραγματική πίεση στο τέλος της εισώθησης είναι μικρότερη σε σύγκριση με την πίεση που προκύπτει από την ισεντροπική συμπίεση. Ο λόγος της πραγματικής αύξησης πίεσης προς την ισεντροπική αύξηση πίεσης ονομάζεται βαθμός απόδοσης εισώθησης (ram efficiency) η_{Ram} , όπου:

$$\eta_{Ram} = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_2' - P_1)} \quad (1.19)$$

Η ικανότητα ψύξης του απλού κύκλου ψύξης αεροσκάφους Q δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_i - T_s) \quad (1.20)$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή μάζας αέρα στο στρόβιλο (8. Guzik Monica, 12. Kharagpur IIT).

1.6 Παραδείγματα εφαρμογών

1.6.1. Σύστημα κλιματισμού αυτοκινήτων

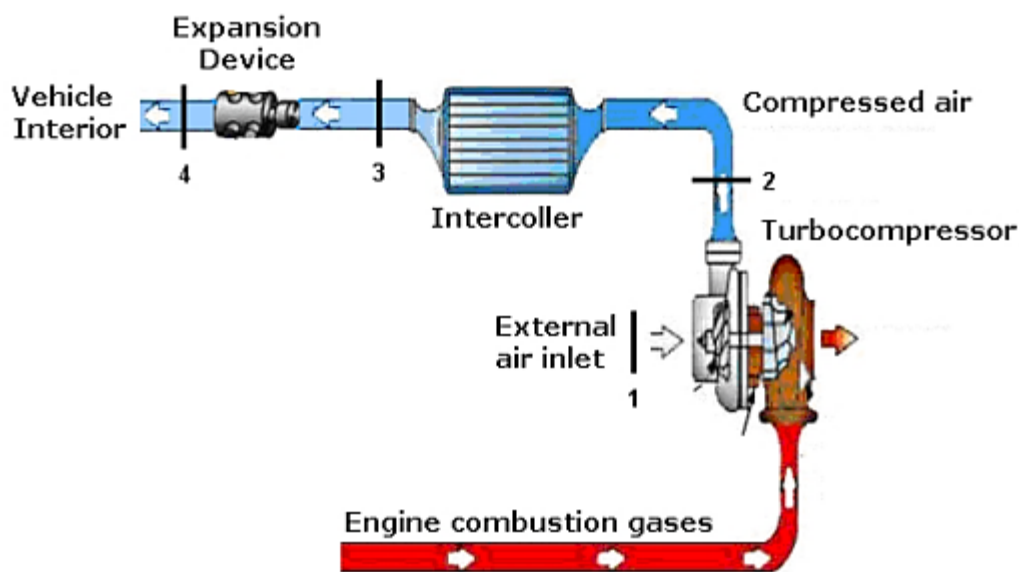
Τα συστήματα κλιματισμού αυτοκινήτων που χρησιμοποιούνται βασίζονται στον κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού και η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται στο συμπιεστή μέσω μαγνητικού συμπλέκτη. Η παροχή ισχύος στο συμπιεστή με τον τρόπο αυτό, έχει σημαντική επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου της μηχανής και τη μεταφορά ισχύος στα ελαστικά, κυρίως για αυτοκίνητα οικονομικής κλάσης. Σύμφωνα με τους Kaynakli & Hoguz (2003) [11], ένα τυπικό αυτόματο σύστημα κλιματισμού απαιτεί ισχύ συμπίεσης περίπου 1,6-1,7 kW από τη μηχανή.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης. Λόγω της αστάθειας στην αγορά πετρελαίου και της μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αύξησης της τιμής του, καθώς και της περιβαλλοντικής ανησυχίας για την υπερθέρμανση, υπάρχει μια προσπάθεια βελτιστοποίησης των περιφερειακών συστημάτων των αυτοκινήτων, όπως το σύστημα κλιματισμού, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια οι εκπομπές ρύπων. Μια άλλη σημαντική περιβαλλοντική παράμετρος που αφορά τα συστήματα κλιματισμού είναι η μείωση των αλογονωμένων ψυκτικών, μέσω

της ανάπτυξης συστημάτων που δε χρησιμοποιούν τέτοιου είδους συστατικά. Η χρήση του αντίστροφου κύκλου Brayton για κλιματισμό αυτοκινήτων είναι σημαντική από περιβαλλοντικής πλευράς, καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας, και όχι κάποιο αλογονωμένο ψυκτικό που συμβάλλει στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης. Ο συγκεκριμένος κύκλος όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιείται ήδη σε αεροσκάφη.

Συγκεκριμένα λοιπόν παρουσιάζεται η λειτουργία ενός συστήματος κλιματισμού με βάση τον κύκλο Brayton, το οποίο κατασκευάστηκε με μια διάταξη στροβιλοσυμπιεστή με ενδιάμεση ψύξη, διαθέσιμη στην αγορά. Ύστερα από θερμοδυναμική ανάλυση, βρέθηκε ότι το προτεινόμενο σύστημα στροβιλοσυμπιεστή απαιτεί 1,7 kW από τη μηχανή, ισχύς η οποία είναι παρόμοια με την απαίτηση ενός συμβατικού συστήματος κλιματισμού. Όσον αφορά το βάρος, βρέθηκε ότι το σύστημα αυτό είναι περίπου 1 kg βαρύτερο ως προς το συμβατικό σύστημα. Το κόστος είναι κατά 56% μεγαλύτερο σε σχέση με το συμβατικό, όμως και τα απαιτούμενα έξοδα συντήρησης είναι κατά 24% λιγότερα.

Η διαμόρφωση της διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.10. Το σύστημα βελτιστοποιεί επίσης την κατανάλωση καυσίμου, καθώς η ενέργεια των καυσαερίων ανακτάται και παρέχεται στο σύστημα κλιματισμού (4. Beatrice L.).



Εικόνα 1.10: Σύστημα κλιματισμού αυτοκινήτου με στροβιλοσυμπιεστή (4. Beatrice L. 2009)

Προκειμένου να υπολογιστεί το ψυκτικό φορτίο του συστήματος κλιματισμού, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές των παραμέτρων.

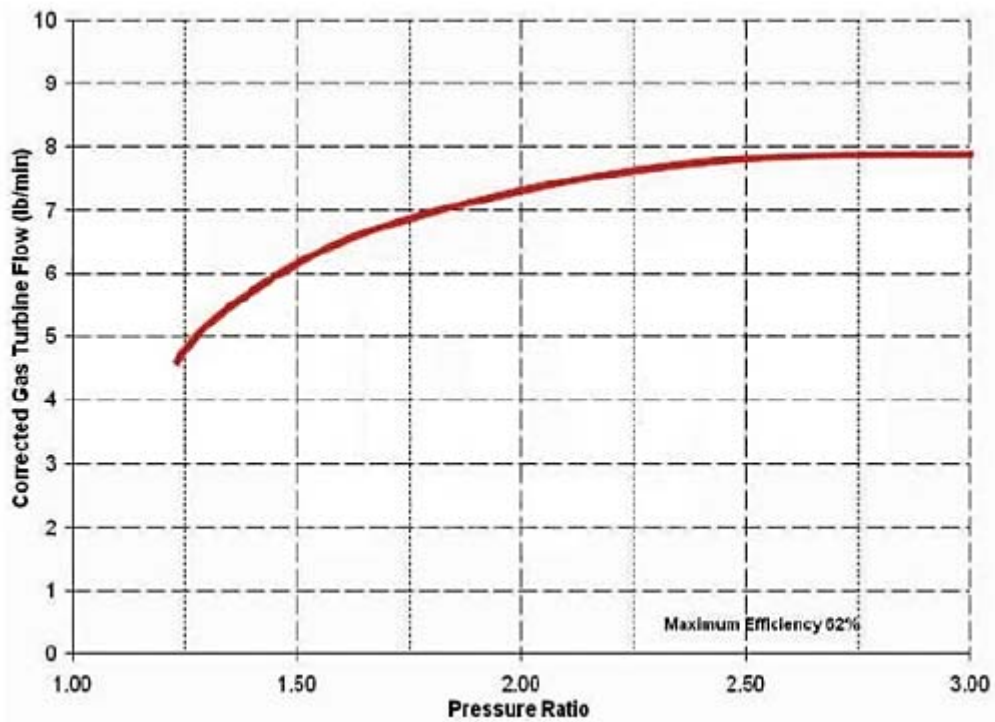
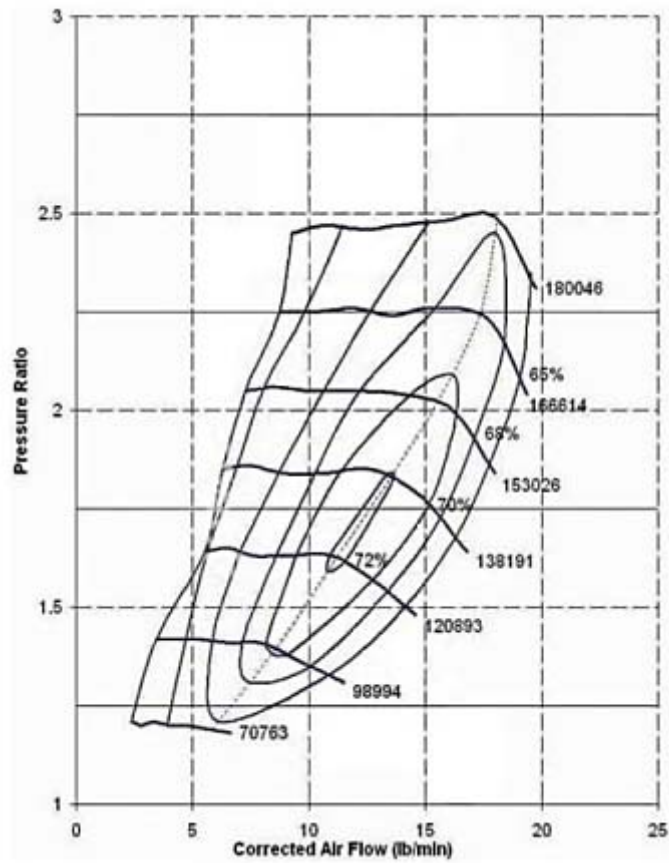
Πίνακας 1.1: Παράμετροι για την εκτίμηση του ψυκτικού φορτίου (6. Forrest & Bhatti)

Parameter	Value
T_0	38°C
ϕ_0	40%
p_0	101,325 kPa
T_E	10°C
ϕ_E	100%
\dot{m}_a	0,1285 kg/s

Πίνακας 1.2: Ιδιότητες ενθαλπίας και απόλυτης υγρασίας αέρα και νερού (6. Forrest & Bhatti)

Property	Value
h_E	81,0 kJ/kg
h_0	29,0 kJ/kg
ω_E	0,0078 kg _{vapor} /kg _{dry air}
ω_0	0,0168 kg _{vapor} /kg _{dry air}
h_w	42,0 kJ/kg

Με βάση τις τιμές αυτές το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο υπολογίστηκε ίσο με 5,68kW =1,6 TR (6. Forrest & Bhatti).



Εικόνα 1.11: Χάρτες στροβίλοσυμπιεστή του μοντέλου που επιλέχθηκε (4. Beatrice L.)

Θεωρώντας ταχύτητα συμπιεστή 100000 rpm και την επιθυμητή παροχή αέρα, το σύστημα στροβίλοσυμπιεστή λειτουργεί με λόγο πίεσης 1,25 και ισεντροπικό βαθμό

απόδοσης 68%. Με βάση τις τιμές αυτές και θεωρώντας τον αέρα ιδανικό αέριο με σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα, υπολογίστηκε η ιδανική θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή (θεωρώντας ισεντροπική μεταβολή) ίση με 47,6 °C.

Από τις συνθήκες στο εσωτερικό του οχήματος και λαμβάνοντας υπόψη την χειρότερη περίπτωση της αμελητέας ταχύτητας αέρα, είναι εφικτός ο υπολογισμός της πίεσης στο εσωτερικό του οχήματος, η οποία είναι ίση με 1018 kPa. Με βάση τις συνθήκες στο εσωτερικό του οχήματος και θεωρώντας ισεντροπική εκτόνωση στη βαλβίδα εκτόνωσης, η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο της βαλβίδας εκτόνωσης είναι 14,7 °C. Με βάση αυτά υπολογίζεται η ψύξη από τον ενδιάμεσο ψύκτη ίση με 4,24 kW.

Με βάση την απαιτούμενη ψύξη και τα διαθέσιμα μοντέλα της αγοράς, επιλέχθηκε ένας ψύκτης αέρα-αέρα μετωπικής επιφάνειας 2 m² με βοηθητικό σύστημα εξατμιστικής ψύξης (Beatrice L. 2009).

1.6.1.1. Επίδραση του συστήματος στην απόδοση της μηχανής

Με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή, ο στροβιλοσυμπιεστής αυξάνει την πίεση εξόδου της μηχανής κατά 3,5% στο χειρότερο σενάριο, αλλά η επίδραση στην απόδοση της μηχανής είναι ελάχιστη. Για ένα τυπικό αμάξι μικρού κυβισμού με ισχύ κινητήρα 51 kW, ο στροβιλοσυμπιεστής απαιτεί 1,7 kW, παρόμοια κατανάλωση και με το συμπιεστή του συμβατικού συστήματος κλιματισμού.

Άλλος παράγοντας που ελέγχεται είναι το βάρος του συστήματος. Το βάρος του προτεινόμενου συστήματος είναι περίπου 11,5 kg, ενώ τα συμβατικά συστήματα ζυγίζουν περίπου 10,5 kg.

Με βάση τις παραμέτρους αυτές, προκύπτει ότι το προτεινόμενο σύστημα οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση λόγω του μεγαλύτερου βάρους. Παρόλα αυτά, λόγω του ότι η διαφορά στο βάρος είναι μικρή, μια βελτιστοποίηση του συστήματος ίσως να εξάλειψε αυτή την αύξηση της κατανάλωσης (4. Beatrice L.).

1.6.1.2. Περιβαλλοντική επίδραση

Ένα από τα αλογονωμένα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα κλιματισμού αυτοκινήτων είναι το HFC-134a. Σύμφωνα με έρευνα της ένωσης κατασκευαστών αυτοκινήτων της Βραζιλίας, περίπου 90 τόνοι HFC-134a απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα λόγω διαρροών και συντήρησης κάθε χρόνο. Η απουσία τέτοιου είδους ψυκτικού είναι και το βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος. (11. Kaynakli Ö.)

1.6.1.3 Σύγκριση κόστους

Η σύγκριση έγινε λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό κόστος και τα πάγια έξοδα συντήρησης. Το αρχικό κόστος υπολογίστηκε με βάση το κόστος των συνιστωσών του οχήματος και τα έξοδα συντήρησης υπολογίστηκαν με ορίζοντα τριετίας, η οποία είναι η τυπική περίοδος εγγύησης ενός οχήματος.

Προέκυψε ότι το εναλλακτικό σύστημα είναι περίπου 56% πιο ακριβό από το συμβατικό, αλλά παρουσιάζει κατά 24% χαμηλότερα έξοδα συντήρησης (4. Beatrice L.).

1.6.2. Διαστημικές εφαρμογές

Η κρυογονική ψύξη με κύκλο Brayton παρουσιάζει τεχνολογικά πλεονεκτήματα για πολλές διαστημικές εφαρμογές λόγω των χαμηλών δονήσεων και της απλότητας ενσωμάτωσης συστημάτων απόρριψης θερμότητας από το διαστημόπλοιο. Η τεχνολογία παρουσιάστηκε το Μάρτιο 2002, όπου ο κρυογονικός ψύκτης NICMOS εγκαταστάθηκε στο τηλεσκόπιο Hubble. Ο κρυογονικός ψύκτης NICMOS είναι μια μονοβάθμια μονάδα που παρέχει 7 kW ψύξης στους 70K και λειτουργεί έκτοτε χωρίς υποβάθμιση ή δυσλειτουργία. Η ανάγκη αποδοτικής ψύξης σε πολλαπλές θερμοκρασίες έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός διβάθμιου κρυογενούς ψύκτη. Η διαμόρφωση αυτή βασίζεται στην τεχνολογία του NICMOS για το μηχανολογικό εξοπλισμό, αλλά χρησιμοποιεί νέα ηλεκτρονικά ελέγχου που έχουν σχεδιαστεί για τον ακριβή και ανεξάρτητο σχεδιασμό των δύο θερμοκρασιακών φορτίων. Ο κρυογονικός ψύκτης βελτιστοποιήθηκε ώστε να παρέχει ταυτόχρονα τουλάχιστον 1,8 kW ψύξης στους 65K και 12,6 kW στους 100K. Ο μηχανικός εξοπλισμός ζυγίζει περίπου 21kg. (14. Zagarola M.)

Στην παρούσα δεκαετία, η τεχνολογία των μηχανικών κρυογονικών ψυκτών για διαστημικές εφαρμογές, κυρίως για την ψύξη υπέρυθρων ανιχνευτών, έχει ωριμάσει. Οι θερμοκρασίες ψύξης συνήθως κυμαίνονται από 10K για συστοιχίες εστιακών επιπέδων πυριτίου με προσμίξεις ως 120K για οπτικά μεγάλου μήκους κύματος. Η απαιτούμενη ψύξη αυτών των αντικειμένων παρέχεται είτε από μηχανικούς κρυογονικούς ψύκτες είτε από παθητικές τεχνικές, όπως τα κρυογονικά σώματα ακτινοβολίας ή τα αποθηκευμένα κρυογονικά ρευστά. Οι μηχανικοί κρυογονικοί ψύκτες παρέχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις παθητικές τεχνικές. Οι κρυογονικοί ψύκτες έχουν σημαντικά μικρότερη μάζα σε σχέση με τα αποθηκευμένα κρυογονικά ρευστά συγκρίσιμης αποθηκευτικής ικανότητας. Οι κρυογονικοί ψύκτες έχουν επίσης μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης κρυογονικού ρευστού, τα οποία πρέπει να βασίζονται σε μια πεπερασμένη πηγή είτε αποθηκευμένου κρυογονικού ρευστού ή αερίου υψηλής πίεσης που πρέπει να εκτονωθεί μέσω ενός στομίου ώστε να παραχθεί ψύξη. Οι κρυογονικοί ψύκτες είναι επίσης μικρότερης μάζας σε σχέση με τα κρυογονικά σώματα ακτινοβολίας. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ενσωμάτωση των μηχανικών κρυογονικών ψυκτών σε διαστημικές εφαρμογές είναι πολύ αργή, λόγω της ανησυχίας για τις εκπεμπόμενες δονήσεις που θα μπορούσαν να έχουν επίδραση στην ακρίβεια και των εγγενών περιορισμών της αξιοπιστίας των μηχανικών συσκευών.

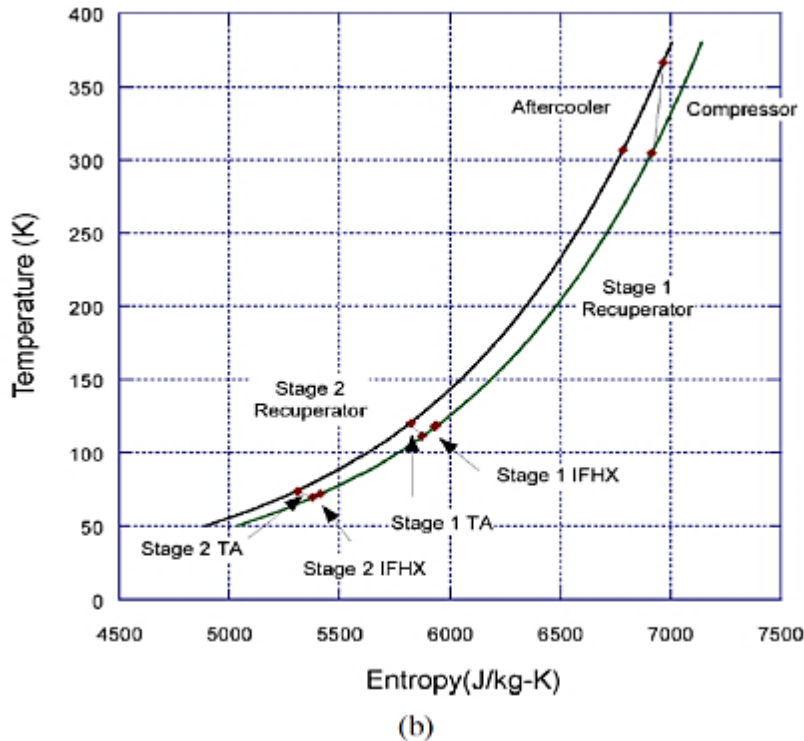
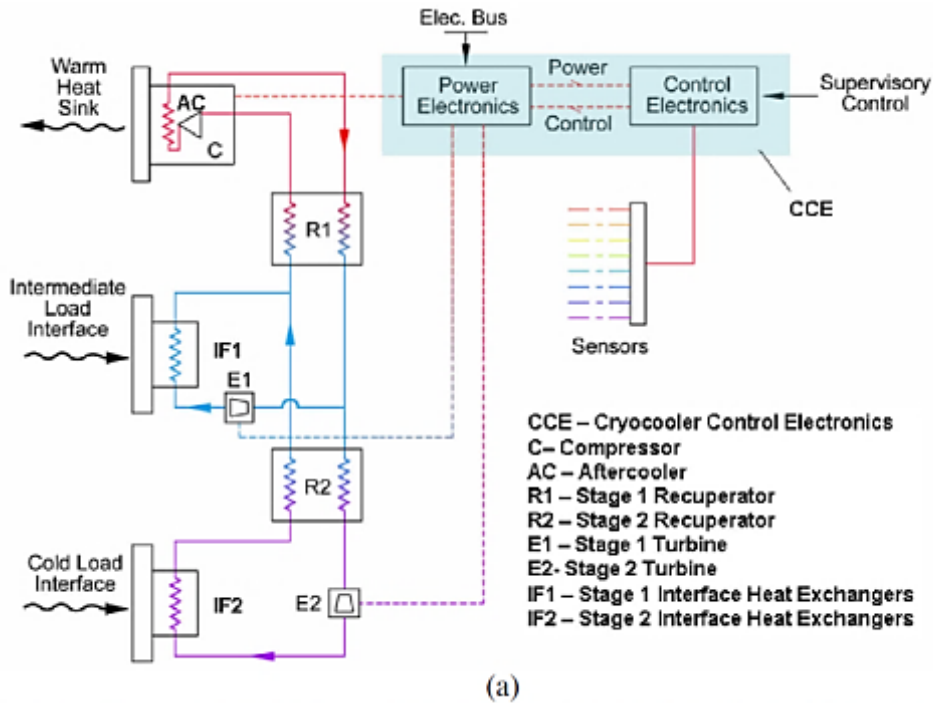
Η εταιρία Creare Inc. έχει αναπτύξει μια κατηγορία μηχανικών κρυογονικών ψυκτών, τους κρυογονικούς ψύκτες στροβιλομηχανών οι οποίοι βασίζονται στον αντίστροφο κύκλο Brayton (για συντομία ονομάζονται Turbo-Brayton). Η διαμόρφωση αυτή έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με τους ενεργούς κρυογονικούς ψύκτες όσον αφορά τις ανησυχίες αυτές. Οι Turbo-Brayton κρυογονικοί ψύκτες χρησιμοποιούν μινιατούρες στροβιλοαντιδραστήρες για να συμπίεσουν και να εκτονώσουν το εργαζόμενο μέσο ως μέρος ενός αντίστροφου θερμοδυναμικού κύκλου Brayton. Τα μόνα κινούμενα μέρη αυτών των κρυογονικών ψυκτών είναι οι ρότορες των στροβιλοσυμπιεστών, οι οποίοι έχουν μάζες από 1 ως 10 gr. Οι ρότορες έχουν διάμετρο μερικών χιλιοστών και λειτουργούν σε ταχύτητες αρκετών χιλιάδων περιστροφών το δευτερόλεπτο. Οι μικρές διαμέτροι και οι μεγάλες ταχύτητες απαιτούνται για την υψηλή θερμοδυναμική απόδοση στα χαμηλά επίπεδα ισχύος που αφορούν τις διαστημικές κρυογονικές εφαρμογές. Οι ρότορες υποστηρίζονται από έδρανα αέρα, και δεν υπάρχει φθορά του μηχανισμού κατά την κανονική λειτουργία. Η επαφή μεταξύ του ρότορα και των εδράνων εμφανίζεται κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό, αλλά οι εξαιρετικά χαμηλές δυνάμεις επαφής προλαμβάνουν τη φθορά κατά τη διάρκεια των χιλιάδων εκκινήσεων και τερματισμών. Επίσης οι ρότορες είναι κατάλληλοι για λειτουργία υψηλών ταχυτήτων και ο κύκλος ροή του αερίου είναι συνεχής. Ως αποτέλεσμα οι εκπεμπόμενες δονήσεις είναι εξαιρετικά χαμηλές σε υψηλές συχνότητες, όπου η προβλεπόμενη μηχανική μετατόπιση λόγω των δονήσεων είναι της τάξης του νανόμετρου.

Η αρχική επίδειξη του κρυογονικού Turbo –Brayton έγινε κατά τη διάρκεια του Προγράμματος NASA’s NICMOS Cooling System (NCS). Το NCS αποτελείται από ένα μονοβάθμιο κρυογονικό ψύκτη turbo-Brayton συζευγμένο με ένα κρυογονικό κυκλοφορητή και ένα βρόχο τριχοειδούς αντλίας. Πρόσφατα, η εταιρία Creare Inc. σε συνεργασία με άλλους φορείς, δημιούργησαν ένα διβάθμιο κρυογονικό ψύκτη turbo-Brayton. Όλα τα μηχανικά μέρη βασίζονται στον κρυογονικό ψύκτη NICMOS. Ο κρυογονικός ψύκτης σχεδιάστηκε για να παράγει 12,6 W ψύξης στην πρώτη βαθμίδα θερμοκρασίας των 100K και 1,8 W στη δεύτερη βαθμίδα θερμοκρασίας στους 65K. (14. Zagarola M.)

1.6.2.1. Περιγραφή του διβάθμιου κρυογονικού ψύκτη TURBO-BRAYTON

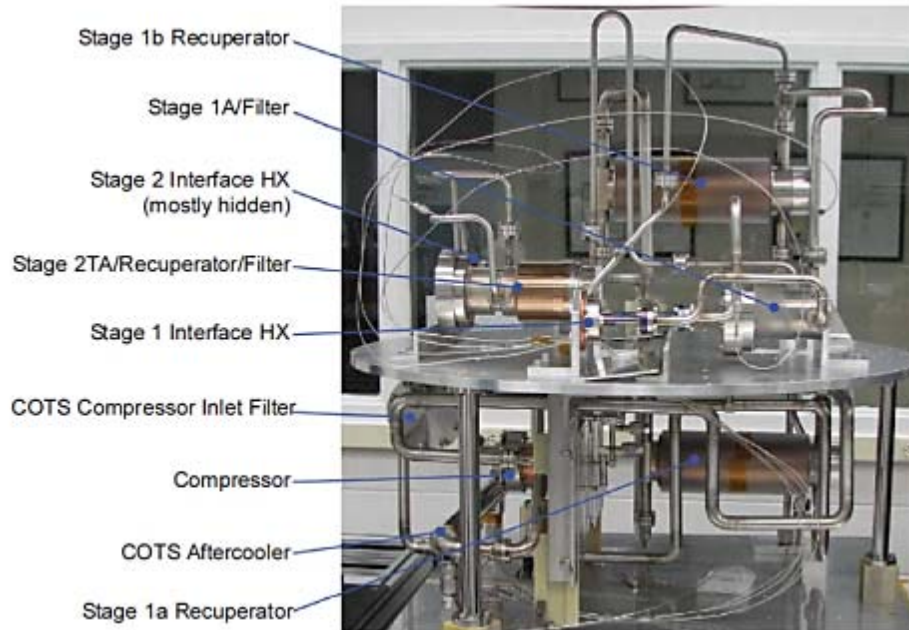
Η σχηματική αναπαράσταση του κύκλου και το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας του διβάθμιου κρυογονικού ψύκτη turbo-Brayton φαίνεται στην Εικόνα 1.12. Το αέριο που επιλέχθηκε για την εφαρμογή αυτή είναι το νέον. Ένας απλός συμπιεστής συμπιέζει το νέον, προκαλώντας συνεχής ροή μέσω του συστήματος. (Hou Y. Developments in Reverse Brayton Cycle Cryocooler in China) Η θερμότητα της συμπίεσης και οι απώλειες εντός του συμπιεστή αποβάλλονται στη θερμή καταβόθρα θερμότητα. Το αέριο υψηλής πίεσης ρέει μέσω της βαθμίδας 1 του προθερμαντήρα και στη συνέχεια διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα. Το πρώτο ρεύμα εκτονώνεται στην πρώτη βαθμίδα του στροβίλου και στη συνέχεια ρέει μέσω της βαθμίδας 1 ενός εναλλάκτη θερμότητας. Το δεύτερο ρεύμα περνά μέσα από τη βαθμίδα 2 του προθερμαντήρα και στη

συνέχεια εκτονώνεται μέσω της δεύτερης βαθμίδας του στροβίλου. Το ρεύμα αυτό συνεχίζει στη δεύτερη βαθμίδα του εναλλάκτη θερμότητας και στη συνέχεια ενώνεται με το πρώτο ρεύμα. Μετά την ανάμιξη, τα δύο ρεύματα περνούν από την πρώτη βαθμίδα του προθερμαντήρα και ξανά πίσω στο συμπιεστή. (14. Zagarola M.)



Εικόνα 1.12: Αντίστροφος κύκλος Brayton δύο σταδίων (α) σχηματική απεικόνιση του κύκλου (β) διάγραμμα θερμοκρασίας- εντροπίας (14. Zagarola M.)

Η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου μειώνεται από τους 300K στους 200K στην πρώτη διάταξη και από 200K στους 100K στη δεύτερη. Ένας επιπλέον στρόβιλος και προθερμαντήρας χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου από την πρώτη βαθμίδα των 100K στη θερμοκρασία των 65K στη δεύτερη βαθμίδα.



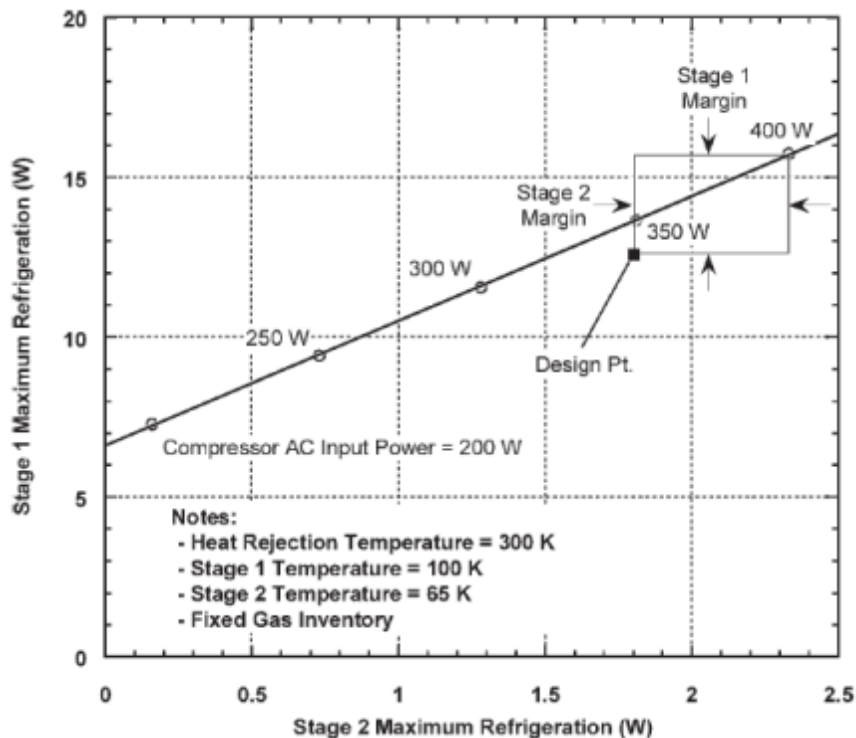
Εικόνα 1.13: Απεικόνιση της διάταξης (14. Zagarola M.)

1.6.2.2. Απόδοση

Η αύξηση του μεγέθους από ένα μονοβάθμιο κρυογονικό ψύκτη σε έναν πολλαπλών βαθμίδων είναι εύκολη από άποψης θερμοδυναμικής λόγω της συνεχούς ροής. Η απόδοση των μεμονωμένων συνιστωσών χαρακτηρίστηκε και αναπαραστάθηκε από εμπειρικές καμπύλες. Το κλειδί για να επιτευχθεί ο διαμοιρασμός του απαιτούμενου φορτίου μεταξύ των δύο βαθμίδων προσδιορίστηκε από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροφυσίου του στρόβιλου και τη θερμική απόδοση των προθερμαντών. Η θερμική απόδοση και το μέγεθος των προθερμαντών είναι παράμετροι σχεδιασμού

Η μέγιστη παραγόμενη ψύξη που παρέχεται σε κάθε βαθμίδα μπορεί να προβλεφθεί από την Εικόνα 1.14 του συμπιεστή, με βάση τα επίπεδα ισχύος εισόδου, από 200W ως 400W. Τα επίπεδα θερμοκρασιών είναι 65K και 100K για όλα τα σημεία. Ο κρυογονικός ψύκτης βελτιστοποιήθηκε για ισχύ εισόδου στο συμπιεστή 400W και φορτία σχεδιασμού 1,8 W στους 65K και 12,6 W στους 100K. Επίπεδα ισχύος εισόδου μικρότερα των 400 W προκύπτουν μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή. Η ισχύς εισόδου του συμπιεστή μεταβάλλεται με τον κύβο της ταχύτητας περιστροφής, και άρα για

παράδειγμα η μείωση της ισχύος εισόδου από τα 400W στα 200W κανονικά απαιτεί μείωση 21% στην ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή. (14. Zagarola M.)



Εικόνα 1.14: Μέγιστη ψύξη σε κάθε βαθμίδα για διαφορετικά επίπεδα ισχύος εισόδου (14. Zagarola M.)

Τα δεδομένα του σχήματος (Εικόνα 1.14) είναι οι μέγιστες τιμές ψύξης για κάθε βαθμίδα. Για να επιτευχθεί αυτή η τιμή πρέπει οι στροβιλοεναλλακτήρες να λειτουργούν σε ταχύτητες που αντιστοιχούν σε μέγιστη απόδοση. Ο κρυογονικός ψύκτης μπορεί να λειτουργήσει σε όλες τις τιμές ψύξης που είναι μικρότερες από τη μέγιστη, μεταβάλλοντας απλώς την ταχύτητα του στροβιλοεναλλακτήρα σε ένα λιγότερο αποδοτικό σημείο. Τα ηλεκτρονικά ελέγχου του κρυογονικού ψύκτη προσαρμόζουν τις ταχύτητες της στροβιλομηχανής, ώστε να παρέχουν έλεγχο της θερμοκρασίας και να ελαχιστοποιούν την ισχύ εισόδου. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας προκύπτει μεταβάλλοντας την ταχύτητα του συμπιεστή, η οποία μεταβάλλεται τόσο την ισχύ εισόδου του συμπιεστή όσο και την ψύξη. Οι ταχύτητες του στροβιλοεναλλακτήρα και του συμπιεστή συνεχώς προσαρμόζονται ώστε να ελαχιστοποιείται η ισχύς εισόδου και να διατηρούνται τα φορτία σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. (14. Zagarola M.)

1.7. Υγροποίηση φυσικού αερίου

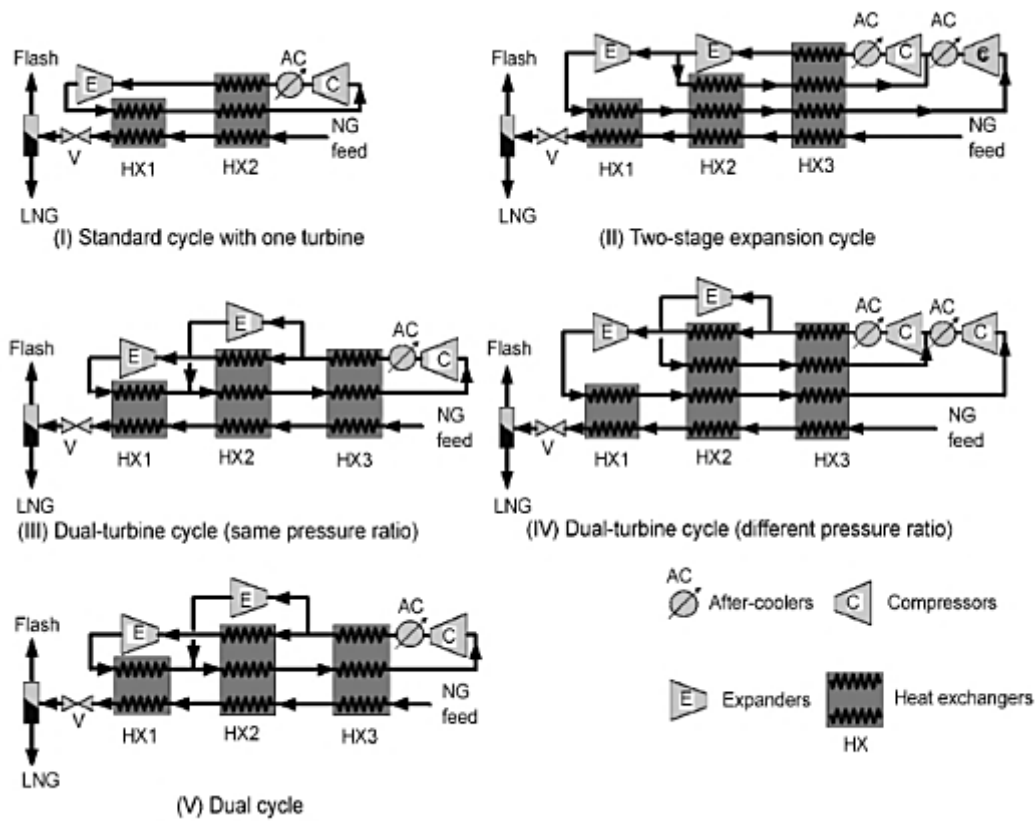
Για δεκαετίες, έχει διερευνηθεί και αναπτυχθεί ένας αριθμός θερμοδυναμικών κύκλων για την υγροποίηση φυσικού αερίου με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και απλούστερο εξοπλισμό. Μιας και το φυσικό αέριο είναι μίγμα διαφορετικών υδρογονανθράκων, η ειδική θερμότητα μεταβάλλεται σημαντικά με τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας υγροποίησης. Για αποδοτική υγροποίηση, είναι σημαντική η μείωση της παραγωγής εντροπίας λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς στους εναλλάκτες θερμότητας. Οι αντίστροφοι κύκλοι Brayton χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των αιχμών φορτίου, με κύρια πλεονεκτήματα την απλότητα και τη γρήγορη εκκίνησή τους. Πρόσφατα, μελετήθηκε η εφαρμογή τους σε υπεράκτιες εξέδρες εξόρυξης, για την επιτόπια υγροποίηση του φυσικού αερίου και τη μεταφορά του από πλοία ως LNG (υγροποιημένο φυσικό αέριο – Liquefied Natural Gas). Από την άλλη, το πιο κοινό ψυκτικό τους είναι το αέριο άζωτο. Το άζωτο είναι σχετικά φθινό, μη εύφλεκτο, και ασφαλές στο χειρισμό του ακόμη και σε υψηλές πιέσεις, της τάξεως των 100 bar. Επιπλέον η διαδικασία του κύκλου του αζώτου είναι απλή και εύκολη στο χειρισμό (7. Gomes Jeff).

Οι Chang et al (2012) [5] μελέτησαν την εφαρμογή του αντίστροφου κύκλου Brayton με ένα στρόβιλο, αλλά και διαφορετικούς συνδυασμούς δυο στροβίλων για την ολοκλήρωση ενός αποδοτικού θερμοδυναμικού κύκλου. Επίσης μελετήθηκε ποιοτικά η βελτίωση της απόδοσης του κύκλου με την προσθήκη πρόψυξης μέσω του κύκλου Joule – Thomson στο θερμό άκρο. Για τη σύγκριση απόδοσης των κύκλων οι Chang et al [5] χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα Aspen HYSYS Version 7.3.

1.7.1. Παρουσίαση των κύκλων

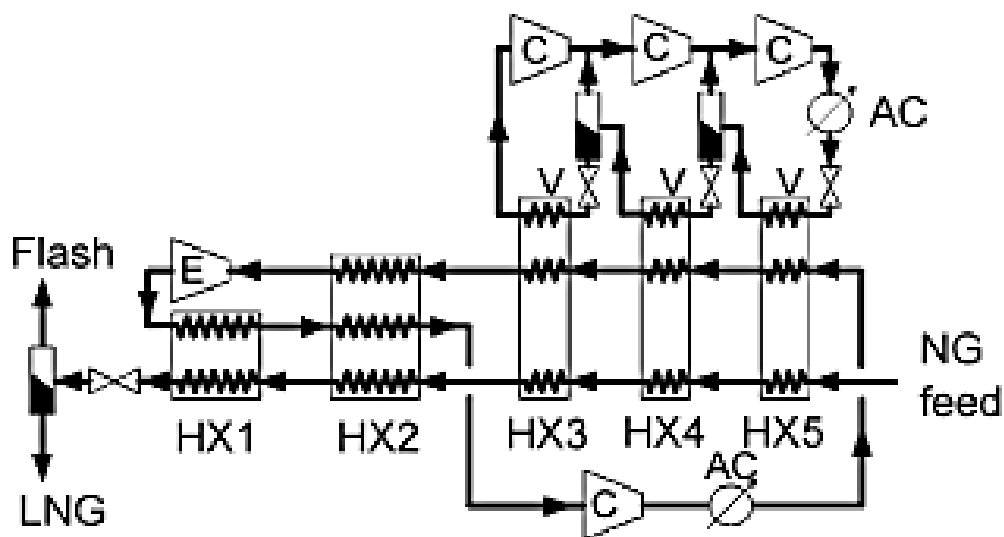
Στην Εικόνα 1.15 που ακολουθεί φαίνεται ο βασικός και οι τροποποιημένοι αντίστροφοι κύκλοι Brayton. Στην Εικόνα 1.15 (I) παρουσιάζεται ο κλασικός κύκλος με ένα στρόβιλο και δυο εναλλάκτες θερμότητας σε σειρά (HX1 και HX2), όπου η τροφοδοσία του φυσικού αερίου (NG) ψύχεται από θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 113 K, θερμοκρασία του υγροποιημένου αερίου. Με την εφαρμογή δυο στροβίλων μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές διατάξεις, όπου στην Εικόνα 1.15(II) ο κύκλος καλείται «διβάθμιας εκτόνωσης», και οι στρόβιλοι τοποθετούνται σε σειρά και το ρεύμα του αζώτου διακλαδίζεται προς τον αναγεννητικό εναλλάκτη θερμότητας μετά την πρώτη εκτόνωση. Οι διατάξεις που φαίνονται στην Εικόνα 1.15 (III) και (IV) καλούνται κύκλοι διπλού στρόβιλου, οι δυο στρόβιλοι τοποθετούνται παράλληλα και το συμπιεσμένο αέριο άζωτο –διακλαδίζεται στους δυο στρόβιλους προτού εκτονωθεί. Η διαφορά των δύο διατάξεων είναι στο διαφορετικό λόγο πίεσης μεταξύ των δυο στροβίλων. Επίσης στην Εικόνα 1.15 (IV) φαίνεται μια διάταξη διπλού κύκλου, όπου δυο ξεχωριστοί κύκλοι

τοποθετούνται παράλληλα για την ψύξη και στη συνέχεια την υγροποίηση της τροφοδοσίας του φυσικού αερίου (5. Chang H.M.).



Εικόνα 1.15: Αντίστροφοι κύκλοι Brayton, (I) Κλασικός κύκλος με ένα στρόβιλο, (II - V) Τροποποιημένοι κύκλοι (5. Chang H.M.)

Όπως προαναφέρθηκε, η θερμοδυναμική απόδοση των συστημάτων υγροποίησης μπορεί να βελτιωθεί με τη βοήθεια κύκλου πρόψυξης. Τυπικά στις διαδικασίες υγροποίησης φυσικού αερίου, ο κύκλος πρόψυξης ψύχει την τροφοδοσία του φυσικού αερίου, που βρίσκεται σε φάση ατμών, από τους 300 K στους 240 K, η οποία είναι κοντά στη θερμοκρασία κορεσμού του. Η πιο δημοφιλής διαδικασία πρόψυξης είναι η χρήση πολυβάθμιων κύκλων Joule-Thomson με διαφασικά ψυκτικά όπως είναι το προπάνιο (C_3) και η αμμωνία (NH_3). Επειδή συνήθως τα ψυκτικά αυτά αποτελούνται από μία χημική ένωση, ο κύκλος πρόψυξης έχει τρία ή τέσσερα επίπεδα εξάτμισης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.16.



Εικόνα 1.16: Διάταξη πρόψυξης του τυπικού αντίστροφου κύκλου Brayton (5. Chang H.M.)

1.7.2. Αποτελέσματα έρευνας

Η θερμοδυναμική απόδοση του κλασικού κύκλου με ένα στρόβιλο μπορεί να βελτιωθεί με τη χρησιμοποίηση δυο στροβίλων και για τους τέσσερις τρόπους διάταξης. Από την άλλη, οι διβάθμιοι κύκλοι και διπλού στρόβιλου με ίδιο λόγο πίεσης προτιμώνται σε περιπτώσεις που είναι θέμα το μέγεθος ή το βάρος του συστήματος υγροποίησης. Η προσθήκη των κύκλων πρόψυξης μπορεί να αυξήσει την απόδοση της υγροποίησης, αλλά τα περιθώρια βελτίωσης δεν είναι τόσο μεγάλα όσο η διάταξη με τους δύο στρόβιλους. Η χρήση του κύκλου Joule-Thomson με αμμωνία (NH_3) ως πρόψυξη ενδείκνυται σε περιπτώσεις που απαιτείται μικρό μέγεθος (7. Gomes Jeff).

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αλλά και από τις εικόνες που παρουσιάστηκαν, η προσθήκη ενός κύκλου πρόψυξης αυξάνει σημαντικά το μέγεθος του βασικού κύκλου, το οποίο είναι το αναπόφευκτο αρνητικό επακόλουθο της βελτίωσης της απόδοσης της υγροποίησης. Τόσο το προπάνιο όσο και η αμμωνία είναι πολύ καλά ψυκτικά μέσα, αλλά η αμμωνία προτιμάται σε υπεράκτιες πλατφόρμες εξόρυξης για λόγους ασφάλειας των εκρηκτικών μειγμάτων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω της εξόρυξης και της χρήσης του προπανίου.

Γενικά, η επιλογή του βασικού αντίστροφου κύκλου Brayton, αλλά και η χρήση πρόψυξης πρέπει να γίνεται με βάση και τη θερμοδυναμική απόδοση, αλλά το μέγεθος του συστήματος, μιας και υπάρχουν εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος (5. Chang H.M.).

2. Μηχανή Stirling και οι εφαρμογές της

2.6. Εισαγωγή στη μηχανή Stirling

Η μηχανή Stirling είναι μια μηχανολογική διάταξη, η οποία λειτουργεί σε έναν κλειστό αναγεννητικό θερμοδυναμικό κύκλο με κυκλική συμπίεση και εκτόνωση του εργαζόμενου ρευστού σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Η ροή του εργαζόμενου ρευστού ελέγχεται μόνο μέσω των εσωτερικών αλλαγών στους όγκους, δεν υπάρχουν βαλβίδες και, συνολικά, υπάρχει μια καθαρή μετατροπή της θερμότητας σε έργο και αντίστροφα.

Αυτός ο γενικευμένος ορισμός περιλαμβάνει μια μεγάλη οικογένεια μηχανών με διαφορετικές λειτουργίες, χαρακτηριστικά και διαμορφώσεις. Περιλαμβάνει αμφότερα τα συστήματα, περιστροφικό και παλινδρομικό, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς διαφορετικής πολυπλοκότητας. Περιλαμβάνει μηχανές που έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως κινητήριες μηχανές ή ως συστήματα ισχύος μετατρέποντας θερμότητα παρεχόμενη σε υψηλή θερμοκρασία σε έργο στην έξοδό τους και απορριπτόμενη θερμότητα σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Καλύπτει επίσης μηχανές κατανάλωσης ισχύος που χρησιμοποιούνται ως συστήματα ψύξης και αντλίες θερμότητας, απορροφώντας θερμότητα από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας και διοχετεύοντας αυτή συν την ισοδύναμη θερμότητα του έργου που καταναλώνεται, σε χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας. Τέλος καλύπτει διατάξεις κατανάλωσης ισχύος που λειτουργούν ως γεννήτριες πίεσης (αντλίες) συμπιέζοντας ρευστό από χαμηλή πίεση σε υψηλότερη.

Υπάρχουν πολύ παρόμοιες μηχανές οι οποίες λειτουργούν με ανοικτό αναγεννητικό κύκλο, όπου η ροή του εργαζόμενου ρευστού ελέγχεται από βαλβίδες. Για διευκόλυνση αυτές μπορούν να ονομάζονται μηχανές “Ericsson”, αλλά δυστυχώς η διάκριση αυτή δεν είναι ευρέως διαδεδομένη και οι αναγεννητικές μηχανές και των δύο τύπων καλούνται συχνά “μηχανές κύκλου Stirling”.

Οι μηχανές Stirling είναι επίσης γνωστές ως μηχανές θερμού αέρα, θερμού αερίου και μέσω ενός μεγάλου αριθμού ονομασιών που προορίζονται για διαφορετικές ρυθμίσεις των στοιχείων της μηχανής. Υπάρχει επίσης και ένας ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος που ονομάζεται κύκλος Stirling. Αυτός είναι χρήσιμος για μία στοιχειώδη περιγραφή της αναγεννητικής λειτουργίας της μηχανής, αλλά πρακτικά οι μηχανές Stirling λειτουργούν σε ένα πολύ πολύπλοκο κύκλο και δε θα έπρεπε ποτέ να περιγράφονται ως “μηχανές κύκλου Stirling”.(28. Walker G.)

Ο επιθυμητός γενικός τίτλος για όλες αυτές τις διαφορετικές κατηγορίες μηχανών είναι “αναγεννητικές θερμικές μηχανές”, αλλά αυτός είναι περίπλοκος και, επιπλέον, είναι σίγουρα πολύ αργά για κάτι άλλο εκτός από την περιγραφή “μηχανή Stirling” να χρησιμοποιείται ευρέως και αδιακρίτως. Όμως επειδή έχουν ριζικά διαφορετικά

χαρακτηριστικά θα πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ μηχανών όπου η ροή ελέγχεται με:

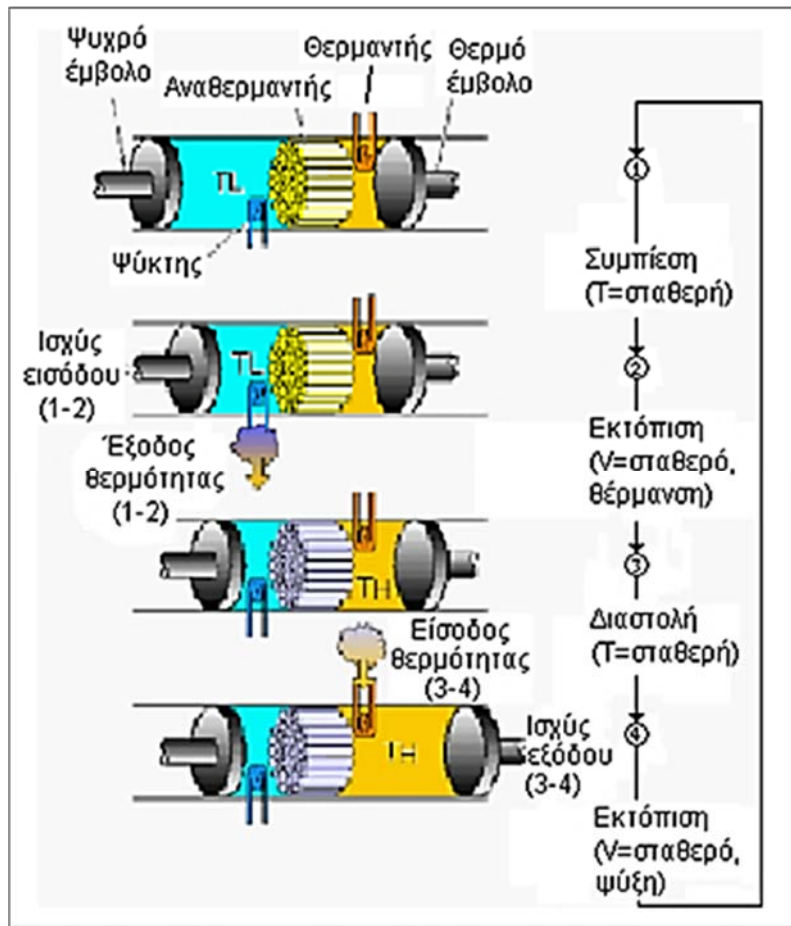
- a. βαλβίδες (μηχανή Ericsson)
- b. εσωτερικές μεταβολές του όγκου (μηχανή Stirling)

Ο όρος “μηχανή Stirling” ως ο γενικός τίτλος για τις κλειστού τύπου αναγεννητικές μηχανές γεννήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 στα ερευνητικά εργαστήριά της Philips στο Eindhoven. Μέχρι τότε ήταν σύνηθες να τις αποκαλούν μηχανές θερμού αέρα προλογίζοντάς τις με το όνομα του εφευρέτη ή του κατασκευαστή τους. Η αλλαγή του εργαζόμενου ρευστού από αέρα σε υδρογόνο 1_1H ή ήλιο 4_2He από τη Philips στις αρχές της δεκαετίας του πενήντα έκανε τον όρο μηχανές θερμού αέρα ακατάλληλο. Η εναλλακτική “μηχανή θερμού αερίου της Philips” αποδείχθηκε λιγότερο ελκυστική από τον όρο “μηχανή Stirling” και ο τελευταίος πέρασε σε ευρεία χρήση (28. Walker G.)

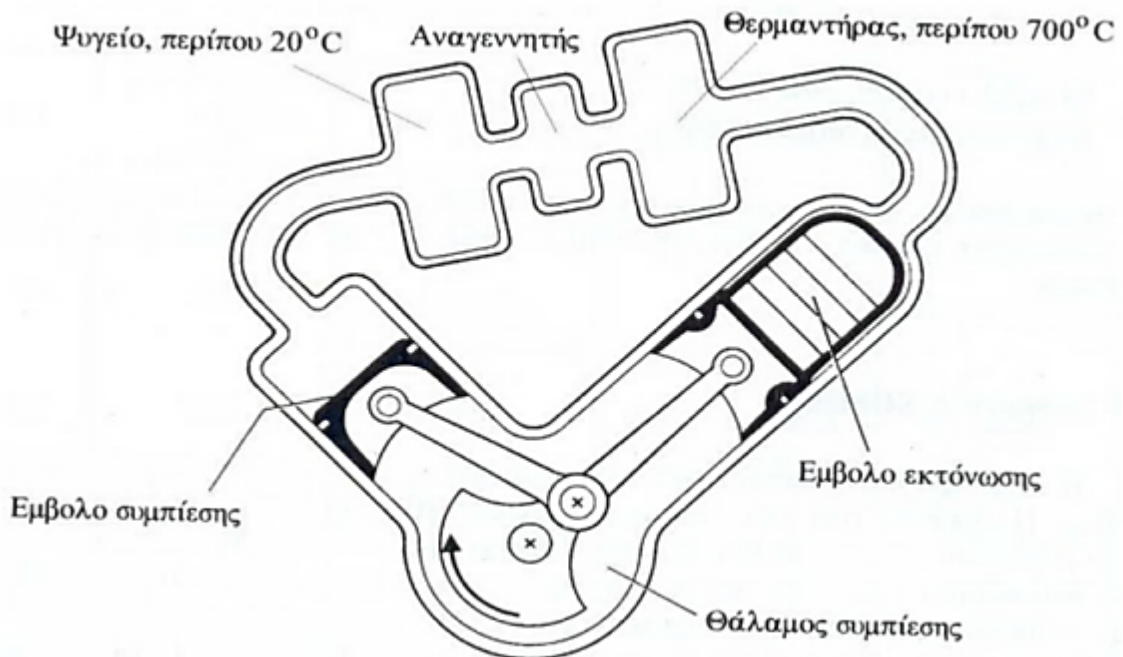
Μηχανή Stirling

Οι μηχανές κύκλου Stirling μπορεί να λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση, θερμαίνονται εξωτερικά και χρησιμοποιούν υδρογόνο ή ήλιο ως εργαζόμενο μέσο. Οι θερμοκρασίες του εργαζόμενου αερίου ξεπερνούν τους $700^{\circ}C$ ενώ η πίεση του φτάνει τα 20 MPa. Στον κύκλο Stirling, το αέριο θερμαίνεται και ψύχεται διαδοχικά με διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού όγκου. (Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)

Οι μηχανές Stirling ενσωματώνουν συνήθως έναν αναθερμαντή που συλλαμβάνει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ψύξης σε σταθερό όγκο και την επιστρέφει όταν το αέριο θερμαίνεται σε σταθερό πάλι όγκο. Η Εικόνα 2.1 εμφανίζει τις τέσσερις βασικές διεργασίες μιας μηχανής κύκλου Stirling. Υπάρχουν διάφορες μηχανικές διατάξεις που εφαρμόζουν αυτές τις διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας και σταθερού όγκου. Οι περισσότερες περιλαμβάνουν τη χρήση εμβόλων και κυλίνδρων. Ορισμένες χρησιμοποιούν ένα έμβολο που εκτοπίζει το αέριο λειτουργίας χωρίς να μεταβάλλει τον όγκο του. Το έμβολο αυτό παλινδρομεί το αέριο μπρος-πίσω από την θερμή περιοχή στην ψυχρή περιοχή της μηχανής. Για τα περισσότερα σχέδια μηχανών, η κινητική ενέργεια λαμβάνεται από έναν περιστρεφόμενο στροφαλοφόρο άξονα. Η μέγιστη απόδοση μετατροπής από θερμική σε ηλεκτρική ενέργεια για μηχανή Stirling είναι περίπου 40%.



Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας μηχανής Stirling (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)



Εικόνα 2.2: Μηχανή Stirling και τα κύρια μέρη της (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)

Το σχήμα που φαίνεται στην Εικόνα 2.2 αποτελεί μια απλοποιημένη απεικόνιση κινητήρα Stirling. Αέριο (π.χ., υδρογόνο, ήλιο, κ.λ.π.) συμπιέζεται και εκτονώνεται σε διάταξη κυλίνδρου - δύο εμβόλων με αποτέλεσμα την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Το αέριο θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας χωρίς να συμμετέχει στην καύση (κινητήρας εξωτερικής καύσης).

Αρχικά, η έρευνα και ανάπτυξη είχε ως αντικείμενο κινητήρες ισχύος 3-100 kW, κατάλληλους για αυτοκίνητα. Η προσπάθεια στράφηκε κατόπιν και προς κινητήρες ισχύος μέχρι 1-1,5 MW με αναμενόμενη διάρκεια ζωής της τάξεως των 20 ετών. Χάρη στην εξωτερική καύση και τον κλειστό κύκλο λειτουργίας, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσης με αποτέλεσμα οι φθορές να είναι περιορισμένες. Όμως, απαιτούνται στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου όσο και του λιπαντικού λαδιού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν. (27. Walker G.)

Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει τη χρήση διαφόρων καυσίμων: υγρά ή αέρια καύσιμα, άνθρακας, αέρια ή υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα, ακόμη και απορρίμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, είναι δυνατή η αλλαγή καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας ή μετατροπή των ρυθμίσεων του κινητήρα. Χάρη στην ευελιξία τους, οι μηχανές Stirling μπορούν επίσης να αποτελέσουν στοιχεία ηλιακών ή πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ή συμπαραγωγής.

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι εφικτή με μηχανές Stirling, όπως προαναφέρθηκε. Η τεχνική αυτή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί και διαδοθεί αρκετά, αλλά το ενδιαφέρον για την ανάπτυξή της έχει αυξηθεί χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με συστήματα κινητήρων Diesel, αεριοστροβίλων ή ατμοστροβίλων: δυνατότητα υψηλότερου βαθμού απόδοσης, μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου, καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο, χαμηλές εκπομπές ρύπων, χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών. (15. T.O.T.E.E. 2010)

Στην Εικόνα 2.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια μηχανή ΣΗΘ δυναμικότητας σε ηλεκτρική ενέργεια 55 kW.

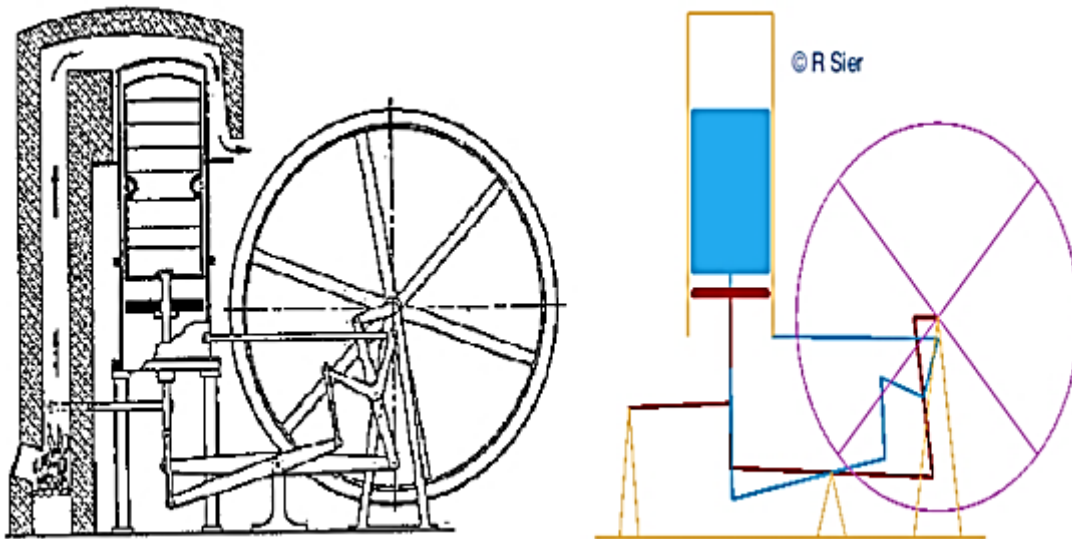


Εικόνα 2.3: Μηχανή συμπαραγωγής Stirling και γεννήτρια με ηλεκτρική ισχύ 55 kW (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)

2.7. Ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της μηχανής

Ο R. Stirling γεννήθηκε στο Cloag της Σκωτίας στις 25 Οκτωβρίου του 1790 . Σπούδασε στο Πανεπιστήμιο της Γλασκώβης και του Εδιμβούργου (1805-1808), μαθηματικά, μεταφυσική, ρητορική, Λατινικά και Ελληνικά σε προχωρημένο επίπεδο. Χειροτονήθηκε πάστορας στις 19 Σεπτεμβρίου 1816 και δύο μήνες αργότερα κατοχύρωσε και εφάρμοσε την ευρεσιτεχνία του (UK Patent 4081) πάνω στη μηχανή Stirling και στον θερμικό αναγεννητή (regenerator) τον οποίο ο ίδιος ονόμαζε οικονομητήρα (economizer). Η ευρεσιτεχνία του R. Stirling περιέγραφε ένα πλήθος από εφαρμογές πάνω σε γυαλί και σε διάφορους κλιβάνους.

Επίσης περιέγραφε και μια μηχανή ισχύος (εργοπαραγωγό) που ήταν σχεδιασμένη να λειτουργεί με μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, σε σχέση με τις μηχανές ατμού που υπήρχαν και χρησιμοποιούσαν εκείνη την εποχή. Η μειωμένη κατανάλωση οφειλόταν στην ύπαρξη του αναγεννητή. Και άλλοι όπως ο Sir George Caley (1807) είχαν εφεύρει μηχανές αέρα πριν από τον R. Stirling. Επίσης ήταν ήδη γνωστές από το 1699 και άλλες διατάξεις που αποκαλούνταν μηχανές αέρα. Ο οικονομητήρας ή αναγεννητής υπήρξε όμως ένα πολύ σημαντικό τμήμα της πατέντας του 1816 (Εικόνα 2.4). Αυτές οι καινοτομίες ήταν πολύ αξιόλογες λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι προηγήθηκαν της γέννησης της θερμοδυναμικής και των συγγραμμάτων του Sadi Carnot (1796-1832). (27. Walker G.)



Εικόνα 2.4: Η γνήσια ευρεσιτεχνία της μηχανής(1790-1878) Stirling στα 1816 (Finkelstein 1959) - Σημειώνεται η απουσία του ψύκτη (27. Walker G.)

Ορισμένοι ιστορικοί θεωρούν ότι οι προσπάθειες του αιδεσιμότατου R. Stirling για μια τέτοια μηχανή ήταν αποτέλεσμα του ενδιαφέροντος που έδειχνε για τους ανθρώπους της εργατικής τάξης των ενοριών του καθώς οι ατμομηχανές είχαν την εποχή εκείνη εκτεταμένη χρήση στη συγκεκριμένη περιοχή.

Εξαιτίας των μη ανθεκτικών υλικών που χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή καυστήρων (ο χάλυβας ή ο σίδηρος του Sir Henry Bessemer δεν είχε ακόμα εφευρεθεί), συχνά έσκαγαν με καταστρεπτικά αποτελέσματα για τους ανθρώπους που δούλευαν κοντά. Οι συνέπειες του ατμού με υψηλή πίεση στο ανθρώπινο σώμα είναι σημαντικές, όπως μπορεί να βεβαιώσει όποιος έχει εμπειρία εγκαύματος από ατμό στην κουζίνα. Η μηχανή Stirling δεν έσκαγε γιατί οι πιέσεις δεν έφταναν σε αυτό το υψηλό επίπεδο.

Ο Rev. Stirling άρχισε να εργάζεται με την πρώτη του εφαρμογή πάνω σε αυτή την μηχανή και το οικονομητήρα το 1816, λίγους μήνες αφότου έγινε πάστορας της εκκλησίας της

Σκότίας σε ηλικία 25 χρονών. Άλλοι, όπως ο Sir George Caley είχαν κατασκευάσει μηχανή αέρος από πριν (1806) και άλλες μηχανές με την επωνυμία «μηχανές αέρος» έχουν αναφερθεί από το 1699. Ο «οικονομητήρας» ή «αναγεννητής» έχει αναγνωριστεί ως το πιο σημαντικό μέρος της πατέντας του Rev. Stirling (Εικόνα 2.4). Αυτή η καινοτομία έκανε την κατασκευή πολύ πιο ελαφριά σε σχέση με τα δεδομένα της εποχής .

Η πρώτη καταγεγραμμένη προσπάθεια υλοποίησης αυτού του εγχειρήματος από εταιρεία ήταν από την Dundee Foundry Company στην οποία εργαζόταν ο αδελφός του Robert, James Stirling. Ο James ήταν πολύ καλός μηχανικός και ένθερμος υποστηρικτής του εγχειρήματος του αδελφού του. Μια πολύ μεγάλη σε διαστάσεις μηχανή με διπλά ενεργά έμβολα με πολλές σχεδιαστικές και κατασκευαστικές καινοτομίες κατασκευάστηκε στο εργοστάσιο που δούλευε με την δική του επίβλεψη. (21. Hirata K.)

Η μηχανή αυτή δούλευε για πολλά χρόνια στο εργοστάσιο, αλλά λόγω αστοχιών των μετάλλων αντικαταστάθηκε πάλι από μια ατμομηχανή. Το 1908 η μηχανή Stirling είχε ήδη αναπτυχθεί αρκετά, αφού τόσο ο αναγεννητής όσο και η μηχανή διπλών εμβόλων ήταν αρκετά γνωστά και στις δύο ακτές του Ατλαντικού. Συζητήσεις για την χρησιμότητα και τις πιθανές μελλοντικές εφαρμογές της, γίνονταν από το Institution of Mechanical Engineers της μεγάλης Βρετανίας.

Ήταν γεγονός ότι από τα μέσα του 19ου αιώνα μέχρι την έναρξη του 1ου παγκόσμιου πολέμου, τόσο μηχανές ανοικτού κύκλου λειτουργίας όσο και μηχανές κλειστού κύκλου λειτουργίας είχαν μελετηθεί, αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις, από την τοποθέτησή τους σε πλοία μέχρι και την χρήση τους σε εκκλησιαστικά όργανα για την άντληση του απαραίτητου αέρα για τη λειτουργία τους. Είναι εκπληκτικό το γεγονός ότι πολλές από εκείνες τις μηχανές λειτουργούν ακόμα και μάλιστα ικανοποιητικά. Παρόλο ότι η μηχανή Stirling ήταν μια πολύ καλή εναλλακτική λύση των απρόβλεπτων εκείνη την εποχή ατμομηχανών, η έλλειψη την εποχή εκείνη κατάλληλων υλικών για τους κύλινδρους και για τις κεφαλές τους, είχαν σαν αποτέλεσμα να μην πρεσάρονται όσο θα έπρεπε οι κύλινδροι, με αποτέλεσμα να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα η παραγόμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης, περίπου 1 kW ανά τόνο και 1% αντίστοιχα. Παρόλα αυτά η μηχανή είχε πολύ καλή απόδοση και ευρεία εφαρμογή σε περιπτώσεις άντλησης υδάτων. Το 1908 εμφανίσθηκε για πρώτη φορά η μηχανή Stirling που έπαιρνε ενέργεια από τον ήλιο.

Η επιτυχία της μηχανής του Stirling αναγνωρίστηκε από τα διάφορα ερευνητικά κέντρα και από το ενδιαφέρον που έδειξαν γι' αυτήν ισχυρές προσωπικότητες της εποχής όπως ο βασιλιάς Εδουάρδος VII, ο Σουλτάνος της Τουρκίας, ο Andrew Carnegie κ.α. Παρά την επιτυχία της, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '20 η μηχανή Stirling κόντευε να «πεθάνει».

Η κατάσταση αυτή επιδεινώθηκε από την ραγδαία ανάπτυξη και χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης την εποχή του 2ου παγκόσμιου πολέμου. Η ανάπτυξη της μηχανής Otto και του ηλεκτροκινητήρα συνετέλεσαν στο μαρασμό της Stirling σε μια εποχή που κατά ειρωνικό τρόπο όλοι περίμεναν το αντίθετο αφού είχε αναπτυχθεί τόσο πολύ η τεχνολογία των υλικών, και όλοι πίστευαν στην μεγάλη εξέλιξη της Stirling αφού θα βελτιωνόταν σημαντικά ο βαθμός απόδοσής της. Την δεκαετία του '20 ο Beale της Sunpower Inc. κατασκεύασε μια μηχανή βασισμένη στον θερμοδυναμικό κύκλο Stirling που όμως λάμβανε θερμότητα από τις ηλιακές ακτίνες. Λόγω των βελτιωμένων υλικών και της καλύτερης σχεδίασης, η μηχανή αυτή είχε πολύ βελτιωμένο βαθμό απόδοσης και παρήγαγε πολύ μεγαλύτερη ισχύ.

Η Ολλανδική εταιρία Philips είδε τα αποτελέσματα αυτά και άρχισε να ασχολείται και εκείνη με την Stirling για άλλους λόγους. Ήθελε να κατασκευάσει γεννήτριες ρεύματος (Εικόνα 2.5) ώστε να φτάσει σε όλα τα μέρη του κόσμου η νέα ανακάλυψη, το ραδιόφωνο, που όμως χρειαζόνταν ηλεκτρικό ρεύμα για να λειτουργήσει.



Εικόνα 2.5: Ηλεκτρική γεννήτρια της Philips (19. Hargreaves C.M.)

Τη δεκαετία το '30 η μηχανή Stirling έχει πλέον πέσει σε ολοκληρωτική απαξίωση. Λίγες μόνο πολύ μικρές μονάδες βρίσκονται σε λειτουργία και αυτές σε τροπικά μέρη, όπου χρησιμοποιούνται για να κινούν κάποια πρωτόγονα συστήματα κλιματισμού. Καμιά από τις καινοτομίες της μηχανής Stirling δεν χρησιμοποιούνταν πλέον και καμιά περαιτέρω εξέλιξη δεν είχε επιτευχθεί από τις αρχές του 20ου αιώνα. Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής ήταν μόλις 1% ενώ ο βαθμός απόδοσης κατά Carnot ξεπερνούσε το 50% .

Η Philips αμέσως συνειδητοποίησε την δυναμική εξέλιξης και ανάπτυξης των μηχανών Stirling και την υπεροχή της σε σχέση με την ατμομηχανή. Καθώς η απειλή ενός νέου παγκόσμιου πόλεμου πλανιόταν πάνω από την Ευρώπη, ξεκίνησε η Ολλανδική εταιρεία να δουλεύει πάνω στη μηχανή αυτή, ξεκινώντας από το αρχικό σχέδιο του 1816. Η έρευνα συνεχίστηκε την περίοδο 1936-45 και το 1946 η ομάδα της Phillips είχε ήδη δημοσιεύσει αρκετές μελέτες στις οποίες υπήρχαν οι πρώτες μετά από πολλά χρόνια νέες πληροφορίες για τη μηχανή Stirling. Μέσα σε διάστημα μικρότερο από 10 χρόνια, σε μια περίοδο μάλιστα πολύ δύσκολη για την ανθρωπότητα, η Phillips είχε πάρει μια σχεδόν ξεχασμένη μηχανή, αύξησε την παραγόμενη ισχύ ανά χιλιόγραμμα μάζας της κατά 50 φορές, μείωσε το μέγεθος της ανά μονάδα ισχύος με ένα συντελεστή της τάξης του 125 και βελτίωσε το βαθμό απόδοσής της κατά περίπου 15 φορές. Η μηχανή Stirling είχε πλέον περάσει σε άλλη εποχή εξέλιξης.

Η πρώτη μηχανή που κατασκευάστηκε από την Phillips είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης αναθερμαντών με πτερύγια ως επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας και όχι σωλήνων όπως εφαρμόστηκε αργότερα. Η συγκεκριμένη αυτή μηχανή παρήγαγε 0.7 kW ισχύος και κινούσε γεννήτρια 200W. (19. Hargreaves C.M.)

Παρόλα αυτά, οι εξελίξεις την εποχή εκείνη στις μπαταρίες και την ηλεκτρονική παραγκώνισαν για άλλη μια φορά τη μηχανή Stirling ως γεννήτρια. Μεγαλύτερες μηχανές που θα μπορούσαν να σταθούν καλά και εμπορικά δεν εμφανίστηκαν μέχρι το 1948. Τότε ο Henry Ford II κατασκεύασε στα εργαστήρια του Αϊντχόβεν μια μηχανή απόδοσης 11kW. Η General Motors ακολούθησε τη Philips στην έρευνά της πάνω στη

μηχανή Stirling. Η Phillips δεν πτοήθηκε από το γεγονός αυτό, πήρε το ρίσκο και με την προσθήκη και άλλων ερευνητών στην υπάρχουσα ομάδα εξέλιξε τη μηχανή όχι μόνο ως κινητήρια και θερμική, αλλά και ως ψυκτική και ως κρυογεννητική. Με το πρόγραμμα αυτό η Phillips πέτυχε και εμπορική επιτυχία. Μια μονοβάθμια τέτοια μηχανή πέτυχε θερμοκρασία 12K. Ήταν μια πολύ σημαντική ανακάλυψη που επιτεύχθηκε με την ανάστροφη λειτουργία της μηχανής.

Η χρήση του ηλίου ή του υδρογόνου ανακαλύφθηκε ότι μείωνε τις απώλειες του εργαζόμενου μέσου στο περιβάλλον και βελτιώνει σημαντικά το βαθμό απόδοσης της μηχανής. Η επιτυχία της ψυκτικής μηχανής Stirling και η ταυτόχρονη γιγάντωση των Otto και Diesel οδήγησαν σε εξαφάνιση από την αγορά της θερμικής κινητήριας μηχανής, γεγονός που μπορούσε να σημάνει το τέλος της θερμικής Stirling. Όμως ο ενθουσιασμός και η καθοδήγηση ενός από τους μηχανικούς της Phillips, του Meijer, κράτησε ζωντανή την έρευνα πάνω στην θερμική Stirling με την ανακάλυψη του ρομβικού μηχανισμού κίνησης των εμβόλων (1953) που έδωσε νέα ώθηση και μέλλον στη μηχανή αυτή.(22. Meijer R.)

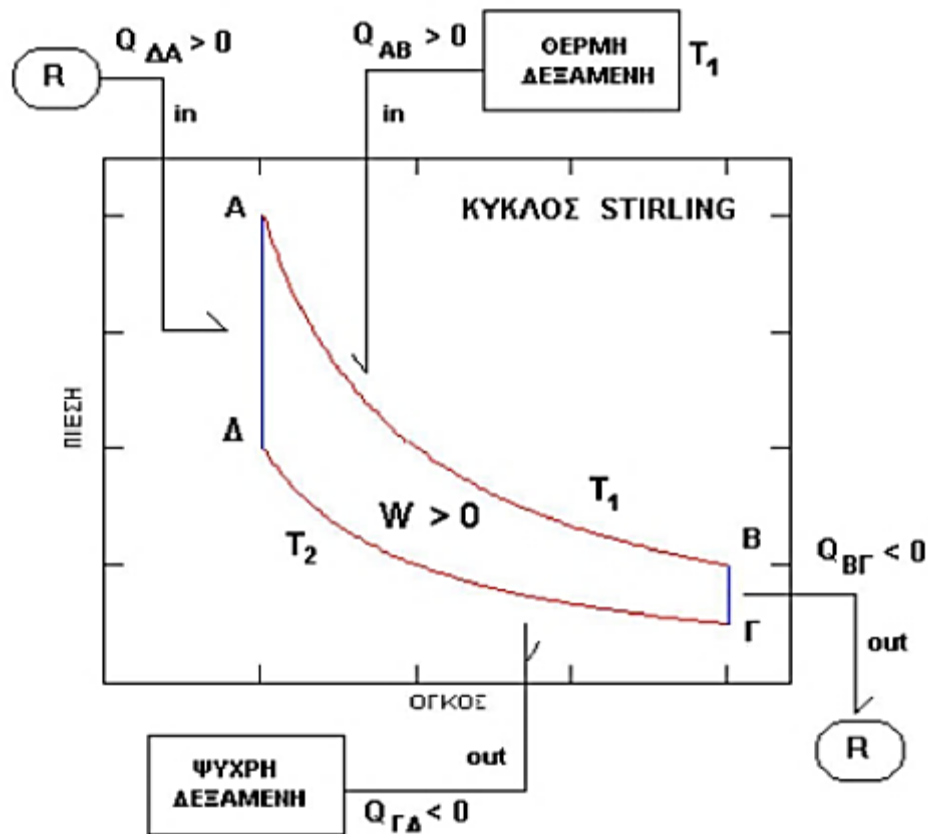
Η χρήση του ρομβικού μηχανισμού οδήγησης των εμβόλων, οι σωληνωτοί εναλλάκτες θερμότητας και εργαζόμενων αερίων με πολύ μικρά μοριακά βάρη είχαν σαν αποτέλεσμα μέχρι τα τέλη του '50 να κατασκευάσει η Phillips μηχανές με βαθμούς απόδοσης πλέον του 30% και παραγόμενη ισχύ μερικές δεκάδες kW. Το γεγονός αυτό έκανε την Phillips να εμπορεύεται πλέον την τεχνολογία της. Από τότε όλοι οι μεγάλοι ερευνητές των μηχανών Stirling με στροφαλοφόρο άξονα βασίστηκαν πάνω στις ανακαλύψεις της Phillips και χρειάζονταν την άδειά της για να προχωρήσουν. (19. Hargreaves C.M., 20. Haywood D.)

2.8. Θερμοδυναμική ανάλυση του κύκλου Stirling

Η θεωρητική απόδοση του κύκλου Stirling είναι ίση με την θεωρητική απόδοση του κύκλου Carnot εφόσον χρησιμοποιηθούν θερμές δεξαμενές μεγάλης θερμοχωρητικότητας της ίδιας υψηλής θερμοκρασίας T_1 και ψυχρές δεξαμενές μεγάλης θερμοχωρητικότητας της ίδιας χαμηλής θερμοκρασίας T_2 ($T_1 > T_2$). (16. Χατζηδάκης Σ.)

$$e_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1$$

Η πραγματική απόδοση e_r της μηχανής είναι μικρότερη της e_{th} . Στο διάγραμμα πίεσης – όγκου η δεξιόστροφη διαγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου αντιστοιχεί σε θερμική μηχανή, ενώ η αριστερόστροφη σε ψυκτική, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6.



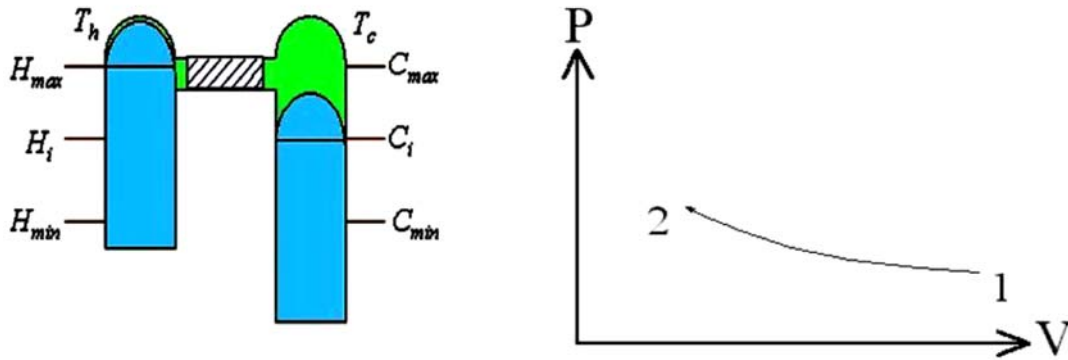
Εικόνα 2.6: Ο θερμοδυναμικός κύκλος Stirling σε διάγραμμα πίεσης – όγκου (16. Χατζηδάκης Σ.)

- *Ανάλυση μεταβολών*

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Stirling αποτελείται διαδοχικά από τέσσερις αντιστρεπτές μεταβολές. (20. Haywood D, 16. Χατζηδάκης Σ.)

a. Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση

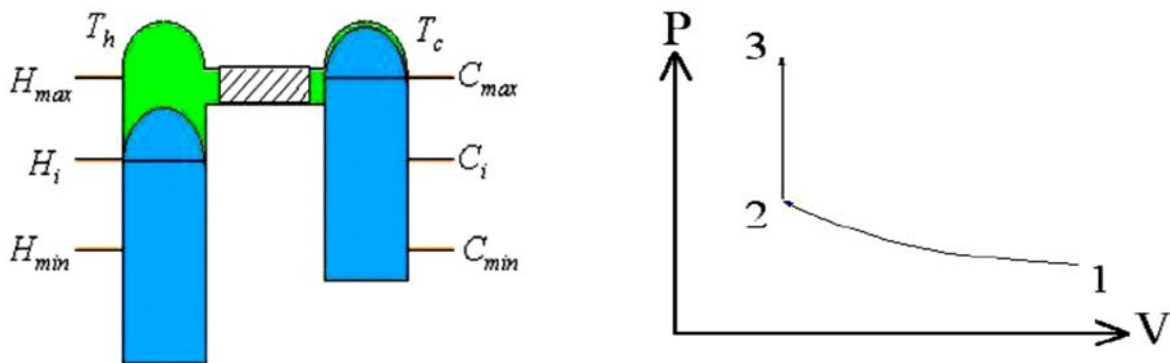
Το κρύο έμβολο κινείται προς τα πάνω σε μια τυχαία θέση (Q) συμπιέζοντας το αέριο, το οποίο ταυτοχρόνως κινείται προς τον αναγεννητή με σταθερή χαμηλή θερμοκρασία TC (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.7: Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (20. Haywood D)

b. Ισόογκη θέρμανση

Το κρύο έμβολο συνεχίζει να κινείται προς την ίδια κατεύθυνση μέχρι το άνω νεκρό σημείο (Α.Ν.Σ.), σημείο C_{max} . Ταυτόχρονα, το θερμό έμβολο κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση με το κρύο έμβολο (ώστε να διατηρείται ο όγκος σταθερός) και βρίσκεται σε μια τυχαία θέση (H_i). Έτσι το εργαζόμενο μέσο διαπερνά τον αναγεννητή.

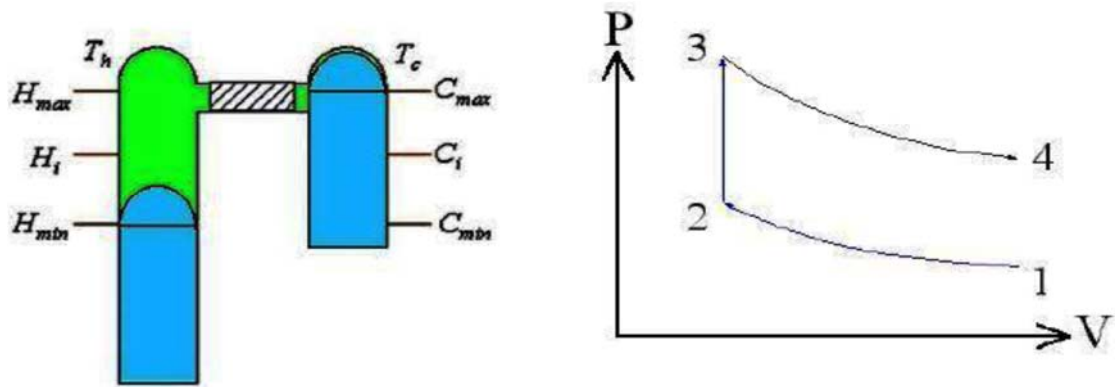


Εικόνα 2.8: Ισόογκη θέρμανση (20. Haywood D.)

Από τον προηγούμενο κύκλο λειτουργίας είχε αποθηκευτεί στον αναγεννητή θερμότητα αφού όταν το εργαζόμενο μέσο διέρχεται από αυτόν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Εφόσον ο όγκος παραμένει σταθερός, η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου προκαλεί αύξηση της πίεσης του (Εικόνα 2.8).

c. Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση

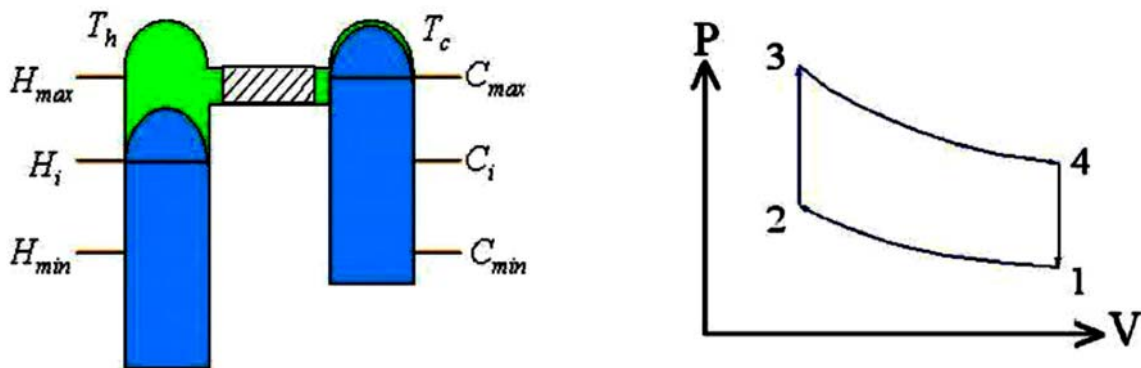
Το αέριο βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία (T_h) και εκτονώνεται. Κατά την εκτόνωση το θερμό έμβολο έχει μια ώθηση προς τα κάτω, στο Κ.Ν.Σ. το H_{min} . (Εικόνα 2.13)



Εικόνα 2.9: Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (20. Haywood D.)

d. Ισόογκη ψύξη.

Το θερμό έμβολο κινείται τώρα προς το Α.Ν.Σ. και το κρύο κινείται προς το Κ.Ν.Σ. διατηρώντας συνεχώς τον όγκο σταθερό. Το εργαζόμενο μέσο αποδίδει θερμότητα στο πλέγμα του αναγεννητή καθώς διέρχεται από αυτόν. Άρα εφόσον ο όγκος παραμένει σταθερός, η πίεση του μειώνεται (Εικόνα 2.10). Η θερμότητα αυτή αποθηκεύεται στον αναγεννητή έτσι ώστε να αποδοθεί ξανά στο εργαζόμενο μέσο, καθώς αυτό θα ξαναπεράσει από εκεί στον επόμενο κύκλο και τη φάση της ισοθερμοκρασιακής συμπίεσης.



Εικόνα 2.10: Ισόογκη ψύξη (20. Haywood D.)

2.9. Συνιστώσες κύκλου Stirling

Η μηχανή Stirling πήρε το όνομα της από το Dr. Rolf. J. Meijer διευθυντή προγράμματος στην Philips της Ολλανδίας. Η Philips ήθελε τη δημιουργία ενός νέου ονόματος για τη μηχανή "αέρα" στην περίπτωση που δεν θα υπήρχε αέρας μέσα στη μηχανή. Εάν το εργαζόμενο αέριο είναι ήλιο ή υδρογόνο, είναι φανερό ότι δεν μπορούμε πλέον να μιλάμε για μηχανή "αέρα". Η μηχανή Stirling πήρε το όνομα της προς τιμή του εφευρέτη του αναγεννητή (εξοικονομητή) και της μηχανής που κατέδειξε τη χρήση του. (22. Meijer R)

Υπάρχουν πέντε κύριες συνιστώσες σε μια μηχανή κύκλου Stirling: (27. Walker G., 20. Haywood D.)

(α) **Εργαζόμενο μέσο-** ο κύκλος Stirling είναι ένας κλειστός κύκλος και οι διάφορες θερμοδυναμικές διαδικασίες πραγματοποιούνται σε ένα εργαζόμενο μέσο που είναι παγιδευμένο μέσα στο σύστημα. Αποδεικνύεται ότι το παραγόμενο έργο μπορεί να αυξηθεί εντυπωσιακά σε μια μηχανή κύκλου του Stirling απλά με την επιλογή ενός αερίου με υψηλή ειδική σταθερά αερίου, όπως δείχνει και ο Πίνακας 2.1

Πίνακας 2.1: Ειδικές σταθερές εργαζόμενων μέσων μηχανών Stirling (15. T.O.T.E.E. 2010)

Αέριο	Ειδική σταθερά αερίου R (J/KgK)
Αέρας	319.3
Αμμωνία	488.2
Διοξίδιο του άνθρακα	188.9
Ήλιο	2077.0
Υδρογόνο	4124.2
Άζωτο	296.8
Προπάνιο	188.6
Ατμός	461.5

Ένας από τους λόγους για τους οποίους το υδρογόνο και το ήλιο χρησιμοποιούνται τόσο πολύ συχνά σαν αέρια λειτουργίας σε μεγάλες μηχανές Stirling φαίνεται από τις τιμές του παραπάνω πίνακα (ένας άλλος λόγος είναι ότι μικρότερες απώλειες ροής συμβαίνουν σε αέρια μικρότερου μεγέθους μορίων).

(β) **Εναλλάκτες θερμότητας** – 2 εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τη θερμότητα δια μέσου των ορίων του συστήματος. Ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος απορροφά θερμότητα έξω από το σύστημα και το μεταφέρει στο αέριο λειτουργίας. Ένας δεύτερος εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος απορρίπτει θερμότητα από το αέριο λειτουργίας στο περιβάλλον έξω από το σύστημα.

Παραδείγματος χάριν, σε μια μηχανή ο εναλλάκτης θερμότητας που απορροφά θερμότητα μεταφέρει τη θερμότητα από έναν καυστήρα στο αέριο λειτουργίας, και ο εναλλάκτης θερμότητας που απορρίπτει θερμότητα μεταφέρει τη θερμότητα από το αέριο λειτουργίας σε ένα ψυκτικό μέσο.

(γ) **Μηχανισμός Displacer (Μηχανισμός Μετατόπισης)** – ο μηχανισμός αυτός κινεί (ή μετατοπίζει) το εργαζόμενο μέσο μεταξύ των θερμών και ψυχρών τμημάτων της μηχανής (δια μέσω του αναγεννητή).

(δ) **Αναγεννητής (Regenerator)** – Όταν το αέριο λειτουργίας μετατοπίζεται από το θερμό άκρο της μηχανής (μέσω του αναγεννητή) στο κρύο άκρο της μηχανής, η θερμότητα "πηγαίνει" στον αναγεννητή, και η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου μειωθεί. Όταν η αντίστροφη μετατόπιση πραγματοποιείται, η θερμότητα "αποσύρεται" από τον αναγεννητή, και η θερμοκρασία του εργαζόμενου αερίου αυξάνεται. Ο αναγεννητής λειτουργεί λοιπόν ως "θερμική αποθήκη" για τον κύκλο. Αυτή η ενεργειακή εσωτερική ανακύκλωση επιτρέπει υψηλότερες αποδόσεις. Κατασκευαστικά ένας αναγεννητής αποτελείται συνήθως από ένα υλικό πλέγματος και η θερμότητα μεταφέρεται καθώς το αέριο λειτουργίας "φυσιέται" δια μέσω του πλέγματος του αναγεννητή. (24. Organ A.)

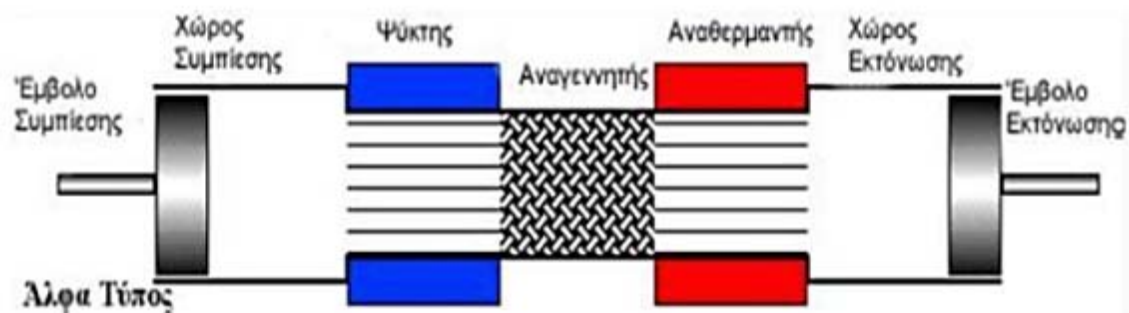
(ε) **Μηχανισμός συμπίεσης /εκτόνωσης** – Εδώ έχουμε εκτόνωση και /ή συμπίεση του εργαζόμενου μέσου. Στην περίπτωση που η Stirling είναι θερμική μηχανή αυτός ο μηχανισμός παράγει μια καθαρή ποσότητα έργου. Ενώ στην περίπτωση που η Stirling είναι ψύκτης ή μια αντλία θερμότητας, η είσοδος μιας καθαρής ποσότητας έργου απαιτείται για να μεταφέρει θερμότητα από ένα χαμηλό σε ένα υψηλό επίπεδο θερμοκρασίας (σύμφωνα με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής). (24. Organ A.)

Μια μηχανή Stirling μπορεί να κατασκευαστεί σε μια ποικιλία διατάξεων. Γενικά διακρίνονται στις: άλφα (Alpha), βήτα (Beta) διαμόρφωση, γάμα (Gamma) διαμόρφωση και στις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικά στη συνέχεια.

2.10. Διαμορφώσεις μηχανών Stirling

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι κατάταξης των μηχανών Stirling. Οι κυριότεροι τύποι είναι 3 (19. Hargreaves C.M., 27. Walker G.).

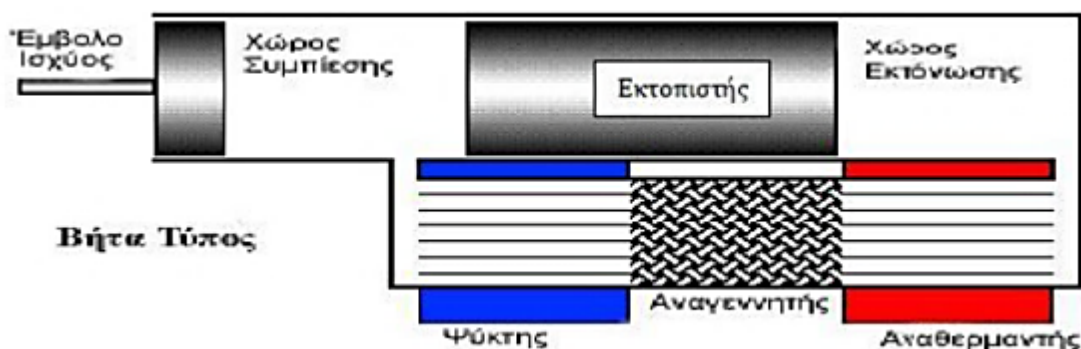
Τύπος Α. Ο κρύος χώρος συμπίεσης και το έμβολο ισχύος (PP) σε ξεχωριστό κύλινδρο από τον θερμό χώρο εκτόνωσης όπου υπάρχει το έμβολο εκτόνωσης (P) (Εικόνα 2.11). Η διάταξη τύπου Άλφα, προτείνεται από τους υποστηρικτές της χρήσης των μηχανών Stirling για αυτοκίνηση, με καλύτερο παράδειγμα την Ford. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των μηχανών Άλφα τύπου είναι ο απλός τρόπος συναρμολόγησής τους και ο μικρός όγκος τους σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ.



Εικόνα 2.11: Διαμόρφωση μηχανής Stirling τύπου Άλφα

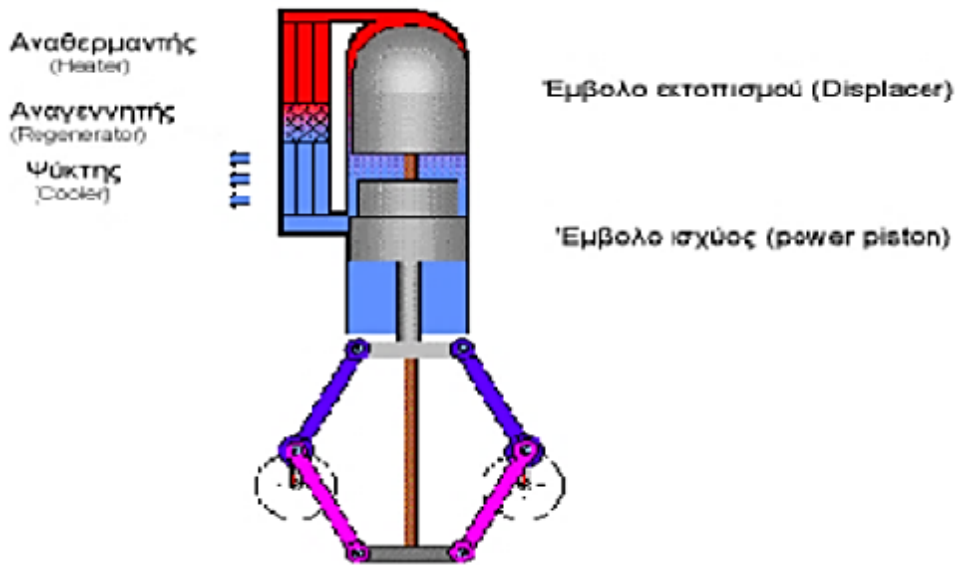
Τύπος Β. Το έμβολο ισχύος (PP) και ο εκτοπιστής (displacer, DP) στον ίδιο κύλινδρο (Εικόνα 2.12).

Οι μηχανές Βήτα τύπου θεωρούνται οι κλασσικές μηχανές Stirling και είναι δημοφιλείς λόγω της εύκολης έναρξης της λειτουργίας τους. Η αρχική μηχανή που σχεδίασε και κατασκεύασε ο Stirling ήταν μια Βήτα τύπου μηχανή.

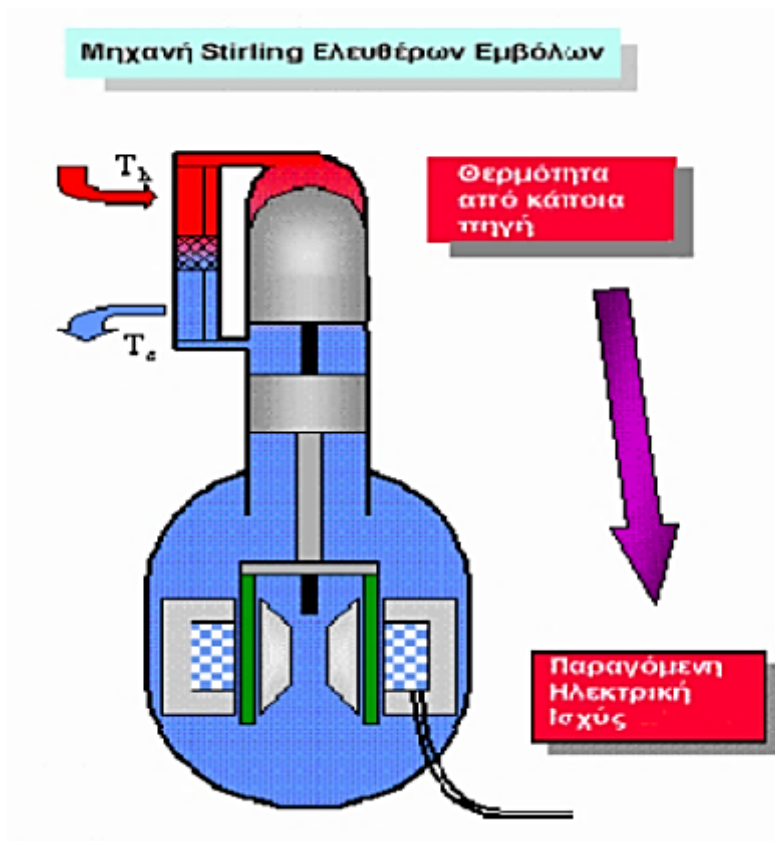


Εικόνα 2.12: Διαμόρφωση μηχανής Stirling τύπου Βήτα

Ο Meijer (1970) για λογαριασμό της Philips, ανακάλυψε τον περίφημο ρομβικό μηχανισμό οδήγησης των εμβόλων χωρίς την ανάγκη λίπανσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13, πάνω σε μια μηχανή Βήτα τύπου τις αρχές του 1960. Οι πιθανόν πιο εμπνευσμένες κατασκευές πάνω στις μηχανές Stirling, δηλαδή οι μηχανές ελευθέρου εμβόλου που ανακάλυψε ο William Beale στο πανεπιστήμιο του Ohio στα τέλη της δεκαετίας του '60, άνηκαν στις Βήτα τύπου διατάξεις Stirling. Μια τέτοια χαρακτηριστική διάταξη παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2.14. (22. Meijer R.)

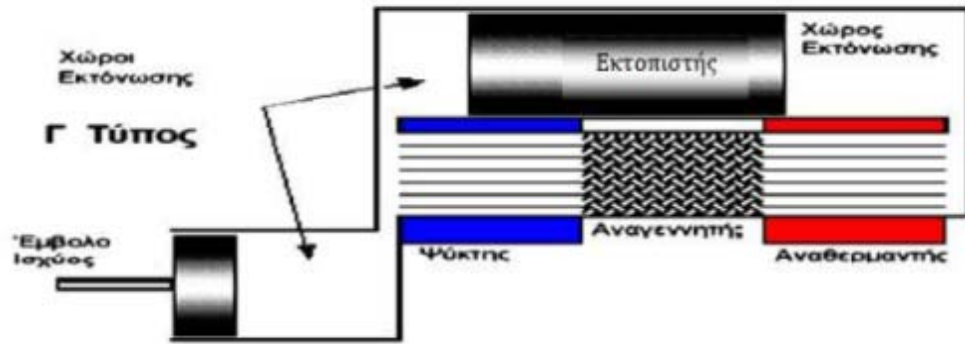


Εικόνα 2.13: Ο ρομβικός μηχανισμός οδήγησης των εμβόλων (18. Global Cooling BV)



Εικόνα 2.14: Η μηχανή ελευθέρων εμβόλων (18. Global Cooling BV)

Τύπος Γ. Το έμβολο ισχύος (PP) και ο εκτοπιστής (displacer, DP) σε διαφορετικούς κυλίνδρους (Εικόνα 2.15). Οι μηχανές Γ τύπου τείνουν να έχουν μεγαλύτερο επιζήμιο (dead) όγκο, από τους Άλφα και Βήτα τύπους.



Εικόνα 2.15: Διαμόρφωση μηχανής Stirling τύπου Γάμμα (18. Global Cooling BV)

Αυτό συχνά οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης. Γι' αυτό οι μηχανές τύπου Γάμμα χρησιμοποιούνται όταν το πλεονέκτημα της ύπαρξης δύο κυλίνδρων υπερνικά το μειονέκτημα της μειωμένης απόδοσης. Παραδείγματα των μηχανών αυτών κατασκεύασαν οι Robert και James Stirling γύρω το 1830 και η μοναδική μηχανή του Robinson. (20. Haywood D.)

2.11. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μηχανής Stirling

Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται ορισμένα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σχετικά με τη μηχανή Stirling.

➤ Πλεονεκτήματα

Αθόρυβη λειτουργία καθώς δεν υπάρχει εκτόνωση όπως στην περίπτωση των μηχανών εσωτερικής καύσης

Υψηλός βαθμός απόδοσης

Το πλήθος καυσίμων μπορεί να αξιοποιηθεί σαν καύσιμο και βιομάζα

Υψηλή αξιοπιστία και ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης

Μεγάλη διάρκεια ζωής λόγω της απλότητας του

➤ Μειονεκτήματα

Το κόστος

Η άγνοια του ευρύ κοινού για ύπαρξή της

Προβλήματα σφραγίσεως

Η έλλειψη ευελιξίας (25. Radebaugh R.)

2.12. Θαλάσσιες εφαρμογές

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 η Σουηδική εταιρία Kockums προσάρμοσε μια μηχανή Stirling στο υποβρύχιο Nacken (Εικόνα 2.16) του Βασιλικού Σουηδικού Ναυτικού. Το υποβρύχιο τοποθετήθηκε αρχικά στη δεξαμενή του ναυπηγείου, κόπηκε στα δύο και εισήχθη ένα πλήρως εφοδιασμένο σύστημα AIP μήκους οκτώ μέτρων. Τα χρόνια των πρακτικών θαλάσσιων δοκιμών που ακολούθησαν ήταν εξαιρετικά ικανοποιητικά και οδήγησαν στην εγκατάσταση των συστημάτων Stirling AIP στα νέα υποβρύχια τύπου Gotland. Αλλά τι ακριβώς είναι το σύστημα Stirling AIP και ποια τα πλεονεκτήματά του.



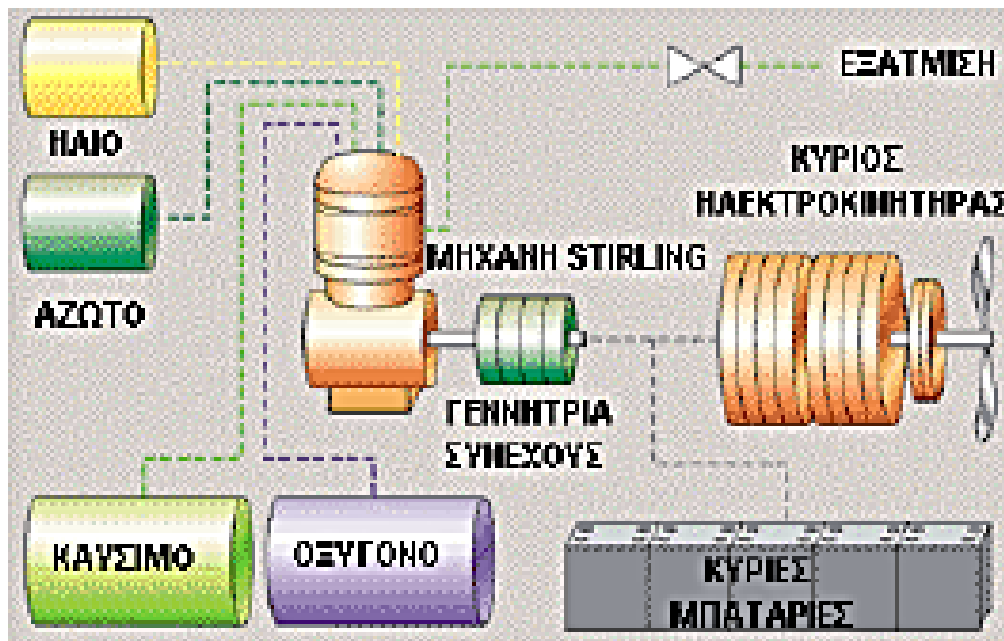
Εικόνα 2.16: Σύγχρονο Σουηδικό υποβρύχιο κινούμενο με μηχανή Stirling (21. Hirata K.)

Το κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος πρόωσης ανεξαρτήτως αέρα της Kockums (AIP) είναι η χρήση μηχανών Stirling (Εικόνα 2.17, Εικόνα 2.18). Αυτές χρησιμοποιεί diesel με καθαρό οξυγόνο σε θάλαμο καύσης υψηλής πίεσης. Η πίεση της καύσης είναι υψηλότερη από την πίεση του περιβάλλοντος θαλασσινού νερού (υδροστατική πίεση), επιτρέποντας έτσι στα προϊόντα της καύσης, που διαλύονται στο νερό, να αποβάλλονται από το υποβρύχιο χωρίς της χρήση συμπιεστή. Το οξυγόνο αποθηκεύεται σε υγρή μορφή (LOX) σε κρυογονικές δεξαμενές. Ο χρόνος παραμονής κάτω από το νερό καθορίζεται κυρίως από την ποσότητα του αποθηκευμένου υγρού οξυγόνου (LOX). Το σύστημα Kockums Stirling AIP αυξάνει έτσι σημαντικά την παραμονή του υποβρυχίου κάτω από την επιφάνεια του νερού και προσφέρει μια εναλλακτική λύση στην παροχή ενέργειας από συσσωρευτές. Αυτό σημαίνει λιγότερο συχνές απαιτήσεις, επαναφόρτισης συσσωρευτών, με τη βοήθεια γεννητριών diesel, η οποία είναι μια θορυβώδης διαδικασία. Αντί για χρόνο παραμονής κάτω από την επιφάνεια του νερού της τάξεως ολίγων ημερών, ένα υποβρύχιο με σύστημα Stirling AIP μπορεί να τον παρατείνει σε εβδομάδες, υπερτερώντας έτσι κάθε άλλου συμβατικού υποβρυχίου. Επίσης το σύστημα είναι πρακτικά απαλλαγμένο κραδασμών, αθόρυβο και 'βαρύ', δηλαδή το υπέρυθρο σήμα εκπομπής του είναι πολύ χαμηλό. Όταν εξαντληθούν τα αποθέματα υγρού οξυγόνου (LOX), το υποβρύχιο παραμένει ένα ισχυρό συμβατικό υποβρύχιο. Έχει χαμηλό κόστος

αγοράς και χαμηλό κόστος κύκλου λειτουργίας. Το σύστημα Stirling AIP μπορεί να συμπεριληφθεί στο σχεδιασμό νέων υποβρυχίων, όπως στα Σουηδικά τύπου Gotland και στα Αυστραλιανά τύπου Collins τα οποία είναι προετοιμασμένα για την εγκατάσταση αυτή. (21. Hirata K.)



Εικόνα 2.17: Το Σύστημα Stirling AIP της Kockums (21. Hirata K.)



Εικόνα 2.18: Η αρχή του συστήματος Stirling AIP της Kockums (21. Hirata K.)

2.13. Ψυκτικές εφαρμογές

Οι μηχανές Stirling λειτουργούν πολύ καλά και ως ψυκτικές. Οι δυνατότητες αυτές είχαν αναγνωριστεί ήδη από το 1834, από τον John Herschel. Ο 1876 ο Alexander Kirk περιέγραψε μια μηχανή ψύξης η οποία χρησιμοποιούνταν δέκα χρόνια. Ωστόσο, μόνο

προς τα τέλη της δεκαετίας του 1940 έγιναν σοβαρές προσπάθειες ως προς την εμπορική ανάπτυξη των ψυκτικών μηχανών κύκλου Stirling. Αυτό το ανέλαβε η εταιρεία Philips στο Eindhoven. Η πρώτη ψυκτική μηχανή παρουσιάστηκε το 1953 και ήταν ένας υγροποιητής αέρα. Από τότε, περαιτέρω έρευνα οδήγησε στην ανάπτυξη μιας ποικιλίας ψυκτικών μηχανών Stirling που αφορούν ψυκτική ικανότητα ευρέως φάσματος, και στην κατασκευή σχετικού εξοπλισμού για κρυογονική έρευνα και βιομηχανικές εφαρμογές. Ως τώρα, οι ψυκτικές μηχανές κύκλου Stirling έχουν αποδειχθεί πιο κατάλληλες για το κρυογονικό πεδίο (δηλαδή για εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες), σε αντίθεση με το πεδίο υψηλών θερμοκρασιών (οικιακού και βιομηχανικού ενδιαφέροντος) το οποίο κυριαρχείται προς το παρόν από ψυκτικές μηχανές συμπίεσης ατμού π.χ. Αμμωνίας, R22 [CHClF₂] και άλλων οικολογικότερων ψυκτικών ρευστών. Άλλοι κατασκευαστές έχουν εισέλθει στην αγορά των μικρών (και μικροσκοπικών) κρυογονικών μηχανών ψύξης οι οποίες χρησιμοποιούνται σαν βοηθητικές σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, κυρίως σε ανιχνευτικούς μηχανισμούς με υπέρυθη ακτινοβολία για ποικιλία στρατιωτικών και πολιτικών σκοπών. Η ανάπτυξη, από τον Samuel Collins στο M.I.T., μιας σχετικά μη δαπανηρής και αξιόπιστης μηχανής εκτόνωσης, ικανής να υγροποιεί Ήλιο, ήταν ανάμεσα στα πιο σημαντικά βήματα στην κρυογονική τεχνική, διευρύνοντας σε σημαντικό βαθμό τις δυνατότητες μελέτης αυτού του στοιχείου. Είναι ανυπολόγιστης αξίας τα μελλοντικά πλεονεκτήματα της έρευνας στο πεδίο της υπεραγωγιμότητας και της μικροηλεκτρονικής.

Οι συνήθεις ψυκτικές μηχανές Stirling λειτουργούν με εργαζόμενο μέσο το Ήλιο. Χρησιμοποιούνται σε αρκετά εργαστήρια για την επίτευξη χαμηλότερων θερμοκρασιών και από 12 K. Ενδεικτικά αναφέρονται: i) Βιομηχανικό ψυγείο ψυκτικής ικανότητας 20 kW στα 70 K το οποίο παράγει 250 L υγρό N₂ την ώρα με κλασματική απόσταση αέρα. Η απόδοση στη θερμοκρασία αυτή είναι περίπου 42% της τιμής της απόδοσης Carnot. Η τετρακύλινδρη αυτή μηχανή που έχει μάζα 6.500 kg και διαστάσεις 1.6x3x2 m, οδηγείται από μοτέρ 240 HP. ii) Minicooler της Philips. Έχει ψυκτική ικανότητα 1W, μήκος 22cm, βάρος 2 kg, χρόνο πτώσης της θερμοκρασίας λιγότερο από 15 min, ακουστικό θόρυβο μικρότερο από 40 dB στα 8 m, συντήρηση μετά από 2.500 ώρες λειτουργίας. Χρησιμοποιείται κυρίως για ψύξη διαφόρων ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών (lasers, ανιχνευτές υπέρυθρων κλπ). (25. Radebaugh R.)

Στην πράξη, η κίνηση του εμβόλου και του εκτοπιστή είναι σχεδόν ημιτονοειδής. Η σωστή φάση συμβαίνει όταν ο όγκος της ψυχρής εκτόνωσης προηγείται του όγκου της θερμής συμπίεσης κατά 90°. Με αυτή τη συνθήκη η ροή μάζας ή όγκου μέσω του αναγεννητή είναι σχεδόν συμφασική με την πίεση. Όπως και στα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά συστήματα, η πραγματική ισχύς υπάρχει όταν το ρεύμα και η τάση είναι συμφασικά μεταξύ τους. Δίχως τον εκτοπιστή στον κύκλο Stirling, η ροή μάζας θα προηγούνταν της πίεσης κατά 90° και κατά συνέπεια θα είχε καμία ψυκτική ικανότητα. Αν και το κινούμενο έμβολο προκαλεί και τη συμπίεση και την εκτόνωση του αερίου, απαιτείται εισαγωγή ενέργειας για την οδήγηση του συστήματος. Ο κινούμενος εκτοπιστής εξάγει ωφέλιμο έργο από το αέριο στο ψυχρό άκρο και το διοχετεύει στο θερμό άκρο όπου συμβάλλει λίγο στο έργο συμπίεσης. Σε ένα ιδανικό σύστημα, με ισόθερμη συμπίεση και εκτόνωση και τέλει αναγεννητή, η διαδικασία είναι

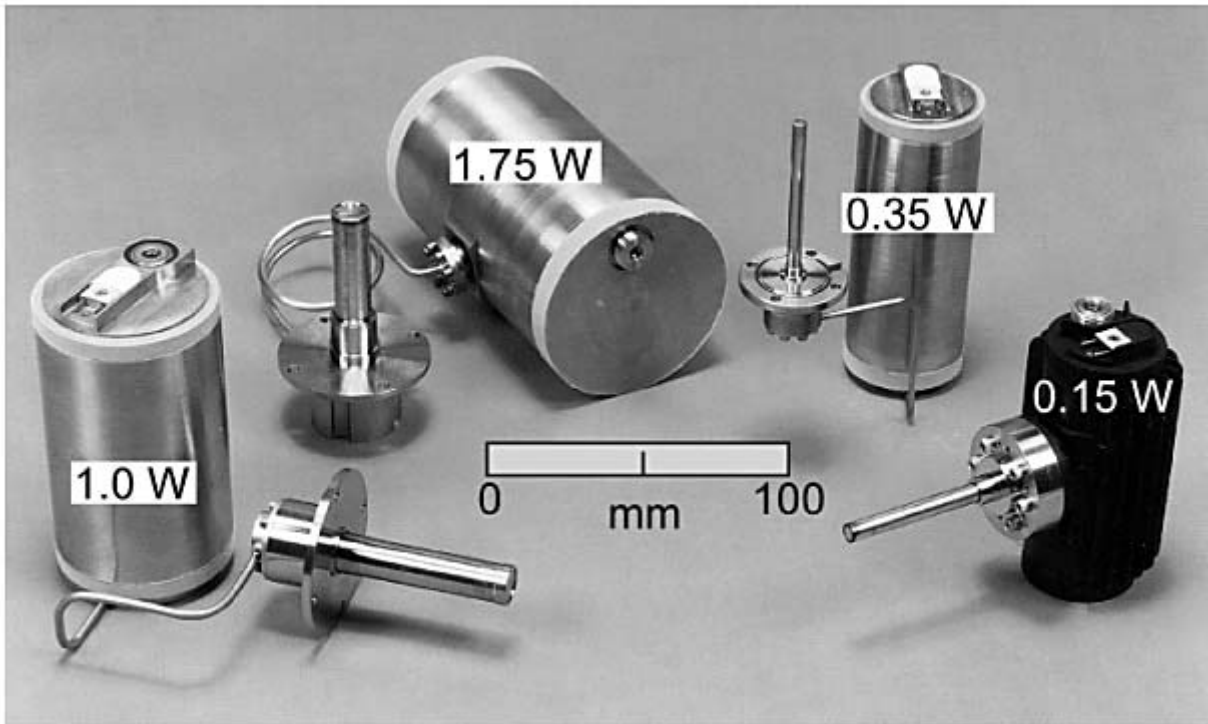
αναστρέψιμη. Έτσι, ο συντελεστής απόδοσης COP για τον ιδανικό αναγεννητή Stirling είναι ο ίδιος με τον Carnot και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$COP_{Carnot} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_0} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (2.1)$$

όπου \dot{Q}_c είναι η ωφέλιμη ψυκτική ισχύς, \dot{W}_0 είναι η εισαγωγή ενέργειας, T_c είναι η χαμηλή θερμοκρασία, και T_h είναι η υψηλή θερμοκρασία. Οι συνήθεις κρυογονικές μηχανές έχουν βαθμούς απόδοσης COP της τάξεως του 100% έως 25% του κύκλου Carnot. (25. Radebaugh R.)

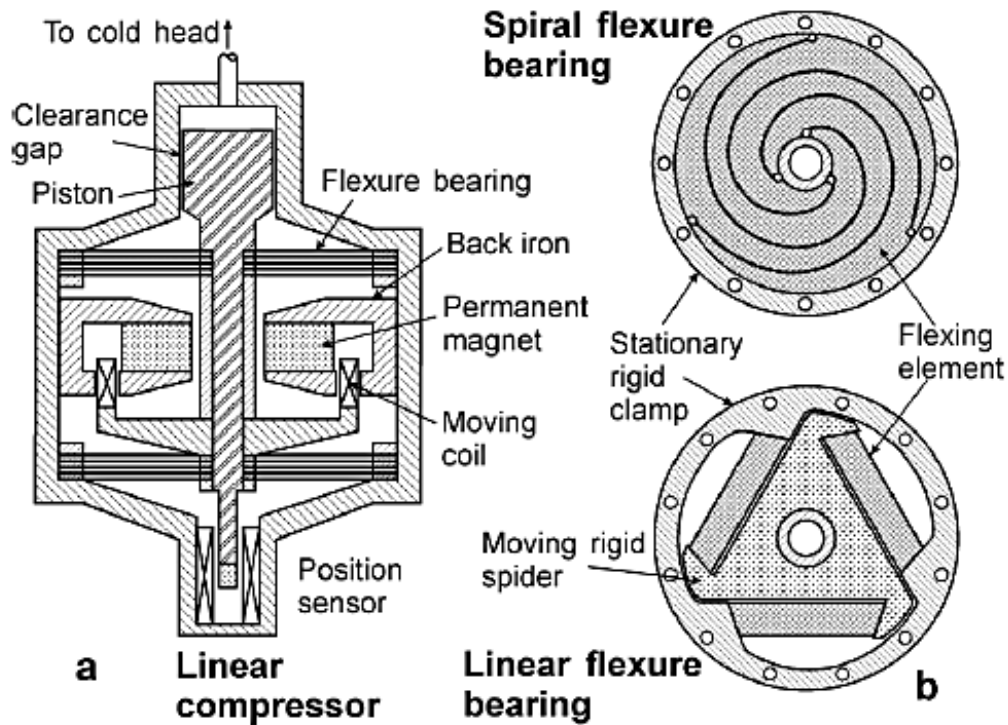
Στην Εικόνα 2.19 φαίνονται τέσσερα μεγέθη κρυογονικών μηχανών Stirling που χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές. Οι ψυκτικές ισχύεις που αναγράφονται σε κάθε τύπο είναι για θερμοκρασίες 77 με 80 K, εκτός από το σύστημα του 1,75W, το οποίο είναι για θερμοκρασία 67 K. Οι ελάχιστες αποδόσεις τους κυμαίνονται από 3 έως % του Carnot όσο το μέγεθος τους μεγαλώνει. Όλες οι κρυογονικές μηχανές που φαίνονται στην Εικόνα 2.19, έχουν γραμμικούς κινητήρες με αντικριστή διάταξη για τη μείωση των δονήσεων. Ο γραμμικός κινητήρας μειώνει τις πλευρικές δυνάμεις μεταξύ του εμβόλου και του κυλίνδρου και ο μέσος χρόνος αστοχίας τους είναι 4000 ώρες. Ο εκτοπιστής οδηγείται πνευματικά με την ταλαντούμενη πίεση του συστήματος και επειδή υπάρχει μόνο ένας εκτοπιστής αυξάνει σημαντικά τις δονήσεις.

Πρόσφατα οι προσπάθειες επικεντρώνονται για την αύξηση του μέσου χρόνου αστοχίας αυτών των κρυογονικών μηχανών. Η ανάπτυξη των κρυογονικών μηχανών για διαστημικές εφαρμογές έχει οδηγήσει σε αύξηση της αξιοπιστίας τους και μέσο χρόνο αστοχίας 10 χρόνια. (25. Radebaugh R.)



Εικόνα 2.19: Τέσσερα μεγέθη κρυογονικών μηχανών Stirling με διπλούς αντικριστούς γραμμικούς συμπιεστές (25. Radebaugh R.)

Οι ψύκτικές μηχανές Stirling που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις διαστημικές εφαρμογές, έφεραν έδρανα κάμψεως ώστε να στηρίζουν το έμβολο και τους εκτοπιστές στους αντίστοιχους κυλίνδρους με ελάχιστη ή και καθόλου επαφή με το διάκενο των 15 μm . Η Εικόνα 2.20 δείχνει δύο παραδείγματα γεωμετριών εδράνων κάμψης που χρησιμοποιούνται σε συμπιεστή. Ο εκτοπιστής επίσης χρησιμοποιεί τον ίδιο τύπο εδράνου. Αυτές οι κρυογονικές μηχανές Stirling που έφεραν έδρανα κάμψεως αρχικά ήταν πολύ ακριβές, αλλά οι εξελίξεις στην κατασκευή τους μείωσαν το κόστος των εδράνων ώστε τώρα να γίνεται έρευνα για τη χρήση τους σε συμπιεστές καθημερινής χρήσης.



Εικόνα 2.20: Σχήμα ενός (a) γραμμικού συμπιεστή με (b) δυο τύπους εδράνων κάμψεως (25. Radebaugh R.)

Στην Εικόνα 2.21 φαίνεται μία επιδαπέδια ψυκτική μηχανή, η SPC-1, της Ολλανδικής εταιρίας Stirling Cryogenics & Refrigeration BV. Έχει μάζα 600kg, εργάζεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έως 45° C, με μέγιστη σχετική υγρασία 95%, έχει ψυκτική ικανότητα 1kW στους 70K ή 3kW στους 200K, ψύχει 750 L νερό ανά ώρα και απαιτεί συντήρηση κάθε 6.000 ώρες λειτουργίας.



Εικόνα 2.21: Ψυκτική μηχανή SPC-1 (25. Radebaugh R.)

Στην Εικόνα 2.22 φαίνεται μία μικρή κρυογονική μηχανή, η CryoTel, της Αμερικανικής εταιρίας Sunpower. Έχει ψυκτική ικανότητα 6W στους 60K, συχνότητα 60Hz, καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ 155W, διάρκεια ζωής 50.000 ώρες, λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος από -40oC έως 60oC , και ενδεικτική τιμή αγοράς 10.000\$. (Ray Radebaugh 2000)



Εικόνα 2.22: Κρυογονική μηχανή CryoTel (25. Radebaugh R.)

2.13.1. Απόδοση ψυκτικής μηχανής Stirling

Σε σύγκριση με ους συμβατικούς συμπιεστές, η απόδοση μιας ψυκτικής μηχανής Stirling έχει βελτιώσεις σε δυο τομείς, όπως η μείωση των τριβών και η δυνατότητα μεταβολής της ψυκτικής ικανότητας με μεταβολή της τάσης οδήγησης.

Με τη μεταβλητή του ικανότητα, ο ψύκτης Stirling μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλά φορτία σε σταθερές συνθήκες, αλλά αν χρειαστεί το φορτίο μπορεί να αυξηθεί ακόμη και στα 70 με 80 W.

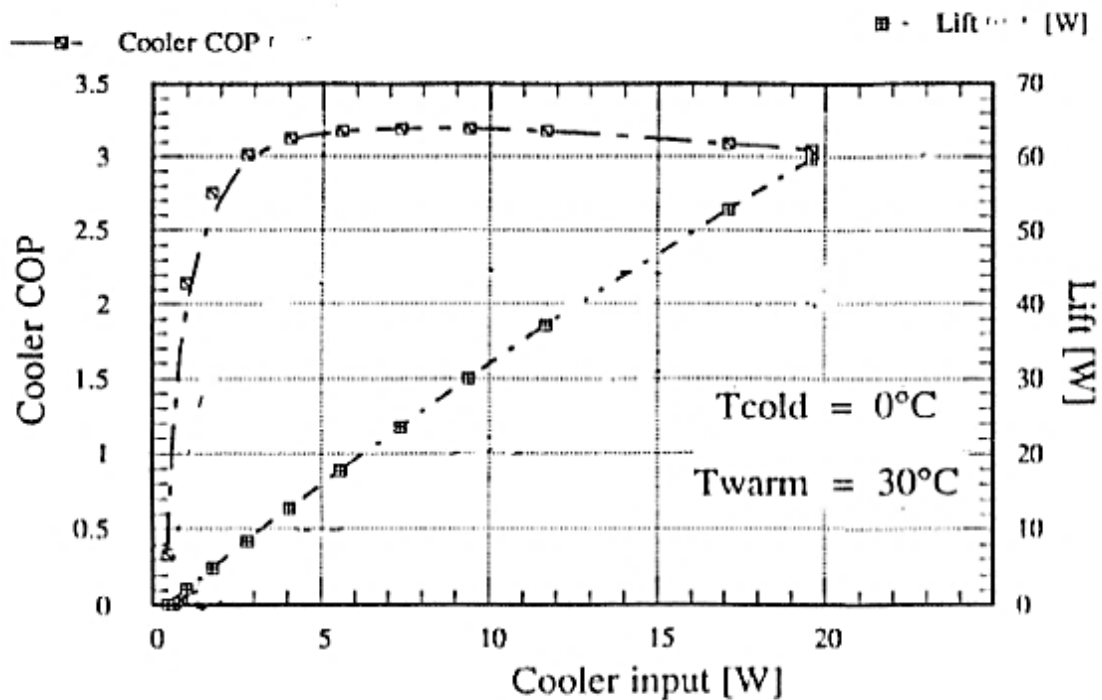
Σε μεγάλο βαθμό, οι βελτιώσεις προέρχονται από τη χρήση γραμμικού κινητήρα, ο οποίος έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους περιστροφικούς κινητήρες:

1. Πλευρικά φορτία είναι αμελητέα, έτσι εξαλείφεται η τριβή, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθούν απλά έδρανα αερίου. Οι φθορές είναι μηδαμινές και δεν απαιτείται λιπαντικό έλαιο. Επίπλέον, μιας και η τριβή είναι σχεδόν μηδέν, η μηχανική απόδοση της συσκευής είναι μεγαλύτερη από 90% (σε σύγκριση με την απόδοση ενός κινητήρα του 70% για τους περιστροφικούς κινητήρες του συμπιεστή – κινητήρα Rankine) και επίσης η εσωτερική παραγωγή θερμότητας είναι χαμηλή.
2. Το πλάτος κίνησης του εμβόλου είναι απευθείας ανάλογο με την τάση οδήγησης και κατά συνέπεια εύκολα ελέγξιμο. Αυτό οδηγεί σε αρκετά απλό χειρισμό, διαμόρφωση της ψυκτικής ικανότητας και βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης.

Μιας και η απόδοση της ψυκτικής μηχανής Stirling μπορεί να διαμορφωθεί σε ευρεία κλίμακα, ο ψύκτης θα λειτουργεί συνέχεια. Η θερμοκρασιακή διαφορά είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, γεγονός που βοηθάει στην επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης. Κατά συνέπεια δεν υπάρχουν απώλειες στον κύκλο από την έναρξη ή τον τερματισμό των ρυθμιζόμενων συμπιεστών. (18. Global Cooling BV)

Στην Εικόνα 2.23 που ακολουθεί φαίνεται η ψυκτική απόδοση της μηχανής για διαφορετικά φορτία. Ενώ η απόδοση του κύκλου Rankine μειώνεται σε χαμηλά φορτία, η μηχανή Stirling μπορεί να διατηρήσει υψηλές αποδόσεις μέχρι και φορτίο 4 W.

Ο στόχος που έχει τεθεί παγκοσμίως για τον ψυκτικό βαθμό απόδοσης είναι κατ'ελάχιστο 3.



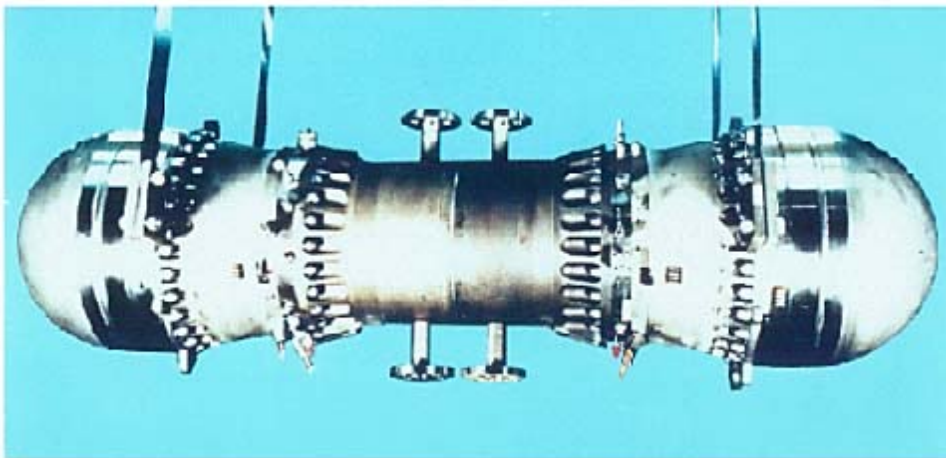
Εικόνα 2.23: Πρόβλεψη απόδοσης της ψυκτικής μηχανής Stirling ($T = 0 - 30^{\circ}\text{C}$) (μέγιστος βαθμός απόδοσης COP = 3,1) (18. Global Cooling BV)

Κόστος

Εκτός από το κέρδος σχετικά με την απόδοση με τη χρησιμοποίηση της ψυκτικής μηχανής Stirling, μπορεί να έχει και μικρότερο κόστος από ένα σύστημα Rankine αν κατασκευαστεί μαζικά. Ένα σύστημα Stirling έχει λιγότερα κινούμενα μέρη σε σχέση με ένα συμπιεστή. Οι εναλλάκτες θερμότητας έχουν μηδαμινό κόστος και κατά συνέπεια μπορούν να κατασκευαστούν λεπτότεροι και οικονομικότεροι από τους εναλλάκτες υψηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα Rankine. Με τη μαζική παραγωγή, θα μειωθεί και το κόστος συναρμολόγησης, μιας και είναι απλούστερη διάταξη, δεν χρειάζεται κάποιο ψυκτικό και οι διαδικασίες ελέγχου μπορούν να απλουστευτούν. Κατά την αποσυναρμολόγηση του, ο ψύκτης Stirling μπορεί να αφαιρεθεί σχετικά εύκολα και να ελεγχθεί για επαναχρησιμοποίηση. Εξάλλου λόγω της έλλειψης φθορών και τριβών επαφής η τεχνική διάρκεια ζωής του είναι μεγαλύτερη από 15 χρόνια. (18. Global Cooling BV)

2.14. Διαστημικές εφαρμογές

Η NASA (Glenn Research Center-Rockwell International) το Μάρτιο του 1993 δημοσίευσε μία ολοκληρωμένη μελέτη με τον τίτλο “Lunar Electric Power Systems Utilizing the SP-100 Reactor Coupled to Dynamic Conversion Systems”. Στη μελέτη αυτή παρουσιάζεται μία εφαρμογή μηχανής Stirling η οποία καταναλώνοντας πυρηνικό καύσιμο παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες ενός διαστημικού σταθμού. Ο σταθμός αυτός μπορεί να είναι εγκατεστημένος πάνω στην επιφάνεια ενός απομακρυσμένου πλανήτη ή να βρίσκεται πάνω σε διαστημικό όχημα που κινείται στις εσχατιές του Ηλιακού συστήματος όπου η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας είναι ασήμαντη. Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς είναι 550 kW στα 70Hz, η πραγματική απόδοση 29.7%, η θερμοκρασία στην έξοδο του αντιδραστήρα 1355 K, η θερμοκρασία στο θερμαντήρα 1265 K και η θερμοκρασία στον ψύκτη 602 K. Χρησιμοποιώντας σαν εργαζόμενο ρευστό το Ήλιο, έχει μέση πίεση 150 bar. Η διάρκεια ζωής του αντιδραστήρα με πλήρη ισχύ είναι 9.6 χρόνια. Οι τέσσερις επιφάνειες ακτινοβολίας ενέργειας που συνδέονται με τον ψύκτη έχουν διαστάσεις 6 x 9 m, ο δε εναλλάκτης του χρησιμοποιεί NaK για την αποβολή της θερμότητας. Για την ελαχιστοποίηση των κραδασμών η μηχανή έχει αντικριστή διάταξη. (28. Walker G.)



Εικόνα 2.24: Stirling ελευθέρων εμβόλων για διαστημική χρήση (28. Walker G.)

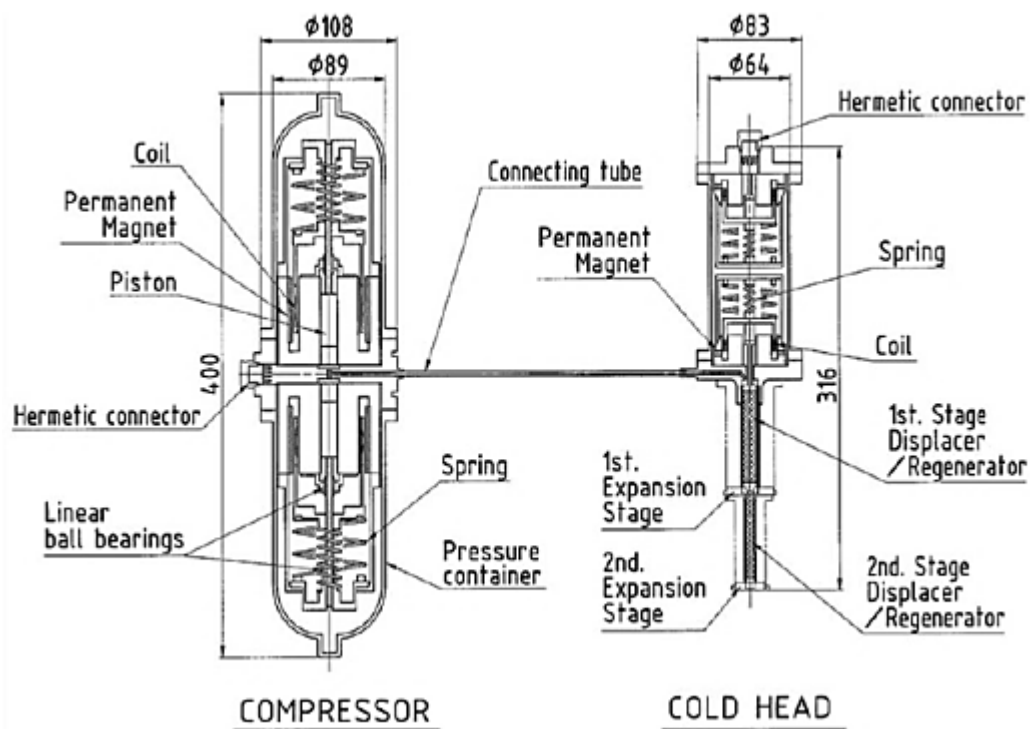
Στην Εικόνα 2.24 παραπάνω φαίνεται μια άλλη δικύλινδρη βοηθητική μηχανή Stirling ελευθέρων εμβόλων (Free piston) παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος 25 kW (12.5 kW/κύλινδρο), στα 100 Hz, με συνολική απόδοση 25%. Χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο το Ήλιο, σε μέση πίεση 150 bar, με θερμοκρασία στο θερμό άκρο 650 K και θερμοκρασία στο ψυχρό άκρο 325 K.

Στο διαστημικό κέντρο της Ιαπωνίας (JAXA) έχει αναπτυχθεί μια προηγμένη διβάθμια κρυογονική μηχανή Stirling για τα κρυογονικά συστήματα των μελλοντικών

αστρονομικών αποστολών και των αποστολών παρατήρησης της Γης. Το κλειδί είναι το SPICA, ένα Γιαπωνέζικο υπέρυθρο διαστημικό τηλεσκόπιο με πρωτεύον κάτοπτρο διαμέτρου 3.5m και την οπτική τράπεζα η οποία πρέπει να διατηρείται στους 4.5K για πάνω από πέντε χρόνια μέσω ψυκτικού συστήματος με ακτινοβολία και μηχανικού συστήματος ψύξης. Η θερμοκρασία των 4.5K επιτυγχάνεται μέσω ενός κυκλώματος Joule-Thomson (JT) σε συνδυασμό με μια διβάθμια κρυογονική μηχανή, η οποία χρησιμοποιείται για πρόψυξη στους 15-20K Αυτή η πρόψυξη συμβάλλει σημαντικά στην ψυκτική απόδοση του κυκλώματος JT. Κατά συνέπεια, η ψυκτική απόδοση και η αξιοπιστία της διβάθμιας κρυογονικής μηχανής είναι ένα ακόμη σημαντικό τεχνικό θέμα, ώστε να αποφεύγεται η μείωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας και η σταθερότητα του σημείου των οπτικών συσκευών. Στη συνέχεια περιγράφεται η ανάπτυξη της προηγμένης διβάθμιας κρυογονικής μηχανής και αναλύονται ορισμένα τεχνικά θέματα για την επίτευξη υψηλότερης ψυκτικής απόδοσης, καλύτερης αξιοπιστίας και λιγότερων ταλαντώσεων για τις επερχόμενες διαστημικές αποστολές.

Η υπάρχουσα διβάθμια κρυογονική μηχανή της τάξης των 20K αναπτύχθηκε για τον πρώτο γιαπωνέζικο υπέρυθρο δορυφόρο AKARI, ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 21 Φεβρουαρίου 2006 από το Διαστημικό Κέντρο Uchinoura. Ο σχεδιασμός αυτής της διβάθμιας κρυογονικής μηχανής βασίστηκε σε ένα διβάθμιο κύκλο Stirling που αναπτύχθηκε το 1991 για διαστημικές εφαρμογές με θερμοκρασίες κάτω από 20K.

Στην Εικόνα 2.25 παρουσιάζεται μια τομή της υπάρχουσας διβάθμιας κρυογονικής μηχανής. Αποτελείται από μια ψυχρή κεφαλή, ένα συμπιεστή και ένα σωλήνα σύνδεσης. Ο γραμμικός συμπιεστής έχει δύο αντικριστά έμβολα στερεωμένα σε έναν άξονα οδήγησης, ώστε να αλληλοαναιρούνται οι μηχανικές ταλαντώσεις. Ο άξονας οδήγησης υποστηρίζεται από δύο ομάδες γραμμικών κυλινδρικών εδράνων. Η ψυχρή κεφαλή αποτελείται από ένα διβάθμιο εκτοπιστή και έναν ενεργό ζυγοσταθμιστή που λειτουργεί ως αντίβαρο του εκτοπιστή για να μειώνονται οι μηχανικές ταλαντώσεις. Ο εκτοπιστής χρησιμοποιεί οθόνες ανοξείδωτου χάλυβα στον αναγεννητή και υποστηρίζεται από ελατήρια και σταθερές επαφές. Οδηγείται γραμμικά από ένα πηνίο και μόνιμους μαγνήτες καθώς και από τη ροή αερίου από το συμπιεστή. Η ονομαστική ψυκτική ισχύς είναι 0.2 W στους 20K με 90W εισερχόμενη ισχύ. (26. Sato Y.)

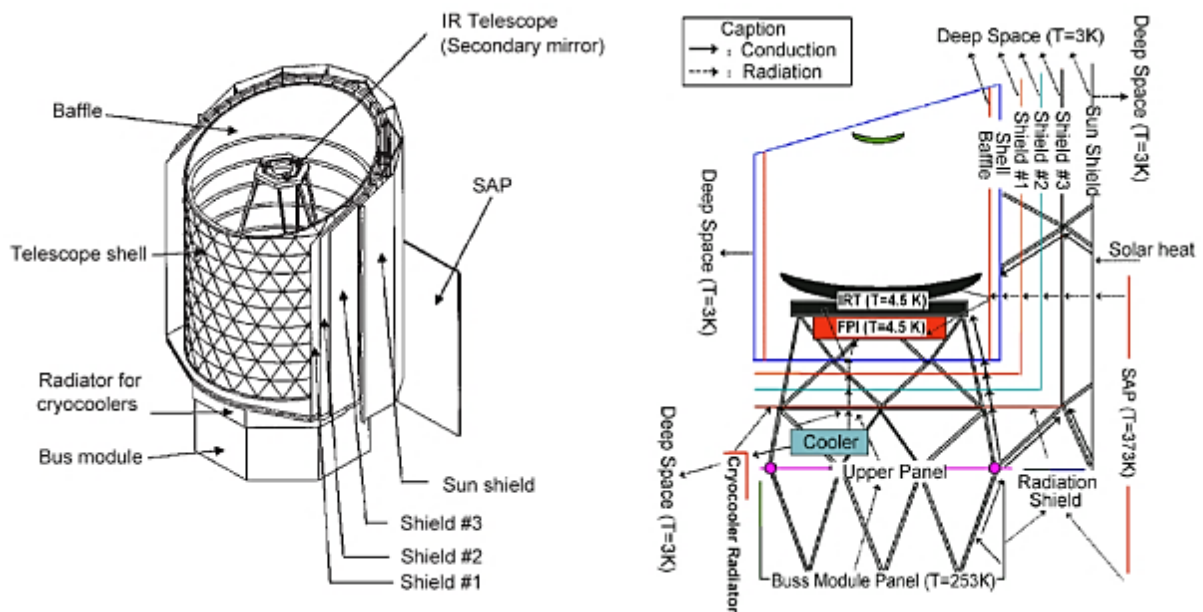


Εικόνα 2.25: Τομή της υπάρχουσας διβάθμιας κρυογονικής μηχανής Stirling (26. Sato Y.)

Εξέλιξη της υπάρχουσας εγκατάστασης

Η κρυογονική μηχανή είναι μια τεχνολογία κλειδί για την ψύξη οπτικών συσκευών ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος υπόβαθρου και να βελτιωθεί η ευαισθησία ανίχνευσης. Απαιτείται για να βελτιωθεί η απόδοση και η αξιοπιστία της ψύξης, ώστε να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την πρόοδο που συντελείται στην απόδοση των οπτικών συσκευών. Πολλές διαστημικές αποστολές στο JAXA έχουν ήδη υιοθετήσει την προτεινόμενη κρυογονική μηχανή Stirling.

Όπως αναφέρθηκε, το υπέρυθρο τηλεσκόπιο της αποστολής SPICA με διάμετρο 3.5m το οποίο διατηρείται στους 4.5K έχει υιοθετήσει μια νέα ιδέα για το κρυογονικό σύστημα, στο οποίο δε χρησιμοποιείται κρυογονικό ρευστό. Το τηλεσκόπιο και το Όργανο Εστιακού Επιπέδου (FPI) ψύχονται μέσω μιας υβριδικής μεθόδου ψύξης με ακτινοβολία και μηχανικής ψύξης για 5 χρόνια, αντί μέσω ενός βραχύβιου κρυογονικού ρευστού. Η επιθυμητή θερμοκρασία των 4.5K επιτυγχάνεται μέσω κυκλώματος JT, σε συνδυασμό με προηγμένη διβάθμια κρυογονική μηχανή για πρόψυξη στους 15-20K. Η αυξημένη ψυκτική ικανότητα της διβάθμιας κρυογονικής μηχανής της τάξης των 20K, η οποία συμβάλλει σημαντικά στην αυξημένη ψυκτική ικανότητα του κυκλώματος JT, μπορεί να διευρύνει το περιθώριο του θερμικού σχεδιασμού ώστε να συμπεριλάβει αβεβαιότητες ή ατυχήματα, παρόλο που η αρχική ψυκτική ικανότητα καλύπτει τις απαιτήσεις του SPICA. Η μείωση των ταλαντώσεων που εισάγεται από την κρυογονική μηχανή είναι επίσης σημαντικό θέμα για την αποστολή SPICA, ώστε να αποφευχθεί ο μηχανικός συντονισμός και η μείωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας και του σημείου σταθερότητας του FPI. (26. Sato Y.)



Εικόνα 2.26: Γεωμετρική διαμόρφωση του κρυογονικού συστήματος SPICA (26. Sato Y.)

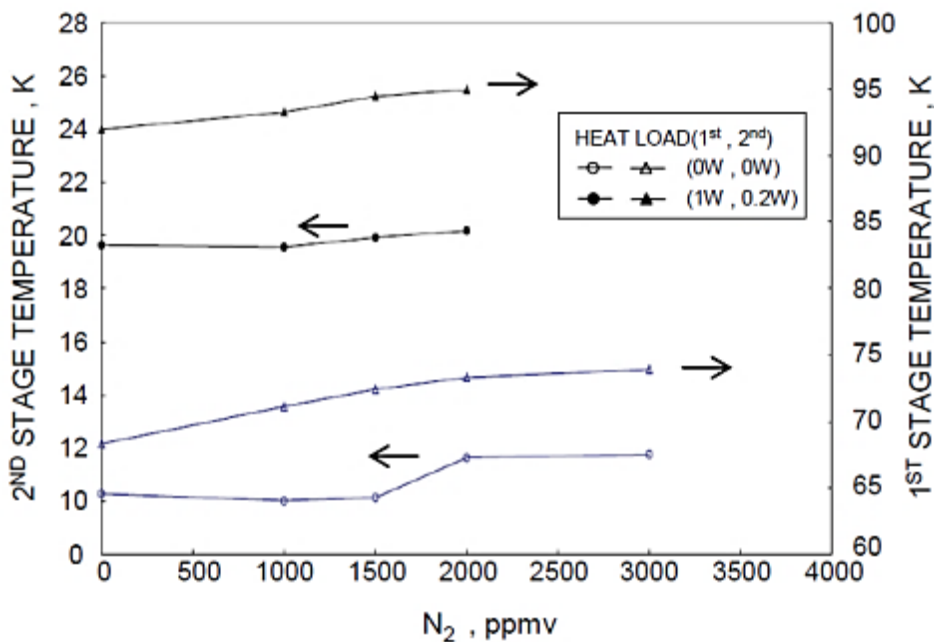
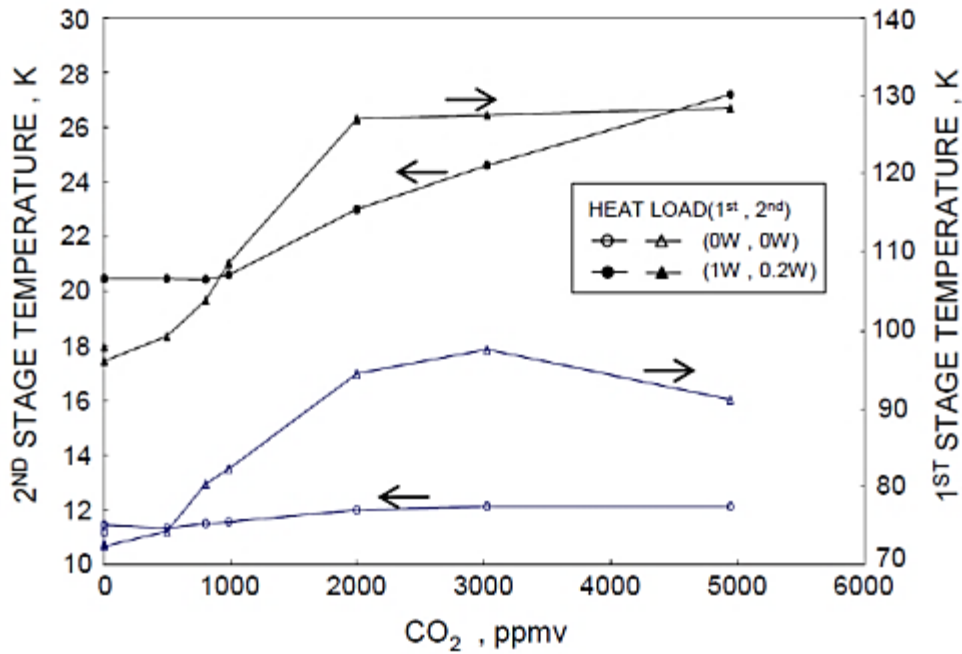
Βελτίωση της ψυκτικής ικανότητας και της αξιοπιστίας

Αύξηση της διαμέτρου του δεύτερου εκτοπιστή

Η διάμετρος του διβάθμιου κυλίνδρου του διβάθμιου κρυογονικού εκτοπιστή αυξήθηκε από 7mm σε 8mm. Άρα, η ψυκτική ικανότητα για ονομαστική ισχύ εισόδου 90W αυξήθηκε από 200 mW σε 325 mW στους 20K στην δεύτερη κρύα βαθμίδα λόγω του αυξημένου όγκου εκτόνωσης. Ταυτόχρονα, η πρώτη κρύα βαθμίδα έφερε θερμικό φορτίο 1W στους 90K.

Αξιολόγηση της επίδρασης του εξωτερικού αερίου στην ψυκτική απόδοση

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της διβάθμιας κρυογονικής μηχανής σε μια περίοδο λειτουργίας 5 ετών, διερευνήθηκε η επίδραση του επιμολυσμένου εργαζόμενου μέσου στην ψυκτική απόδοση. CO₂ σε συγκέντρωση 0-5000 ppm και N₂ σε συγκέντρωση 0-3000 ppm κατ' όγκο αναμείχθηκαν με εργαζόμενο μέσο ήλιο για να προσομοιώσουν τη μόλυνση από εσωτερική εκροή αερίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.27.



Εικόνα 2.27: Μεταβολή της ψυκτικής ικανότητας της κρυογονικής μηχανής λόγω του μολυσμένου εργαζόμενου μέσου (26. Sato Y.)

Παρατηρείστε ότι στην περίπτωση του CO₂, η θερμοκρασία της πρώτης βαθμίδας αυξάνεται απότομα όταν η συγκέντρωση του CO₂ υπερβαίνει τα 500 ppm. Γίνεται η παραδοχή ότι το CO₂ στερεοποιείται στο πλέγμα ανοξειδωτού χάλυβα του αναγεννητή, διότι η θερμοκρασία στερεοποίησης του CO₂ είναι 146K στη μερική πίεση που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση όγκου 500 ppm είναι μεγαλύτερη από το θερμοκρασιακό εύρος της πρώτης βαθμίδας του εκτοπιστή. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει μείωση της απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας του αναγεννητή προκαλώντας αύξηση της

θερμοκρασίας στην πρώτη και στη δεύτερη βαθμίδα. Αντιθέτως, για την περίπτωση του N_2 , η θερμοκρασία τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης βαθμίδας αυξάνονται βαθμιαία καθώς αυξάνεται η ποσότητα του N_2 από 0 ως 5000 ppm. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η δεύτερη βαθμίδα λειτουργεί σταθερά για ψύξη καθώς η συγκέντρωση του CO_2 διατηρείται σε επίπεδα μικρότερα των 500 ppm και ότι η πρώτη βαθμίδα είναι ευάλωτη σε μόλυνση του εργαζόμενου μέσου. Βρέθηκε επίσης ότι η μόλυνση του εργαζόμενο μέσου οδηγεί σε μη κανονική κίνηση του εκτοπιστή.

Τα διαρρέοντα προϊόντα από τις συνιστώσες της διβάθμιας κρυογονικής μηχανής αξιολογήθηκαν, διότι η καθαρότητα του εργαζόμενου μέσου επηρεάζει σημαντικά την ψυκτική ικανότητα κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας λειτουργίας, όπως υπαγορεύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα. (26. Sato Y.)

Μείωση ταλαντώσεων

Η μείωση των ταλαντώσεων που παράγονται από την κρυογονική μηχανή είναι ένα σημαντικό τεχνικό θέμα για τη διατήρηση της καλής χωρικής διακριτικής ικανότητας και της σταθερότητας των οπτικών συσκευών σε αποστολές παρατήρησης. Το επίπεδο της δύναμης δυναμικής ταλάντωσης που παράγεται από μια διβάθμια κρυογονική μηχανή καθώς και οι τρόποι μείωσής της με έλεγχο ζυγοστάθμισης είναι υπό εξέταση.

Στην παρουσιάζεται η κατασκευή ενός συστήματος μέτρησης διαταραχών λόγω ταλάντωσης. Τρεις ομάδες πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων δύναμης με συγκεκριμένη διακριτική ικανότητα εγκαταστάθηκαν κάτω από κάθε δύο πλάκες στερέωσης των κρυογονικών μηχανών, ώστε να ανιχνεύσουν την διαταραχή που μεταφέρεται από την κρυογονική μηχανή.

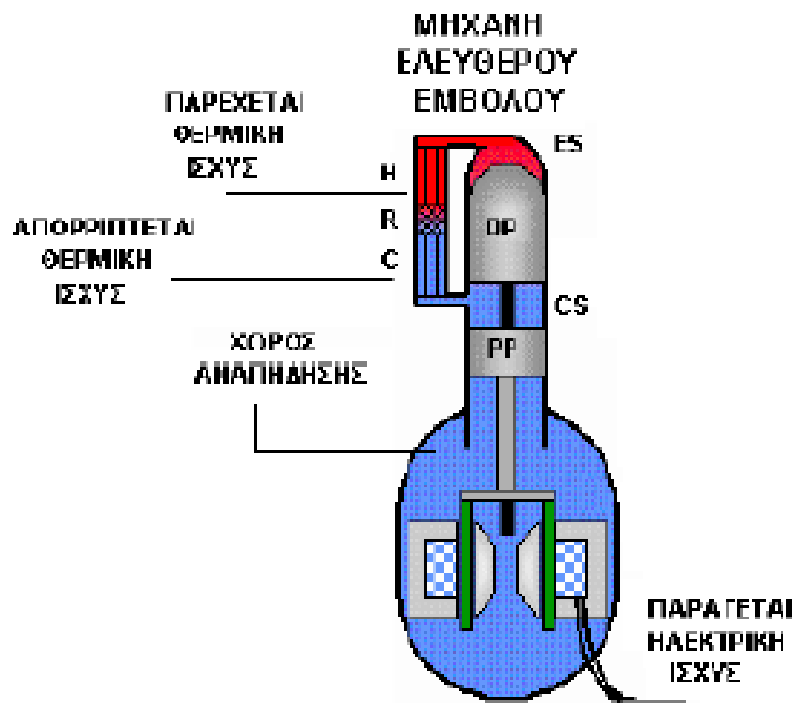
Η διβάθμια κρυογονική μηχανή έχει έναν ενεργό ζυγοσταθμιστή αντικριστά στον εκτοπιστή στην ψυχρή κεφαλή. Λειτουργεί ως αντίβαρο, το οποίο είναι συγχρονισμένο στη συχνότητα οδήγησης και αναιρεί τη δυναμική ταλάντωση του εκτοπιστή. Καθώς η κίνηση του εκτοπιστή διέπεται από τη ροή του εργαζόμενου μέσου ενώ οδηγείται ταυτόχρονα από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη, η συγχρονισμένη είσοδος τάσης τόσο στον ενεργό ζυγοσταθμιστή όσο και στον εκτοπιστή δεν είναι αρκετή για τη μείωση της δύναμης διαταραχής. Η κατάλληλη ρύθμιση του πλάτους της οδηγούσας τάσης και η διαφορά φάσης για τον ενεργό ζυγοσταθμιστή είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση της δύναμης διαταραχής που προκαλείται στην ψυχρή κεφαλή. Το επίπεδο της δύναμης διαταραχής στην ψυχρή κεφαλή μειώθηκε στο 1/50 της περίπτωσης χωρίς ενεργό ζυγοσταθμιστή. (26. Sato Y.)

2.15. Ειδικές μηχανές Stirling

2.15.1. Ελευθέρων εμβόλων

Από τις πιο καινούριες εφαρμογές του κύκλου Stirling είναι η μηχανή με διαμόρφωση ελευθέρων εμβόλων την οποία σχεδίασε και κατασκεύασε στις αρχές του 1960 ο William - T Beale (Εικόνα 2.28). Οι μηχανές αυτές λειτουργούν χωρίς φυσικές συνδεσμολογίες.

Στηρίζονται μόνο στις πιέσεις των αερίων για να μεταβιβάσουν τις σωστές κινήσεις στα παλινδρομούντα μέρη. Τέτοιες μηχανές έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας, του χαμηλού κόστους, και της αξιοπιστίας σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές Stirling.



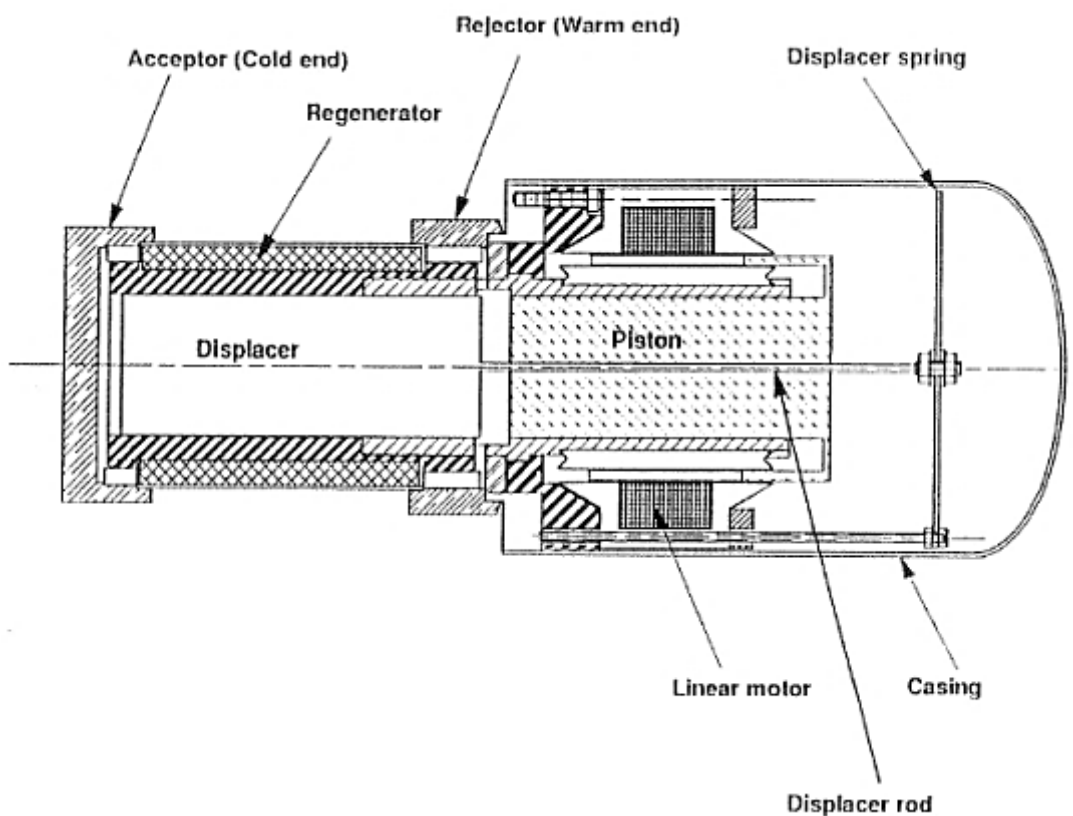
Εικόνα 2.28: Μηχανή Ελευθέρου Εμβόλου (28. Walker G.)

Οι μηχανές αυτές μπορούν να λειτουργούν με σταθερή συχνότητα και αναπτύχθηκαν για ποικίλες εφαρμογές μερικές από τις οποίες είναι οι αντλίες θερμότητας, οι ηλιακοί ηλεκτρικοί εναλλάκτες, οι απομακρυσμένες γεννήτριες ισχύος, τα ολικά συστήματα ενέργειας, οι αντλίες νερού κλπ. (28. Walker G.)

Τεχνικά στοιχεία

Η ψυκτική μηχανή Stirling οδηγείται από ένα γραμμικό κινητήρα ο οποίος είναι στερεωμένος εντός ενός δοχείου πίεσης. Το σύστημα ψύξης αποτελείται από ένα τμήμα συλλογής και ένα τμήμα απόρριψης της θερμότητας, ψυκτικό (ήλιο), ένα έμβολο και έναν

εκτοπιστή και έναν αναγεννητή. Όταν η ψυκτική μηχανή Stirling ελευθέρων εμβόλων λειτουργεί, το τμήμα συλλογής θα μεταφέρει τη θερμική ενέργεια από ψυγείο και το τμήμα απόρριψης θα αποβάλει τη θερμότητα αυτή στο περιβάλλον. Για να μεταφερθεί η θερμική ενέργεια από το σημείο συλλογής (ψυχρό άκρο) στο σημείο απόρριψης (θερμό άκρο), μεταφέρεται περίπου ένα γραμμάριο ήλιο μεταξύ των δύο άκρων εντός της μηχανής ψύξης Stirling. Στο ψυχρό άκρο το αέριο εκτονώνεται λαμβάνοντας θερμική ενέργεια από το σημείο συλλογής (με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του) και στο θερμό σημείο το ψυκτικό αέριο συμπιέζεται και απελευθερώνει θερμική ενέργεια στο σημείο απόρριψης. Το ήλιο μεταφέρεται, συμπιέζεται και εκτονώνεται από τη συνδυασμένη κίνηση δύο μερών της μηχανής ψύξης Stirling: το έμβολο και τον εκτοπιστή. Το έμβολο κινείται από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη που παράγεται από το γραμμικό κινητήρα και ο εκτοπιστής κινείται από τις δυνάμεις που δημιουργούνται από τη διαφορά πίεσης κατά μήκος του διωστήρα του εκτοπιστή. Ο αναγεννητής, ο οποίος αποτελείται από τμήματα πορώδους μέταλλο τοποθετείται μεταξύ του τμήματος συλλογής και απόρριψης, ώστε να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη απώλεια θερμότητας και άρα να βελτιωθεί η θερμική απόδοση.



Εικόνα 2.29: Τομή της ψυκτικής μηχανής Stirling ελευθέρων εμβόλων (18. Global Cooling BV)

Εκτός του να λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, το ήλιο (το οποίο βρίσκεται υπό πίεση 20 bar) χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για να ανυψώσει το έμβολο και τον εκτοπιστή από την κυλινδρική επιφάνεια. Λόγω των ρουλεμάν αερίου, εξαλείφεται η φθορά και δεν απαιτείται λίπανση.

Για τη βελτιστοποίηση της συναγωγής θερμικής ενέργειας προς και από την ψυκτική μηχανή Stirling, συνδέονται εναλλάκτες θερμότητας στο τμήμα συλλογής και στο τμήμα απόρριψης. Το ρευστό αντλείται συμπιέζεται μέσω αυτών των εξωτερικών εναλλακτών θερμότητας σε σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση ώστε να αποβάλει ενέργεια. Οι εναλλάκτες έχουν μεγάλη επιφάνεια ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική απόδοση της ψυκτικής μηχανής Stirling.

Το συνολικό μέγεθος της ψυκτικής μηχανής Stirling είναι πολύ μικρότερο από τους συμπιεστές που λειτουργούν με βάση τον κύκλο Rankine. Καθώς ο απαιτούμενος όγκος της ψυκτικής μηχανής μειώνεται, το πραγματικά χρησιμοποιούμενος όγκος στο ψυγείο μπορεί να αυξηθεί. Οι ψυκτικοί θάλαμοι μπορούν να γίνουν ορθογωνικοί, καθώς η ψυκτική μηχανή Stirling μπορεί να τοποθετηθεί εντός του θαλάμου. Η ψυκτική μηχανή Stirling ζυγίζει λιγότερο από ένα μέσο συμβατικό συμπιεστή Rankine. Το μικρό βάρος και η υψηλή απόδοση κάνουν τη μηχανή Stirling πολύ ελκυστική για εφαρμογές σε κινητές ψυκτικές μονάδες. (18. Global Cooling BV)

Άλλες εφαρμογές της τεχνολογίας ελευθέρων εμβόλων Stirling

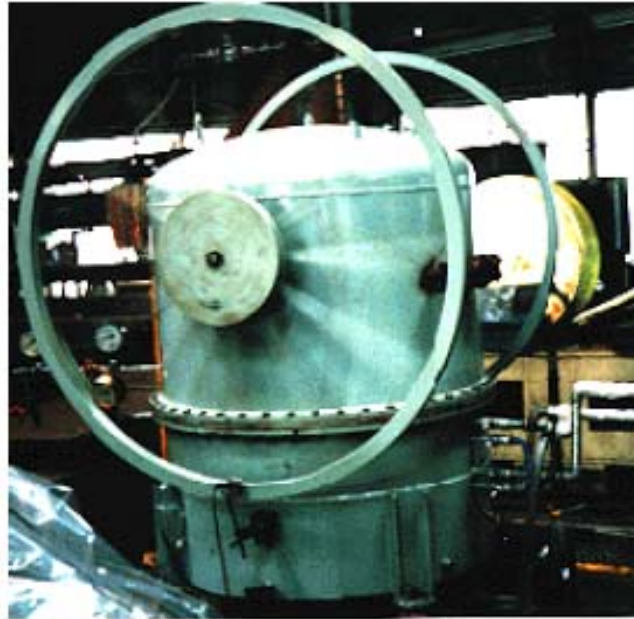
Λόγω του ότι η ψυκτική μηχανή Stirling θερμαίνεται εξωτερικά, μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε πηγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας, συμπεριλαμβανομένης της καύσης βιομάζας, της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας, ή την απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανικές διαδικασίες.

Σε μια διπλή ψυκτική μηχανή Stirling, η απαιτούμενη ισχύς για τη λειτουργία της ψύξης παρέχεται από μια μηχανή Stirling άμεσα συζευγμένη. Το πρόσθετο πλεονέκτημα ως προς τη βασική γεωμετρία ελευθέρων εμβόλων είναι η πηγή φυσικού αερίου ή άλλη πηγή καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οδηγήσει την ψύξη. Καθώς οι βασικοί κύκλοι έχουν υψηλή απόδοση, τα συνολικά λειτουργικά κόστη αναμένεται να είναι τα χαμηλότερα σε σχέση με άλλες οικιακές επιλογές ψύξης. (17. Berchowicz D.)

2.15.2. Χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας

Μία επίσης ενδιαφέρουσα κατηγορία μηχανών Stirling είναι αυτές που λειτουργούν με μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής και ψυχρής δεξαμενής. Συνήθως οι μηχανές αυτές είναι μεγάλων διαστάσεων και μαζών. Η διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να φθάσει μόλις ένα με δύο βαθμούς. Έχουν κατασκευαστεί επίσης μηχανές χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια. Η απόδοση αυτών των μηχανών είναι μικρή αλλά μπορούν να εκμεταλλευθούν θερμές πηγές όχι ιδιαίτερα υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. Γεωθερμία). Στην Εικόνα 2.30 φαίνεται μία μηχανή Ιαπωνικής προέλευσης, 300 W που λειτουργεί με υψηλή θερμοκρασία μόλις 130°C και με χαμηλή 15°C. Ο εναλλάκτης που συνδέεται με τον θερμαντήρα έχει παροχή 20 L/min

Αιθυλενογλυκόλη, ενώ ο εναλλάκτης που συνδέεται με τον ψύκτη έχει παροχή 20 L/min νερό. (17. Berchowitx D. M 1991, 29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)



Εικόνα 2.30: Μηχανή χαμηλής διαφοράς θερμοκρασίας (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)



Εικόνα 2.31: Κινητήρας Stirling χαμηλής θερμοκρασιακής διαφοράς της εταιρίας American Stirling Company που κινείται με τη θερμότητα της παλάμης (29. Ιστοσελίδα: www.stirlingenergy.com)

2.15.3. Ηλιακά συστήματα δίσκου/μηχανής

Οι μηχανές κύκλου Stirling που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά συστήματα δίσκου λειτουργούν τις καθιστά κατάλληλες για θέρμανση μέσω της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής, αλλά και λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους.

Αυτήν την περίοδο, οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται στα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι οι μηχανές SOLO 161 11-kW (Εικόνα 2.32), Kockums 25-kW (πρώην United Stirling 4-95) και Stirling Thermal Motors STM 4-120 25-kW. Όλες οι μηχανές Stirling που είναι υπό εξέταση για ηλιακές εφαρμογές κατασκευάζονται και για άλλες μη ηλιακές εφαρμογές, όπως δηλαδή για συμπαραγωγή, για υποβρύχια προωθητικά συστήματα και για υβριδικά οχήματα. Η επιτυχής εμπορευματοποίηση οποιασδήποτε από αυτές τις μηχανές θα εξαλείψει διάφορα εμπόδια στην εμπορική ανάπτυξη της τεχνολογίας δίσκου/μηχανής. (23. Moreno J.)



Εικόνα 2.32: Σύστημα δίσκου/μηχανής Stirling (23. Moreno J.)

2.15.4. Ψύξη chip

Η εταιρία MSI (Ταϊβάν) πρόσφατα ανέπτυξε ένα σύστημα ψύξης με κινητήρα Stirling μινιατούρα για τσιπ προσωπικών υπολογιστών που χρησιμοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα από το τσιπ για την οδήγηση ενός ανεμιστήρα. MSI ECOlution Chipset Cooler (Source: TweakTown)

3. Κρυογονικά αέρια και εφαρμογές τους

3.6. Εισαγωγή

Κρυογονικά αέρια: είναι αέρια σε υγρή κατάσταση που προέρχονται από το διαχωρισμό του αέρα και ευρίσκονται σε θερμοκρασίες μεταξύ -165 και -210°C . Τέτοια αέρια είναι το οξυγόνο, το άζωτο, το αργό, το ήλιο, το ξένο, το κρυπτό και το νέον. (31. ΦΕΚ 370/1988)

Κρυογονική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη δημιουργία και τις επιπτώσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Η ετυμολογία της λέξης επιτρέπει την υιοθέτηση όλων των θερμοκρασιών κάτω από το σημείο πήξης του νερού (0°C). Παρόλα αυτά ο καθηγητής Kamerlingh Onnes του πανεπιστημίου Leiden στην Ολλανδία, πρώτη φορά χρησιμοποίησε τη λέξη το 1894 για την περιγραφή της επιστήμης παραγωγής κατά πολύ χαμηλότερων θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα αναφερόταν στην υγροποίηση αερίων όπως το οξυγόνο, το άζωτο, το υδρογόνο, και το ήλιο. Το οξυγόνο υγροποιούνταν στους -183°C ορισμένα χρόνια νωρίτερα το 1887. Οι τεχνικές που υιοθετήθηκαν για την παραγωγή ακόμη χαμηλότερων θερμοκρασιών ώστε να υγροποιούνται και τα υπόλοιπα αέρια. Πιο συγκεκριμένα, για την επίτευξη τόσο χαμηλών θερμοκρασιών απαιτούνται αποδοτικοί εναλλάκτες θερμότητας. Με την πάροδο του χρόνου ο όρος κρυογονική κατέληξε να αναφέρεται σε θερμοκρασίες κάτω των -150°C .

Ο τομέας των κρυογονικών αερίων αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, όταν οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι τα μέταλλα που έχουν ψυχθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά. Κρυογονική είναι ο τομέας της φυσικής και της μηχανικής που ασχολείται με τη μελέτη των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, με τον τρόπο παραγωγής τους και τη συμπεριφορά των υλικών σε αυτές τις θερμοκρασίες. Μια διεργασία είναι κρυογονική αν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κάτω από τους -150°C ή 123K . Για τις περισσότερες κρυογονικές διεργασίες το θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται μεταξύ 4K - 77K . Συγκεκριμένοι κρυογονικοί κύκλοι, όπως ο Linde και ο Claude αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια. (38. Dash et al. 2008)

Σύμφωνα με τους νόμους της θερμοδυναμικής, υπάρχει ένα όριο στην κατώτερη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί και ονομάζεται απόλυτο μηδέν. Τα μόρια βρίσκονται στην χαμηλότερη, αλλά πεπερασμένη ενεργειακή τους κατάσταση στο απόλυτο μηδέν. Σήμερα έχει επιτευχθεί θερμοκρασία μερικά δισεκατομμυριοστά πάνω από το απόλυτο μηδέν, το οποίο αντιστοιχεί στους $-273,15^{\circ}\text{C}$ ή $-459,67^{\circ}\text{F}$, ενώ στην κλίμακα SI αντιστοιχεί στο 0 της κλίμακας Kelvin. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει το κανονικό σημείο βρασμού των πιο κοινών κρυογονικών αερίων που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Πίνακας 3.1: Κανονικό σημείο βρασμού κρυογονικών αερίων

Κρυογονικό αέριο	(K)	(°C)	(°R)	(°F)
Μεθάνιο	111.7	-161.5	201.1	-258.6
Οξυγόνο	90.2	-183.0	162.4	-297.3
Άζωτο	77.4	-195.8	139.3	-320.4
Υδρογόνο	20.3	-252.9	36.5	-423.2
Ήλιο	4.2	-269.0	7.6	-452.1
Απόλυτο μηδέν	0	-273.15	0	-459.67

Η μέτρηση των κρυογονικών θερμοκρασιών απαιτεί μεθόδους που δεν είναι ευρέως γνωστές. Τα κλασικά θερμόμετρα υδραργύρου ή οινοπνεύματος παγώνουν σε αυτές τις θερμοκρασίες. Τα θερμόμετρα αντίστασης λευκόχρυσου έχουν καλή συμπεριφορά σχετικά με την ηλεκτρική τους αντίσταση σε σχέση με τη θερμοκρασία και χρησιμοποιείται για την ακριβή μέτρηση θερμοκρασιών έως τους 20 K. Ορισμένα ημιαγώγιμα υλικά, όπως το ενισχυμένο γερμάνιο, είναι αρκετά χρήσιμα μιας και μπορούν να μετρήσουν μέχρι και θερμοκρασίες κάτω από το 1 K, αρκεί να έχουν την κατάλληλη βαθμονόμηση.

Η παραγωγή κρυογονικών θερμοκρασιών συνήθως επιτυγχάνεται με συμπίεση και εκτόνωση αερίων. Σε μια τυπική διαδικασία υγροποίησης, ο αέρας συμπιέζεται, με συνέπεια να θερμανθεί, και αφήνεται να φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου ενώ είναι ακόμη συμπιεσμένος. Στη συνέχεια ψύχεται περαιτέρω σε εναλλάκτη θερμότητας προτού αποτονωθεί ξανά σε ατμοσφαιρική πίεση. Η εκτόνωση προκαλεί ψύξη στον αέρα ενώ και ένα μέρος του υγροποιείται. Το εναπομείνον ψυχρό αέριο μέρος επιστρέφει μέσω του άλλου μέρους του εναλλάκτη θερμότητας, ώστε να προψύξει το άλλο ρεύμα του εισερχόμενου αέρα υψηλής πίεσης, προτού επιστρέψει στον συμπιεστή. Το υγροποιημένο μέρος συνήθως αποστάζεται προς παραγωγή υγρού οξυγόνου, υγρού αζώτου και υγρού αργού. Άλλα αέρια, όπως το ήλιο, χρησιμοποιούν παρόμοιες διαδικασίες και μπορούν να παράξουν ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες, αλλά απαιτούν αρκετά στάδια εκτόνωσης.

Ακολούθως παρουσιάζονται ορισμένες από τις εφαρμογές των κρυογονικών αερίων:

Στη συντήρηση και τη μεταφορά τροφίμων:

- Αντικατάσταση υγρού αζώτου στους καταψύκτες, το οποίο με την εκτόξευση του με ψεκάσμο, εξατμίζεται και καταψύχει τον εσωτερικό χώρο. Το αέριο άζωτο προστατεύει τα τρόφιμα από την οξείδωση και τα τρωκτικά
- Διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας (δηλαδή αποφυγή αφυδάτωσης τροφίμων)
- Εύκολος έλεγχος επιθυμητής θερμοκρασίας (55. Ιστοσελίδα: www.linde-gas.gr)

Στην Κρυοϊατρική:

- Κρυοβιολογία (μελέτη της επίδρασης χαμηλών θερμοκρασιών σε ζωντανούς οργανισμούς).
- Κρυοχειρουργική (χρήση καταψυχόμενου καθετήρα αντί για νυστέρι).
- Οφθαλμολογία (αποκόλληση αμφιβληστροειδούς). (42. Graham GF)

Σε Διαστημικές εφαρμογές:

Συστήματα κατάψυξης και στοιχεία καυσίμου.

Μελλοντικές εφαρμογές:

- Μεταφορά και διανομή ηλιακής ενέργειας
- Θεραπεία καρκίνου, αύξηση γονιμότητας
- Κρυογονικά καύσιμα (αποφυγή καπνού κατά τη καύση, ελάχιστη ρύπανση αέρα και νερού) (51. Ιστοσελίδα: <http://cryogenics.gr/>)

3.7. Ιστορική εξέλιξη κρυογονικής

Η Κρυογονική (cryogenics), γεννήθηκε θεωρητικά το 1877, όταν επιστήμονες ανακάλυψαν πως μικρές ποσότητες οξυγόνου είναι δυνατόν να υγροποιηθούν σε θερμοκρασία $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι σημερινοί κρυογονιστές προσπαθούν ρίχνοντας τη θερμοκρασία ενός νεκρού σώματος στους $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (και διατηρώντας το σε αυτή την κατάσταση) να το επαναφέρουν πειραματικά στη ζωή. Όμως τεράστιοι αιχμηροί κρύσταλλοι πάγου μεγαλώνουν μέσα στον οργανισμό όπως ακριβώς μεγαλώνουν και στα παράθυρα μας το χειμώνα. Μεγάλα δάκτυλα πάγου, καταστρέφουν κύτταρα και όργανα. Τα κύτταρα των θηλαστικών σε τέτοια θερμοκρασία δεν αντιδρούν σωστά. Χωρίς την παρουσία των κρυοπροστατευτικών τα κύτταρα των θηλαστικών δεν μπορούν να επιβιώσουν στο ψύχος. Το νερό εγκαταλείπει γρήγορα το κύτταρο για να ενωθεί με τον πάγο που σχηματίζεται έξω από το κύτταρο. Το κύτταρο συρρικνώνεται τόσο πολύ που η μεμβράνη του αδυνατίζει τελείως. Τελικά το απροστάτευτο συρρικνωμένο κύτταρο τρυπιέται από τον πάγο και καταστρέφεται ανεπανόρθωτα. Όταν η κυτταρική μεμβράνη σχιστεί και καταστραφεί δεν υπάρχει περίπτωση να επαναφερθεί. Οι κρυογονιστές μάλιστα, πιστεύουν πως οι συνάδερφοί τους στο μέλλον θα μπορούν να επανορθώσουν τα σώματα που έχουν φθαρεί από το ψύχος. (40. Freiman A., 33. Aaron M.)

❖ Στάδια της Κρυογονικής:

1888: Εφεύρεση γυάλινου δοχείου με διπλά τοιχώματα και κενό αέρος.

1895: Η υγροποίηση και ο διαχωρισμός του ατμοσφαιρικού αέρα στα συστατικά του. Η χρήση υγρού οξυγόνου το 1926 για την προώθηση πυραύλου ήταν καθοριστική για την εξέλιξη των εφαρμογών της κρυογονικής σε διαστημικά προγράμματα, και στην προώθηση των V-2 στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από τη Γερμανία.

1908: Υγροποίηση ηλίου. Το 1947 επιτυγχάνεται η παραγωγή υγρού ηλίου, σε θερμοκρασία 4,2 K που είχε ευνοϊκά αποτελέσματα στον οικονομικό τομέα. Το 1960 η κρυογονική μηχανή φτάνει πλέον σε σημείο να πραγματοποιεί τη μέθοδο αυτή σε θερμοκρασία 1/1.000.000 K.

1911: Ανακάλυψη υπεραγωγιμότητας.

1920-1930: Οι τεχνικές των επιστημόνων και οι προσπάθειές τους, είχαν ως στόχο να πλησιάσουν όσο το δυνατόν πιο χαμηλές θερμοκρασίες αγγίζοντας το απόλυτο μηδέν. (40. Freiman A.)

3.8. Κρυογονικά ψυκτικά συστήματα

3.8.1. Εφαρμογή σε υπεραγώγιμες συσκευές

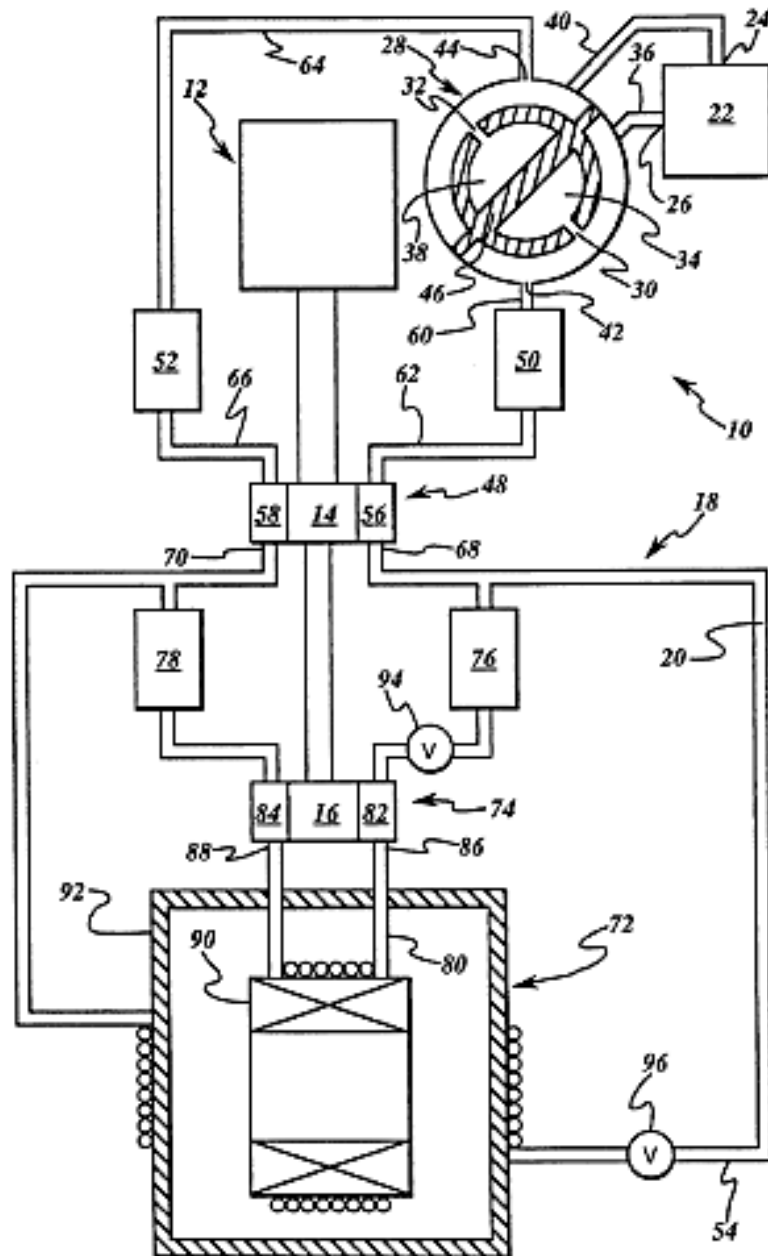
Η συγκεκριμένη εφεύρεση των Ackerman et al. (1996) [34] σχετίζεται εν γένει με την ψύξη και πιο συγκεκριμένα με ένα σύστημα κρυογονικής ψύξης, με σκοπό π.χ. την ψύξη μιας υπεραγώγιμης συσκευής. Ο όρος κρυογονικός για τη συγκεκριμένη εφαρμογή υποδηλώνει θερμοκρασία χαμηλότερη από τους 150K.

Οι υπεραγώγιμες συσκευές περιλαμβάνουν τα συστήματα απεικονίσεων μαγνητικού συντονισμού (MRI) για ιατρικές διαγνώσεις, υπεραγώγιμους ρότορες για ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες και συσκευές μαγνητικής αιώρησης για μετακίνηση τρένων.

Ορισμένοι υπεραγώγιμοι μαγνήτες ψύχονται με αγωγή μέσω μιας κρυογονικής ψυχρής κεφαλής, όπως στην περίπτωση της συμβατικής κρυογονικής συσκευής Gifford-McMahon, η οποία είναι στερεωμένη στο μαγνήτη. Μια τέτοια στήριξη της κρυογονικής ψυχρής κεφαλής στο μαγνήτη δημιουργεί δυσκολίες όπως φαινόμενα παραμορφωτικών μαγνητικών πεδίων στην ψυχρή κεφαλή το κινητήρα, μετάδοση ταλαντώσεων από την ψυχρή κεφαλή στο μαγνήτη, θερμοκρασιακές διαφορές κατά μήκος των θερμικών συνδέσεων μεταξύ της ψυχρής κεφαλής και του μαγνήτη. Τέτοιου είδους ψύξη δεν είναι γενικά κατάλληλη για περιστρεφόμενους μαγνήτες όπως ο υπεραγώγιμος ρότορας.

Άλλοι υπεραγωγάμοιο μαγνήτες ψύχονται μέσω της απευθείας επαφής του υγρού ήλιου με το μαγνήτη, με αποτέλεσμα το βρασμό του υγρού ήλιου κατά τη διάρκεια της ψύξης και τη μετατροπή του σε αέριο ήλιο το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Η τοποθέτηση του υγρού ήλιου σε περίβλημα κενού αέρος αυξάνει το μέγεθος του συστήματος, πράγμα το οποίο είναι ανεπιθύμητο σε πολλές εφαρμογές υπεραγωγάμων μαγνητών.

Αυτό που απαιτείται είναι ένα βελτιωμένο κρυογονικό σύστημα ψύξης για την ψύξη των υπεραγωγάμων συσκευών. Επιπλέον, το σύστημα ψύξης πρέπει να είναι απομακρυσμένο από το μαγνήτη. Ακόμα, πρέπει να είναι ικανό να ψύξει πολλούς υπεραγωγάμους πυρήνες και να μπορεί να ψύξει έναν περιστρεφόμενο υπεραγωγάμο μαγνήτη, όπως ο ρότορας μιας ηλεκτρικής γεννήτριας. Το σύστημα περιλαμβάνει μια κρυογονική ψυχρή κεφαλή και ένα σύστημα ψυκτικού με κρυογονικό αέριο, όπως το αέριο ήλιο. Το κύκλωμα ψύξης περιλαμβάνει κυκλοφορητή αερίων, μια βαλβίδα, έναν εναλλάκτη θερμότητας και ένα μονοπάτι ρευστού ψύξης. Ένας κυκλοφορητής αερίου έχει ένα ακροφύσιο εισόδου χαμηλής πίεσης και ένα ακροφύσιο εισόδου υψηλής πίεσης, και μια βαλβίδα έχει μια πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα θύρα. Η βαλβίδα δημιουργεί και αλλάζει τις συνδέσεις του ρευστού μεταξύ της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας θύρας και των ακροφυσίων εισόδου και εξόδου του κυκλοφορητή αερίου. (34. Ackermann)



Εικόνα 3.1: Κρυογονική σύστημα ψύξης υπεραγωγίσιμης συσκευής (34. Ackermann)

Ένας εναλλάκτης θερμότητας έχει ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον τμήμα το καθένα σε θερμική επαφή με την κρύα βαθμίδα. Ένα μονοπάτι ροής ψυκτικού έχει ένα άκρο σε επικοινωνία με το πρωτεύον τμήμα του εναλλάκτη και ένα δεύτερο άκρο σε επικοινωνία με το δευτερεύον τμήμα του εναλλάκτη. Το μονοπάτι ροής του ψυκτικού μπορεί να τοποθετηθεί σε θερμική επαφή με μια υπεραγωγίσιμη συσκευή.

Ένας κυκλοφορητής αερίου έχει ένα ακροφύσιο εισόδου χαμηλής πίεσης και ένα ακροφύσιο εισόδου υψηλής πίεσης, και μια βαλβίδα έχει μια πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα θύρα. Η βαλβίδα δημιουργεί και αλλάζει τις συνδέσεις του ρευστού μεταξύ της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας θύρας και των ακροφυσίων εισόδου και εξόδου του κυκλοφορητή αερίου. Ένας εναλλάκτης θερμότητας έχει ένα πρωτεύον και ένα

δευτερεύον τμήμα το καθένα σε θερμική επαφή με την κρύα βαθμίδα. Ένα μονοπάτι ροής ψυκτικού έχει ένα άκρο σε επικοινωνία με το πρωτεύον τμήμα του εναλλάκτη και ένα δεύτερο άκρο σε επικοινωνία με το δευτερεύον τμήμα του εναλλάκτη. Το μονοπάτι ροής του ψυκτικού μπορεί να τοποθετηθεί σε θερμική επαφή με μια υπεραγωγίμη συσκευή.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης είναι αρκετά, όπως παρουσιάζεται παραστατικά στην Εικόνα 3.1.. Η χρήση αναγεννητών στο ψυκτικό κύκλωμα βελτιώνει την απόδοση του κρυογονικού συστήματος ψύξης σε σύγκριση με τη χρήση πολυπλοκότερων και ακριβότερων εναλλακτών ανάκτησης θερμότητας. Η χρήση κρυογονικού αερίου στο κύκλωμα ψύξης επιτρέπει την ψύξη πολλών μαγνητών, μέσω της προσθήκης μονοπατιών στο κύκλωμα προς τους επιπλέον μαγνήτες. (34. Ackermann)

3.8.2. Εφαρμογή στον επιταχυντή LHC (Large Hadron Collider)

Μια αντίστοιχη εφαρμογή για την ψύξη υπεραγωγίμης συσκευής μέσω κρυογονικού συστήματος έγινε στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) στο CERN της Γενεύης, και σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από Ελληνική ομάδα επιστημόνων.

Οι υπεραγωγίμοι μαγνήτες αποτελούν τις πιο εξελιγμένες τεχνολογικές κατασκευές στον επιταχυντή LHC. Υπεραγωγιμότητα είναι η ιδιότητα ορισμένων υλικών να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα με σχεδόν μηδενική αντίσταση, όταν βρεθούν σε περιβάλλον πολύ χαμηλής θερμοκρασίας, περίπου 1,9°K. Έτσι, γίνεται δυνατή η διέλευση μεγάλης ποσότητας ρεύματος μέσα από υπεραγωγίμα καλώδια μικρής σχετικά διαμέτρου. Ταυτόχρονα μπορούν να κατασκευαστούν συμπαγείς μαγνήτες, που λειτουργούν με πολύ μικρότερο κόστος ηλεκτρικής ισχύος από ότι οι συμβατικοί μαγνήτες με αγωγούς χαλκού ή αλουμινίου. Η βασική δομική μονάδα του επιταχυντή είναι το εικονιζόμενο υπεραγωγίμο μαγνητικό δίπολο, όπως αναλύεται στην Εικόνα 3.2.

Το βασικό σύστημα για την λειτουργία του μοναδικού υπεραγωγίμου επιταχυντή LHC είναι το σύστημα ψύξης (Cryogenesis) που τροφοδοτεί όλα τα μαγνητικά στοιχεία (δίπολα και τετράπολα) του LHC. Όλα τα υπεραγωγίμα καλώδια NbTi των μαγνητών θα βρίσκονται σε θερμοκρασία 1,8 K χρησιμοποιώντας υπέρρευστο υγρό ήλιο ως μέσο ψύξης. Οι αγωγοί αυτοί πρέπει να παραμείνουν σε υπεραγωγίμη κατάσταση ακόμα και όταν το διερχόμενο ρεύμα μεταβάλλεται. Η διατήρηση αυτή είναι βασική λόγω του ισχυρού μαγνητικού πεδίου. (41. Gazis E.)

Το έργο της Ελληνικής ομάδας, εστιάζεται κυρίως στην εγκατάσταση και έλεγχο λειτουργίας του κρυογονικού συστήματος και του συστήματος τροφοδοσίας υψηλής ισχύος των υπεραγωγίμων μαγνητικών διπόλων. Το κρυογονικό σύστημα θα τροφοδοτεί με ψύξη εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας όλα τα υπεραγωγίμα συστήματα του επιταχυντή LHC. Ενώ το σύστημα τροφοδοσίας υψηλής ισχύος θα τροφοδοτεί τα μαγνητικά δίπολα και τετράπολα σε συνθήκες μοναδικές μέχρι στιγμής, σε θερμοκρασία περίπου 1,9°K. Το εν λόγω σύστημα παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Λεπτομερής ανάλυση του υπεραγωγίου διπόλου, βασικού στοιχείου του επιταχυντή LHC, μαζί με το κρυογονικό σύστημα για την λειτουργία του σε εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία περίπου 1,9 K (41. Gazis E.)

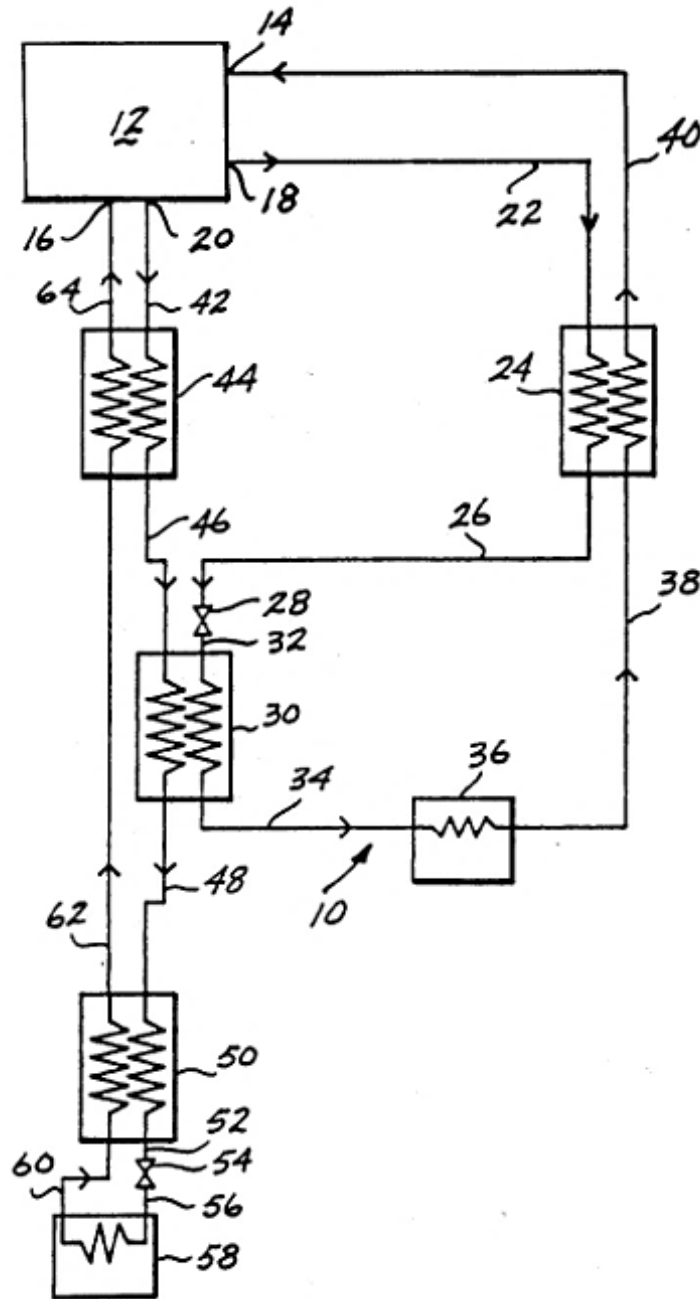
Περιγραφή κρυογονικού συστήματος ψύξης

- Οι πρωτεύοντες διπολικοί μαγνήτες δουλεύουν σε θερμοκρασία 1.9K
- Ο λόγος είναι ότι όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο υψηλό το κρίσιμο ρεύμα σε ένα υπεραγωγό μαγνήτη, και άρα τόσο υψηλότερο το μαγνητικό πεδίο
 - Σε αυτή τη θερμοκρασία το υγρό ήλιο γίνεται υπέρ-υγρό (με πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα)
- Όμως το ήλιο βράζει στους 4.5K
- Ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα με τέσσερα εργοστάσια ψύξης, το καθένα από τα οποία έχει δυο υποσύστημα:
 - Ένα ‘συμβατικό’ που ψύχει στους 4.5K
 - Ένα δεύτερο που δουλεύει σε πίεση 15mbar (30. Κορατζίνος Μ. 2011)

3.8.3. Κρυογονικό σύστημα με κύκλο πρόψυξης

Ένα άλλο κρυογονικό σύστημα ψύξης σχεδίασε ο Hersey νωρίτερα το 1989, που περιλάμβανε έναν ηλεκτροχημικό συμπιεστή για τη συμπίεση ενός πρώτου και ενός δεύτερου κρυογονικού αερίου. Στο συμπιεστή είναι συνδεδεμένοι ένας πρώτος και ένας

δεύτερος ψυκτικός βρόχος , όπου ο πρώτος παρέχει πρόψυξη στον δεύτερο και ο δεύτερος βρόχος που ψύχει ένα πρωτεύον φορτίο σε μια θερμοκρασία που είναι σημαντικά κάτω από την ελάχιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται από τον πρώτο ψυκτικό βρόχο. Η συσκευή –πατέντα του Hersey φαίνεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση της κρυογονικής διάταξης με σύστημα πρόψυξης (43. Hersey)

Ένα κρυογονικό σύστημα ψύξης που χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως πρωτεύον ψυκτικό ρευστό και το οξυγόνο ως δευτερεύον ψυκτικό ρευστό για να προψύξει το υδρογόνο κάτω από τη θερμοκρασία μετατροπής του. Σε μια πρώτη προσέγγιση της διάταξης, το σύστημα ψύξης περιλαμβάνει έναν ηλεκτροχημικό συμπιεστή που λειτουργεί για να συμπιέσει το υδρογόνο και το οξυγόνο χωρίς κινούμενα μέρη. Το συμπιεσμένο οξυγόνο

από την ηλεκτροχημικό συμπίεστή περνά από έναν αναγεννητή, όπου συναλλάσσει θερμότητα με οξυγόνο χαμηλής πίεσης, και εκτονώνεται μέσω μιας βαλβίδας εκτόνωσης Joule-Thomson, απορροφώντας θερμότητα από ένα ρεύμα συμπιεσμένου υδρογόνου σε έναν εναλλάκτη πρόψυξης. Το οξυγόνο χαμηλής πίεσης παρέχει πρόσθετη ψύξη σε έναν παρασιτικό εναλλάκτη θερμότητας, επιστρέφοντας στον ηλεκτροχημικό συμπίεστή μέσω του αναγεννητή. Το ρεύμα του συμπιεσμένου υδρογόνου περνά από τον αναγεννητή ανταλλάσσοντας θερμότητα με ένα ρεύμα υδρογόνου χαμηλής πίεσης, και ψύχεται καθώς περνά από τον εναλλάκτη πρόψυξης. Ένας δεύτερος αναγεννητής παρέχει πρόσθετη ψύξη μέσω μεταφοράς θερμότητας με το ρεύμα υδρογόνου χαμηλής πίεσης, πριν από την εκτόνωση του συμπιεσμένου υδρογόνου σε βαλβίδα Joule-Thomson. Το εκτονούμενο υδρογόνο ψύχει ένα φορτίο στον εναλλάκτη θερμότητας. Στη δεύτερη προσέγγιση, συμπιέζεται νερό μέσω μιας μηχανικής αντλίας θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσο μέσο μεταξύ των ρευμάτων υδρογόνου και οξυγόνου υψηλής και χαμηλής πίεσης. Και στις δύο διατάξεις, το αέριο υδρογόνο και το αέριο οξυγόνο ενώνονται ηλεκτροχημικά σχηματίζοντας νερό μέσω μιας καταλυτικής μεμβράνης και στη συνέχεια διαχωρίζονται ηλεκτρολυτικά σε ρεύματα υδρογόνου και οξυγόνου με μια άλλη καταλυτική μεμβράνη. (43. Hersey)

3.8.4. Για εργαστηριακές εφαρμογές

Τα κρυογονικά συστήματα μπορούν να είναι και κλειστού τύπου, καθώς με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει ανάγκη να αγοράσει κάποιος ξανά υγρό ήλιο, ύστερα από την αρχική εγκατάσταση του εξοπλισμού. Γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο όταν πρόκειται για εργαστηριακές εφαρμογές.

Η εργαστηριακή συσκευή λειτουργεί με παραγωγή συνεχούς ρεύματος ψυχρού ήλιου ή αζώτου. Το ρεύμα ήλιου ή αζώτου ρέει εντός του ψυγείου, όπου το αέριο ψύχεται. Το ψυχρό αέριο διασχίζει τη γραμμή μεταφοράς και εξέρχεται από το ακροφύσιο. Το αρχικό υγρό ήλιο παρέχεται στον καταψύκτη από έναν κύλινδρο αερίου. Υπάρχουν διαθέσιμα συστήματα με τελική θερμοκρασία 5K, 8K, 11K ή 20K.

Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται ένα τέτοιο σύστημα με την εμπορική ονομασία Cryo Industries CRYOCOOL, που επιτυγχάνει 20 K και φέρει μικροσκόπιο για την εξέταση ευαίσθητων δειγμάτων. (36. Cryo Industries of America Inc.)



Εικόνα 3.4: Κρυογονική συσκευή CRYOCOOL-G2b (20K) με μικροσκόπιο (36. Cryo Industries of America Inc.)

3.8.5. Κρυογονικοί καταψύκτες τροφίμων

Μια εύκολη μέθοδος, που μάλιστα επιτυγχάνει ταχύτερη κατάψυξη, είναι ο κατευθείαν ψεκάσμος των προϊόντων με υγρό άζωτο ή διοξείδιο του άνθρακα (κρυογονικά αέρια). Κάποιες φορές, η κρυογονική κατάψυξη χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποια άλλη συμβατική μέθοδο κατάψυξης: Σε ένα προκαταρκτικό στάδιο, ψεκάζεται το προϊόν με κρυογονικό αέριο, ώστε να σχηματιστεί μια παγωμένη κρούστα. Κατόπιν το προϊόν εισάγεται σε ένα συμβατικό καταψύκτη. Η κρούστα προστατεύει το προϊόν από αφυδάτωση. Το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα φυλάσσονται σε υγρή μορφή, σε δοχεία υψηλής πίεσης. Κατά τη κρυογονική κατάψυξη, τα υγρά αυτά εκτονώνονται και ψεκάζονται επί του προϊόντος υπό μορφή υγρού – αερίου, το οποίο για το άζωτο έχει θερμοκρασία -196°C (η θερμοκρασία κορεσμού στην ατμοσφαιρική πίεση). Το μεγαλύτερο μέρος της ποσότητας της αφαιρούμενης θερμότητας οφείλεται στην εξάτμιση του υγρού αζώτου (λανθάνουσα), ενώ ένα μικρό ποσοστό οφείλεται στη θέρμανση του αερίου (αισθητή). Όταν όμως χρησιμοποιείται διοξείδιο του άνθρακα, υπάρχει μια ιδιαιτερότητα : Όταν εκτονώνεται σε ατμοσφαιρική πίεση, βρίσκεται σε μια κατάσταση μίγματος στερεού – αερίου. Κατόπιν, η θερμότητα αφαιρείται με την εξάχνωση του στερεού διοξειδίου και με τη θέρμανση του ψυχρού αερίου.

Η κρυογονική κατάψυξη απαιτεί επένδυση πολύ χαμηλότερου κόστους, σε σχέση με τις άλλες συμβατικές μεθόδους. Όμως, το κόστος λειτουργίας είναι 2 ως 6 φορές

μεγαλύτερο. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι η κρυογονική κατάψυξη χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μικροποσοτήτων ή όταν η ευαισθησία του προϊόντος επιβάλλει πολύ γρήγορη κατάψυξη. (48. Stoecker W.)

Μειονεκτήματα:

Τα μειονεκτήματα επικεντρώνονται αναφορικά με την επίδραση της κρυογονικής κατάψυξης επί των προϊόντων:

- Όταν η κατάψυξη γίνεται με κατευθείαν εμβάπτιση του προϊόντος σε υγρό άζωτο για μικρό διάστημα, η κατάψυξη επιτυγχάνεται ταχύτατα, αλλά μπορεί να σχηματίζονται ρωγμές στην επιφάνεια του προϊόντος, αν δεν λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα.
- Διαρκής έλεγχος της ταχύτητα κατάψυξης, ώστε να αποφεύγεται η πολύ μεγάλη ταχύτητα κατάψυξης, που μπορεί να καταλήξει σε εύθραυστα προϊόντα

Επίσης συνιστάται να προηγείται μια πρόψυξη με αέριο άζωτο και κατόπιν ένας ήπιος ψεκάσμος με υγρό άζωτο. Έτσι επιτυγχάνουμε ταχεία κατάψυξη, αλλά με πιο ελεγχόμενο τρόπο. (47. Recommendations for the processing and Handling of Frozen Foods)

Ανάλογα με τον εξοπλισμό, οι ταχύτητες κατάψυξης έχουν ως εξής:

Ταχύτητα κατάψυξης ανάλογα τη μέθοδο

- ❖ Θάλαμος “blast freezer” < 0,5 cm/h
- ❖ Τούνελ blast freezer / σπειροειδής καταψύκτης 0,5 – 1,5 cm/h
- ❖ Πλακοειδής καταψύκτης επαφής 1,2 – 2,5 cm/h
- ❖ Ταχυκαταψύκτες μεμονωμένων τεμαχίων 1,5 – 3 cm/h
- ❖ Κρυογονικοί καταψύκτες 3 – 10 cm/h (56. Ιστοσελίδα: www.linde-gas.gr)

Πλεονεκτήματα:

- Ταχεία ψύξη και κατάψυξη μέσα στα πλαίσια της επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να διατηρείται η γεύση
- Το κατεψυγμένο προϊόν είναι καλύτερης ποιότητας από αυτά που καταψύχονται με χρήση πιο αργών μεθόδων
- Λιγότερες απώλειες drip loss κατά την απόψυξη
- Μικρότερη αφυδάτωση και συνεπώς καλύτερη απόδοση
- Μικρότερες απαιτήσεις χώρου
- Διάφοροι τύποι καταψυκτών ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις διαφορετικών τροφίμων (47. Recommendations for the processing and Handling of Frozen Foods)

Η κρυογονική κατάψυξη τροφίμων με υγρό άζωτο (LIN), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5, και διοξείδιο του άνθρακα (LIC) είναι μια καθιερωμένη πρακτική η οποία βασίζεται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες των αερίων αυτών (-196°C ή -320°F , στην περίπτωση του αζώτου) καθώς έρχονται σε επαφή με τα τρόφιμα. Στην περίπτωση υγρού διοξειδίου του άνθρακα, δημιουργούνται νιφάδες καθώς διαστέλλεται το υγρό. Στη συνέχεια, οι νιφάδες εξατμίζονται πάνω στο προϊόν. (47. Recommendations for the processing and Handling of Frozen Foods)



Εικόνα 3.5: Κρυογονική κατάψυξη τροφίμων με υγρό άζωτο (56. Ιστοσελίδα: www.linde-gas.gr)

Η κρυογονική ψύξη και κατάψυξη τροφίμων με χρήση υγρού αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα είναι μια καταξιωμένη τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για τη βελτίωση της επεξεργασίας των τροφίμων

3.9. Διαστημικές εφαρμογές

Η αποστολή αφορά τον πύραυλο Ariane 5 που θα μεταφέρει τους δύο πλέον περίπλοκους δορυφόρους Planck και Herschel που έχουν κατασκευαστεί στην Ευρώπη. Θα μπουν σε τροχιά σε απόσταση 1,5 εκατ. χιλιομέτρων από τη γη, μετά από ένα ταξίδι 4 μηνών στο διάστημα. Τα καινούργια διαστημικά τηλεσκόπια με τα οποία είναι εφοδιασμένοι μπορούν να δώσουν στους αστροφυσικούς εξαιρετικά χρήσιμες και ακριβείς πληροφορίες, σε ότι αφορά στο διάστημα, την δημιουργία του και την εξέλιξή του. Ο όμιλος Air Liquide, παγκόσμιος ηγέτης στο χώρο της κρυογονικής, δημιούργησε καινοτόμες τεχνολογίες τις οποίες εφάρμοσε στο κέντρο λειτουργίας των δύο αυτών επιστημονικών δορυφόρων.

Για την αποστολή Planck, η Air Liquide έπρεπε να ανταποκριθεί σε μία πολύ ιδιαίτερη τεχνολογική πρόκληση κατασκευάζοντας έναν ψύκτη με πρωτοφανή απόδοση για τα

επιστημονικά δεδομένα: την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας, κοντά στο απόλυτο μηδέν ($-273,15^{\circ}\text{C}$) σε ένα μάλλον αντίξοο περιβάλλον στο διάστημα.

Η πρώτη συνεργασία μεταξύ της Air Liquide και του CNRS (National Centre for Scientific Research) ξεκίνησε το 1995. Ο Όμιλος Air Liquide, σημαντικός και αναγνωρισμένος παράγοντας στο ευρωπαϊκό διαστημικό πρόγραμμα, έχει μοναδική εμπειρία στις κρυογονικές τεχνολογίες για την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών.

Η συνεργασία αυτή καλύπτει την προμήθεια υγρών προώθησης, κρυογονική υποδομή τόσο για εκτόξευση όσο και για τον σχεδιασμό και την κατασκευή κρυογονικών δεξαμενών υδρογόνου και οξυγόνου, για όλα τα επίπεδα του Ariane 5 και τον κρυο-τεχνικό εξοπλισμό των συστημάτων που θέτουν σε τροχιά τους δορυφόρους.

Σκοπός του Planck είναι να καταγράψει τη μορφή του διαστήματος πριν από περισσότερα από 13 δις χρόνια, μέσω μίας φωτεινής δέσμης η οποία δημιουργήθηκε 380 000 χρόνια μετά από το Big-bang και η οποία ταξιδεύει έκτοτε ελεύθερα μέσα στο διάστημα. Για να ερευνηθούν ακόμη και τα πλέον αδύναμα σήματα που εκπέμπονται, είναι απαραίτητο να τεθούν σε λειτουργία όργανα σε πολύ χαμηλή και σταθερή θερμοκρασία, στους 0,1 Κέλβιν (K), περίπου 10 βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν. Ο δορυφόρος Planck, εξοπλισμένος με ένα ψύκτη, με διάρκεια λειτουργίας περίπου ενάμιση χρόνου, θα καταφέρει να χαρτογραφήσει την κοσμική δέσμη φωτός στο βάθος τους σύμπαντος. Είναι η πρώτη φορά που αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται στο διάστημα. Σε τροχιά, ο Planck θα αποτελεί το πλέον ψυχρό σημείο του διαστήματος, στους 0,1K. Για χάρη αυτού του εξαιρετικού προγράμματος, η ομάδα της Air Liquide συνεργάστηκε άμεσα με τους ειδικούς του Ινστιτούτου Néel (Εθνικό Κέντρο Επιστημονικής Έρευνας Γαλλίας - CNRS) και του Ινστιτούτου Διαστημικής Αστροφυσικής - IAS για λογαριασμό του Εθνικού Κέντρου Διαστημικών Μελετών – CNES - Γαλλίας. (52. Ιστοσελίδα: www.airliquide.com)



Εικόνα 3.6: Τμήμα της κρυογονικής δεξαμενής του δορυφόρου Herschel (52. Ιστοσελίδα: www.airliquide.com)

Οι απαιτήσεις για τον δορυφόρο Herschel αφορούσαν κυρίως στον σχεδιασμό και στην κατασκευή της κρυογονικής δεξαμενής του, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.6. Η εν λόγω δεξαμενή θα αποθηκεύει ήλιο σε υπέρ-ρευστή μορφή, στη θερμοκρασία των 1,6K, το οποίο προορίζεται για την ψύξη του τηλεσκοπίου και των τριών συστημάτων παρακολούθησης του δορυφόρου. Για το λόγο αυτό η Air Liquide σχεδίασε και κατασκεύασε μία τεράστια δεξαμενή 2400 λίτρων, απόλυτα στεγανοποιημένη. Ο δορυφόρος θα είναι εξοπλισμένος με έναν καθρέφτη διαμέτρου 3,5 μέτρων, ο οποίος θα αποτελεί το μεγαλύτερο διαστημικό τηλεσκόπιο που εκτοξεύθηκε στο διάστημα και θα δώσει στους αστρονόμους τη μοναδική ευκαιρία να παρατηρήσουν το σύμπαν, και πιο συγκεκριμένα να εξερευνήσουν τις ζώνες που δημιουργούνται τα αστέρια, τα γαλαξιακά κέντρα και τα πλανητικά συστήματα.

Οι δύο δορυφόροι θα είναι σε μόνιμη επαφή με τη γη μέσω δορυφορικής σύνδεσης η οποία θα επιτρέπει την «από-απόσταση» έναρξη λειτουργίας του ψύκτη και την τακτική μετάδοση δεδομένων, τα οποία θα συλλέγονται από την επιστημονική κοινότητα. (52. Ιστοσελίδα: www.airliquide.com)

3.10. Κρυογονικός διαχωρισμός αερίων

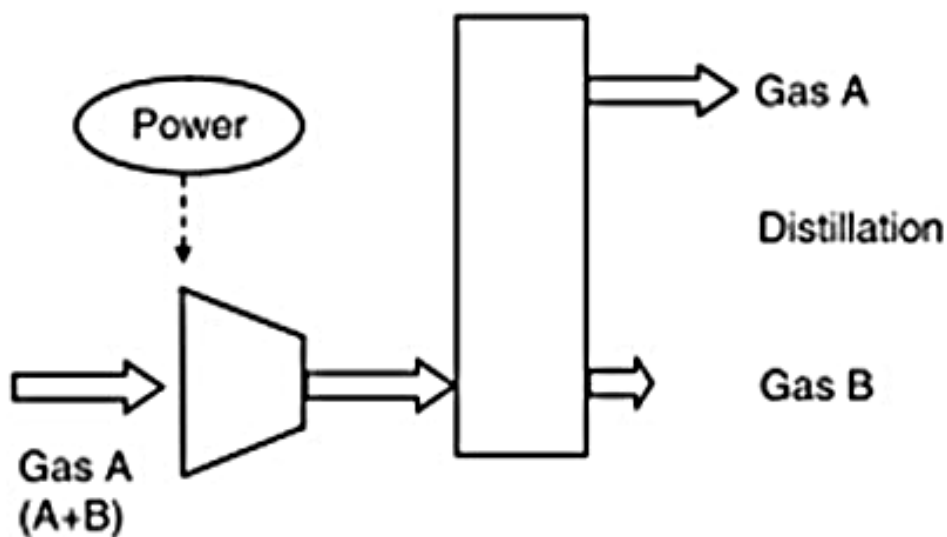
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της εφαρμογής είναι το CO₂, που μπορεί να διαχωριστεί από άλλα αέρια με επαναλαμβανόμενα βήματα ψύξης και συμπίεσης. Ο κρυογονικός διαχωρισμός εφαρμόζεται σε εμπορική κλίμακα για το διαχωρισμό αερίων με υψηλή συγκέντρωση CO₂ άνω του 90%. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του

κρυογονικού διαχωρισμού CO₂ είναι η μεγάλη ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την διεργασία της ψύξης. Όμως αυτό αντισταθμίζεται από το ότι παράγει απευθείας υγροποιημένο CO₂, κάτι που είναι απαραίτητο για κάποια είδη μεταφορών του, όπως μεταφορά με φορτηγά, βυτιοφόρα ή πλοία. (46. Mathieu P.)

Η κρυογονική μέθοδος είναι η πιο κατάλληλη τεχνολογία για το διαχωρισμό του αζώτου από τον αέρα και φαίνεται παραστατικά στην Εικόνα 3.7.

Τα στάδια της κρυογονικής μεθόδου διαχωρισμού του αέρα είναι τα ακόλουθα:

1. Συμπύεση του αέρα με ενδιάμεσες ψύξεις. Το επίπεδο συμπύεσης είναι περίπου 5,5 bar και προτείνονται τα ακόλουθα στάδια συμπύεσης 1,013-1,53 bar, 1,53-2,35 bar, 2,35-3,6 bar και 3,6-5,5 bar και οι ενδιάμεσες ψύξεις είναι στους 25 °C
2. Ψύξη του αέρα περίπου στους 11,5 °C
3. Απομάκρυνση της υγρασίας και άλλων σωματιδίων με τη μέθοδο της προσρόφησης.
4. Υγροποίηση του αέρα (-180 °C)
5. Απομάκρυνση του αζώτου σε στήλη απόσταξης (35. Anderson K.)



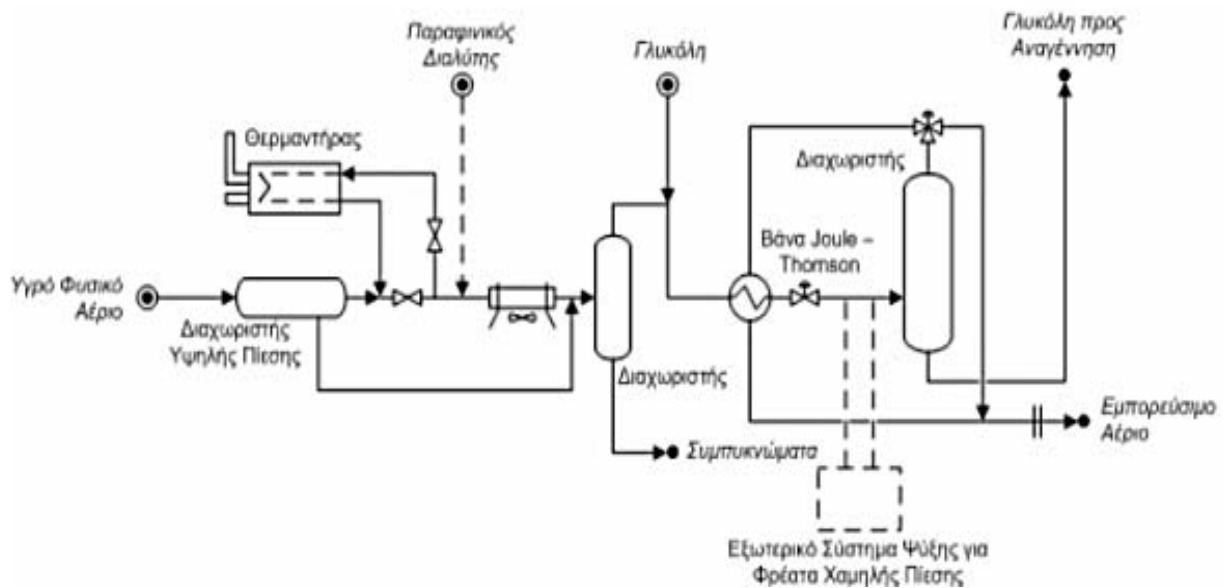
Εικόνα 3.7: Κρυογονικός διαχωρισμός CO₂ (35. Anderson K.)

Η διαδικασία διαχωρισμού του αέρα είναι δυνατό να καταναλώσει έως και το 15% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού. Η καθαρότητα του οξυγόνου παρουσιάζει σημαντική επίδραση όσον αφορά την κατανάλωση ισχύος από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα. Η καθαρότητα που μπορεί να επιτύχει η κρυογονική μονάδα διαχωρισμού του αέρα είναι έως και 99,7%. Για καθαρότητα οξυγόνου μικρότερη του 95%, η κατανάλωση ισχύος μειώνεται, καθώς το επίπεδο της απαιτούμενης συμπύεσης του αέρα μειώνεται. Από την άλλη μεριά, για καθαρότητα οξυγόνου πάνω από 97%, η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται απότομα, γιατί σε αυτή την περίπτωση πρέπει να

διαχωριστεί και το αργό. Η βέλτιστη επιλογή για την καθαρότητα του οξυγόνου που παράγεται από τη μονάδα διαχωρισμού είναι 95%. (44. Herzog H.)

3.10.1. Κρυογονική Αφυδάτωση

Για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε βαρύτερους υδρογονάνθρακες εκτός από τη διατήρηση ενός συγκεκριμένου σημείου δρόσου νερού, υιοθετείται συχνά η κρυογονική αφυδάτωση του φυσικού αερίου (Εικόνα 3.8). Το υγρό αέριο ψύχεται μέχρι τα προς αφαίρεση συστατικά να διαχωριστούν λόγω συμπύκνωσης ή σχηματισμού υδριτών . Συχνά προστίθενται μεθανόλη , γλυκόλη, ή παραφινικός διαλύτης . Η μείωση της θερμοκρασίας μπορεί να επιτευχθεί με εκτόνωση Joule-Thomson. Αυτή η διαδρομή υιοθετείται ιδιαίτερα στην πρώτη φάση της παραγωγής σε φρέατα υψηλής πίεσης.' Όταν η πίεση παραγωγής είναι κοντά σε αυτήν του συστήματος μεταφοράς, χρησιμοποιούνται εξωτερικές κρυογονικές μονάδες. (57. Ιστοσελίδα: www.specoilandgas.com)



Εικόνα 3.8: Κρυογονική αφυδάτωση με αναστολέα σχηματισμού υδριτών και ψύξη σε φρέαρ υψηλής πίεσης (32. Χριστοφορίδης Θ.)

3.11. Παραγωγή κρυογονικού υδρογόνου

Αν και το υδρογόνο υγροποιήθηκε πρώτη φορά το 1989 μέσω των προσπαθειών της NASA, μόλις πρόσφατα αναπτύχθηκε η τεχνολογία για την παραγωγή και αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων του. Η μεγαλύτερη μονάδα αποθήκευσης που υπάρχει είναι στο ακρωτήριο Canaveral, με χωρητικότητα 3375 m³. Δεδομένου ότι η πυκνότητα του υγρού υδρογόνου είναι 71 kg m⁻³ η εγκατάσταση μπορεί να συσσωρεύσει 240.000 kg υγρού

υδρογόνου. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη μορίων υδρογόνου: το παραϋδρογόνο και το ορθοϋδρογόνο. Στην πρώτη μορφή, η στροφορμή (spin) των δύο ατόμων που συνιστούν το μόριο είναι σε αντίθετες κατευθύνσεις, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η στροφορμή έχει την ίδια κατεύθυνση. Στην υγρή κατάσταση, το παραϋδρογόνο (p – H₂) έχει χαμηλότερη ενθαλπία από τη μορφή του ορθοϋδρογόνου (o – H₂). Στο σημείο βρασμού του υδρογόνου (20.4 K σε 0.1 MPa), η διαφορά είναι 1,406 MJ kmole⁻¹.

Το 'φρέσκο' συμπυκνωμένο υδρογόνο, ακόμα και αν φυλάσσεται σε απόλυτα αδιαβατική δεξαμενή, θα χάσει το 1% της μάζας του κατά τη διάρκεια της πρώτης ώρας και 50% κατά τη διάρκεια της πρώτης εβδομάδας. Για την ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών, το ορθοϋδρογόνο μετατρέπεται καταλυτικά σε παραϋδρογόνο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας υγροποίησης. Επίπεδα της τάξης του 95% σε παραϋδρογόνο θεωρούνται ικανοποιητικά. (45. Lipman T.)

Τέλος, οι ενεργειακές απαιτήσεις για την υγροποίηση υδρογόνου είναι υψηλές και ο βρασμός πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή και να εξαλειφθεί εντελώς ώστε το σύστημα να γίνει αποδοτικό ως προς το κόστος και την ενέργεια. Οι δεξαμενές υγρού υδρογόνου μπορούν να αποθηκεύσουν μεγαλύτερες ποσότητες σε συγκεκριμένο όγκο, σε σχέση με τις δεξαμενές συμπιεσμένου αερίου. (45. Lipman T., 32. Χριστοφορίδης Θ.) Στην ακόλουθη Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου. Τα μεγέθη των εν λόγω δεξαμενών κυμαίνονται από 3.000 – 100.000 λίτρα.

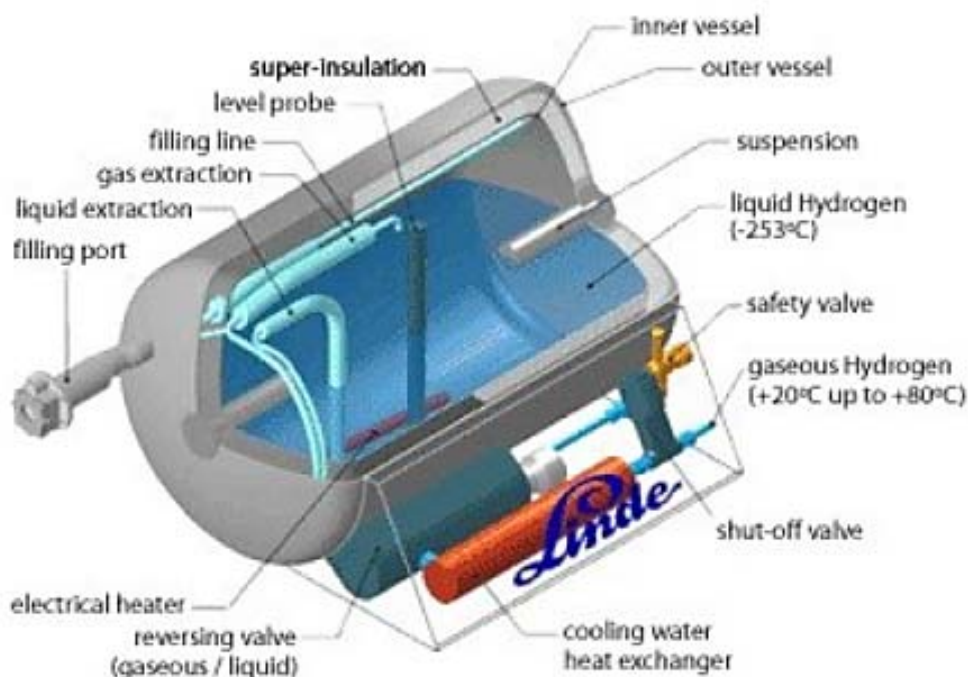


Εικόνα 3.9: Δεξαμενή αποθήκευσης κρυογονικού υδρογόνου της εταιρίας Linde (55. Ιστοσελίδα: www.linde.com)

3.12. Κρυογονικές δεξαμενές

Κάποια από τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην αέρια αποθήκευση του υδρογόνου, όπως το βάρος και η αντοχή της κατασκευής, ξεπερνώνται με την αποθήκευσή του σε υγρή μορφή. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται συνήθεις κρυογονικές δεξαμενές ήδη ανεπτυγμένες για την αποθήκευση και άλλων υγρών υλικών που υπό κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες είναι αέρια. Σε αυτές ο συνδυασμός πολύ χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλών πιέσεων επιτυγχάνεται με αέρια που διαθέτουν πολύ χαμηλό σημείο υγροποίησης προσφέροντας τη δυνατότητα να αφαιρούν τη θερμότητα από άλλα υλικά με υψηλότερο σημείο υγροποίησης, και με διάφορες διατάξεις απαγωγής κενού. (45. Lipman T.)

Το υδρογόνο αποθηκεύεται στις κρυογονικές δεξαμενές σε θερμοκρασίες λίγο χαμηλότερες από αυτή του βρασμού του (περίπου 20 K) και σε πιέσεις που δεν ξεπερνούν τις 5 ατμόσφαιρες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κρυογονικής δεξαμενής φαίνεται και στην Εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Τομή κρυογονικής δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου (55. Ιστοσελίδα: www.linde.com)

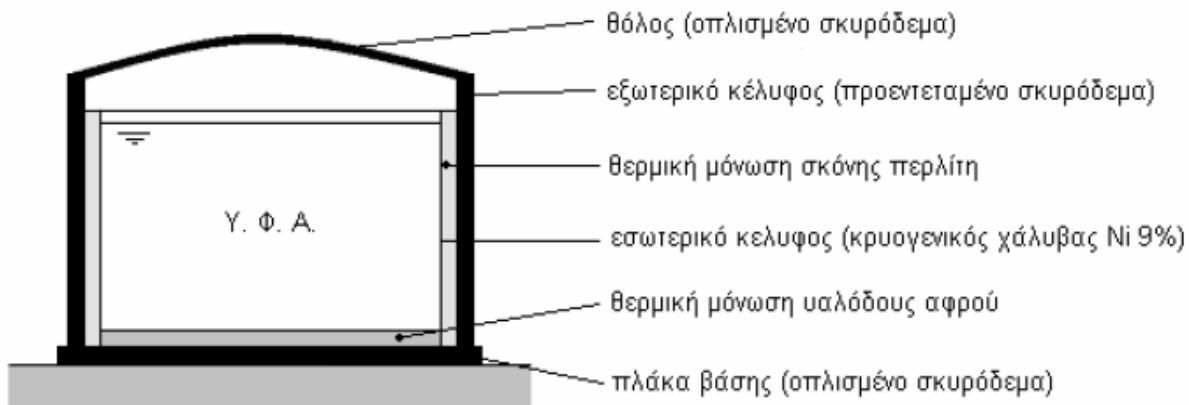
Το σημαντικότερο πρόβλημα της μεθόδου αυτής είναι πως το υδρογόνο δε μπορεί να αποθηκευτεί επ' αόριστον, μιας και ακόμα και με την καλύτερη δυνατή θερμική μόνωση υπάρχει ένα ποσοστό θερμότητας που εισέρχεται και το οποίο προκαλεί τη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας με τελικό αποτέλεσμα την αεριοποίηση. Όπως είναι αναμενόμενο με την αεριοποίηση του υδρογόνου αυξάνεται η πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής, μιας και αποκτά τον αρχικό του όγκο, αυτός είναι και ο λόγος ύπαρξης

βαλβίδας ασφαλείας, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η οποία από κάποια πίεση και πάνω επιτρέπει τη διαφυγή του για την αποφυγή εκρηκτικής αποσυμπίεσης

Ένα ακόμα μειονέκτημα της υγρής αποθήκευσής του είναι τα μεγάλα ποσά ενέργειας που είναι απαραίτητα για την επίτευξη των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται, και τα οποία “αντλούνται” από το ίδιο το υδρογόνο με αποτέλεσμα προκειμένου να μην υπάρξει απώλεια θερμότητας, και κατά συνέπεια υδρογόνου, να μειώνεται σταδιακά το αποθηκευμένο απόθεμα. (45. Lipman T.)

3.12.1. Βασική αρχή της κρυογονικής λειτουργίας των δεξαμενών

Οι κρυογονικές δεξαμενές υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι δεξαμενές εντός των οποίων το προϊόν, το οποίο υπό Κανονικές Συνθήκες είναι αέριο, αποθηκεύεται σε υγρή κατάσταση, υπό ατμοσφαιρική, ή ελαφρώς μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, πίεση και υπό εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία. Η θερμοκρασία αυτή είναι η θερμοκρασία υγροποίησης ή θερμοκρασία βρασμού του προϊόντος, δηλαδή η θερμοκρασία υπό την οποία η τάση ατμών του προϊόντος ισούται με την ολική τάση του μίγματος αερίων πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Επομένως, ο λόγος για τον οποίο η θερμοκρασία της υγρής φάσης προϊόντος δεν αυξάνεται, παρά το γεγονός ότι αναπόφευκτα μία ποσότητα θερμικής ενέργειας μεταφέρεται στο υγρό προϊόν από το περιβάλλον, είναι ότι η εισερχόμενη ενέργεια αναλώνεται πλήρως για τη μετάβαση μέρους τις μάζας της υγρής φάσης του προϊόντος στην αέρια φάση έτσι, η εισερχόμενη ενέργεια αποδίδεται εκ νέου στο περιβάλλον με τη μορφή εσωτερικής ενέργειας των ατμών. Στην πραγματικότητα και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας των δεξαμενών, οι ατμοί δεν απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα αλλά συγκεντρώνονται από το πάνω μέρος της δεξαμενής, συμπυκνώνονται και επανυγροποιούνται. Εάν οι ατμοί του προϊόντος περιορίζονται μέσα στη δεξαμενή, δηλαδή δεν τους επιτρέπεται η έξοδος από αυτή, τότε η ολική τάση του μίγματος αερίων πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια συνεχώς θα αυξανόταν με αποτέλεσμα η θερμοκρασία βρασμού του προϊόντος, δηλαδή η θερμοκρασία υπό την οποία βρίσκεται η υγρή φάση, να αυξάνεται και αυτή έως ότου εξισωθεί με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος όποτε και θα σταματούσε η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. (45. Lipman T., 32. Χριστοφορίδης Θ.)



Εικόνα 3.11: Δομικά στοιχεία κρυογονικών δεξαμενών διπλού κελύφους για την αποθήκευση υγροποιημένου Φ.Α. (32. Χριστοφορίδης Θ.)

3.13. Άλλες εφαρμογές

3.13.1. Κατεργασία μετάλλων

Συγκεκριμένα σε ότι αφορά την εφαρμογή της στα μέταλλα, πρόκειται για μια ανέξοδη, μόνιμη, θερμική κατεργασία η οποία εφαρμόζεται άπαξ σε μεταλλικά αντικείμενα και στοιχεία μηχανών τα οποία έχουν ήδη αποκτήσει την τελική, εμπορική τους μορφή ακριβώς πριν τη συναρμολόγησή τους. Αποτελεί μια πρόσθετη κατεργασία, πέρα από τις συμβατικές θερμικές κατεργασίες και επιδρά σε ολόκληρο το τεμάχιο αντίθετα με άλλες επιφανειακές κατεργασίες. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μεταλλικά τεμάχια ψύχονται σε κρυογονικές θερμοκρασίες, ακολουθώντας έναν ειδικά σχεδιασμένο κατά περίπτωση θερμοδυναμικό κύκλο, παραμένουν στη θερμοκρασία αυτή για προκαθορισμένο χρόνο και έπειτα επανέρχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα από συγκεκριμένη διαδικασία πλήρως ελεγχόμενη. Αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας είναι η βελτίωση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων και κατ' επέκταση η αύξηση του χρόνου ζωής των αντικειμένων. (37. Darwin, 50. Zhirafar S., 39. Flavio J.)

Η κρυογονική κατεργασία εφαρμόζεται μια μόνον φορά και τα αποτελέσματά της διαρκούν μέχρι το πέρας της διάρκειας ζωής του αντικειμένου. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατεργασία αυτή επιδρά στη δομή του κρυσταλλικού πλέγματος, αλλάζοντας τη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνει τις ιδιότητες του υλικού.

Κατατάσσεται στην οικογένεια των θερμικών κατεργασιών, επειδή αυτό που αλλάζει δραματικά τη συμπεριφορά των μετάλλων είναι η μεταβολή της ενεργειακής τους κατάστασης εξ' αιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας τους, που οδηγεί σε μεταβολή της κρυσταλλικής τους δομής.

Όσον αφορά το κόστος της απαιτείται αρκετά μεγάλο χρηματικό ποσό για την απόκτηση και εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού. Το χρησιμοποιούμενο δε δραστικό μέσο,

το άζωτο, υπάρχει σε μεγάλη αφθονία και σε πολύ χαμηλή τιμή. (37. Darwin, 50. Zhirafar S., 39. Flavio J.)

Η διαδικασία με την οποία τα κατεργασμένα τεμάχια επανέρχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πλήρως ελεγχόμενη και αποτελεί μια ολόκληρη φάση της κατεργασίας, που λέγεται ανόπτηση.

Στη βιβλιογραφία γίνεται μια διάκριση των κρυογονικών θερμοκρασιών σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται σε θερμοκρασίες γύρω από τους 189K (-84 °C) και τότε η διαδικασία ονομάζεται κρυογονική κατεργασία, ενώ η δεύτερη σε θερμοκρασίες γύρω από τους 77K (-196 °C) και τότε η διαδικασία ονομάζεται βαθειά κρυογονική κατεργασία.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται μια εργαστηριακή διάταξη κρυογονικής κατεργασίας μετάλλων.



Εικόνα 3.12: Εργαστηριακή διάταξη κρυογονικής κατεργασίας μετάλλων (37. Darwin)

- **Ιστορική εξέλιξη της κρυο-κατεργασίας**

Η ιστορία της κρυογονικής έχει αφετηρία στην εποχή του Ψυχρού Πολέμου, κατά την οποία Σοβιετικοί επιστήμονες όταν δοκίμασαν να ψύξουν χαλύβδινα δοκίμια δεν διαπίστωσαν ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα σχετικά με τη μεταβολή των μηχανικών τους ιδιοτήτων οπότε και απέρριψαν αυτή τη μέθοδο βαθείας ψύξης. Βέβαια σήμερα γνωρίζουμε πως για τα φτωχά αποτελέσματα των Σοβιετικών ευθύνεται μόνο η μέθοδος που χρησιμοποιούσαν η οποία δεν ήταν τίποτε άλλο από την απλή εμφύσηση των δοκιμίων σε υγρό άζωτο.

Τα πρώτα πειράματα εφαρμογής της κρυογονικής σε μέταλλα ξεκίνησαν κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου στη Γερμανία. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν

κυρίως βύθιση μεταλλικών αντικειμένων μέσα σε υγρό άζωτο. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά αλλά η τεχνολογία της εποχής σε συνδυασμό με τις μικρές ποσότητες αζώτου που ήταν διαθέσιμες δεν επέτρεψαν την γενικευμένη χρήση της κρυογονικής.

Το 1966 ο Αμερικανός Edward Busch ο οποίος είχε έντονη δραστηριότητα σε θερμικές κατεργασίες μετάλλων, κατάφερε να δημιουργήσει τον πρώτο κρυογενικό επεξεργαστή που χρησιμοποιούσε αέριο άζωτο. Έτσι δημιουργήθηκε η Cryo-tech, η πρώτη εταιρεία κρυογονικής κατεργασίας μετάλλων παγκοσμίως.

Το 1973 ο Ed. Busch σε συνεργασία με τον Dr. Randall Barron, καθηγητή κρυογονικής στο πανεπιστήμιο της Louisiana, πραγματοποίησαν έρευνα για τα αποτελέσματα της κρυογονικής σε μεταλλικά αντικείμενα.

Το 1989 ο Pete Paulin εξαγόρασε την τεχνολογία από τον Ed Busch και εξελίσσοντας τον κρυογενικό επεξεργαστή την βελτίωσε αρκετά. Ο Pete Paulin εκμεταλλευόμενος τις δυνατότητες που του έδιναν πλέον οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές δημιούργησε εξειδικευμένο software, το οποίο μπορούσε πλέον να ελέγχει πλήρως την διαδικασία παρέχοντας πολλές πληροφορίες όσον αφορά το χρόνο και τη θερμοκρασία της κρυογονικής κατεργασίας. (49. Yakup Y., 39. Flavio J.)

- **Διαδικασία κρυογονικής κατεργασίας**

Όλα ξεκινούν από τον κρυογενικό επεξεργαστή. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ψυκτικό θάλαμο ο οποίος μειώνει με προκαθορισμένο ρυθμό τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του, και φυσικά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, μέχρι τους -300 F (-184 °C) περίπου.

Τα προς κατεργασία τεμάχια πρέπει να μην έχουν υποστεί τέτοιες καταπονήσεις, οι οποίες να έχουν προκαλέσει αστοχίες. Πρέπει, επίσης, τα τεμάχια να έχουν ομαδοποιηθεί, έτσι ώστε το κάθε τεμάχιο να μην υπάρχει περίπτωση να υποβληθεί σε κατεργασία ασύμβατη με τα χαρακτηριστικά του, αλλά και για να εξαλειφθεί ο κίνδυνος παραμορφώσεων εξαιτίας των μεγάλων συστολών και διαστολών που θα συμβούν. Τέλος, τα τεμάχια θα πρέπει να έχουν καθαριστεί σχολαστικά και να έχουν επάλειψη με ειδικό λιπαντικό για την προστασία τους από τυχόν υγρασία και οξειδώσεις.

Τα τεμάχια τοποθετούνται κατά τρόπον ώστε να διευκολύνεται η διέλευση του ψυκτικού μέσου στον κρυογενικό επεξεργαστή και η διαδικασία βαθείας ψύξης αρχίζει. Ο ρυθμός με τον οποίο η θερμοκρασία στο εσωτερικό του επεξεργαστή μειώνεται μέχρι την τελική τιμή της, ελέγχεται από κύκλωμα κλειστού βρόγχου, όπου τις εντολές δίνει το ειδικό software ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος αποτελεί και τη μονάδα ελέγχου του συστήματος. Ο χειριστής του συστήματος επιλέγει μέσω της μονάδας ελέγχου το λεγόμενο «προφίλ» της ψύξης, ουσιαστικά τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου συναρτήσει του χρόνου. Η μέτρηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μέσω των θερμομέτρων που υπάρχουν στο εσωτερικό, τα οποία στέλνουν σήμα στην κεντρική μονάδα, που με τη σειρά της ρυθμίζει ανάλογα την παροχή ψυκτικού μέσου στον κρυογενικό επεξεργαστή.

Η ρύθμιση της παροχής γίνεται με τη βοήθεια μιας βαλβίδας, συνήθως μαγνητικής. Το ψυκτικό μέσο εγχύεται με ψεκαστήρα στην είσοδο του θαλάμου ψύξης. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται συνήθως, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, όπως θα δούμε παρακάτω, υγρό άζωτο το οποίο αεριοποιείται μόλις εξέρχεται από τον ψεκαστήρα. Το υγρό άζωτο τοποθετείται και αποθηκεύεται σε μεγάλες δεξαμενές υπό μανομετρική πίεση 3-4 Bar και μέσω δικτύου σωληνώσεων και βαλβίδων ασφαλείας οδηγείται στον κρυογονικό επεξεργαστή.

Αντί του αζώτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα ψυκτικά μέσα όπως το ήλιο. Το άζωτο είναι το επικρατέστερο, αφού αποτελεί παραπάνω από το 70% του ατμοσφαιρικού αέρα με αποτέλεσμα να έχει εξαιρετικά περιορισμένες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Επίσης η παρασκευή αζώτου είναι πλέον μια διαδικασία αρκετά εύκολη και με χαμηλό κόστος. (51. Ιστοσελίδα: <http://cryogenics.gr/>)

Καθώς το υγρό άζωτο μετατρέπεται σε αέριο και εισέρχεται στο θάλαμο ψύξης, τα συστατικά στην εγγύτητά του ψύχονται και αυτά. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από μικροκατεργαστές με τέτοιο τρόπο ώστε το θερμικό σοκ να μην «παράγεται» ταυτόχρονα και να προκαλεί ζημιά στα συστατικά αυτά.

Καθώς το άζωτο πληρώνει τον εσωτερικό χώρο του επεξεργαστή ο ατμοσφαιρικός αέρας εξέρχεται σταδιακά μέσω ειδικών οπών που συνδέονται με τον περιβάλλοντα χώρο, ώσπου από κάποιο σημείο και μετά υπάρχει μόνο άζωτο. Από τις οπές αυτές εξέρχεται, εκτός από τον ατμοσφαιρικό αέρα, και το αέριο άζωτο το οποίο χάνει την επιθυμητή θερμοκρασία και τότε δίνεται εντολή από το σύστημα για νέα εισαγωγή αζώτου. Συνεπώς, απουσία οξυγόνου και υδρατμών, αποφεύγεται η οξείδωση. Η παροχή αζώτου εξαρτάται από τη μάζα και την ποσότητα των τεμαχίων που θα τοποθετηθούν στον επεξεργαστή.

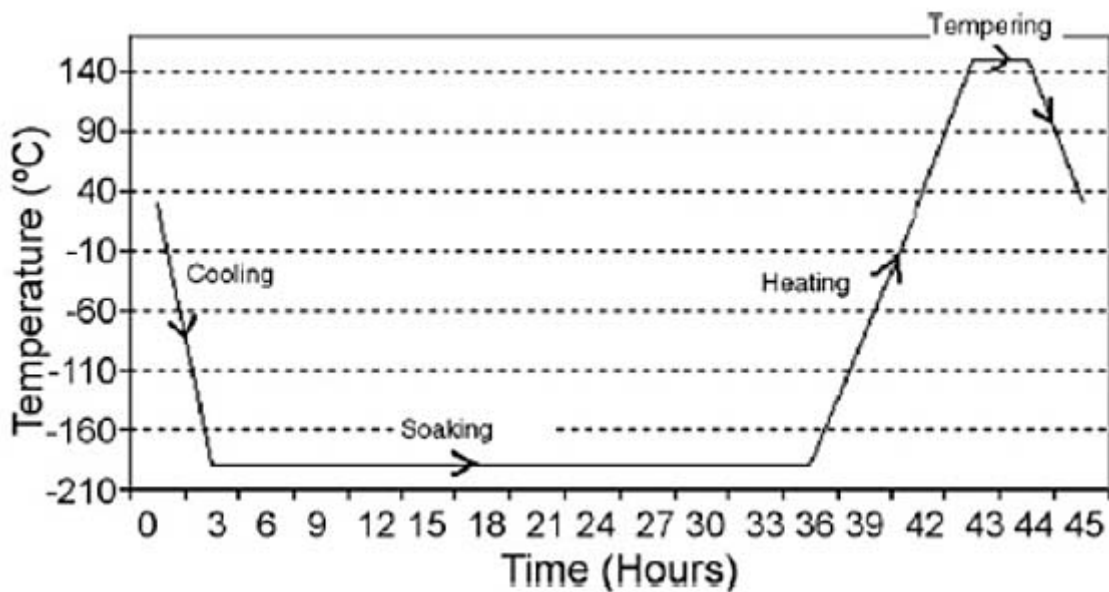
Η χρονική αλληλουχία των σταδίων της κατεργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η σταδιακή ψύξη στους -300 F (-184 °C) απαιτεί περίπου 4 έως 10 ώρες και στη θερμοκρασία αυτή το τεμάχιο παραμένει για 36 περίπου ώρες. Ο λόγος για τον οποίο η πτώση της θερμοκρασίας γίνεται σταδιακά είναι ο ίδιος για τον οποίο το τεμάχιο δεν έρχεται σε καμία φάση της διαδικασίας σε άμεση επαφή με υγρό άζωτο, παρά μόνο με άζωτο σε αέρια κατάσταση, δηλαδή για να αποφευχθεί το λεγόμενο «θερμικό σοκ» του υλικού. (49. Yakup Y., 50. Zhirafar S.)

Μόλις η μονάδα ελέγχου του επεξεργαστή οδηγήσει το τεμάχιο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και πάλι, αυτό αφαιρείται από τον επεξεργαστή και εισέρχεται σε ηλεκτρικό φούρνο για τη διαδικασία της επαναφοράς. Η επαναφορά θα φέρει το τεμάχιο στο άλλο άκρο της κλίμακας του θερμομέτρου, στους +149 °C, για δυο σημαντικούς λόγους. Πρώτον για να ατμοποιηθεί και να αποβληθεί η όποια υγρασία έχει συγκρατηθεί στη μάζα του υλικού, και δεύτερον για να σταθεροποιηθεί ο μαρτενσίτης εφόσον πρόκειται για χαλύβδινα υλικά. Συνολικά η όλη διαδικασία διαρκεί περίπου 50 ώρες.

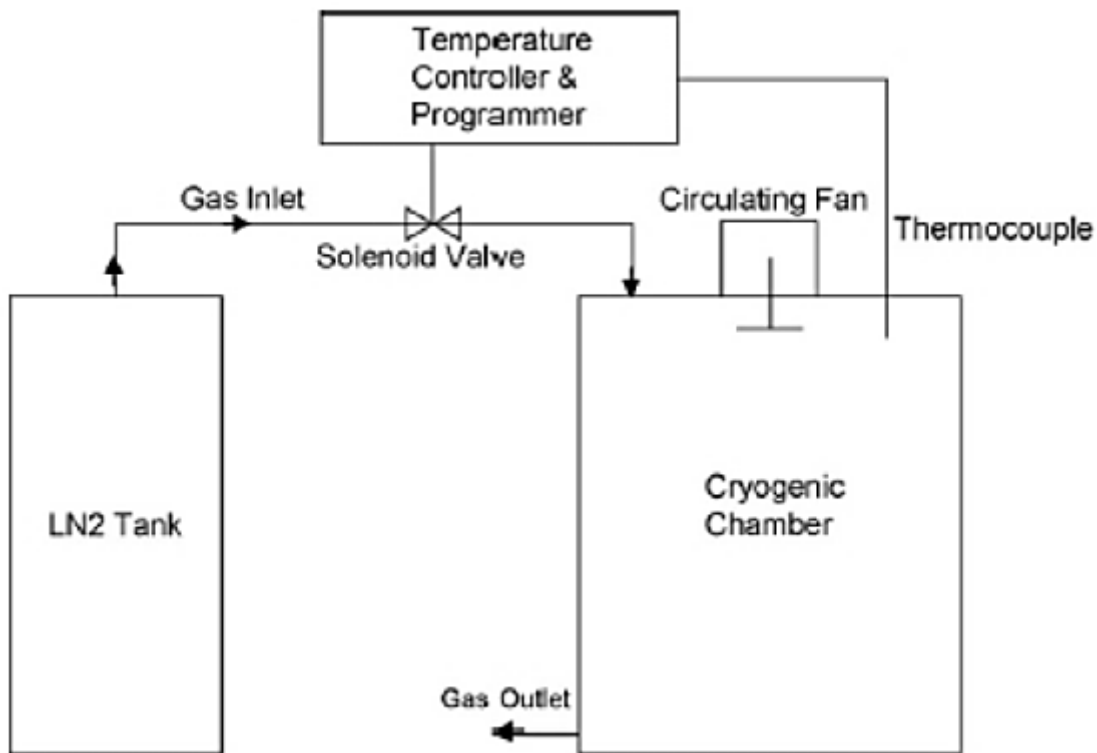
Ο μαρτενσίτης έχει υψηλή σκληρότητα και επομένως ελάχιστη πλαστικότητα, σίγουρα όχι το ζητούμενο της κατεργασίας μας. Με τη διαδικασία της ανόπτησης οι παραμένουσες τάσεις του υλικού καθώς και αυτές που προήλθαν από τη πτώση της

θερμοκρασίας εξαλείφονται σχεδόν ολοκληρωτικά και τελικά οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου είναι πολύ κοντά στις επιθυμητές. Η φάση της ανόπτησης διαρκεί μιάμιση ώρα περίπου και επαναλαμβάνεται δυο φορές για λόγους αποτελεσματικότητας. Συμπληρωματικά κάποιες φορές, κυρίως σε αεροπορικά κράματα αλουμινίου, εφαρμόζεται και το λεγόμενο "sweetening", κατά το οποίο πριν τη φάση της ψύξης προηγείται ένα στάδιο θέρμανσης στους 180°C σε ηλεκτρικό φούρνο για να προετοιμαστεί καλύτερα το υλικό από πλευράς τάσεων και υγρασίας. (49. Yakup Y., 50. Zhirafar S.)

Στην Εικόνα 3.13 φαίνεται ενδεικτικά ένας θερμικός κύκλος της κρυογονικής κατεργασίας συναρτήσει του χρόνου (37. Darwin) και στην Εικόνα 3.14 ένα σύστημα κρυογονικής κατεργασίας μετάλλων.



Εικόνα 3.13: Ενδεικτικός θερμικός κύκλος (37. Darwin)



Εικόνα 3.14: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της κρυογονικής κατεργασίας (37. Darwin)

- **Πρακτικές εφαρμογές της κρυογονικής κατεργασίας**

Η κρυογονική κατεργασία έχει τρομερά ευρύ πεδίο εφαρμογών, που εκτείνεται από τα πιο απλά αντικείμενα που χρησιμοποιούμε καθημερινά μέχρι και τις πιο εξεζητημένες εφαρμογές της από τη NASA, που ήταν και οι πρώτες που έγιναν γνωστές.

Η πολεμική βιομηχανία είναι ένας από τους χώρους που η κρυογονική βρήκε απήχηση. Η κάνη ενός όπλου κατά την φάση κατασκευής περιέχει παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται κατά κύριο λόγο από τις έντονες μηχανουργικές και θερμικές κατεργασίες. Καθώς οι κάνες θερμαίνονται μετά από επαναλαμβανόμενες βολές, με την παρουσία παραμενουσών τάσεων θα έχαναν την ακρίβεια και την ευθυβολία τους. Με την κρυογονική κατεργασία το πρόβλημα απαλείφεται.

Άλλο ένα από τα βασικότερα πεδία εφαρμογής της είναι ο μηχανοκίνητος αθλητισμός. Τμήματα όπως μπλοκ κινητήρων, σασμάν, καπάκια, και άλλα αποδίδουν καλύτερα και διαρκούν περισσότερο. Η κρυογονική κατεργασία δεν δίνει οπτικά παρατηρήσιμη βελτίωση, δίνει όμως καλύτερες επιδόσεις, λιγότερη φθορά και αστοχίες.

Σε αθλητικό εξοπλισμό όπως μαστούνια του γκολφ, ρακέτες του τένις, πέδιλα πατινάζ, μετά από κρυογονική κατεργασία στα μεταλλικά του μέρη απαλείφονται παραμένουσες τάσεις, ομογενοποιείται η μορφή της κρυσταλλικής δομής και μειώνονται τα κενά της.

Στη βιομηχανία μουσικών οργάνων, ένα καλής ποιότητας μουσικό όργανο πρέπει να έχει καλό τόνο και ηχητική χροιά σε ολόκληρο το εύρος του. Ο λόγος που πολλά μουσικά όργανα δεν προσφέρουν αυτά τα χαρακτηριστικά κατά ένα μεγάλο μέρος είναι οι τάσεις

που δημιουργούνται στο μέταλλο τους κατά την κατασκευής τους, π.χ. στη συγκόλληση είτε στη δημιουργία καμπύλων μορφών για να πάρει το μουσικό όργανο την τελική του μορφή. Η κρυογονική κατεργασία εφαρμόζεται σε όλα σχεδόν τα μουσικά όργανα όπως σαξόφωνα, ντραμς, τρομπέτες, κορνέτα, χορδές κιθάρας, χορδές πιάνου κλπ και τα αποτελέσματά της είναι θεαματικά.

Στις εργαλειομηχανές, πάλι, με τη χρήση της κρυογονικής στα αναλώσιμα και κινητά μέρη τους, επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής, αύξηση αξιοπιστίας και άρα μείωση του κόστους χρήσης και παραγωγής.

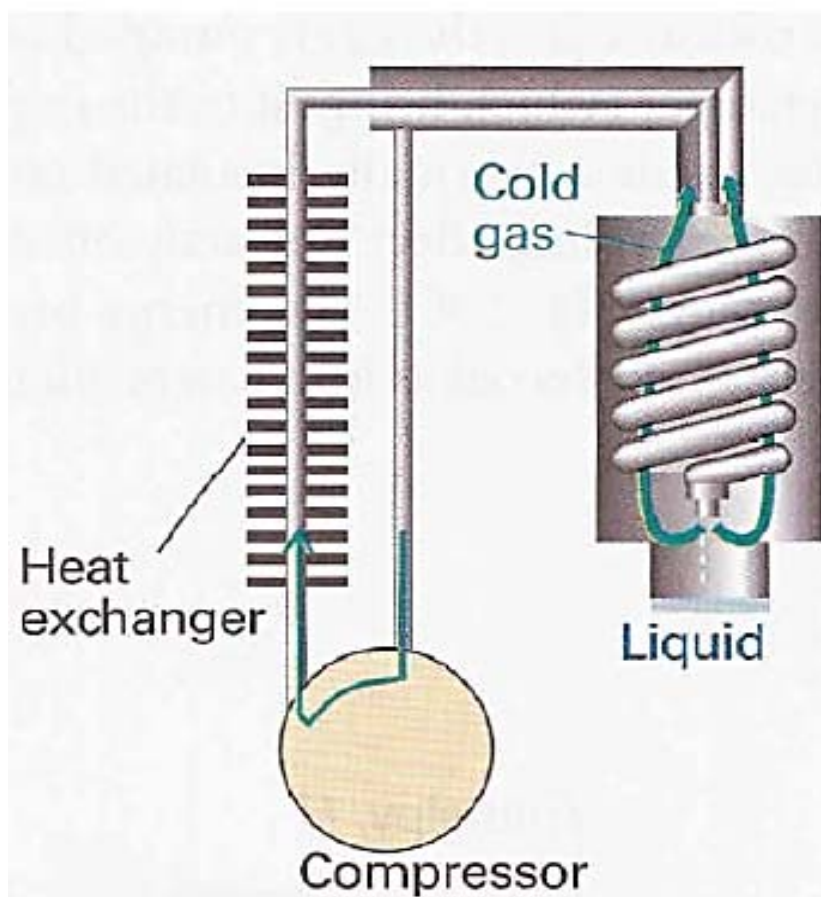
Επίσης, με το ίδιο σκεπτικό κοπτικά εργαλεία μπορεί να αποδίδουν έως και τριπλάσια από την ονομαστική τους τιμή. Παραπλήσια αποτελέσματα επιτυγχάνονται σε αγροτικά εργαλεία, αναλώσιμα ανταλλακτικά εκσκαφέων, εργαλεία εξόρυξης κλπ.

Η κρυογονική κατεργασία χαίρει του πλεονεκτήματος ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε τεράστια γκάμα υλικών. Σε κάποια υλικά έχει ευεργετικές επιπτώσεις, ενώ κάποια άλλα δεν αντιδρούν τόσο καλά. (54. Ιστοσελίδες: www.cryogenicsinternational.com, 53. www.cryogenics.nist.gov/)

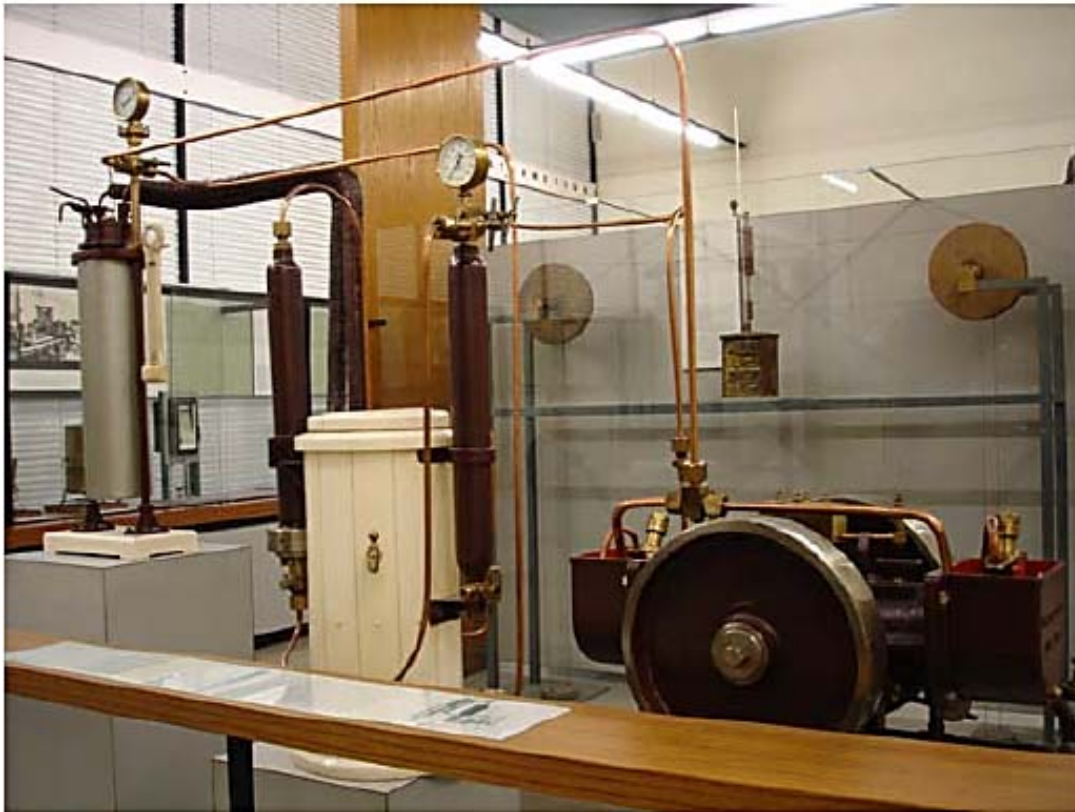
4. Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Linde

4.6. Εισαγωγή στη μέθοδο Linde

Η ψυκτική συσκευή Linde είναι μία συσκευή που χρησιμοποιεί το φαινόμενο Joule – Thomson για να υγροποιεί αέρια. Στη συσκευή αυτή (Εικόνα 4.1) ένα αέριο περνά υπό υψηλή πίεση μέσα από ένα διάφραγμα και ψύχεται σύμφωνα με το φαινόμενο J – T. Το αέριο ανακυκλώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το ψυκτικό αέριο συνεχώς να ψύχει το αέριο που εισέρχεται υπό υψηλή πίεση. Έτσι σε κάθε κύκλο η θερμοκρασία μειώνεται και όταν η ανακύκλωση επαναληφθεί αρκετές φορές το αέριο είναι δυνατό να φτάσει στη θερμοκρασία υγροποίησης του. Βέβαια για να λειτουργήσει σωστά η συσκευή το αέριο πρέπει πάντα να βρίσκεται σε μία θερμοκρασία ανάμεσα στην ανώτερη και κατώτερη θερμοκρασία αντιστροφής. (62. Perinić G.)



Εικόνα 4.1: Ψυκτική συσκευή με κύκλο Linde (62. Perinić G.)



Εικόνα 4.2: Συσκευή υγροποίησης Linde (1842-1934) (62. Perinić G.)

Το φαινόμενο Joule - Thomson έχει μια πολύ ενδιαφέρουσα πρακτική εφαρμογή. Μας δίνει τη δυνατότητα να μειώσουμε τη θερμοκρασία ενός αερίου τόσο πολύ, ώστε να φτάσουμε ακόμα και στην υγροποίησή του. Ας δούμε (λόγω της μεγάλης βιομηχανικής της σημασίας) λίγο αναλυτικότερα τη μέθοδο Linde για την υγροποίηση του αέρα, η οποία ακριβώς στο φαινόμενο Joule - Thomson βασίζεται.

Βασικό στοιχείο στη λειτουργία της εγκατάστασης είναι ο συμπιεστής ο οποίος συμπιέζει τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο αέρας φυσικά θερμαίνεται, εύκολα όμως μπορούμε να τον ψύξουμε μέχρι τη θερμοκρασία του νερού ψύξεως που διαθέτουμε. Αν εκτονωθεί αυτός ο αέρας, η θερμοκρασία του θα μειωθεί ακόμα περισσότερο. Αν π.χ. ο συμπιεστής έχει πίεση 200 bar και το νερό ψύξεως μειώσει τη θερμοκρασία στους 15°C, μετά την εκτόνωση μπορούμε να έχουμε αέρα σε -24°C. Αν τώρα τον εκτονωμένο αέρα χαμηλής θερμοκρασίας τον χρησιμοποιήσουμε σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για να ψύξουμε κατ' αντιστροφή τον πεπιεσμένο αέρα που έρχεται από το ψυγείο του νερού και στη συνέχεια, μετά τον εναλλάκτη, κάνουμε την εκτόνωση, τότε καθώς λειτουργεί η συσκευή, η θερμοκρασία μετά την εκτόνωση θα μειώνεται συνεχώς περισσότερο, έως ότου στο τέλος ο αέρας να αρχίσει να παράγεται σε υγρή μορφή. (64. Sunil D.)

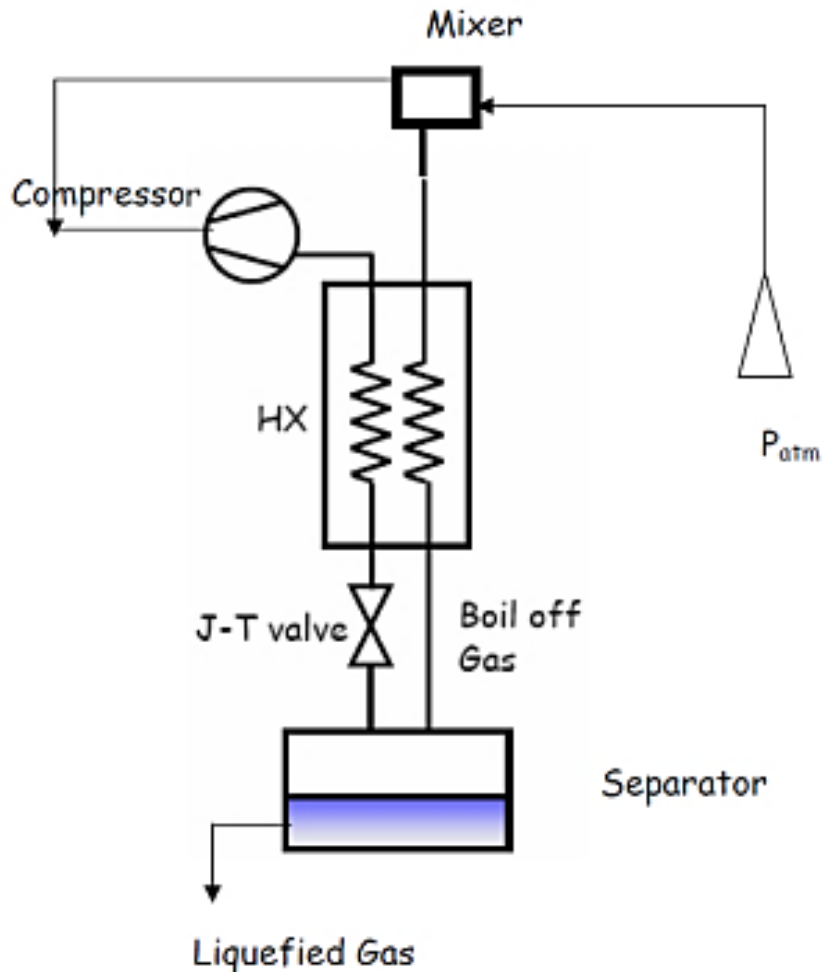
Στο υδρογόνο δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο αυτή. Συμπιεσμένο υδρογόνο που έχει ψυχθεί στη θερμοκρασία του νερού ψύξεως, βρίσκεται επάνω από το σημείο αντιστροφής του. Το δ του είναι αρνητικό. Μετά την εκτόνωση θα αυξανόταν η

θερμοκρασία. Για να λειτουργήσει η μέθοδος, η βιομηχανία χρειάζεται ένα ψυκτικό υγρό πολύ χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Αυτό είναι ο υγρός αέρας που έχουμε ήδη κατορθώσει να παρασκευάσουμε, όπως περιγράψαμε, με τη μέθοδο Linde. Αυτός έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία αντιστροφής του υδρογόνου, και έτσι αν ψύξουμε το υδρογόνο με υγρό αέρα, μπορούμε να ακολουθήσουμε την παραπάνω διαδικασία και να πάρουμε στο τέλος υγρό υδρογόνο. Αυτό έχει πια θερμοκρασία χαμηλότερη και από τη θερμοκρασία αντιστροφής του ηλίου, ώστε ψύχοντας το συμπιεσμένο ήλιο με υγρό υδρογόνο, κατορθώνουμε με την ίδια μέθοδο να υγροποιήσουμε ακόμα και το ήλιο. (64. Sunil D.)

4.7. Ο κύκλος Linde

Ο κύκλος Linde είναι ένας τυπικός κρυογονικός κύκλος που χρησιμοποιείται για την υγραποίηση αερίων και είναι ο απλούστερος από όλους τους κύκλους υγροποίησης. Σχηματικά ο κύκλος αυτός παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου Linde (61. Papadopoulos M.)

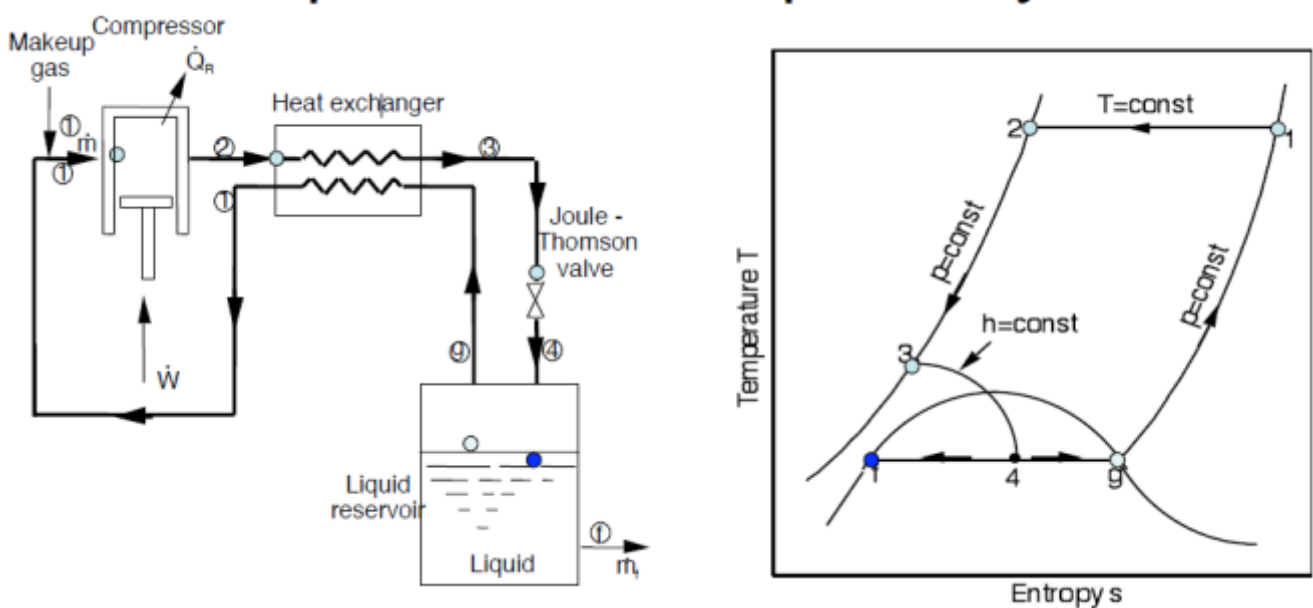
Κύρια σημεία που αφορούν τον κύκλο Linde (61. Papadopoulos M.):

1. **ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ:** Ως γνωστόν, είναι η συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για μείωση του όγκου ενός αερίου και αύξηση της πίεσής του. Γενικά χρησιμοποιούνται για κρυογονικές εφαρμογές συμπίεσης με μεγάλους λόγους συμπίεσης. Για να επιτευχθεί μεγάλος λόγος συμπίεσης ανά βαθμίδα χρησιμοποιείται ένα πλήθος συμπιεστών εν σειρά αντί για έναν συμπιεστή. Μειώνεται επίσης η κατανάλωση έργου.
2. **ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ:** Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές που μεταφέρουν θερμότητα από ένα ρεύμα θερμού ρευστού σε ένα ρεύμα ψυχρού ρευστού. Σε έναν εναλλάκτη θερμότητας η θερμοκρασία του θερμού ρεύματος μειώνεται, ενώ η θερμοκρασία του ψυχρού ρευστού αυξάνεται. Μέσω της απώλειας θερμότητας, το θερμό ρευστό προετοιμάζεται για τη διαδικασία στραγγαλισμού, και παρόμοια μέσω της πρόσληψης θερμότητας το ψυχρό ρευστό θερμαίνεται για τη διαδικασία συμπίεσης.

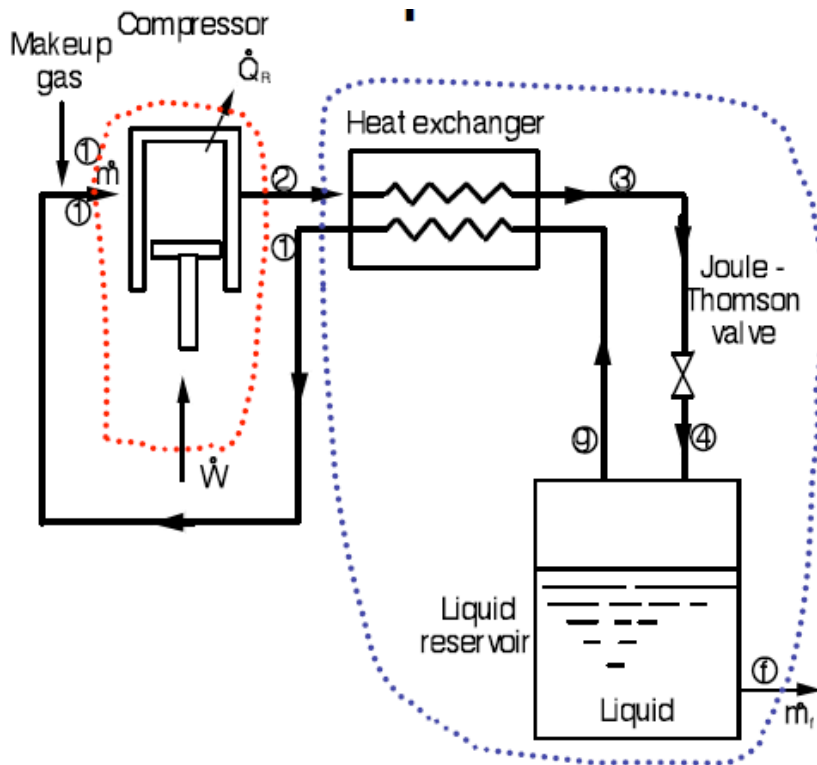
3. **ΒΑΛΒΙΔΑ:** Μια στραγγαλιστική βαλβίδα χρησιμοποιείται για να μειώσει την πίεση του συμπιεσμένου αερίου, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί υγρός αέρας να μπορεί να αποθηκευτεί. Η διεργασία θεωρείται ισεντροπική εκτόνωση.
4. **ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΣ/ ΑΠΟΣΤΑΚΤΙΚΗ ΣΤΗΛΗ:** Στο θάλαμο αυτό, ο αέρας διαχωρίζεται στα επιθυμητά συστατικά, όπως υγρό N_2 , υγρό O_2 κλπ και το αέριο μέρος ανακυκλοφορείται.
5. **ΑΝΑΜΕΙΚΤΗΣ:** Είναι η συσκευή η οποία επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής παροχής αέρα στο συμπιεστή. Ο επιπλέον αέρας προστίθεται στο εισερχόμενο ρεύμα από το διαχωριστή. η διεργασία θεωρείται ισοβαρής.

Μια βασική διαφοροποίηση μεταξύ των διαφόρων κύκλων ψύξης είναι η συσκευή εκτόνωσης. Μπορεί να είναι μια μηχανή εκτόνωσης, όπως στρόβιλος εκτόνωσης, παλινδρομική μηχανή εκτόνωσης ή στραγγαλιστική βαλβίδα. Η μηχανή εκτόνωσης προσεγγίζει την ισεντροπική μεταβολή ενώ η βαλβίδα την ισενθαλπική μεταβολή. Η ισεντροπική εκτόνωση υποδηλώνει μια αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή, ενώ οι ισενθαλπικές μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές. Στο σύστημα Linde, ενσωματώνεται η βασική αρχή της ισεντροπικής εκτόνωσης ενώ ο κύκλος Claude περιλαμβάνει τόσο ισεντροπική όσο και ισενθαλπική διεργασία εκτόνωσης. (61. Papadopoulos M.)

4.8. Θερμοδυναμική ανάλυση



Εικόνα 4.4: Θερμοδυναμικός κύκλος Linde σε σχέση με τα επιμέρους τμήματα που τον αποτελούν (63. Refrigeration and Liquefaction)



Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση επιμέρους συστημάτων ενός κύκλου Linde (63. Refrigeration and Liquefaction)

Υπό σταθερές συνθήκες ο 1^{ος} θερμοδυναμικός νόμος για τον συμπιεστή δίνει:

$$\dot{W}_c - \dot{Q}_r + \dot{m}(h_1 - h_2) = 0 \quad (4.1)$$

Σύμφωνα με τον 2^ο θερμοδυναμικό νόμο, για τον συμπιεστή έχουμε:

$$\dot{m}s_1 = \dot{m}s_2 + \frac{\dot{Q}_r}{T_1} \quad \text{ή} \quad \dot{Q}_r = \dot{m}T_1(s_1 - s_2) \quad (4.2)$$

με την παραδοχή ισόθερμη συμπίεσης

Από τις δυο εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) \quad (4.3)$$

Εφαρμόζοντας τον 1^ο θερμοδυναμικό νόμο σε όλο το σύστημα εκτός από τον συμπιεστή έχουμε:

$$\dot{m}h_2 - (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 - \dot{m}_f h_f = 0 \quad \text{ή} \quad \dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{m}_f(h_1 - h_f) \quad (4.4)$$

Προσδιορίζοντας την απόδοση έχουμε:

$$Y = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} \quad (4.5)$$

και συνδυάζοντας την με το έργο του συμπιεστή έχουμε:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_f} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}Y} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] \left(\frac{h_1 - h_f}{h_1 - h_2} \right) \quad (4.6)$$

Για το ισοζύγιο ενέργειας, εφαρμόζουμε τον 1^ο θερμοδυναμικό νόμο σε όλο το σύστημα εκτός από τον συμπιεστή:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{m}y\Delta h_{f_g} \quad (4.7)$$

Συνδυάζοντας με την έκφραση για το έργο του συμπιεστή προκύπτει η εξίσωση για το COP:

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} = \frac{(h_1 - h_2)}{[T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]} \quad (4.8)$$

Συγκρίνοντας με το COP του κύκλου carnot προκύπτει το FOM:

$$FOM = \frac{(h_1 - h_2)(T_1 - T_c)}{[T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]T_c} \quad (4.9)$$

Το FOM ορίζεται ως βαθμός ποιότητας του κύκλου (Figure of Merit):

$$FOM_{\psi\acute{\upsilon}\kappa\tau\eta} = \frac{COP_{\text{πραγματικό}}}{COP_{\text{ιδανικό}}} \quad (4.10)$$

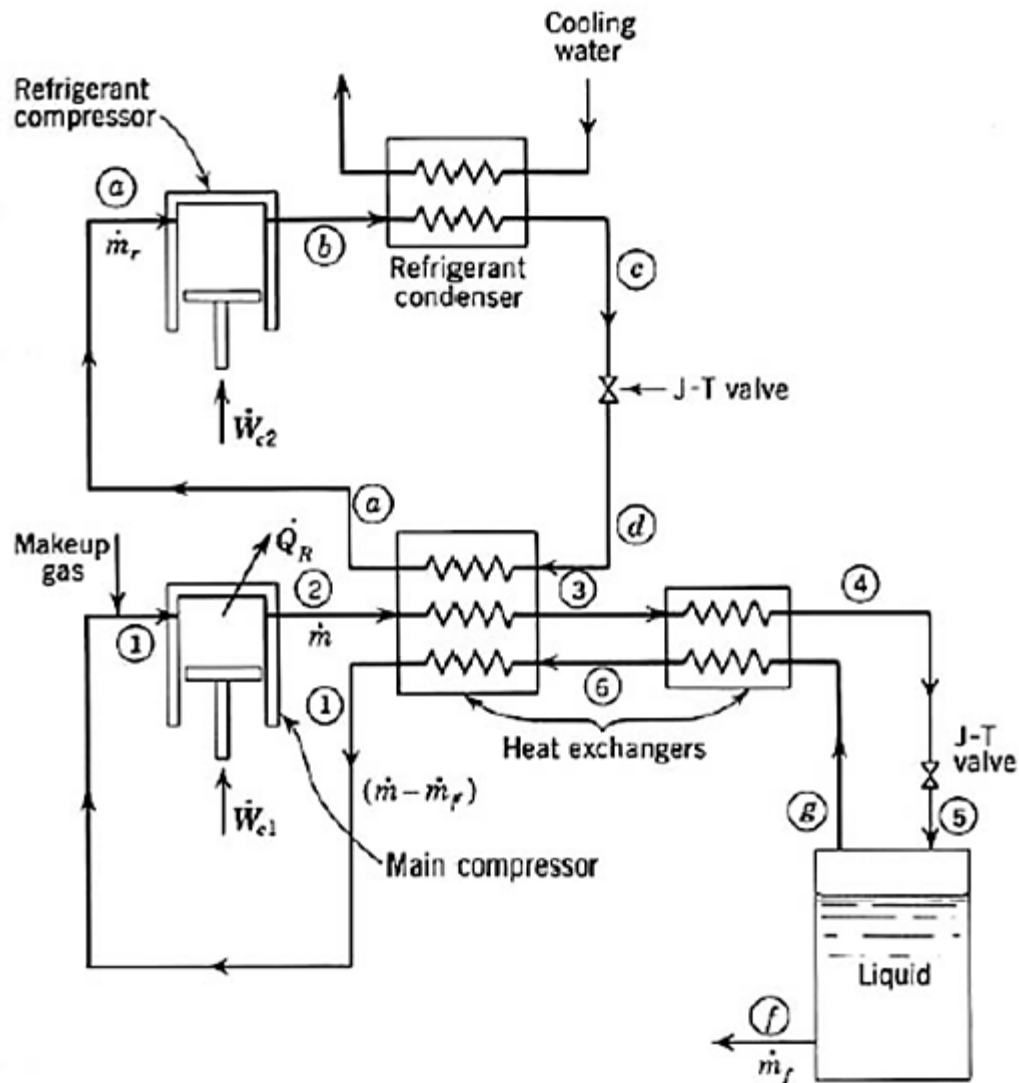
(63. Refrigeration and Liquefaction)

✓ **Απόδοση του κύκλου Linde**

Η θεωρητικά βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της h_2 (το P_2 να είναι τόσο ώστε το h να είναι πάνω στην καμπύλη αντιστροφής). Μια τυπική τιμή για την P_2 είναι $\sim 100\text{atm}$.

4.9. Κύκλος Linde με πρόψυξη

Βελτιστοποιεί την απόδοση μέσω της πίεσης, της θερμοκρασίας πρόψυξης και του λόγου μάζας. Το FOM αυξάνεται κατά παράγοντα της τάξεως 2.

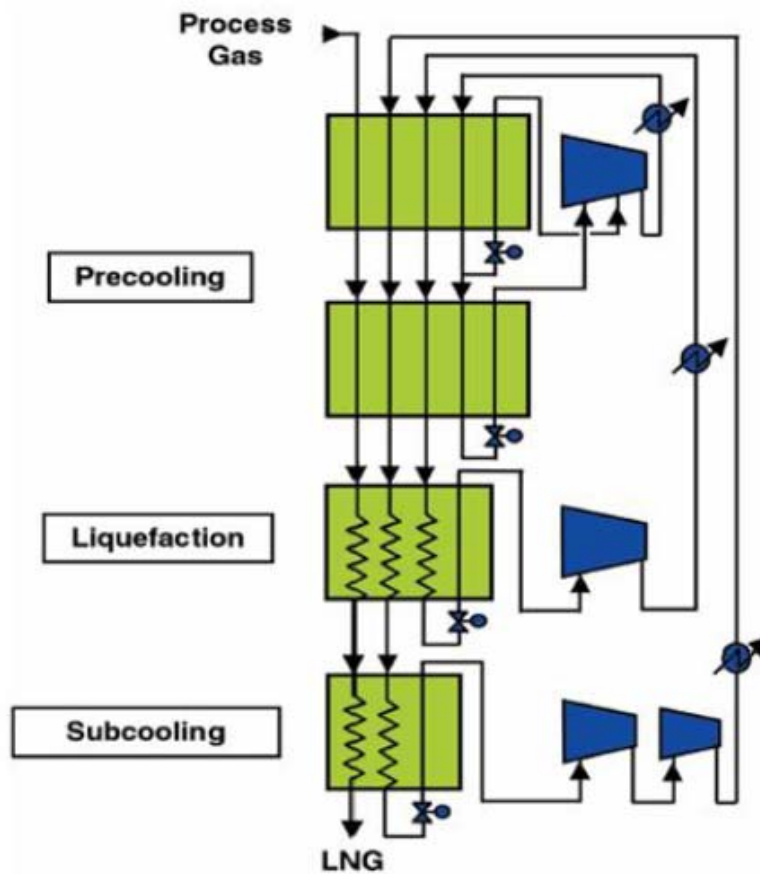


Εικόνα 4.6: Κύκλος Linde με σύστημα πρόψυξης (63. Refrigeration and Liquefaction)

4.9.1. Κλιμακωτή Μέθοδος Statoil/Linde

Σε αυτή τη διαδικασία (Εικόνα 4.7) χρησιμοποιούνται τρία μεικτά ψυκτικά για την ψύξη και την υγροποίηση αερίων. Ο κύκλος της πρόψυξης διεξάγεται σε εναλλάκτες PFHE από τον πρώτο μικτό ψυκτικό και η υγροποίηση και η ψύξη σε ένα εναλλάκτη θερμότητας

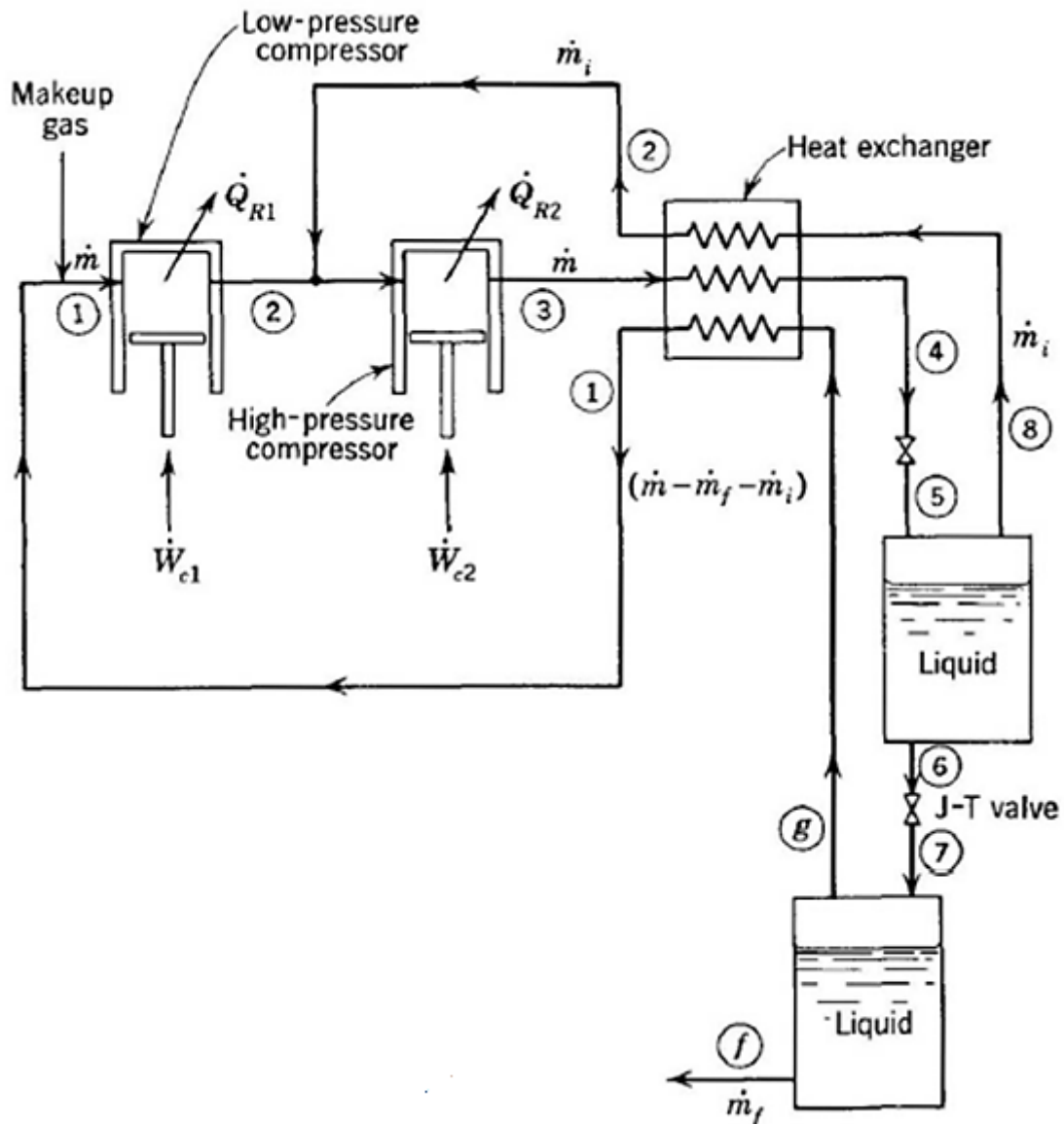
SWHE από τα δύο άλλα ψυκτικά. Ο SWHE είναι ένας εναλλάκτης που έχει κατασκευαστεί από την εταιρία Linde. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον κύκλο της πρόψυξης. Τα ψυκτικά αποτελούνται από συστατικά που επιλέγονται από μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο και άζωτο. (59. Σοφός Ο.)



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Ροής Κλιμακωτής Μεθόδου Statoil/Linde (55. Ιστοσελίδα: www.linde.com)

4.10. Κύκλος Linde διπλής πίεσης

Βελτιστοποιεί την απόδοση μέσω δυο πιέσεων και κλασματικού λόγου μάζας. Ο FOM αυξάνεται κατά παράγοντα της τάξεως 1.9.



Εικόνα 4.8: Κύκλος Linde διπλής πίεσης (63. Refrigeration and Liquefaction)

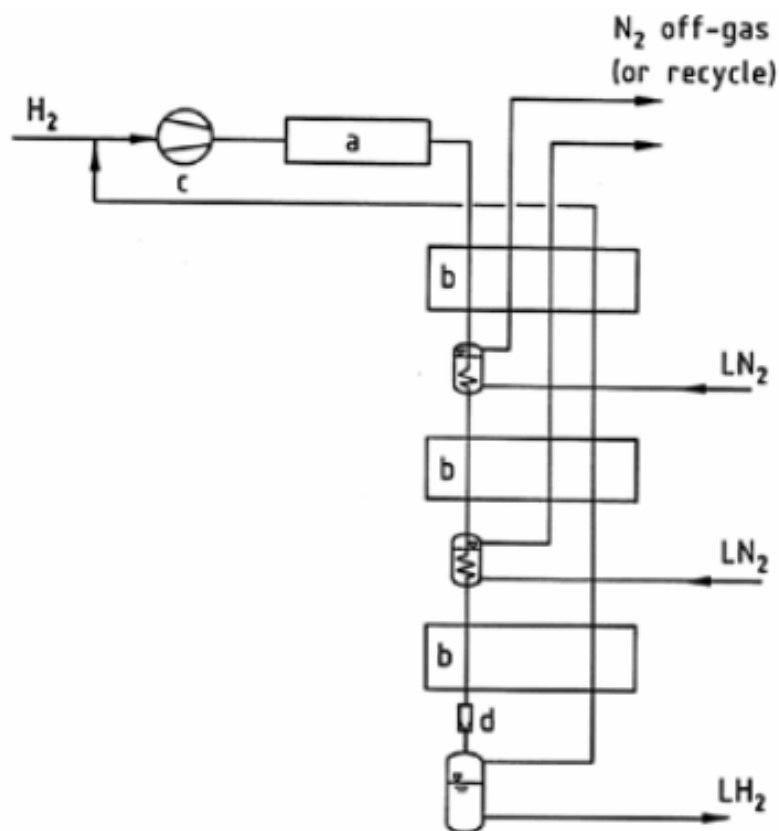
4.11. Εφαρμογές

4.11.1. Συστήματα Υγροποίησης

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν λίγα συστήματα υγροποίησης υδρογόνου στον κόσμο. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης με ικανότητα περίπου 60τόνους/μέρα λειτουργεί στις ΗΠΑ. Εξυπηρετεί κυρίως τις ανάγκες για τα καύσιμα των μηχανών των πυραύλων που χρησιμοποιούνται για τα διαστημικά ταξίδια.

Μερικά μικρότερα συστήματα υγροποίησης βρίσκονται στην Ευρώπη (πχ Ολλανδία). Εξυπηρετούν την τροφοδοσία βιομηχανιών υδρογόνου γενικά, την παραγωγή καυσίμων για τις μηχανές των πυραύλων για τα διαστημικά ταξίδια και κάποιες ερευνητικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης στην Ευρώπη έχει ικανότητα παραγωγής 5τόνους/μέρα.

Τα μεγάλα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde-Hampson που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9 , με την οποία στα ανώτερα επίπεδα το συμπιεσμένο υδρογόνο, εκτονώνεται στους στροβίλους. Τα μικρότερα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde με μικρότερα επίπεδα πίεσης γενικά. (64. Sunil D.)



Εικόνα 4.9: Διαδικασία Linde-Hampson (62. Perinić G.)

Τα επιμέρους στοιχεία της παραπάνω διεργασίας είναι:

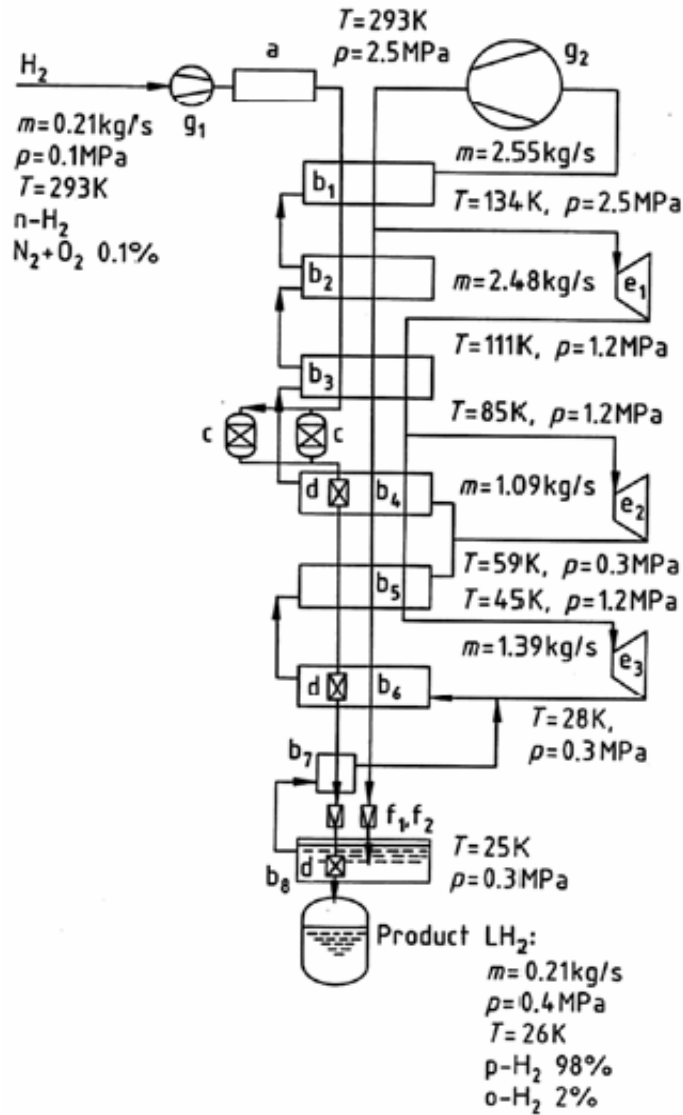
- a) Προετοιμασία, προσρόφηση
- b) Εναλλάκτες θερμότητας
- c) Συμπιεστής υδρογόνου
- d) Βαλβίδες εκτόνωσης

Εάν καταναλωθεί άμεσα το LH₂, μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί η μετατροπή ορθο-υδρογόνου σε παρα-υδρογόνο. Όλων των συστημάτων υγροποίησης είναι κοινό στοιχείο η ανάγκη ενός προεπιλεγμένου σταδίου καθαρισμού. Οι ακαθαρσίες οι οποίες παγώνουν κατά την απόψυξη θα μπλόκαραν τις σωληνώσεις.

Το σύνηθες ποσοστό καθαρότητας >99,5%, μετά από ηλεκτρόλυση ή περίπου 99,9% μετά από στάδιο PSA ενός αναμορφωτή SMR αυξάνεται περισσότερο μετά από τα εξής βήματα:

- 1) Αδιαβατική καταλυτική απομάκρυνση από υδρογόνο, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσω ανασυνδέσεων. (μετά από ηλεκτρόλυση)
- 2) Στέγνωμα προσρόφησης (μετά από ηλεκτρόλυση)
- 3) Περαιτέρω καθαρισμός απορρόφησης για απομάκρυνση αζώτου, μεθανίου, αργού, μονοξειδίου του άνθρακα, σε θερμοκρασία LN₂.

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την μετατροπή ο-p πρέπει επίσης να απομακρυνθεί. Η μετατροπή τοποθετείται μέσω καταλυτών από οξείδιο του σιδήρου και προωθείται στα τελευταία στάδια εναλλαγής θερμότητας. (64. Sunil D.)



Εικόνα 4.10: Σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας Linde με περιγραφή των παροχών μάζας, των πιέσεων και των θερμοκρασιών (62. Perinić G.)

Τα επιμέρους στοιχεία της παραπάνω διαδικασίας είναι:

- a) Προσροφητικός και καταλυτικός προκαθαρισμός
- b1-b8) Εναλλάκτες θερμότητας
- c) Προσροφητές στις θερμοκρασίες του LN₂
- d) Αντιδραστήρας μετατροπής o-p
- e1-e3) Στρόβιλοι εκτόνωσης
- f1-f2) Τιμές εκτόνωσης
- g1) Συμπιεστής
- g2) Ανακυκλωτικός συμπιεστής για τον κύκλο ψύξης του H₂ (64. Sunil D.)

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εγκατάστασης του Linde φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 4.11: Linde-υγραέριο-αναμορφωτής ατμού με CO μετατροπέα (58. Λάμπρου Ε.)

Η συνολική απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης, στην οποία 1 Nm³ μεθανίου μετατρέπεται σε περίπου 3 Nm³ H₂, είναι 65%. Στην πραγματικότητα είναι δύσκολο να υπερβούμε αυτό το ποσοστό. Σημερινοί αναμορφωτές έχουν ποσό παραγωγής περίπου 130.000 Nm³/h. Μελλοντικά συστήματα με ποσό παραγωγής περισσότερο από 237.000 Nm³/h, σχεδιάζονται ήδη.

Μικρότερες μονάδες για επιπλέον παραγωγή υδρογόνου συμφέρουν για μια κατανάλωση περίπου 1000kg H₂/έτος (περίπου 1,5 Nm³/h). Συνήθως όμως αυτές οι μονάδες έχουν ποσό παραγωγής 150 Nm³/h.

Εκσυγχρονισμένες διαδικασίες χρησιμοποιούν μεμβρανικούς καταλύτες οι οποίοι συνδυάζουν τη μείωση του CO με την διαδικασία αναμόρφωσης.

Με αυτόν τον συνδυασμό μειώνονται οι θερμοκρασίες αντίδρασης στους περίπου 550 οC. Τα πρώτα μικρά συστήματα της εταιρίας Tokyo Gas Co., στην Ιαπωνία δούλευαν έως και 1500 ώρες και πετύχαιναν απόδοση 76%, σε μια παραγωγή των 15 Nm³/h.

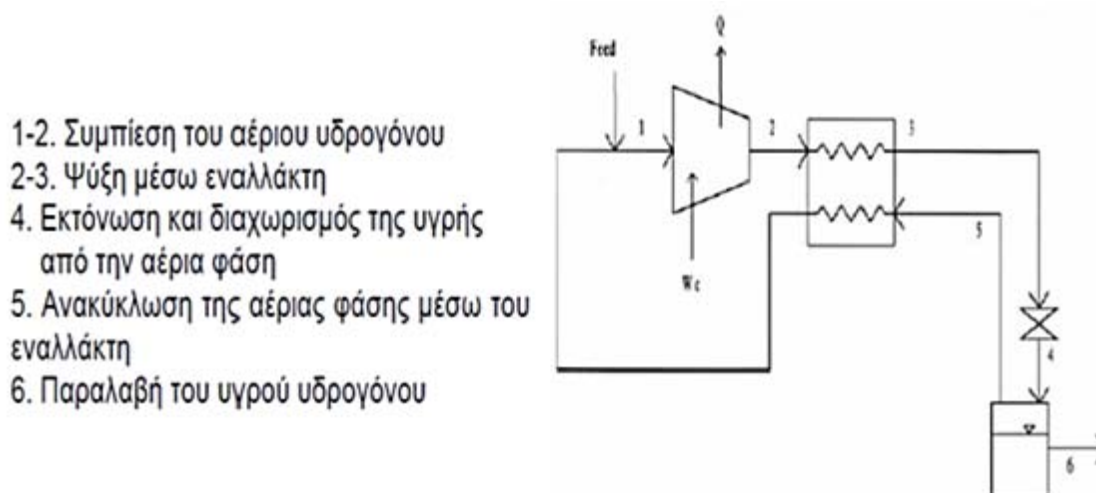
Μικροί αναμορφωτές ατμού μπορούν να παραχθούν μέσω της ονομαζόμενης ως Printed Circuit Heat Exchanges διαδικασίας. Αυτοί οι αναμορφωτές είναι ιδιαίτερα μικροί, ανθεκτικοί και αποτελούνται από στοιβες πλακών σιδήρου και μικρο-εναλλάκτες θερμότητας. Τα πολύπλοκα κανάλια ανάμεσά τους παράγονται με μια διαδικασία που μοιάζει με τη διαδικασία παραγωγής των PCBs. Οι αναμορφωτές αυτοί δουλεύουν σε πίεση και θερμοκρασία έως και 50MPa και 900°C, αντίστοιχα. (58. Λάμπρου Ε.)

4.11.2. Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή

Το αέριο υδρογόνο κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης όπως όλα τα αέρια μπορεί να μετατραπεί σε υγρό. Είναι χαρακτηριστικό ότι το υδρογόνο σε μορφή υγρού μπορεί να αποθηκευτεί ακόμα και σε ατμοσφαιρική πίεση. Η υγροποίηση του αερίου υδρογόνου προϋποθέτει την ψύξη του αερίου υδρογόνου αέριας μορφής σε θερμοκρασία περίπου -253°C .

Η όλη διαδικασία απαιτεί μία συνδυασμένη διάταξη από συμπιεστές, εναλλάκτες θερμοκρασίας, μηχανές εκτόνωσης και στραγγαλιστικές βαλβίδες, η οποία επιτυγχάνει την ψύξη του αερίου υδρογόνου σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. (60. Dunn S.)

Βέβαια για όλες τις παραπάνω διαδικασίες θα πρέπει παράλληλα να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Η διαδικασία υγροποίησης του υδρογόνου είναι γνωστή ως ο κύκλος του Linde ή Joule-Thompson και η πορεία αυτής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 4.12: Διαδικασία υγροποίησης αέριου υδρογόνου (58. Λάμπρου Ε.)

Η αποθήκευση του υγρού υδρογόνου θα πρέπει να γίνεται μέσα σε δεξαμενές στις οποίες η θερμοκρασία θα διατηρείται κάτω από τους -253°C . Στις δεξαμενές είναι σημαντικό να μην μεταφέρεται κανένα άλλου είδους θερμότητας μέσα στον εσωτερικό χώρο αποθήκευσης από το περιβάλλον για να μην ανεπιθύμητη μετατροπή του υγρού υδρογόνου σε αέριο. Για το λόγο αυτό η αποθήκευση γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένες και μονωμένες δεξαμενές οι οποίες ονομάζονται κρυογενικές δεξαμενές-δοχεία.

Αυτού του τύπου οι δεξαμενές έχουν διπλά τοιχώματα και ο χώρος όπου υπάρχει μεταξύ των δύο τοιχωμάτων συνήθως εκκενώνεται πλήρως για να ελαχιστοποιείται το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από τη διαφορά θερμοκρασίας με το εξωτερικό περιβάλλον με ακτινοβολία και με αγωγιμότητα. Για να εμποδιστεί το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία τόσο το εξωτερικό περίβλημα όσο και το εσωτερικό, από την

ελεύθερη-εξωτερική τους πλευρά, τα τοιχώματα καλύπτονται με φύλλα κολλοειδούς σιλικόνης ή από το ειδικό συνθετικό υλικό με την ονομασία MYLAR, το οποίο αποτελείται από ένα κράμα πλαστικού το οποίο περιέχει ίνες αλουμινίου.

Στις μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου, για να μειωθεί περισσότερο η μεταφορά θερμότητας από τον περιβάλλοντα χώρο, περιμετρικά τοποθετείται άλλο ένα στρώμα-διαμέρισμα το οποίο είναι γεμάτο με υγρό άζωτο. (60. Dunn S. 2001)

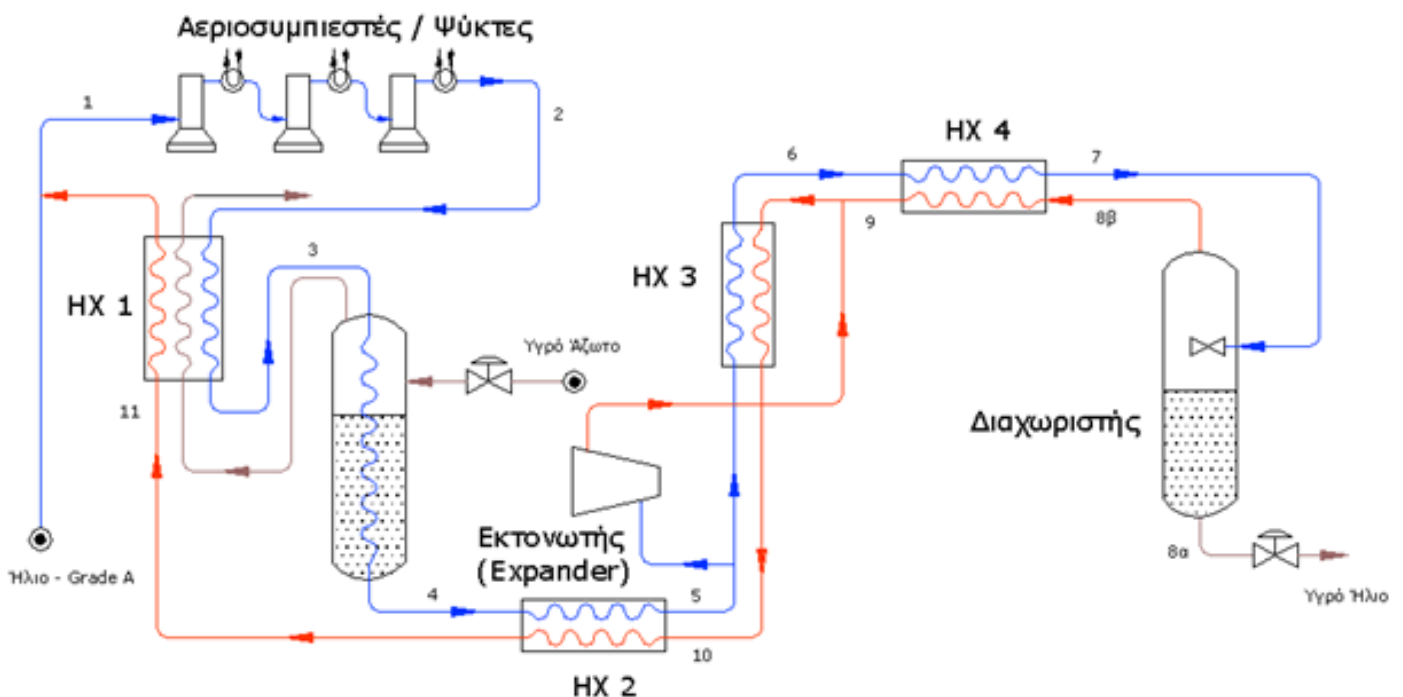
5. Υγροποίηση αερίων με τη μέθοδο Claude

5.6. Εισαγωγή

Το βασικό μειονέκτημα του κύκλου Linde είναι ότι χρησιμοποιεί ένα μέρος του αέρα για τη διεργασία του μη αναστρέψιμου στραγγαλισμού. Ο G. Claude εφάρμοσε το 1902 μια βελτιωμένη μέθοδο υγροποίησης του αέρα, η βασική ιδέα της οποίας ήταν η αντικατάσταση τουλάχιστον ενός μέρους του μη αναστρέψιμου στραγγαλισμού με αναστρέψιμη αδιαβατική αποτόνωση και ταυτόχρονη παραγωγή έργου. Στην περίπτωση αυτή, επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη ψύξη του αέρα σε σχέση με τη μέθοδο Linde, μεταξύ των ίδιων ακραίων πιέσεων. (65. Dincer I.)

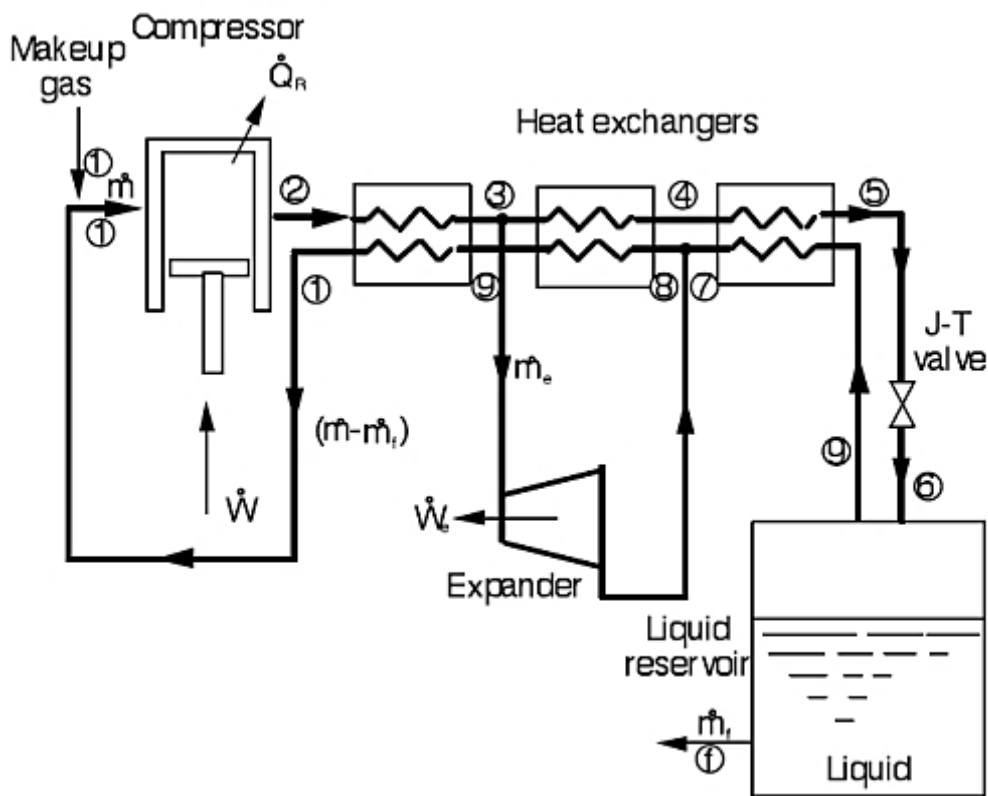
Μετά το 1902, η εταιρεία του George Claude, η Air Liquide, ξεκίνησε την βιομηχανική παραγωγή ποσοτήτων νέον ως υποπροϊόν της υγροποίησης του αέρα, και το Δεκέμβριο 1910 ο Claude έδειξε σύγχρονο φωτισμό νέον που βασιζόταν σε ένα σφραγισμένο σωλήνα νέον. Το 1912, οι συνεργάτες του Claude άρχισαν να πωλούν σωλήνες εκκένωσης νέον όπως διαφημιστικές πινακίδες, που εισήχθησαν στις ΗΠΑ το 1923, όταν δύο μεγάλες πινακίδες νέον αγοράστηκαν από την αντιπροσωπεία αυτοκινήτων Packard Car στο Los Angeles.

Ο Γάλλος μηχανικός, χημικός και εφευρέτης Georges Claude, ήταν ο πρώτος που πραγματοποίησε μια ηλεκτρική εκκένωση σε ένα σφραγισμένο σωλήνα με νέον αέριο το 1902, για τη δημιουργία λαμπτήρα. Ο Georges Claude εμφάνισε τον πρώτο λαμπτήρα νέον στο κοινό, στις 11 Δεκεμβρίου 1910 στο Παρίσι. (65. Dincer I.)



Εικόνα 4.13: Διεργασία υγροποίησης Claude (72. Ιστοσελίδα: <http://catalysis.gr/thermodynamics/physicalprocesses/claudeprocesses-1.html>)

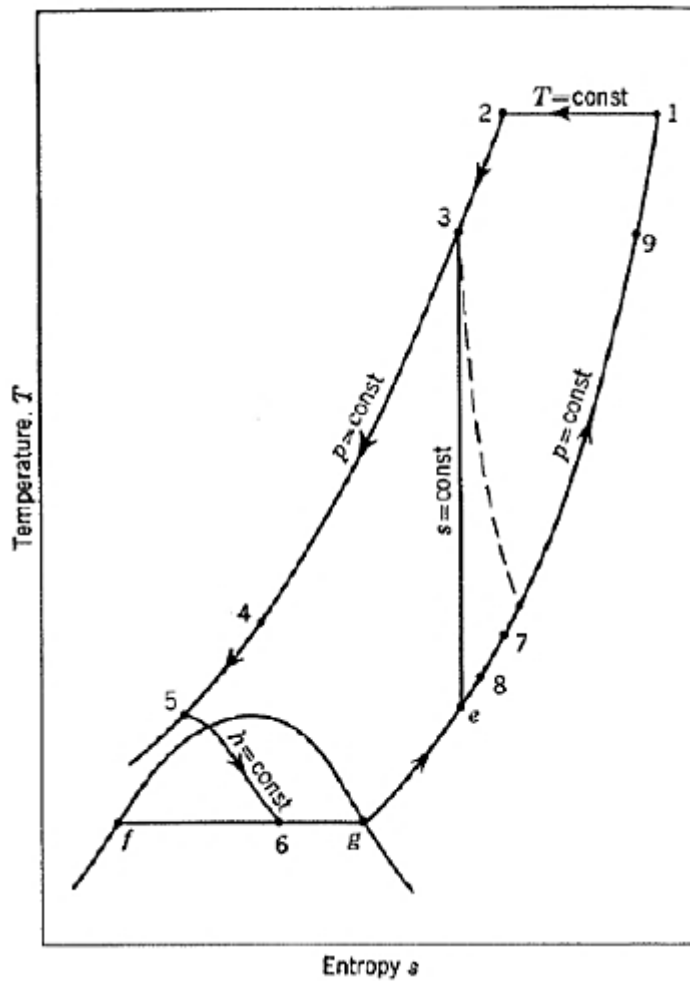
5.7. Θερμοδυναμική ανάλυση κύκλου Claude



Εικόνα 4.14: Σχηματική παράσταση διάταξης υγροποίησης αέρα με μερική αποτόνωση –Μέθοδος Claude (63. Refrigeration and Liquefaction)

Ο συμπιεστής αναρροφά αέρα περιβάλλοντος και τον συμπιέζει ως την κατάσταση 2, με την οποία εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας για να ψυχθεί από τον αέρα που εκτονώνεται κατ' αντιρροή. Μετά την ψύξη στον εναλλάκτη μέχρι την κατάσταση 3, ένα μέρος του ρεύματος του αέρα διακλαδίζεται προς μια μηχανή παραγωγής έργου, από μία εξέρχεται στην κατάσταση e, και στη συνέχεια οδηγείται εκ νέου σε κατάλληλο σημείο του εναλλάκτη θερμότητας, όπου συναντά τον κύριο βρόχο το αέρα χαμηλής πίεσης, που επιστρέφει από τη βαλβίδα στραγγαλισμού joule-Thomson. Το υπόλοιπο ρεύμα αέρα μετά την απομάστευση, ψύχεται περαιτέρω, καταρχάς από τον αέρα που έχει αποτονωθεί μέσα στη μηχανή παραγωγής έργου, και στη συνέχεια, με τη βοήθεια του αέρα που δεν έχει υγροποιηθεί κατάστασης g και επιστρέφει από τη βαλβίδα στραγγαλισμού. Τελικά ο αέρας αυτός εξέρχεται από τον εναλλάκτη στην κατάσταση 5. (67. Moon)

Ακολουθεί ισενθαλπικός στραγγαλισμός στη βαλβίδα Joule-Thomson και ο αέρας κατάστασης 6 διαχωρίζεται στο δοχείο σε υγροποιηθέντα αέρα κατάστασης f και αέρα ατμώδους κατάστασης g. Ο μη υγροποιηθείς αέρας, μαζί με τον αέρα που εκτονώθηκε μέσα στη μηχανή παραγωγής έργου οδηγείται σε αντιρροή προς τον κύριο βρόχο στον εναλλάκτη θερμότητας. Απ' αυτόν εξέρχεται σε κατάσταση 1 και καταλήγει και πάλι στον συμπιεστή της εγκατάστασης. (67. Moon)



Εικόνα 4.15: Κύκλος υγροποίησης αέρα με διάταξη μερικής αποτόνωσης (63. Refrigeration and Liquefaction)

Από το θερμικό ισολογισμό χωρίς απώλειες για ολόκληρη τη διάταξη υγροποίησης εκτός του συμπιεστή και της μηχανής αποτόνωσης, προκύπτει το ποσοστό του αέρα X που υγροποιείται ανά kg συμπιεζόμενου αέρα:

$$h_2 = (1 - X)h_1 + Xh_f + (1 - M)(h_3 - h_e) \quad (5.1)$$

Για την ψυκτική ισχύ της διάταξης αυτής ισχύει ανά kg αέρα κατάστασης 2:

$$q_\psi = X(h_1 - h_f) = (h_1 - h_2) + (1 - M)(h_3 - h_e) \quad (5.2)$$

ή θέτοντας $h_1 - h_2 = \Delta h$ και $h_3 - h_e = \Delta h_e$ προκύπτει για την ψυκτική ισχύ

$$q_\psi = X(h_1 - h_f) = \Delta h + (1 - M)\Delta h_e \quad (5.3)$$

Για το υγροποιούμενο ποσοστό αέρα X ανά kg αέρα κατάστασης 2, προκύπτει από τη σχέση (5.2) ότι είναι:

$$X = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + (1 - M) \frac{h_3 - h_e}{h_1 - h_f} \quad (5.4)$$

Από τη σχέση (5.4) παρατηρούμε ότι η αύξηση του ποσοστού του υγροποιημένου αέρα ανά kg συμπιεζόμενου αέρα είναι ανάλογη του διακλαδιζόμενου ρεύματος αέρα $(1-M)$, που οδηγείται στη μηχανή παραγωγής έργου. (67. Moon)

5.7.1. Ο υγροποιητής Claude

Ο υγροποιητής Claude προέρχεται από το σύστημα Linde με την ακόλουθη τροποποίηση: η βαλβίδα διαστολής της διεργασίας Linde αντικαθίσταται από μια μηχανή εκτόνωσης, και οδηγεί σε αύξηση του παραγόμενου υγρού αερίου. Η αλλαγή αυτή μπορεί να οδηγήσει επίσης σε χρησιμοποίηση του έργου που λαμβάνεται από τη μηχανή εκτόνωσης, η οποία μπορεί να είναι στρόβιλος ή παλινδρομική μηχανή. Για να αποφευχθεί η φθορά της μηχανής λόγω των δύο φάσεων του εργαζόμενου μέσου, το εργαζόμενο μέσο λαμβάνεται σε ενδιάμεση κατάσταση. Το αέριο δεν υγροποιείται στο στάδιο της εκτόνωσης, καθώς θα κατέστρεφε το στρόβιλο. Η τελική υγροποίηση λαμβάνει χώρα με ισενθαπλική εκτόνωση στη βαλβίδα Joule-Thomson. (61. Papadopoulos M)

Η υγροποίηση του αέρα ακολουθείται κατά κανόνα από κλασματική απόσταξη, ώστε να εμπλουτιστεί το συμπύκνωμα σε κάποια από τις συνιστώσες του (π.χ. οξυγόνο ή άζωτο). Η εγκατάσταση υγροποίησης περιλαμβάνει και πολλές βοηθητικές συσκευές, όπως διατάξεις ξήρανσης, διαχωριστή ελαίου, απορροφητές ξένων αερίων κλπ. (64. Sunil Manohr D.)

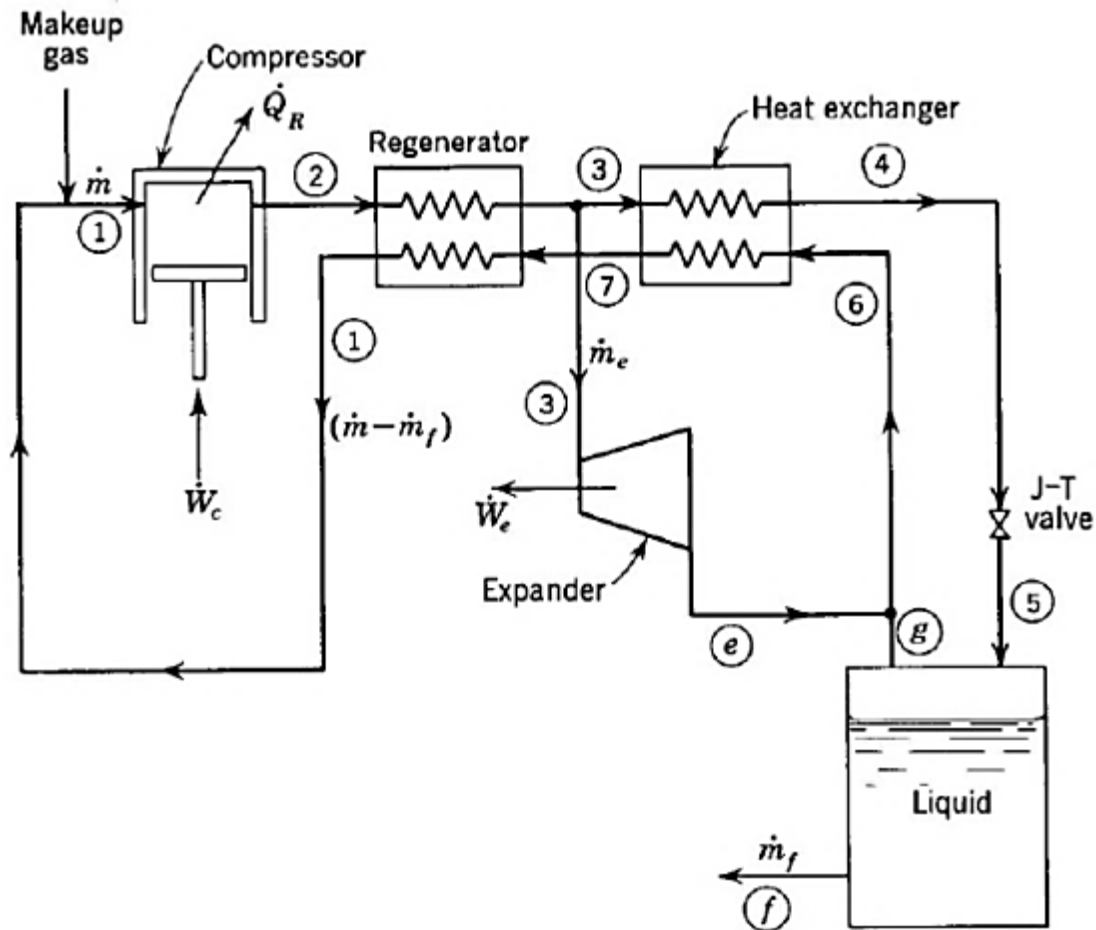
5.8. Παραλλαγές του κύκλου Claude

5.8.1. Σύστημα υγροποίησης Kapitza

Ο Kapitza (1939) τροποποίησε τον βασικό κύκλο Claude, αφαιρώντας τον τρίτο εναλλάκτη θερμότητας ή αλλιώς εναλλάκτη θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Επίσης έγιναν ορισμένες επιπλέον τροποποιήσεις όπως η εισαγωγή μιας περιστροφική μηχανής εκτόνωσης αντί της παλινδρομικής. Ο πρώτος εναλλάκτης θερμότητας (ή υψηλής θερμοκρασίας) στο σύστημα Kapitza είναι μια σειρά από αναγεννητικές βαλβίδες, οι οποίες συνδυάζουν τη διαδικασία ψύξης με αυτή του καθαρισμού. Το εισερχόμενο ακάθαρμο θερμό αέριο ψύχεται στη μια μονάδα και καθαρίζεται στην άλλη αποθέτοντας τις προσμίξεις που μπορεί να έχει, ενώ το θερμό εξερχόμενο ρεύμα θερμαίνεται στη μια

μονάδα και στη συνέχεια οι προσμίξεις που έχει εκτονώνονται. Έτσι επιτυγχάνεται υγροποίηση του αέρα υπό χαμηλή πίεση (7 bar), που είναι αρκετά χαμηλότερη από την κρίσιμη πίεση του αζώτου. (68. Prasad S.)

Ένα τροποποιημένο σύστημα Claude με τον κύκλο Karitza φαίνεται στην Εικόνα 4.16.

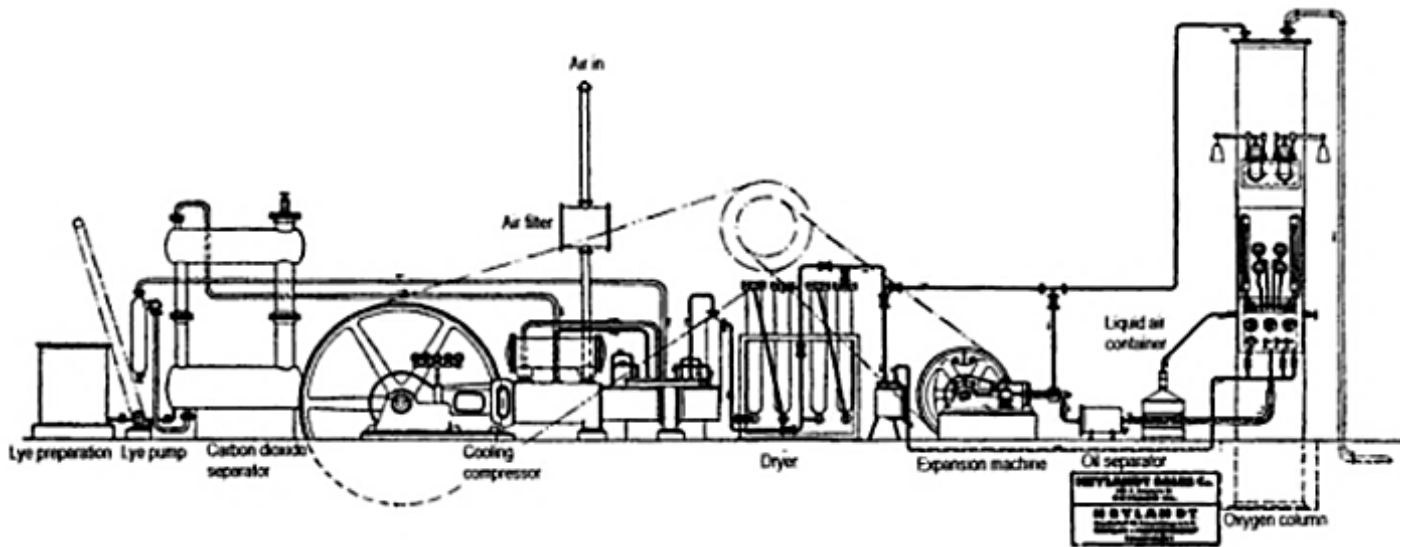


Εικόνα 4.16: Τροποποιημένο σύστημα Claude με τον κύκλο Karitza (68. Prasad S.)

5.8.2. Διαδικασία Heylandt

Η διαδικασία αυτή αναπτύχθηκε στη Γερμανία από τον Paul Heylandt το 1920. Οι διαφοροποιήσεις ήταν η εφαρμογή υγροποίησης υψηλής πίεσης στα 200 bar. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή εκτόνωσης σε θερμοκρασία δωματίου.

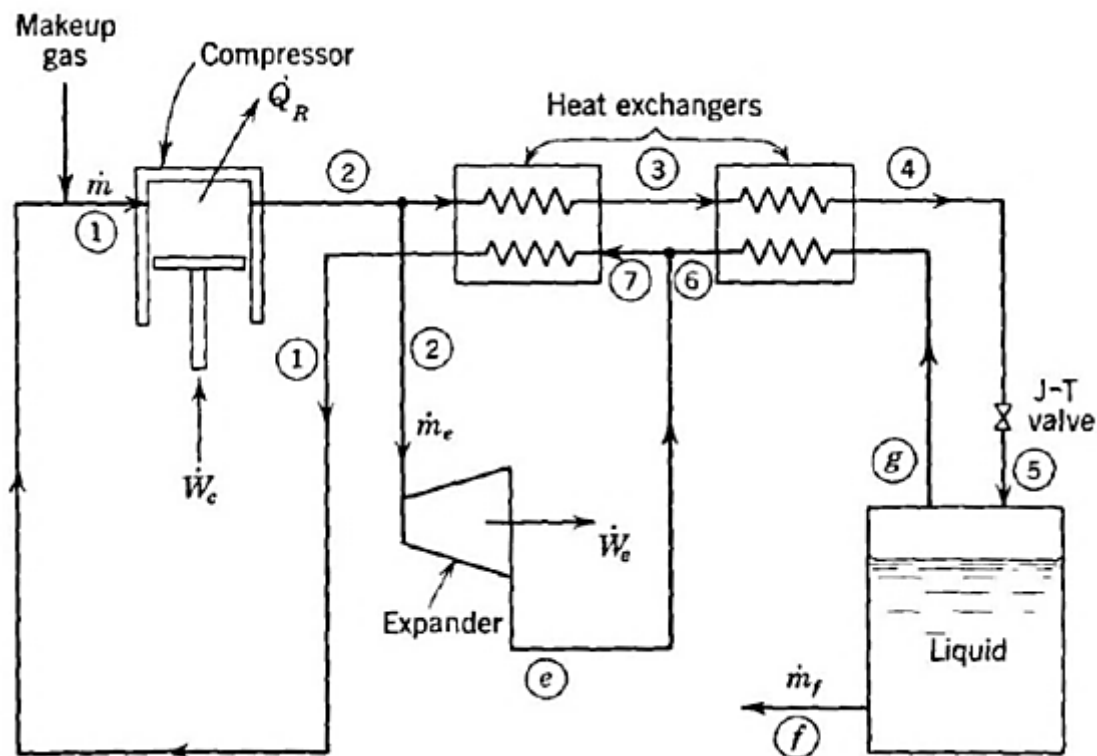
Ήταν από τους πρώτους που διέγινε τα πλεονεκτήματα διανομής και διαχείρισης των αερίων σε υγρή μορφή, γι' αυτό και παρουσίασε ένα σχέδιο μονάδας παραγωγής οξυγόνου, το οποίο κατασκευάστηκε το 1928, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.17. (63. Refrigeration and Liquefaction)



Εικόνα 4.17: Εργοστάσιο Heylandt του 1928 (66. Jha R.)

Αντίστοιχα βλέπουμε την τροποποιημένη διαδικασία Claude από τον Heylandt στην Εικόνα 4.18. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε αρκετά μετά το πέρας του 2^{ου} Παγκοσμίου πολέμου, όταν και αυξήθηκε σημαντικά η ζήτηση για οξυγόνο και άζωτο σε υγρή μορφή. (66. Jha R.).

Η εν λόγω παραλλαγή του κύκλου Claude φαίνεται στην Εικόνα 4.18.

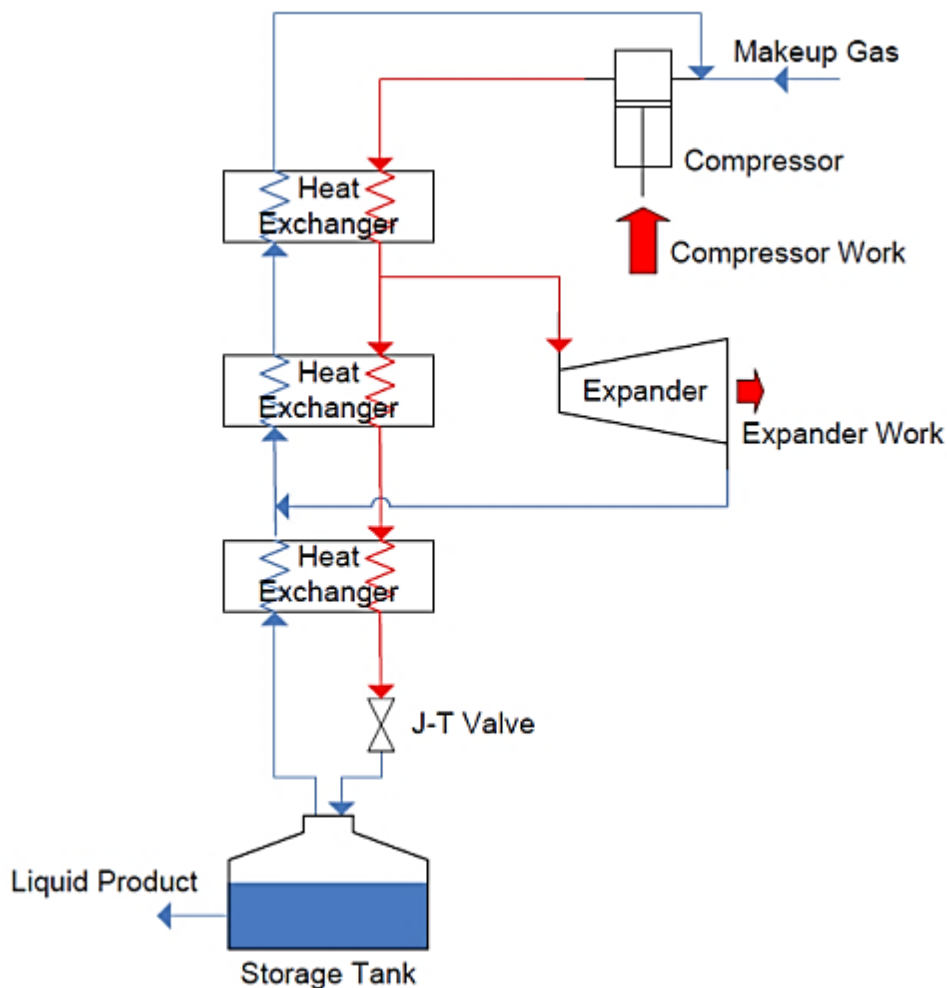


Εικόνα 4.18: Κύκλος Heylandt (63. Refrigeration and Liquefaction)

5.9. Υγροποίηση υδρογόνου

Παρόλο που οι μεγάλοι βιομηχανικοί κύκλοι υγροποίησης είναι συνήθως πολύπλοκοι, πολλοί βασίζονται στον κύκλο Claude (Peschka,1992)(Gross, 1994). Στον κύκλο αυτό, το υδρογόνο είναι τόσο το προϊόν όσο και το εργαζόμενο μέσο. Μία ή περισσότερες μηχανές εκτόνωσης απορροφούν έργο από το εργαζόμενο μέσο, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας του. Τελικά, μια βαλβίδα Joule-Thomson οδηγεί το ρευστό σε κατάσταση δύο φάσεων, και το κορεσμένο υγρό απομακρύνεται από τον κύκλο. Η συμπλήρωση του αερίου στο θερμό άκρο διασφαλίζει μια σταθερή μάζα στο σύστημα. Το έργο της μηχανής εκτόνωσης στον κύκλο Claude μειώνει το έργο συμπίεσης και μειώνει τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου.

Συχνά ο κύκλος Claude τροποποιείται ώστε να έχει δύο συμπιεστές και ονομάζεται κύκλος Claude «διπλής πίεσης». Ο πρώτος πραγματοποιεί συμπίεση από χαμηλή σε ενδιάμεση πίεση, και τα καυσαέρια παρέχουν πρόσθετη ψύξη στον ατμό υψηλής πίεσης. Είναι επίσης πιθανό να υπάρχει εκτόνωση μεταξύ της υψηλής και της ενδιάμεσης πίεσης. Ο ατμός υψηλής πίεσης εκτονώνεται κατά μήκος της βαλβίδας J-T στη χαμηλής πίεσης δεξαμενή αποθήκευσης. Ο ατμός χαμηλής πίεσης ανακυκλοφορεί και ψύχει το ρεύμα ενδιάμεσης πίεσης και υψηλής πίεσης. Οι παραλλαγές του κύκλου Claude διπλής πίεσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργοστάσια υγροποίησης υδρογόνου (Peschka,1992). Τα περισσότερα εργοστάσια χρησιμοποιούν πρόψυξη υγρού αζώτου, ορθο- πάρα κατάλυση πολλαπλών σταδίων, και περισσότερες από μία μηχανές εκτόνωσης.



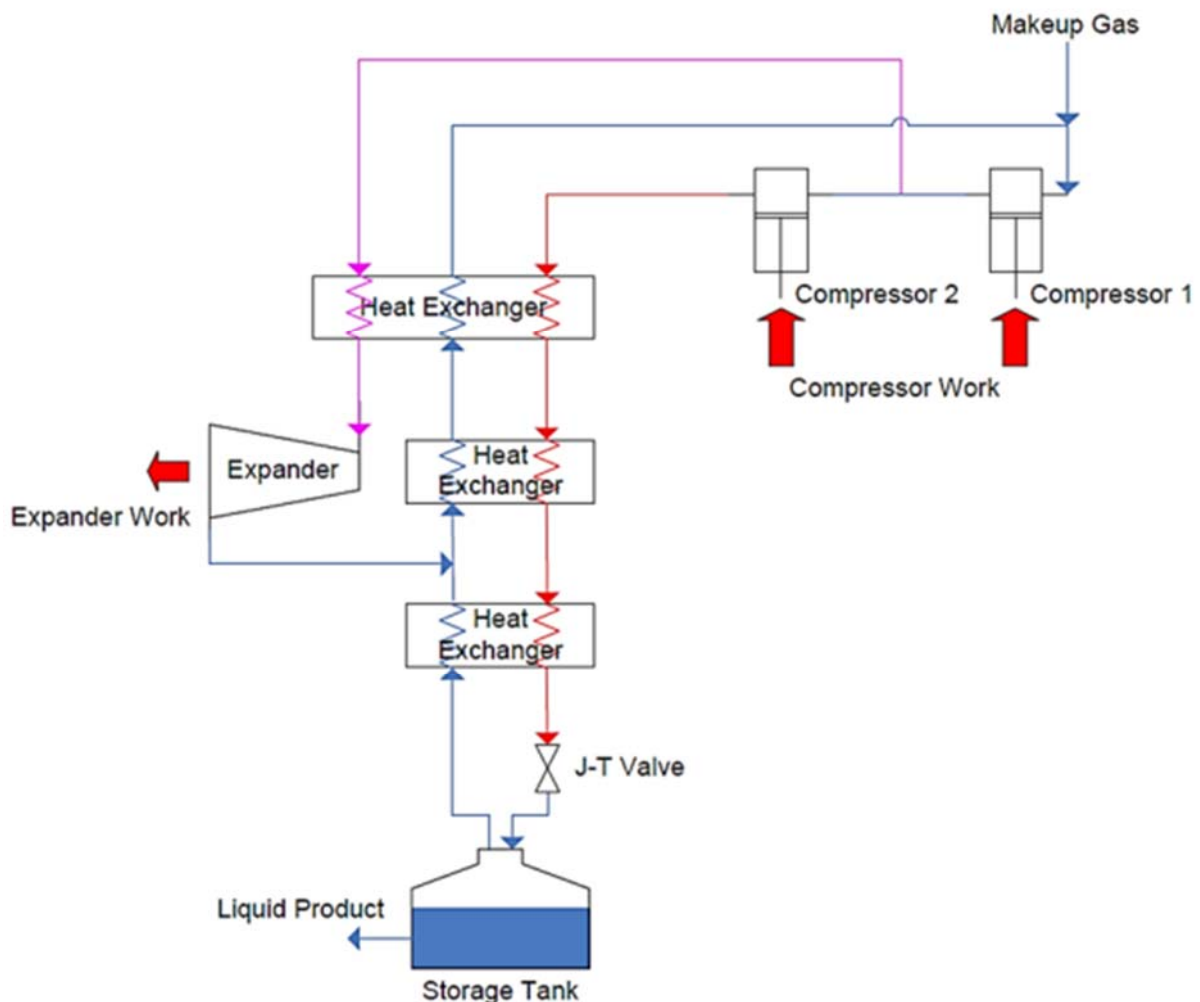
Εικόνα 4.19: Απλός κύκλος Claude (69. Staats W.)

Η βιομηχανική υγροποίηση του υδρογόνου ξεκίνησε τη δεκαετία του 50 όταν το πρόγραμμα ατομικών όπλων των ΗΠΑ και οι αποστολές Apollo της NASA δημιούργησαν την ανάγκη για μεγάλες ποσότητες υγρού υδρογόνου (Almqvist,2003) (Flynn, 2005). Το Εθνικό Γραφείο Προτύπων έκανε πειράματα με υγροποίηση υδρογόνου μεγάλης βιομηχανικής κλίμακας, ξεκινώντας το 1952 και η κατασκευή εμπορικών εργοστασίων στο Οχάιο, τη Φλόριντα και την Καλιφόρνια πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 50. Η βιομηχανία έχει πολλά χρόνια εμπειρίας με εργοστάσια με δυναμικότητα τόνων. Επίσης, ο Flynn εκτίμησε το συνολικό δυναμικό υγρού υδρογόνου των ΗΠΑ σε 172t/day το 1990, το οποίο είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερο από την εκτίμηση που μόλις είχε γίνει για την απαίτηση 4100 t/day για την ικανοποίηση του 1% της κατανάλωσης βενζίνης των ΗΠΑ.

Το 1961, ο Vander Arend περιέγραψε έναν υγροποιητή υδρογόνου πρώτης γενιάς βιομηχανικής κλίμακας, με παραγωγή υδρογόνου και δυνατότητα υγροποίησης 27ton/day. Η αξιοπιστία ήταν εξαιρετικά σημαντική, πράγμα το οποίο απέκλειε την επιλογή ενός θερμοδυναμικά ανώτερου σχεδιασμού. Για παράδειγμα, στο σύστημα χρησιμοποιείται μία μόνο μηχανή εκτόνωσης για να αποφευχθεί η πιθανή αστοχία των

πρόσθετων μηχανών, και το έργο της μηχανής εκτόνωσης δεν ανακτάται. Το σύστημα αποτελείται από εργαζόμενο μέσο υδρογόνο διπλής πίεσης με πρόψυξη αζώτου και εκτόνωση μεταξύ της ενδιάμεσης και της χαμηλής πίεσης. Ένα ξεχωριστό παραγόμενο ρεύμα υδρογόνου καθαρίζεται και ψύχεται από ένα βοηθητικό σύστημα ψύξης με νέον και τελικά από το υδρογόνο του κύκλου. (69. Staats W.)

Οι Gross et al., περιέγραψαν ένα εργοστάσιο υγροποίησης υδρογόνου Linde στην περιοχή Ingolstadt της Γερμανίας το 1994 (Gross, 1994). Το εργοστάσιο βασίζεται σε ένα κύκλο Claude και έχει πρόψυξη από υγρό άζωτο. Δύο παλινδρομικοί συμπιεστές παρέχουν λειτουργία διπλής πίεσης, και τρεις μηχανές εκτόνωσης εν σειρά λειτουργούν μεταξύ της υψηλής πίεσης (22 bar) και της ενδιάμεσης πίεσης (3 bar). Η κύρια βαλβίδα J-T λειτουργεί μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής (1,3 bar) πίεσης. Το παραγόμενο ρεύμα καθαρίζεται σε μονάδα απορρόφησης με εναλλαγή πίεσης πριν την είσοδο στον υγροποιητή και ο τελικός καθαρισμός επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία υγρού αζώτου σε έναν πρόσθετο προσροφητή χαμηλής πίεσης.



Εικόνα 4.20: Κύκλος Claude διπλής πίεσης (69. Staats W.)

Το 1974 ο Strobbridge διεξήγαγε μια έρευνα σε 144 κρυογονικούς ψύκτες και υγροποιητές. Ο βαθμός απόδοσής τους σχεδιάστηκε ως προς την ικανότητα ψύξης μηχανών για 1,8-9K, 10-30K και 30-90K. Οι μηχανές μεγάλης ικανότητας των 10-30K έδειξαν βαθμούς απόδοσης 30%-40%. Πέραν της απόδοσης, ο Strobbridge μελέτησε το σχετικό κόστος των ψυκτών και των υγροποιητών που λειτουργούν στο εύρος 1,8-9K και συμπέρανε το ότι το κόστος κεφαλαίου είναι ανάλογο της ισχύος εισόδου υψωμένη στη δύναμη 0,7.

Η χρήση του υδρογόνου ως εργαζόμενου μέσου σε ένα κύκλο παρουσιάζει προβλήματα. Σε ένα σύστημα με μια βαλβίδα J-T που εκτονώνεται και φτάνει εντός της κορεσμένης περιοχής, μόνο ένα μικρό μέρος του εισερχόμενου ρεύματος εξάγεται ως υγρό. Συχνά, η παραγωγή είναι ένα μικρό μόνο τμήμα της παροχής του κύκλου (Barron, 1985), αλλά μπορεί να είναι και μέχρι 60% σε ένα κύκλο Claude διπλής πίεσης με ιδανικά στοιχεία και εναλλάκτες θερμότητας (Peschka, 1992). Οι συμπιεστές, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι μηχανές εκτόνωσης πρέπει να είναι διαστασιολογημένοι ώστε να διαχειρίζονται παροχές υδρογόνου σημαντικά μεγαλύτερες από τη δυναμικότητα του εργοστασίου.

Η βαλβίδα J-T είναι πηγή μη αποδοτικότητας. Σε μια βαλβίδα J-T, το ρευστό ρέει από την υψηλή προς τη χαμηλή πίεση, και δεδομένου ότι το ρευστό έχει θετικό συντελεστή Joule Thomson, καταλήγει σε θερμοκρασιακή μείωση. Η ροή του ρευστού μέσω της βαλβίδας παράγει εντροπία, η οποία αναπαριστά απώλεια στο σύστημα και είναι επιζήμια για τη συνολική απόδοση του εργοστασίου. Όμως, ένα σύστημα χωρίς βαλβίδα J-T συνεχίζει να απαιτεί μια μέθοδο μείωσης της πίεσης του παραγόμενου ρεύματος ως την πίεση αποθήκευσης. Οι δυσκολίες σχεδιασμού μιας μηχανής εκτόνωσης που να λειτουργεί σε κατάσταση δύο φάσεων, με την απαραίτητη αξιοπιστία, κάνει απαραίτητη τη βαλβίδα J-T, παρά την εγγενή αύξηση της εντροπίας. (69. Staats W.)

5.10. Ψύκτες κύκλου Claude

Όλοι οι ψύκτες που χρησιμοποιούν ήλιο βασίζονται στον κύκλο Claude, αν το εύρος λειτουργίας τους ξεπερνά αυτό των κρυογονικών ψυκτικών μηχανών. Για εύρος ισχύος 50 με 1000 W στους 4.5 K, ο κύκλος ψύξης Claude με δυο μηχανές εκτόνωσης και μια βαλβίδα J-T, είναι ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ κόστους επένδυσης (εξοπλισμός) και λειτουργικού κόστους (απόδοση), για υψηλότερες ψυκτικές ικανότητες είναι προτιμότερος ο σχεδιασμός πιο πολύπλοκους κύκλων Claude με περισσότερες μηχανές εκτόνωσης και πιο σύνθετη κατανομή ροής στους εναλλάκτες θερμότητας.

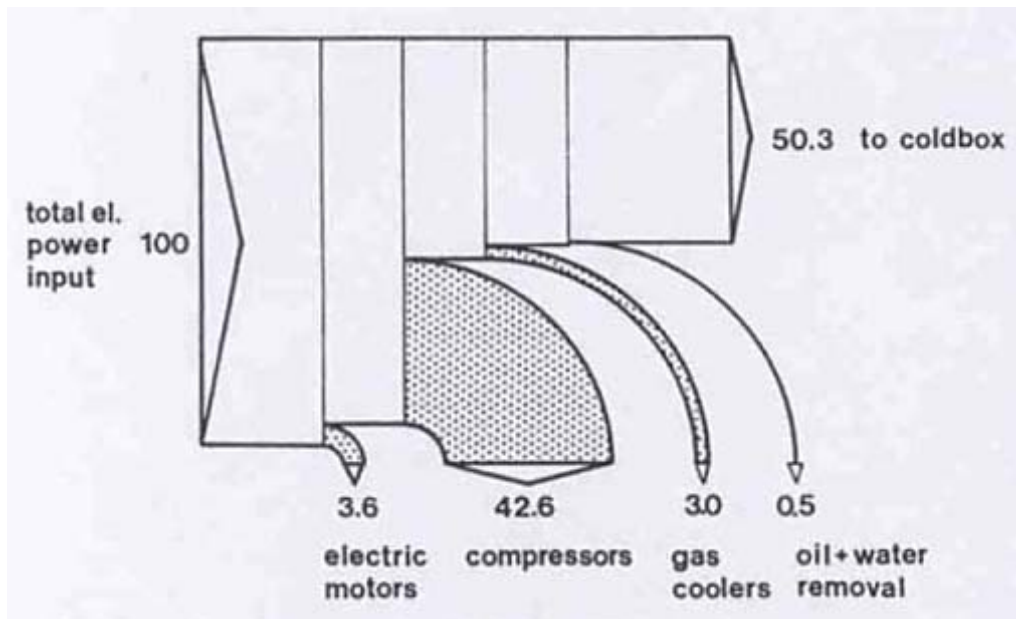
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου ψύκτη σχεδιασμένου για έναν επιταχυντή με χρήση υπεραγωγίων μαγνητών είναι οι ψύκτες HERA. Η δυναμικότητα για κάθε ψύκτη HERA δίνεται στον πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει μια ισόθερμη ψύξη και υγροποίηση σε θερμοκρασία υγρού ηλίου, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι 4,3K, και ένα μη ισόθερμο φορτίο ψύξης για την ψύξη κάτω από τους 80K. Για να υπολογιστεί η ισοδύναμη ικανότητα ψύξης πρέπει να είναι γνωστό ότι για την ψύξη και την υγροποίηση στους 4,3K παρέχεται υπόψυκτο ήλιο στους 4,5K και σε πίεση 0,4MPa και ο ατμός

επιστρέφει στα 0,11 MPa. Υπολογίζεται ότι η συνολική εξεργειακή ικανότητα των 799 kW ισοδυναμεί με 12,2 kW ισόθερμης ψύξης στους 4,5K. (70. Wagner U.)

Πίνακας 4.1: Δυναμικότητα σχεδιασμού ψύκτη HERA (70. Wagner U.)

Cryogenic load		Process design capacity
Refrigeration at 4.3 K	[W]	6875
Vapor superheating at 0.11 MPa	[W]	275
Liquefaction at 4.3 K	[g/s]	22.5
Refrigeration at 40 K to 80 K	[W]	22000

Μια λεπτομερής εξεργειακή ανάλυση της διαδικασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.21, όπου φαίνεται η συνεισφορά απωλειών κάθε στοιχείου της διεργασίας. Σημαντική είναι η συμμετοχή των συμπιεστών ηλίου στις συνολικές απώλειες, και του συστήματος συμπίεσης γενικά, καθώς μόνο το 50% περνά στο κρυογενικό τμήμα της διεργασίας. Αυτό είναι δεδομένο λόγω των μηχανών που χρησιμοποιούνται και εν γένει συμφωνεί με τον κύκλο Claude. Καθώς το τμήμα αυτό δε μπορεί να βελτιωθεί, έγινε προσπάθεια από το σχεδιαστή του συστήματος να βελτιωθεί το κρυογενικό κομμάτι της διαδικασίας. Η απόδοση του ψυχρού τμήματος στην περίπτωση αυτή είναι περίπου 56%, τιμή η οποία μπορεί να θεωρηθεί πολύ καλή για μεγάλους ψύκτες. (70. Wagner U.)



Εικόνα 4.21: Διάγραμμα ροής εξέργειας για τους ψύκτες HERA (70. Wagner U.)

Η τελική εξεργειακή ανάλυση δείχνει ότι στο ψυχρό τμήμα παρέχεται περίπου το 28,1%, το οποίο αντιστοιχεί σε εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύ στο σύστημα 2,84 MW (Εικόνα 4.21).

Συμπεράσματα

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο αντίστροφος θερμοδυναμικός κύκλος Brayton βασίζεται στον απλό κύκλο Brayton, που σχετίζεται με την πλειοψηφία των αεριοστροβιλικών συστημάτων, όπου ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το εργαζόμενο μέσο, διέρχεται από τον στρόβιλο μόνο μία φορά. Η μετατροπή του απλού κύκλου σε αντίστροφο, χρησιμοποιείται σε συστήματα ψυκτικών κύκλων αερίων. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια τροποποίηση του αντίστροφου κύκλου Carnot, καθώς οι δύο ισόθερμες διεργασίες του κύκλου Carnot αντικαθίστανται από δύο ισοβαρείς διεργασίες μεταφοράς θερμότητας. Ο αντίστροφος κύκλος Brayton είναι κατάλληλος για συστήματα ψύξης αυτοκινήτων, αεροσκαφών ακόμα και σε διαστημικές εφαρμογές ως κρυογονικός ψύκτης.

Η απλότητα του κύκλου και η γρήγορη εκκίνησή του, οδήγησαν στην υιοθέτησή του και ως κύκλος υγροποίησης του φυσικού αερίου. Έτσι, στο πλαίσιο της έρευνας στο συγκεκριμένο τομέα έχουν δημιουργηθεί αρκετές τροποποιήσεις με χρήση κύκλου πρόψυξης, διβάθμιας εκτόνωσης, δηλαδή στρόβιλος σε σειρά με αναγεννητικό εναλλάκτη θερμότητας μετά την πρώτη εκτόνωση, καθώς και διπλού στροβίλου, όπου οι δύο στρόβιλοι τοποθετούνται παράλληλα. Το αναπόφευκτο αρνητικό επακόλουθο της βελτίωσης της απόδοσης της υγροποίησης που επιτυγχάνεται μέσω των παραλλαγών αυτών, είναι ότι δεν είναι κατάλληλες για εφαρμογές με περιορισμό χώρου, καθώς αυξάνουν σημαντικά το μέγεθος της εγκατάστασης.

Αναφορικά με τη μηχανή Stirling, η ιδέα του R. Stirling ήταν πρωτοποριακή αφού ο κινητήρας του λειτουργεί χωρίς χρήση βαλβίδων (σε αντίθεση με τις MEK), σε κλειστό χώρο με το εργαζόμενο μέσο να χρησιμοποιείται συνεχώς. Το έμβολο ισχύος βρίσκεται στην κρύα περιοχή του κινητήρα και η παρουσία του αναγεννητή (regenerator) αυξάνει την απόδοση του πραγματικού κύκλου.

Σήμερα οι μηχανές Stirling διεγείρουν σημαντικά το ενδιαφέρον σε σχέση με την εφαρμογή τους, αφού ρυπαίνουν ελάχιστα, λειτουργούν αθόρυβα, πρακτικά χωρίς ταλαντώσεις, μπορούν να έχουν πολλαπλή τροφοδοσία (ηλιακή ενέργεια, διάφορα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, ακόμα και πυρηνικό καύσιμο), λειτουργούν αναστρέψιμα (σαν θερμικές μηχανές ή αντλίες θερμότητας), παρουσιάζουν μηχανολογική απλότητα, πολλαπλές εφαρμογές και μέγιστη απόδοση (θεωρητικά όση του κύκλου Carnot).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα, τα σημεία που διαπιστώθηκαν ότι χρήζουν βελτίωσης είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους, μιας και συνήθως κοστίζουν τουλάχιστον διπλάσια τιμή σε σχέση με τις μηχανές Diesel για την ίδια αποδιδόμενη ισχύ. Αυτό οφείλεται στα ακριβά τμήματα της μηχανής (π.χ. θερμαντήρας), καθώς και στα στεγανωτικά (Seals) τα οποία πρέπει να είναι πολύ καλής ποιότητας για να μη διαρρέει το εγκλωβισμένο εργαζόμενο μέσο, το οποίο συνήθως έχει μικρό MB και εργάζεται σε υψηλές ταχύτητες και υπό μεγάλες πιέσεις.

Το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί σε σχέση με τα κρυογονικά αέρια και τις διεργασίες τους, όπως είναι οι μέθοδοι Linde και Claude, είναι ότι μόνο θετικά αποτελέσματα έχουν έως τώρα να παρουσιάσουν. Είναι συνεπώς αναμενόμενη η συνεχής εξάπλωση αυτής της μεθόδου σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Ήδη έχει αρχίσει να εισβάλλει στην αυτοκινητοβιομηχανία σε αντίστοιχα συστήματα ψύξης, στην αμυντική βιομηχανία, στη βιομηχανία ιατρικών οργάνων, καθώς και στην κατεργασία και παραγωγή ποιοτικότερων μεταλλικών αντικειμένων, ενώ δεν είναι μακριά οι μέρες που πολλά πλαστικά θα υπόκεινται σε κρυογονική επεξεργασία κατά την παραγωγή τους. Προς το παρόν, οι επιστήμονες που ασχολούνται με τις κρυογονικές μεθόδους, προσπαθούν να ερμηνεύσουν πλήρως τα φαινόμενα που συμβαίνουν, να βελτιστοποιήσουν της θετικές επιδράσεις τους πάνω στα υλικά ή τις διεργασίες και να ελαχιστοποιήσουν σημαντικά τα μειονεκτήματά τους. Προς αυτή την κατεύθυνση γίνονται προσπάθειες ώστε να αναπτυχθούν οι διαδικασίες που θα μειώσουν το κόστος της βαθιάς ψύξης και της υψηλής ενεργειακής της απαίτησης και θα επιτρέψουν την εισαγωγή της κρυογονικών μεθόδων δυναμικά στη βιομηχανία.

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της κρυογονικής ψύξης, ποικίλλουν ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης και το είδος του κρυογονικού αερίου που χρησιμοποιείται. Ανεξαρτήτως εφαρμογής η ψύξη παράγεται είτε με εκτόνωση είτε με στραγγαλισμό από μια υψηλότερη σε μια χαμηλότερη πίεση. Η ψυχρή πλευρά οποιουδήποτε κρυογονικού κύκλου πρέπει να περιλαμβάνει είτε βαλβίδα στραγγαλισμού Joule Thomson είτε διάταξη αποτόνωσης. Πάντα είναι προτιμότερη η αναστρέψιμη διεργασία, η οποία όμως περιπλέκει την εγκατάσταση με κινούμενα μέρη (π.χ. στρόβιλος). Η βαλβίδα Joule- Thomson αποτελεί απλούστερη διάταξη, αλλά δε μπορεί να εφαρμοσθεί στην υγροποίηση του υδρογόνου, καθώς μόνο σε θερμοκρασίες κάτω των 150K ψύχεται με ισενθαλπικό στραγγαλισμό. Για το λόγο αυτό, όπως περιγράφηκε, η υγροποίηση του υδρογόνου απαιτεί πάντα πρόψυξη με άζωτο.

Στις χρησιμοποιούμενες διατάξεις, η απαιτούμενη συμπίεση γίνεται όσο το δυνατόν αναστρέψιμα και ισοθερμοκρασιακά. Για το λόγο αυτό η συμπίεση συνήθως είναι πολυβάθμια και με ενδιάμεσες ψύξεις. Οι μέθοδοι Linde και Claude βασίζονται στη λογική αυτή, αλλά η μέθοδος Claude αποτελεί βελτίωση, καθώς ένα μέρος του μη αναστρέψιμου στραγγαλισμού γίνεται με αναστρέψιμη αδιαβατική αποτόνωση και ταυτόχρονη παραγωγή έργου. Με τον τρόπο αυτό, η παραγόμενη ψύξη είναι μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα για την υγροποίηση 1 kg αέρα με τη μέθοδο Claude, απαιτείται ενέργεια ίση με 1 kWh, ενώ με τη μέθοδο Linde περίπου 1,45 kWh. Βέβαια στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφοροι συνδυασμοί των μεθόδων υγροποίησης, ώστε να υπάρχει βέλτιστη προσαρμογή στις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης.

Βιβλιογραφία

1. ΚΑΠΕ, Οδηγός Συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας, Γ.Δ Ενέργειας και Μεταφορών.
2. Μαθιουδάκης Κ, “Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων” ,ΕΜΠ Αθήνα 1997.
3. Bahrami M., Gas Refrigeration Cycles, Reversed Brayton Cycle, ENSC 461 Tutorial.
4. Beatrice L. H. M., and Fiorelli F. A. S., Feasibility of a Brayton cycle automotive air conditioning system, (Thermal Engineering), Vol. 8 • No 02 • December 2009 • p. 10-14.
5. Chang H.M., Park J.H., Cha K.S., Lee S. and Choe K.H., Modified Reverse-Brayton Cycles for Efficient Liquefaction of Natural Gas, Cryocoolers 17, International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO, 2012
6. Forrest, W., and Bhatti, M., 2002, Energy efficient automotive air conditioning system, Proceedings of the SAE 2002 World Congress, Detroit, USA.
7. Gomes Jeff, Module 4: Refrigeration and Liquefaction (EG3539), Module 4.2: Gas-Refrigeration Cycles, School of Engineering, University of Aberdeen, 18th-21st March 2013.
8. Guzik Monica C., Tomsik Thomas M., An active broad area cooling model of a cryogenic propellant tank with a single stage reverse turboBrayton cycle cryocooler, NASA Glenn Research Center, TFAWS 2011 – August 15-19, 2011
9. Henry Cohen, G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravanamuttoo, «Gas Turbine Theory», 4th ed
10. Hou Y., Zhao H.L., Chen C.Z. and Xiong L.Y., Developments in Reverse Brayton Cycle Cryocooler in China.
11. Kaynakli, Ö., Horuz, I., 2003, An experimental analysis of Automotive Air Conditioning System, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No. 2, pp. 273-284.
12. Kharagpur IIT, Air cycle refrigeration systems, Lesson 9, Version 1 ME.
13. Shet U.S.P., Sundararajan T., Mallikarjuna J.M ., Air Conditioning and Refrigeration, Ideal Reverse Brayton Cycle, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, LECTURE-15.
14. Zagarola M.V., J.J. Breedlove, C.S. Kirkconnell, J.T. Russo, T. Chiang, Demonstration of a Two-Stage Turbo- Brayton Cryocooler for Space Applications, Cryocoolers 15, International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO 2009.
15. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2010, Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας & Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε κτήρια, ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ, Αθήνα, Δεκέμβριος 2010.
16. Χατζηδάκης Σ., Σημειώσεις Ψύξης Α και Β μέρος, Αθήνα 2003.
17. Berchowit D. M., and Shonder J., Estimated size and performance of a natural gas fired duplex Stirling for domestic refrigeration applications, In proceedings of XVIIIth International Congress of Refrigeration, pp. 1350 -1354, 1991.
18. Global Cooling BV, Sunpower Inc, The free - piston Stirling cooling system, 19th International Congress on Refrigeration, The Netherlands, 1995.
19. Hargreaves C.M., “The Philips Stirling Engine”, Elsevier, New York, 1991.

20. Haywood David, “An introduction to Stirling-cycle machines “University of Canterbury,1999.
21. Hirata K., “Schmidt theory for stirling engines “Tentative version, 1997.
22. Meijer R. J., K. Khalili, et al., Stirling Cycle Heat Pump for Heating and/or Cooling Systems, Stirling Thermal Motors, U.S. Patent 4,996,841, 1991.
23. Moreno James et. al, Dish/Stirling Hybrid-Heat-Pipe-Receiver Design and Test Results, IECEC 2002 Paper No. 20147.
24. Organ J. Allan, The Regenerator and the Stirling Engine 1997, Mechanical Engineering Publications Limited.
25. Radebaugh Ray, Pulse Tube Cryocoolers for Cooling Infrared Sensors, Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, Infrared Technology and Applications XXVI, Vol. 4130, pp. 363-379 (2000).
26. Sato Y., H. Sugita, K. Komatsu, R. Shimizu, H. Uchida, T. Nakagawa, H. Murakami, K. Mitsuda, M. Murakami, I. Iwata, S. Tsuneta, S. Tsunematsu, K. Kanao, K. Ootsuka, M. Hirabayashi, Development of Advanced Two-Stage Stirling Cryocooler for Next Space Missions, Cryocoolers 15, ICC, Boulder, CO, 2009.
27. Walker G., “Stirling Engines”, Clarendon Press, Oxford, 1980, ISBN No. 0-19-856209-8.
28. Walker G., Senft, J.R, “Free Piston Stirling Engines”, Springer-Verlag, Berlin eidelderg New York Tokyo, 1985.
29. www.stirlingenergy.com
30. Κορατζίνος Μιχάλης, Ο μεγάλος Αδρονικός Επιταχυντής LHC, Greek NTP Programme, 2011.
31. ΦΕΚ 370/ 9 Ιουνίου 1988.
32. Χριστοφορίδης Θεόδωρος, "Αριθμητική διερεύνηση καύσης υδρογόνου και αερίου σύνθεσης για εφαρμογές σε συστήματα καύσης και μετατροπής ενέργειας”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, 2009
33. Aaron J Morgan, MD; Chief Editor: Dirk M Elston, MD, Overview of Cryotherapy, Medscape 2012.
34. Ackermann Robert A., Herd Kenneth G., Cryogenic cooling system, United States Patent, Patent Number: 5,513,498, Date of Patent: May 7, 1996.
35. Andersson K. and P. Maksinen (2002), “Process evaluation of CO2 free combustion in an O2/CO2 power plant”, Master thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
36. CRYO Industries of America, Inc., Closed Cycle Cryogen Free Cooling of Flow Cryostats.
37. Darwin J.D., Mohan Lal D., Nagarajan G., “Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method”, Journal of Materials Processing Technology, 2008, VOL.195, pp. 241–249.
38. Dash Sunil Manohar, Study of cryogenic cycles with aspen - hysys simulations, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2008.
39. Flavio J. da Silva, Sinesio D. Franco, Alisson R. Machado, Emmanuel O. Ezugwu, Antonio M. Souza Jr. “Performance of cryogenically treated HSS tools“ Wear, 2006, VOL.261, pp. 674–685.
40. Freiman A, Bouganim N. History of cryotherapy. Dermatol Online J. Aug 1 2005.
41. Gazis E. About LHC – Cryogenesis.

42. Graham GF. Cryosurgery. *Fitzpatrick's Dermatology in General Medicine*. New York, NY: McGraw-Hill; 1999.
43. Hersey Devin W., Cryogenic cooling system with precooling stage, United States Patent, Patent Number: 4,829,785, Date of Patent: May 16, 1989.
44. Herzog H. and D. Golomb (2004), "Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel use", *Encyclopedia of Energy*.
45. Lipman Timothy, An overview of hydrogen production and storage systems with renewable hydrogen case studies, A clean energy states alliance report, 2011.
46. Mathieu P. (2003), "Mitigation of CO₂ emissions using Low and Near Zero CO₂ emission Power Plants", *Clean Air International Journal on Energy for a Clean Environment*, Vol. 4, No 1.
47. Recommendations for the processing and Handling of Frozen Foods, International Institute of Refrigeration (IIR), 4th edition 2006.
48. Stoecker. Wilbert F., "Industrial Refrigeration Handbook", McGraw Hill, 1998.
49. Yakup Yildiz, Muammer Nalbant "A review of cryogenic cooling in machining processes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issue 9, July 2008, Pages 947–964.
50. Zhirafar S., Rezaeian A., Pugh M., "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel" *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, VOL.186 pp. 298–303.
51. <http://cryogenics.gr/>
52. www.airliquide.com
53. www.cryogenics.nist.gov/
54. www.cryogenicsinternational.com
55. www.linde.com
56. www.linde-gas.gr
57. www.specoilandgas.com
58. Λάμπρου Ευάγγελος, Σιακούλης Ορέστης, Τεχνολογία και συνδυασμένα συστήματα παραγωγής υδρογόνου, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών.
59. Σοφός Ορέστης, Εισαγωγή του Φυσικού Αερίου στην Ηλεκτροπαραγωγή της Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 2013.
60. Dunn S., *Hydrogen Futures: Towards a Sustainable Energy System*, Worldwatch Paper 157, August 2001, ISBN 1-878071-59-9.
61. Papadopoulos A. M. and Koroneos C. J., *Cefrigeration and Cryogenic systems*, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2012.
62. Perinić G., Vandoni G., Niinikoski T., *Introduction to Cryogenic Engineering*, CERN 2005.
63. *Refrigeration and Liquefaction*, University of Wisconsin – Madison.
64. Sunil Manohr Dash, *Study of cryogenic cycles with aspen - hysys simulations*, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2008

65. Dincer Ibrahim, Kanoglu Mehmet, Refrigeration Systems and Applications, Second edition, Wiley, 2010.
66. Jha A. R., Cryogenic Technology and Applications, Oxford, UK, Elsevier, 2006.
67. Moon J. W., Lee Y. P., Jin Y. W., Hong E. S., and Chang H. M., Cryogenic Refrigeration Cycle for Re-Liquefaction of LNG Boil-Off Gas, Cryocoolers 14, edited by S.D. Miller and R.G. Ross, Jr. International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO, 2007.
68. Prasad S., "Study Cryogenics Cycles with ASPEN - HYSYS simulation" N.I.T Rourkela 2009.
69. Staats Lawrence Wayne, Analysis of supercritical hydrogen liquefaction cycle, MIT, Department of Mechanical Engineering, 2008.
70. Wagner U., REFRIGERATION, CERN, Geneva, Switzerland.
71. Weisend J. G., Lecture 6 - Refrigeration & Liquefaction, 2013.
72. <http://catalysis.gr/thermodynamics/physicalprocesses/claudeprocesses-1.html>