



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ DeltaEC”**

Βασίλειος Παπασταμόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Ε. Δ. Ρογδάκης

Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΗΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή έχει σκοπό να παρουσιαστεί η λειτουργία των θερμοακουστικών συσκευών, το εξειδικευμένο για την προσομοίωση θερμοακουστικών μηχανών, πρόγραμμα DeltaEC, καθώς και η συμπεριφορά κάποιων εφαρμογών με τη χρήση του προγράμματος.

Η εργασία αποτελείται από τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος (κεφάλαιο 1) παρουσιάζονται βασικές έννοιες της θερμοακουστικής και γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις έρευνες και στις εφαρμογές της θερμοακουστικής από την ανακάλυψη του φαινομένου, ως τις σύγχρονες εφαρμογές. Εξηγείται η λειτουργία των μηχανών και αναλύεται ο θερμοδυναμικό κύκλος τους. Στο δεύτερο μέρος (κεφάλαιο 2) παρουσιάζεται το πρόγραμμα η λειτουργία και οι δυνατότητες του με τη χρήση απλών παραδειγμάτων. Στο τρίτο μέρος (κεφάλαια 3-4) γίνεται περιγραφή κάποιων θερμοακουστική συσκευών και της λειτουργίας τους, καθώς γίνεται και προσομοίωση της λειτουργίας τους μέσω του προγράμματος DeltaEC. Στο τρίτο κεφάλαιο προσομοιώνονται συσκευές με αποκλειστικά ταλαντωτική ροή (με μηδενική σταθερή ροη), ενώ στο τέταρτο συσκευές με μη μηδενική σταθερή ροή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή για την πολύτιμη βοήθειά του και ψυχική υποστήριξη που μου παρείχε για την εκπόνηση της εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ-ΟΡΙΣΜΟΙ	1
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	2
1.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ	2
1.2.2 ΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	7
1.3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	17
1.3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	19
1.3.2 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	29
1.3.3 ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	32
1.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	36
1.4.1 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	40
1.4.2 ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	42
1.4.3 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΑΕΡΙΑ	46
1.5 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	48
1.5.1 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	48
1.5.2 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	50
1.5.3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ DELTAEC	57
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ DELTAEC	57
2.2 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ DELTAEC	59
2.2.1 ΑΠΛΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ BOTTLE	59

2.2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ (SEGMENTS) ΠΟΥ ΑΝΑΓΝΩΡΙΖΕΙ ΤΟ <i>DeltaEC</i>	60
2.2.3 <i>GUESSES-TARGETS</i>	62
2.2.4 <i>ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΧΗΣΗΣ</i>	66
2.3 PLOTTING	68
2.3.1 <i>ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</i>	68
2.3.2 <i>ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΑΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ</i>	72
2.4 ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	77
2.4.1 <i>ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ</i>	77
2.4.2 <i>ΑΕΡΙΑ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΑ</i>	77
2.4.3 <i>Η ΙΔΙΟΤΗΤΑ SAMEAS</i>	78
2.4.4 <i>MASTER-SLAVELINKS</i>	78
2.4.5 <i>RPN</i>	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ DELTAEC	82
3.1 ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΨΥΚΤΗΣ HOFLER	82
3.1.1 <i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</i>	82
3.1.2 <i>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</i>	85
3.2 ΜΗΧΑΝΗ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	91
3.2.1 <i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</i>	91
3.2.2 <i>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</i>	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ	106
4.1 ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ	106
4.2 Ο ΨΥΚΤΗΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΟΥ REID	107
4.2.1 <i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</i>	107

<i>4.2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</i>	<i>110</i>
4.3 Η ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ STIRLING	118
<i>4.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</i>	<i>118</i>
<i>4.3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</i>	<i>124</i>
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ	134

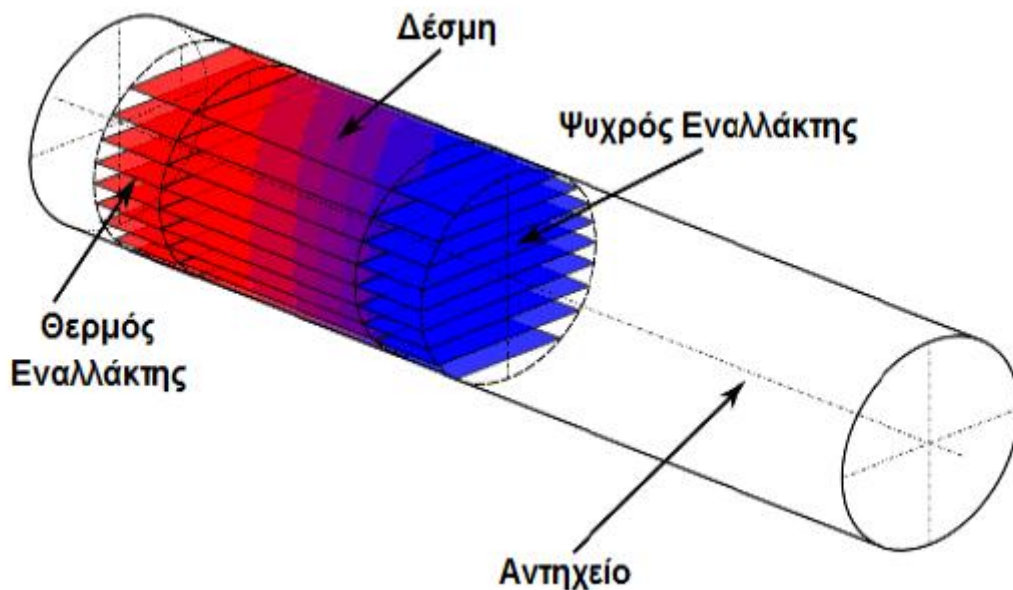
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ-ΟΡΙΣΜΟΙ

Με τον όρο θερμοακουστικές μηχανές αναφερόμαστε στις μηχανολογικές διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμότητα σε ακουστική ισχύ και το αντίστροφο. Οι θερμοακουστικές μηχανές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. τις μηχανές στάσιμου κύματος (standing wave engines) με κύκλο λειτουργίας που προσομοιάζει σε αυτόν του Brayton και
2. τις μηχανές οδεύοντος ή τρέχοντος κύματος με κύκλο λειτουργίας αυτόν του Stirling (travelling wave engines).

Οι θερμοακουστικές συσκευές αποτελούνται από δύο εναλλάκτες θερμότητας (heat exchangers) ψυχρό (cold heat exchanger) και θερμό (hot heat exchanger), το αντηχείο (resonator), μια στοίβα (stack για τις μηχανές στάσιμου κύματος) ή έναν αναγεννητή (regenerator για τις μηχανές τρέχοντος κύματος) κ ανάλογα με το τύπο της μηχανής ένα μεγάφωνο..



Σχήμα 1-1. Σχηματική αναπαράσταση θερμοακουστικής μηχανής

Οι διατάξεις αυτές με τη σειρά τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις κινητήριες μηχανές (γνωστές και ως “θερμικές μηχανές”) και τις αντλίες θερμότητας. Οι θερμικές μηχανές είναι μηχανές που απορροφούν θερμική ενέργεια από μία δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας, μετατρέπουν ένα μέρος της θερμότητας σε ακουστική ενέργεια και αποβάλλουν τη θερμότητα που δεν αξιοποιήθηκε σε μία δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας. Αντίθετα, οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν την ακουστική ενέργεια για να αντλήσουν θερμότητα από μία θερμοκρασιακή δεξαμενή σε μία άλλη με αποτέλεσμα την εμφάνιση κλίσης θερμοκρασίας μεταξύ των δύο δεξαμενών. Επειδή ο θερμοδυναμικός κύκλος τον οποίο ακολουθεί η λειτουργία των θερμοακουστικών συστημάτων είναι ιδανικά αναστρέψιμος, οι ψύκτες κινούνται είτε από ένα μηχανικό σύστημα μετατόπισης αερίου (όπως ένα μεγάφωνο) ή από μία θερμική μηχανή. Τα μεγάφωνα ή οι ηλεκτροδυναμικοί αναδευτήρες, που μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ σε ακουστική ισχύ, είναι σχετικά εύκολα στην κατασκευή και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος. Ωστόσο, οι κινητήριες μηχανές έχουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και δεν έχουν κινούμενα μέρη, με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη λειτουργία.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

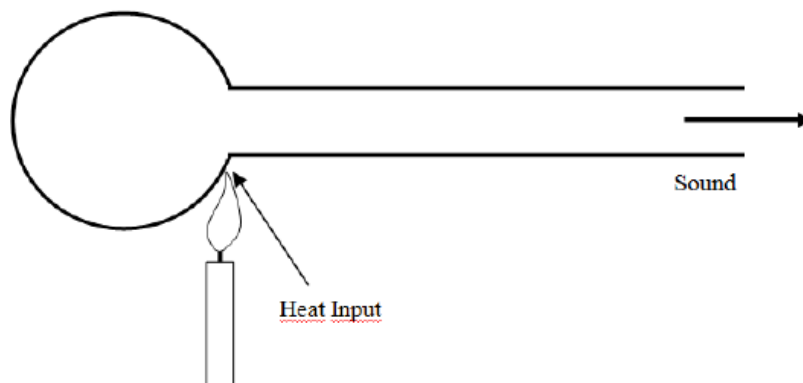
Με τον όρο “θερμοακουστική” εννοούμε τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ακουστική και αντίστροφα. Έρευνες γύρω από τη θερμοακουστική ξεκίνησαν από περιέργεια γύρω από την ταλαντούμενη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ηχητικών κυμάτων που διαδίδονταν σε ένα αέριο και των στερεών τοιχωμάτων των κοιλοτήτων που περιείχαν το αέριο. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι πολύ μικρές για να φανερωθούν στον αέρα, με τον ήχο με τον οποίο επικοινωνούμε κάθε μέρα. Ωστόσο, στα έντονα ηχητικά κύματα στα αέρια υπό πίεση, η θερμοακουστική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθούν ισχυρές μηχανές, αντλίες θερμότητας, ψύκτες και διαχωριστές μιγμάτων. Γι’ αυτό το λόγο, ένα μεγάλο μέρος της έρευνας πάνω στη θερμοακουστική υπαγορεύεται

από την επιθυμία σχεδίασης νέων τεχνολογιών για τη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, οι οποίες θα είναι τόσο απλές και αξιόπιστες όσο και τα ίδια τα ηχητικά κύματα.

Μερικές φορές παρατηρούμε σε γυάλινους φουσητήρες να εκπέμπεται ήχος από το ίδιο το γυαλί όταν η καυτή γυάλινη σφαίρα πλησιάζει το κρύο κυλινδρικό γυαλί. Ο Sondhauss εργάστηκε πάνω στις διαστάσεις του κυλινδρικού γυαλιού και στη συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου [1].

“Αν δοθεί θερμότητα στον αέρα τη στιγμή της μέγιστης συμπύκνωσης (δηλαδή τη στιγμή που έχει τη μέγιστη πυκνότητα) ή του αφαιρεθεί θερμότητα τη στιγμή της μέγιστης αραιώσης, η ταλάντωση ενισχύεται.” Έγραφε ο Sondhauss (Fedlman – 1968) [2].

Ο σωλήνας του Sondhauss (σχήμα 1-2) ερευνήθηκε σαν θερμοακουστική μηχανή το 1850 κ ο σωλήνας Rijke το 1859 [3].



Σχήμα 1-2 Σωλήνας του Sondhauss

Ο Lord Rayleigh εξήγησε το σωλήνα του Sondhauss σωστά το 1896 [4] αλλά ένας θεωρητικός ορισμός έλειπε για πάνω από μισό αιώνα. Το 1962 ο Carter ανακάλυψε ότι οι επιδώσεις του σωλήνα Sondhauss αυξάνονται όταν μέσα στο σωλήνα τοποθετηθούν κατάλληλες παράλληλες πλάκες [5].

Ήταν μια σπουδαία ανακάλυψη για τη θερμοακουστική επειδή η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του αερίου και των πλακών μπορεί να επιτευχθεί από πολλές παράλληλες πλάκες. Έτσι, ένα μεγάλο ποσό έργου μπορεί να παραχθεί από μικρά συστήματα. Ο Feldman ολοκλήρωσε το διδακτορικό του πάνω

στη δουλειά του Carter παράγοντας $27 W$ ακουστικού έργου χρησιμοποιώντας $600 W$ θερμικής ενέργειας. Οι θεωρητικές μελέτες πάνω στην θερμοακουστική συνεχίστηκαν με τον Kirchoff ο οποίος υπολόγισε την ακουστικές δονήσεις από πηγή θερμότητας το 1968 [6].

Ο Rott (1969, 1975, 1980) [7, 8, 9] θεώρησε την έννοια “θερμοακουστική” ως έναν συνδυασμό θερμικών φαινομένων (θερμότητας) και ήχου. Αυτός ανέπτυξε για πρώτη φορά τη μαθηματική διατύπωση που περιγράφει τις ακουστικές ταλαντώσεις ενός αερίου σε κανάλι όπου επικρατεί αξονική κλίση θερμοκρασίας, με τις πλευρικές διαστάσεις του καναλιού να είναι τάξης μεγέθους του θερμικού βάθους διείσδυσης του αερίου δ_k (τυπικά τάξης μεγέθους του $1 mm$), κάτι που είναι σαφώς μικρότερο από το μήκος κύματος (τυπικά τάξης μεγέθους του $1 m$). Στα χρόνια του Rott, τα κίνητρα για την κατανόηση του προβλήματος εμφανίστηκαν κυρίως από το κρυογονικό φαινόμενο, γνωστό και ως ταλαντώσεις Taconis – όταν ένας αγωγός γεμάτος αέριο φθάνει από θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος σε κρυογονική θερμοκρασία, το αέριο μερικές φορές ταλαντώνεται αυθόρμητα, με μεγάλη μεταφορά θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον στο κρυογονικό περιβάλλον.

Η θεωρία του Rott επαληθεύτηκε από τον Yazaki με ήλιο [10], τους Müller και Lang με αέρα [11], και τον Hofler με ήλιο υπό υψηλή πίεση [12] σαν εργαζόμενα αέρια. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη θεωρία του Rott οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η ταλάντωση Taconis ήταν ποσοτικά ακριβής.

Όμοιες ταλαντώσεις μπορούν να υπάρξουν όταν γίνεται ανάφλεξη σε μία κοιλότητα (Zinn – 1986) [13]. Οι ταλαντώσεις εμφανίζονται αυθόρμητα, όταν η ανάφλεξη οδεύει πιο γρήγορα ή πιο αποδοτικά κατά τη διάρκεια της φάσης συμπίεσης της ταλάντωσης της πίεσης από ότι κατά τη διάρκεια της φάσης της αραιώσης.

Οι μαθηματικές διατυπώσεις του Rott εφαρμόστηκαν σε μία κατάσταση όπου η κλίση της θερμοκρασίας κατά μήκος του καναλιού ήταν τόσο ασθενής ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο του Rayleigh, ο Hofler (1988) [14] εφήυρε έναν θερμοακουστικό ψύκτη στάσιμου κύματος και απέδειξε

(Hofler – 1986) [12] για μία ακόμη φορά ότι η προσέγγιση του Rott όσον αφορά την ακουστική σε μικρά κανάλια ήταν ποσοτικά ακριβής. Σε αυτό τον τύπο ψύκτη οι συνδυασμένες ταλαντώσεις της κίνησης του αερίου, της θερμοκρασίας και της μεταφοράς θερμότητας στο ηχητικό κύμα ρυθμίστηκαν στο χρόνο έτσι, ώστε η θερμότητα να απορροφάται από ένα φορτίο σε χαμηλή θερμοκρασία και η αποβαλλόμενη θερμότητα να απορρίπτεται σε μία δεξαμενή υψηλότερης θερμοκρασίας. Οι απόγονοι του ψύκτη του Hofler βρίσκονται υπό έρευνα ακόμη και σήμερα.

Ο ψύκτης με αγωγό παλμών ήταν ο τομέας της κρυογονικής ψύξης που ερευνήθηκε πιο ενεργά. Αυτή η ανάπτυξη ξεκίνησε με την ανακάλυψη από τον Gifford (1965) [15], και τη μεταγενέστερη διερεύνηση, της ψύξης που σχετίζεται με την εφαρμογή τετραγωνικών κυμάτων πίεσης στο ένα άκρο ενός αγωγού, ο οποίος είναι κλειστός στο άλλο άκρο. Αν και η σχέση των δύο εφευρέσεων δεν αναγνωρίστηκε τότε, αυτό το φαινόμενο μοιράζεται αρκετά στοιχεία φυσικής με τον ψύκτη του Hofler (αλλά σε προσέγγιση οριακού στρώματος). Η προσπάθεια του Mikulin (1984) [16] για αξιοπρεπή βελτίωση στη μεταφορά θερμότητας σε ένα μέρος αυτού του “θεμελιώδους” ψύκτη με αγωγό παλμών, οδήγησε σε μία αναπάντεχη βελτίωση της επίδοσης (performance) και ο Radebaugh (1990) [17] συνειδητοποίησε ότι ο ψύκτης με αγωγό παλμών με στόμιο που προέκυψε ήταν στην πραγματικότητα μία διαφορετική εκδοχή του κρυογονικού ψύκτη Stirling. Ψύκτες με αγωγό παλμών με στόμιο και ψύκτες Stirling είναι διαθέσιμοι σήμερα από αρκετές εταιρίες και χρησιμοποιούνται για ψύξη σε αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας σε δορυφόρους, αλλά και σε επίγειες εφαρμογές.

Η λέξη “θερμοακουστική” αντιπροσωπεύει μία ενωτική αναλυτική και θεμελιώδη προσέγγιση για όλες αυτές τις συσκευές και τα φαινόμενα (Swift – 2002) [18]. Η θερμοακουστική προσέγγιση ξεκινά με τις υποθέσεις ότι οι ταλαντώσεις της πίεσης p , της θερμοκρασίας T , της πυκνότητας ρ , της ταχύτητας u και της εντροπίας s μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι μικρές και ότι μπορούν να εκφραστούν ικανοποιητικά ως ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου. Αποτελέσματα μηχανολογικού ενδιαφέροντος λαμβάνονται ως γινόμενα των μέσων τιμών, ως προς το χρόνο, των ταλαντούμενων

μεταβλητών: οι παροχές θερμότητας είναι ανάλογες του γινομένου της θερμοκρασίας T επί την ταχύτητα u , η ισχύς είναι ανάλογη του γινομένου της πίεσης p επί την ταχύτητα u , οι παροχές μάζας είναι ανάλογες του γινομένου της πυκνότητας ρ επί την ταχύτητα u και το ίδιο συμβαίνει και με κάθε άλλο μέγεθος που μας ενδιαφέρει. Παρατηρούμε ότι αν και αρχικά υποθέσαμε ότι οι ταλαντώσεις πρέπει να είναι μικρές και αρμονικές (monofrequency), τα αποτελέσματα της θερμοακουστικής προσέγγισης είναι αρκετά ακριβή για να είναι χρήσιμα ακόμη και για μεγάλες ταλαντώσεις με σημαντικό αρμονικό περιεχόμενο.

Τόσο οι χρονικές εξαρτήσεις των πλατών, όσο και οι χωρικές εξαρτήσεις των φάσεων των ταλαντούμενων μεταβλητών μπορεί να είναι πολύ σύνθετες, μεταβαλλόμενες ομαλά στο εσωτερικό των συστατικών μερών και απότομα στις διεπαφές μεταξύ τους. Τυπικά, η διεπιφάνεια μεταξύ ενός συστατικού μέρους και ενός άλλου συνοδεύεται από δραματική αλλαγή στη γεωμετρία ή στις οριακές συνθήκες, κάτι που ενδυναμώνει ένα μακροσκοπικό φαινόμενο όπως η ψύξη. Για παράδειγμα, οι αναγεννητές των μηχανών και ψυκτών Stirling έχουν μεγέθη πόρων πολύ μικρότερα από το βάθος θερμικής διείσδυσης δ_k , και οι δέσμες των μηχανών και ψυκτών στάσιμου κύματος έχουν μέγεθος πόρων που είναι συγκρίσιμο με το δ_k . Οι επονομαζόμενοι “αγωγοί παλμών” στους ψύκτες (αγωγών παλμών) και άλλοι ανοικτοί χώροι σε άλλα συστήματα, είναι σαφώς μεγαλύτερης διαμέτρου από το δ_k και αυτά τα συστατικά μέρη είναι απομονωμένα από το περιβάλλον τους, ενώ οι εναλλάκτες θερμότητας που συνορεύουν με αυτούς είναι συνδεδεμένοι με εξωτερικές θερμικές δεξαμενές. Ο Wheatley (1985) [19] υπογράμμισε τη σπουδαιότητα των αιφνίδιων αλλαγών στο περιβάλλον του αερίου σε τέτοιες διεπαφές μεταξύ των συστατικών στοιχείων χρησιμοποιώντας τη φράση “διαταραγμένη θερμοδυναμική ισορροπία”.

Ο Olson και συν. (1997) [20] επεξέτεινε την ανάλυση του Rott (1974) [21] που αναφερόταν στη ροή Rayleigh σε ένα αγωγό με αξονική κλίση θερμοκρασίας, για να συμπεριλάβει μία αυθαίρετη διαδοχή φάσεων μεταξύ $p-u$. Με αυτόν τον τρόπο έδειξε πώς μειώνοντας τη διατομή του αγωγού στο

ένα άκρο του μπορεί κανείς να μειώσει τη ροή Rayleigh στο εσωτερικό του. Η εργασία αυτή εξαλείφει αποτελεσματικά μία επιζήμια πηγή διαρροής θερμότητας σε μερικές θερμοακουστικές συσκευές, ειδικά στους ψύκτες με αγωγό παλμών. Μια άλλη, νέα εξέλιξη, βασίζεται στην ανακάλυψη από τον Sproog (2000) [22] του θερμοακουστικού διαχωρισμού μιγμάτων. Η ακτινικά ταλαντούμενη θερμική διάχυση και η αξονική ταλαντωτική ιξώδης κίνηση ενός αερίου μίγματος προκαλεί το διαχωρισμό των αερίων του μίγματος κατά μήκος του αγωγού. Ο Geller (2004) [23] χρησιμοποίησε αυτή τη μέθοδο σε έναν αγωγό 2.5 m για να διαχωρίσει ένα μίγμα με σύσταση στο ένα άκρο αποτελούμενη από 50 % – 50 % ήλιο ^2He -αργό ^{40}Ar σε μίγμα με σύσταση 30 % σε ήλιο και 70 % σε αργό στο άλλο άκρο του αγωγού (Swift – 2004) [24].

1.2.2 ΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

1.2.2.1 ΠΡΩΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΨΥΚΤΩΝ STIRLING

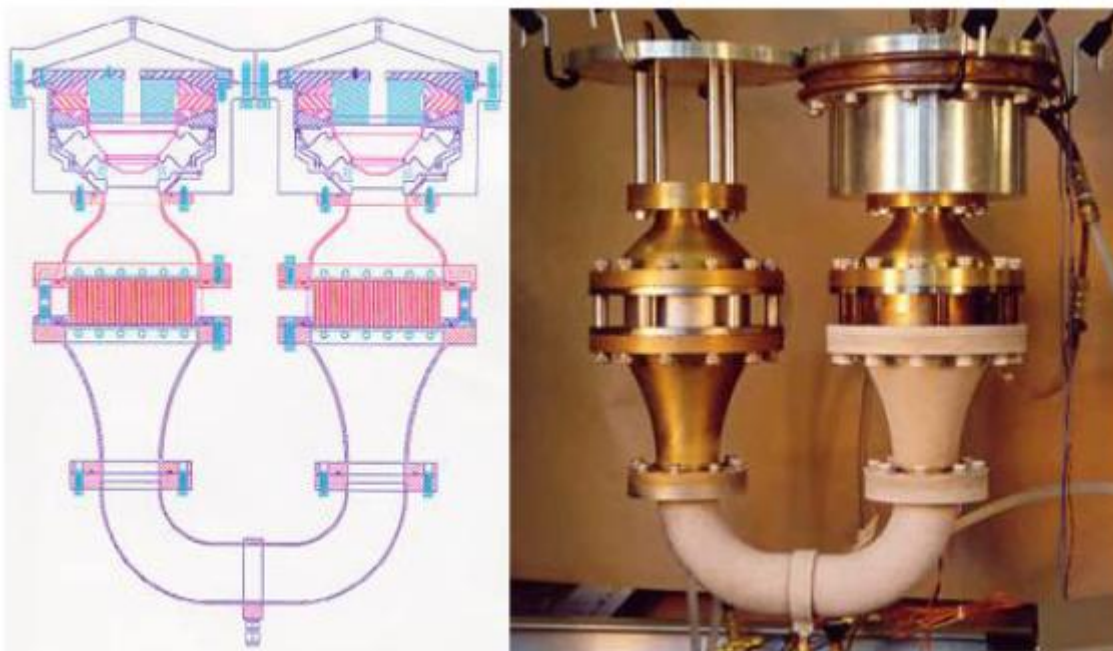
Οι Gifford και Longsworth το 1966 παρήγαγαν ένα μεγάλο ποσό ψυκτικής ισχύος εφαρμόζοντας υψηλής έντασης και χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεις τις πίεσης σε ένα αέριο σε ένα σωλήνα [25]. Η μηχανή ονομάστηκε “ψύκτης αγωγών παλμού”. Το 1980 ο Swift έκανε πολλές μελέτες στους θερμοακουστικούς ψύκτες στα Los Alamos National Laboratory (LANL) στις ΗΠΑ. Η θερμοακουστική τράβηξε το ενδιαφέρον σαν νέα τεχνολογία στα πρώτα χρόνια τις δεκαετίας του 80. Πολλά θερμοακουστικά συστήματα κατασκευάστηκαν κυρίως στα PennStateUniversity, LosAlamos National Laboratory (LANL) (Wheatley και συν. – 1983, 1984, Hofler – 1986, 1988 και Wheatley και Cox – 1985)[26, 27, 28 29, 30, 14, 12, 31] και Naval Postgraduate School (NPS) στην Καλιφόρνια.

Οι εφαρμογές των θερμοακουστικών μηχανών κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από το αν ο ψύκτης απορροφά ισχύ από τον ηλεκτρισμό ή από κάποια πηγή θερμότητας. Οι απλοί και οι κρυογονικοί ψύκτες που χρησιμοποιούν τη θερμότητα ως πηγή ισχύος για τη λειτουργία τους είναι αρκετά ελκυστικοί για εφαρμογές όπου υπάρχει άφθονη ή απορριπτόμενη

θερμότητα. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων είναι ένας ψύκτης μύρας (Wheatley και Cox – 1985, Wheatley και συν. – 1989) [31, 32] και ο κρυογονικός ψύκτης με αγωγό παλμών με στόμιο που ονομάζεται “Coolahoop” (Jones – 1990) [33]. Η έρευνα για τους θερμοακουστικούς ψύκτες που χρησιμοποιούν τον ηλεκτρισμό ως πηγή ισχύος είχε περιοριστεί μέχρι το 1992 σε εργαστηριακές έρευνες και σε εφαρμογές σε διαστημόπλοια.

Ένας θερμοακουστικός ψύκτης (STAR) αναπτύχθηκε στο NPS ο οποίος σχεδιάστηκε να μεταφέρει 4 W θερμότητας με διαφορά θερμοκρασίας στοίβας 80°C ο οποίος τοποθετήθηκε στο διαστημόπλοιο Discovery [34] το 1992.

Ένας ακόμη ψύκτης που κατασκευάστηκε εκείνη την περίοδο είναι ο ThermoAcoustic Life Sciences Refrigerator (TALSR) (Garrett –1991) [35] Ο ψύκτης TALSR ήταν σχεδιασμένος για να αντλεί 700 Btu / hr στη λειτουργία ψύξης (refrigerator mode, +4°C) και 400 Btu/hr στη λειτουργία κατάψυξης (freezer mode, -22°C). Η ιδιαιτερότητα αυτή στη λειτουργία του είναι που κάνει αυτόν τον ψύκτη τον πρώτο θερμοακουστικό ψύκτη που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως συμβατικός ψυγειοκαταψύκτης τροφίμων για οικιακή χρήση. Επιπλέον, έχουν παρουσιαστεί αρκετά αρχικά σχέδια μηχανών που θα είναι ικανές να επεξεργαστούν 1,5 έως 3 τόνους αέρα.



Σχήμα 1-3. Ψύκτης TALSAR [36].

Άλλος ένας θερμοακουστικός ψύκτης (SETAC) που χρηματοδοτήθηκε από το Αμερικάνικο Ναυτικό τοποθετήθηκε στο USS Deyo για την ψύξη των στοιχείων του κυκλώματος του ραντάρ το 1995. Το σύστημα λειτουργούσε με μίγμα ηλίου-αργού σαν εργαζόμενο αέριο στις 20 atm υποστηρίζοντας 419 W ψυκτικής απόδοσης χρησιμοποιώντας 216 W ακουστικής ισχύος. Ο ψύκτης είχε 17% βαθμό απόδοσης του κύκλου Carnot στη χαμηλότερη του θερμοκρασία (4°C). Μολονότι μπορούσε να φτάσει το 26% του βαθμού απόδοσης του κύκλου Carnot, η αποδοτικότητα μειώθηκε εξ αιτίας της αναποτελεσματικότητας των εναλλακτών θερμότητας.

Μετά την επιτυχία του SETAC το USS Deyo παρήγγειλε ένα θερμοακουστικό ψύκτη με ψυκτική ικανότητα 10 KW . Ο ψύκτης σχεδιάστηκε από το PennStateUniversity και ονομάστηκε TRITON αφού μπορούσε να μετατρέψει 3 τόνους νερού σε πάγο 0°C μέσα σε μια μερα. Το πρόγραμμα TRITON άρχισε το 1996 και η σχεδίαση ολοκληρώθηκε το 1998. Το πρόγραμμα τελικά ολοκληρώθηκε το 2005 και ο ψύκτης έφτανε το 26% του βαθμού απόδοσης του κύκλου Carnot

χρησιμοποιώντας μίγμα ηλίου-αργού σαν εργαζόμενο αέριο στις 30 atm και παρείχε 10 kW ψυκτικής ισχύος. [37]



Σχήμα 1-4. Ο θερμοακουστικός ψύκτης TRITON [38]

Τα LANL ασχολούνται κυρίως με μεγάλου μεγέθους βιομηχανικές εφαρμογές. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές η ακουστική ισχύς παράγεται χρησιμοποιώντας τη θερμότητα με θερμοακουστικό τρόπο. Εν συνεχεία, ηλεκτρική ή ψυκτική ισχύς παράγεται χρησιμοποιώντας την ακουστική ισχύ. Ένα από τα ψυκτικά συστήματα που κατασκεύασαν τα LANL είναι ο θερμοακουστικά οδηγούμενος θερμοακουστικός ψύκτης (TADOPTTR). Κατασκευάστηκε το 1989 και καίει το 30-40% για να παράξει ακουστική ισχύ ενώ χρησιμοποιεί αυτή την ισχύ για να υγροποιήσει το υπόλοιπο 60-70%. Το σύστημα είναι φτηνό χωρίς κινούμενα μέρη και φτάνει θερμοκρασία ως και 115K . [38]

Οι Tijani, Zeegers και Waele αδιαστατοποίησαν τις παραμέτρους των θερμοακουστικών εξισώσεων και έτσι έδωσαν μια συστηματική προσέγγιση στη σχεδίαση του θερμοακουστικού ψύκτη [39]. Σχεδίασαν, κατασκεύασαν και έκαναν τις μετρήσεις επιδόσεων ενός θερμοακουστικού ψύκτη. Χρησιμοποίησαν πίεση 10 bar και ήλιο σαν εργαζόμενο αέριο. Ο ψύκτης έφτανε ως τους -65°C .

Ο Qiu έφτασε ως τους 80 K με ένα θερμοακουστικά οδηγούμενο θερμοακουστικό ψύκτη που χρησιμοποιούσε ήλιο σε πίεση 2.08 Mpa . Αυτή είναι και η πιο χαμηλή θερμοκρασία που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα[40].

Αρκετοί θερμοακουστικοί ψύκτες έχουν αναπτυχθεί για να εφαρμοστούν στην ψύξη των ηλεκτρονικών υψηλής ταχύτητας, ένας εκ των οποίων ήταν μία μικρότερη εκδοχή του “Coolahoop”. Τρεις ενδιαφέρουσες εφαρμογές αυτών των μηχανών που έχουν ερευνηθεί είναι: α) ένας ψύκτης για αποθήκευση ιατρικών υλικών και φαρμάκων στο Bangladesh, β) ένα ψυχόμενο εμπορευματοκιβώτιο για μεταφορά τροπικών φρούτων, όπου η ψύξη θα προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και γ) μία μονάδα υγροποίησης φυσικού αέριου.

Εξαιτίας της απλότητας στη λειτουργία της και τη χρήση ενός μόνο κινούμενου τμήματος, η ψύξη με θερμοακουστικές συσκευές είναι επίσης κατάλληλη για να ψύξουμε την τελευταία γενιά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται σε υπολογιστές (computer chips). Τα ολοκληρωμένα αυτά κυκλώματα, όταν λειτουργούν στους -50°C έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με διπλάσια ταχύτητα από αυτή για την οποία έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου (Garrett και συν. – 1993) [41].

1.2.2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗ ΧΡΗΣΗ

Η μικρότερη μηχανή Qdrive είναι η 2s102K, με ικανότητα $8-10\text{ W}$ στους 77 K και κατανάλωση 250 W ηλεκτρικής ισχύος. Αυτή η μηχανή κατασκευάστηκε αρχικά ως ένας υγροποιητής χαμηλού κόστους για μέχρι 2 λίτρα οξυγόνου / ημέρα για οικιακή χρήση. Σε τέτοιες εφαρμογές τα κύρια ζητούμενα είναι τα χαμηλά επίπεδα θορύβου, η ασφάλεια και η αξιοπιστία, ιδιότητες που τις έχει η παραπάνω μηχανή.

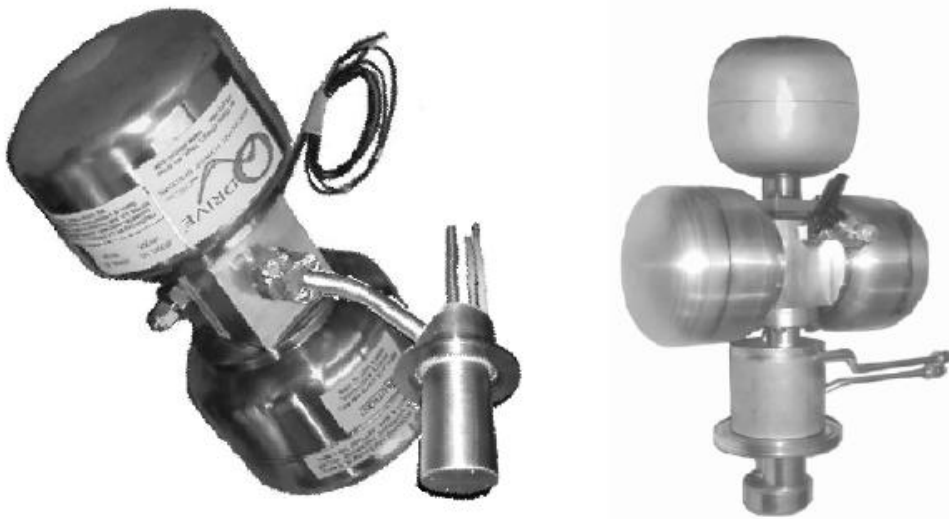


Σχήμα 1-5. Οικιακή μονάδα παραγωγής υγροποιημένου οξυγόνου (LOX) χαμηλού κέντρου βάρους (lowCG).

1.2.2.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η 2s132K παρέχει 20–25 W ψύξης στους 77 K με κατανάλωση 500 W ηλεκτρικής ισχύος. Εκτιμάται να αντικαταστήσει το άζωτο σε κατάσταση βρασμού ως ψυκτικό για μακράς διάρκειας αποθήκευση παγωμένων βιολογικών υλικών (συνήθως σπόρους, σπέρμα και δείγματα ιστού για ιατρική και φαρμακευτική έρευνα). Επί του παρόντος, αυτά φυλάσσονται σε πολλαπλά δοχεία κενού, τα οποία συνήθως απαιτούν ένα δίκτυο από δαπανηρές σωληνώσεις προστατευμένες σε κενό και μία εξωτερική εγκατάσταση αποθήκευσης για τα προϊόντα που βρίσκονται σε κρυογονική θερμοκρασία και θα μεταφερθούν με τα φορτηγά. Με έναν ακουστικό ψύκτη Stirling, αυτά τα δοχεία κενού είναι αληθινά ψυγεία, τόσο αξιόπιστα και ασφαλή όσο αυτά που έχουμε στην κουζίνα. Έχουμε κάποια αποταμίευση εξόδων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, μείωση του κόστους του κεφαλαίου (εξάλειψη της περιοχής των δεξαμενών και της σωλήνωσης κενού), και ένα πλεονέκτημα ασφάλειας (σε ένα καλώς σφραγισμένο κτίριο ή δωμάτιο η διαρροή του αζώτου λόγω εξάτμισης μπορεί να

δημιουργήσει επικίνδυνα χαμηλά επίπεδα οξυγόνου με άμεσο κίνδυνο την ασφυξία).



Σχήμα 1-6. Τροποποιημένο FAR και κανονικός αέρας 2s132K ψύκτης για χρήση στην αποθήκευση βιολογικών υλικών.

1.2.2.4 ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

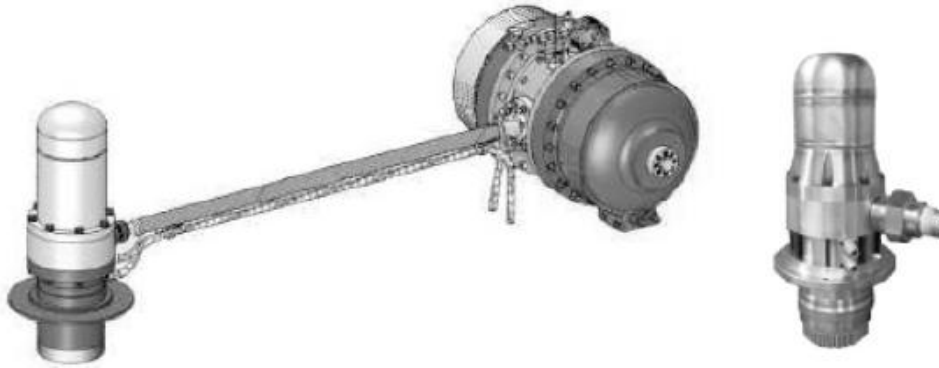
Όπως παρατηρήθηκε, τα περισσότερα κρυογονικά υγρά διανέμονται από φορτηγά σε αποθηκευτικούς χώρους, που βρίσκονται κοντά στο χώρο χρήσης, ώστε να είναι διαθέσιμα για χρήση αργότερα. Οι δεξαμενές έχουν χωρητικότητα τυπικά 100.000 μέχρι 200.000 λίτρα (περίπου 25.000 μέχρι 50.000 γαλόνια). Οι χρήστες είναι πολύ μεγάλες εταιρίες που ασχολούνται με την τοπική υγροποίηση ή αποθηκεύουν ένα προϊόν μεγάλης αξίας (για παράδειγμα αργό ή υψηλής καθαρότητας άζωτο) που δεν μπορεί να ληφθεί με οικονομικό τρόπο από τον αέρα της περιοχής. Ο ακουστικός υγροποιητής Stirling μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει ή να αποτρέψει τις απώλειες λόγω εξάτμισης, σε μία δεξαμενή για μεταφερόμενες προμήθειες. Το μοντέλο 2s241K (250 – 300 W στους 77 K με κατανάλωση κάτω από 5 kW ηλεκτρικής ισχύος) είναι κατάλληλο για αυτή τη λειτουργία.



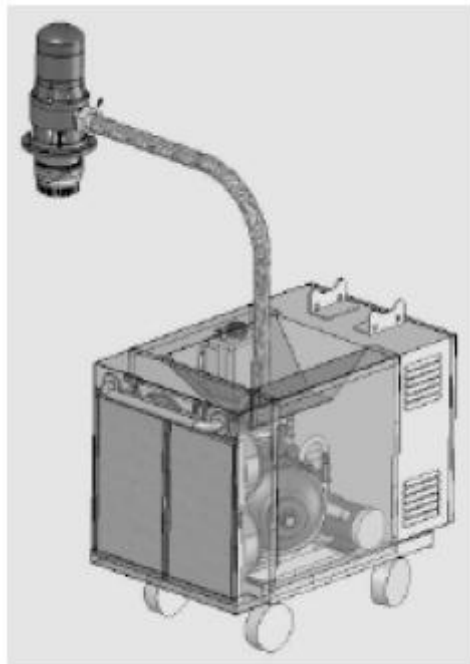
Σχήμα 1-7. 2s241K, Επανασυμπκνωτής – Υγροποιητής (πυρήνας) σε σειρά.

1.2.2.5 ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΥΨΗΛΗΣ T_c

Οι εξελίξεις στους κεραμικούς υπεραγωγούς καθιστούν τους ακουστικούς ψύκτες Stirling κατάλληλους για άμεση χρήση σε πρακτικές εφαρμογές που περιλαμβάνουν ασφάλειες ρεύματος, μετασηματιστές και γραμμές μεταφοράς. Αυτά χρειάζονται εξαιρετικά αξιόπιστη, αποδοτική και προσιτή ψύξη στους $60-80\text{ K}$. Έρευνες αναγνώρισαν στις ακουστικές μηχανές Stirling την ικανότητα ψύξης αυτών των συστημάτων. Για το υγροποιημένο άζωτο (για καλώδια) μία ευθύγραμμη κεφαλή ψύξης (σχήμα 1.7) μπορεί να αρκεί, και ο πρώτος ψύκτης 1000 W με αυτή τη μορφή ανακοινώθηκε από την Praxair. Ένας ψύκτης με σύνδεση FAR είναι υπό ανάπτυξη (παράδειγμα 2s241K, σχήμα 1-8) για βελτιστοποίηση του σχήματός του, ειδικά όπου απαιτείται τοποθέτηση του πάνω σε λεπτότοιχους κρυοστάτες (cryostat). Το σύστημα (σχήμα 1-9) παρουσιάστηκε στο HTSPeerReview του Υπουργείου Ενέργειας (DoE) το 2008.



Σχήμα 1-8. 2s241K-FAR (solid model and first actual Coldhead).



Σχήμα 1-9. 2s241K-FAR για HTS.

1.2.2.6 ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ ΓΙΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ

Τα πολεμικά αεροσκάφη συχνά βασίζονται στο υγροποιημένο οξυγόνο για να αυξήσουν τα αποθέματα οξυγόνου που είναι διαθέσιμα για να αναπνεύσει ο πιλότος. Έτσι, τα αεροπλανοφόρα έχουν “μικρές” μονάδες διαχωρισμού του αέρα για να παράγουν το οξυγόνο. Αυτές απαιτούν τρεις υπαλλήλους και η υγροποίηση ξεκινάει ώρες μετά την εκκίνηση. Το 2005 η CFIC – Qdrive παρουσίασε την ευκολία και την απόδοση υγροποίησης οξυγόνου που επιτυγχάνεται με τη χρήση των

ακουστικών μηχανών Stirling. Η ιδιαίτερα γρήγορη ψύξη που επιτυγχάνουν αυτά τα συστήματα ήταν εντυπωσιακή. Έτσι, το 2006 το Πολεμικό Ναυτικό των Η.Π.Α. την υπέδειξε ως την επιθυμητή τεχνολογία παραγωγής υγροποιημένου οξυγόνου για τα νέα αεροπλανοφόρα τύπου CVN78 (δύο 2s362K έχουν παραγγελθεί). Μία κινητή έκδοση θα είναι η πρώτη που θα παραδοθεί για εμπορική χρήση (σχήμα 1-10, 1-11). Αμφότερες οι εκδόσεις χρησιμοποιούν τριπλές κεφαλές 241 –FAR με τη μεγαλύτερη οδήγηση 362 (Corey – 2008) [42].



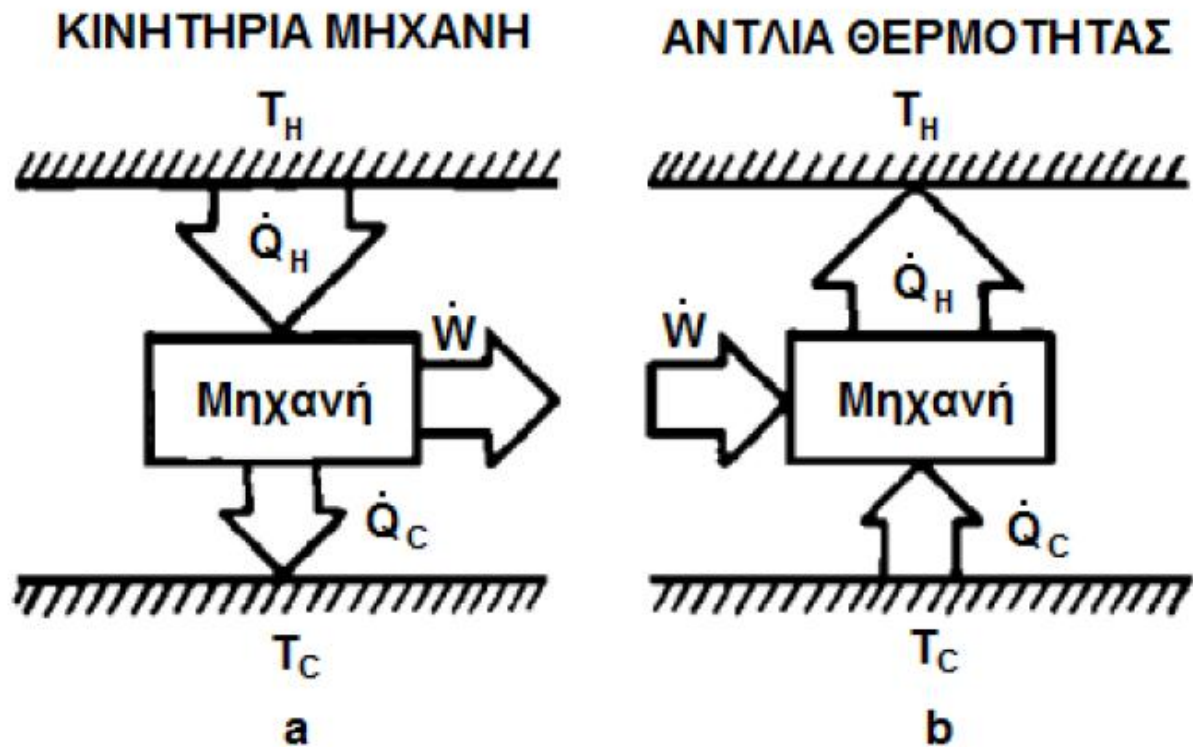
Σχήμα 1.10. 2s241, φορητό σύστημα παραγωγής υγροποιημένου οξυγόνου για εξωτερικό χώρο (field).



Σχήμα 1-11. 2d362K – 3FAR φορητό σύστημα παραγωγής υγροποιημένου οξυγόνου.

1.3. ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Οι μηχανές στάσιμου κύματος χωρίζονται σε κινητήριες μηχανές (primemovers) και αντλίες θερμότητας (heatpumps) ή ψύκτες (refrigerators)



Σχήμα 1-12. Θερμικές Μηχανές: a. Κινητήρια Μηχανή b. Αντλία Θερμότητας [43]

Στις θερμοακουστικές κινητήριες μηχανές, η ροή θερμότητας, από μία πηγή υψηλής θερμοκρασίας σε μία δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας, παράγει ακουστική ισχύ (στάσιμο κύμα), η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ισχύ χρησιμοποιώντας κατάλληλες διατάξεις. Αντίστροφα, στις θερμοακουστικές αντλίες θερμότητας και στους θερμοακουστικούς ψύκτες, η ακουστική ισχύς των στάσιμων κυμάτων χρησιμοποιείται για να αντλήσουμε θερμότητα από μία δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας σε μία δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.

Θεωρώντας το εργαζόμενο αέριο (π.χ. αέρας) των θερμοακουστικών κινητήριων μηχανών ως ιδανικό

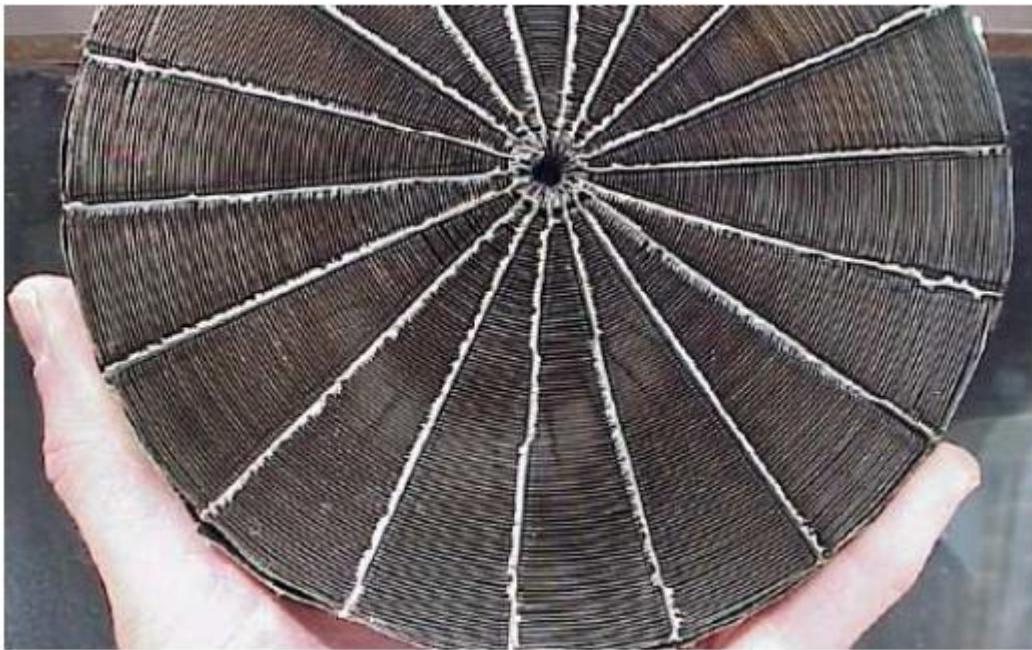
αέριο είναι εύκολο να εξηγήσουμε την παραγωγή ήχου. Αφού το αέριο είναι ιδανικό θα ισχύει η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, δηλαδή:

$$pV = nRT \quad (1.1)$$

Όπου p είναι η πίεση του αερίου, n ο αριθμός των *moles* και T η θερμοκρασία του. Παρατηρούμε ότι αν μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία του αερίου μεταβάλλεται και η πίεσή του. Συνεπώς αν επιβάλλουμε μία ταλάντωση θερμοκρασίας στο αέριο τότε θα προκύψει και ταλάντωση στην πίεσή του. Όμως το ηχητικό κύμα δεν είναι τίποτα άλλο από ταλαντώσεις πίεσης του μέσου στο οποίο διαδίδεται και έτσι παράγεται ήχος από την ταλάντωση της θερμοκρασίας του αερίου. Ακριβώς το αντίστροφο φαινόμενο συμβαίνει σε μία αντλία θερμότητας. Σε αυτές τις μηχανές η ενέργεια που προσδίδουμε είναι με τη μορφή ήχου, δηλαδή επιβάλλουμε στο εργαζόμενο αέριο ταλαντώσεις πίεσης. Αυτές οι ταλαντώσεις της πίεσης, λόγω της καταστατικής εξίσωσης των τέλειων αερίων, εγείρουν στο αέριο ταλαντώσεις θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την άντληση θερμότητας.

1.3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

1.3.1.1 ΣΤΟΙΒΑ

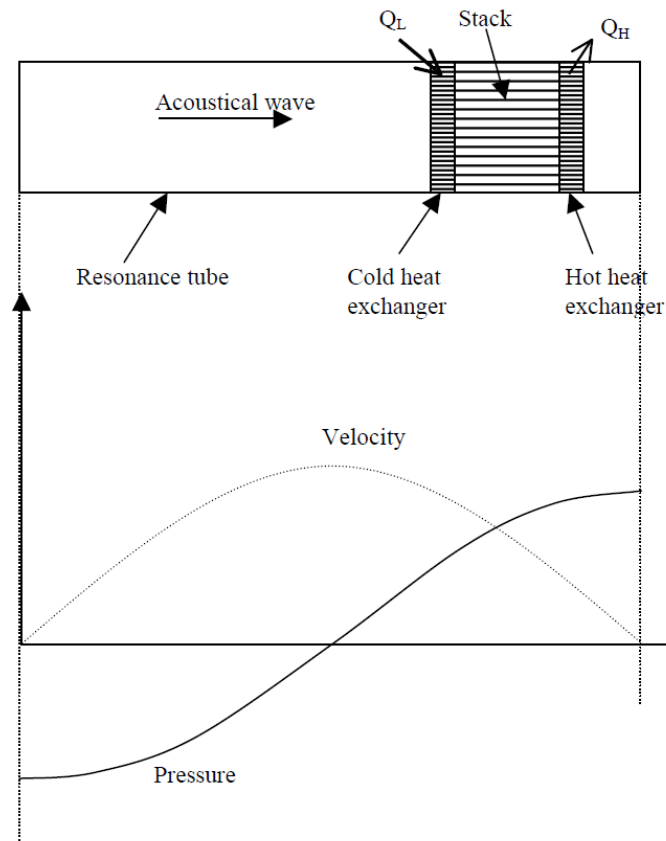


Σχήμα 1-13. Στοίβα [38]

Οι θερμοακουστικές μηχανές, είτε κινητήριες ή αντλίες θερμότητας, έχουν κάποια κοινά κατασκευαστικά στοιχεία. Το πρώτο κοινό τους στοιχείο είναι η στοίβα (stack) (σχήμα 1-13). Αυτή αποτελείται από παράλληλες μεταξύ τους επίπεδες πλάκες, οι οποίες είναι παράλληλες και στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η παρουσία της στοίβας τροποποιεί το ηχητικό κύμα έχοντας δύο σημαντικά αποτελέσματα:

1. μία χρονικά μέση ροή θερμότητας κοντά στην επιφάνεια της στοίβας, κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος και
2. την παραγωγή ή την απορρόφηση πραγματικής ακουστικής ισχύος (έργο) κοντά στην επιφάνεια της στοίβας.

Αυτά τα δύο απλά αποτελέσματα, που προέρχονται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του ηχητικού κύματος και του στερεού ορίου (της στοίβας), είναι η βάση όλων των θερμοακουστικών φαινομένων.



Σχήμα 1-14. κατανομή θερμότητας και ταχύτητας σε απλό θερμοακουστικό σύστημα[38]

Μια απλή θερμοακουστική μηχανή (θερμοακουστικός ψύκτης) και η κατανομή θερμότητας και ταχύτητας μέσα στο σύστημα φαίνονται στο σχήμα 1-14. υποθέτουμε ότι υπάρχει μια ακουστική πηγή μέσα στο σύστημα. Αυτό το στάσιμο κύμα είναι αδιαβατικό και συνεπώς το πλάτος της ταλάντωσης της θερμοκρασίας του αερίου (T_1) εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης της πίεσής του (p_1), που προκαλείται από το ηχητικό κύμα. Θεωρούμε ότι το αέριο στο εσωτερικό του αγωγού είναι ατμοσφαιρικός αέρας σε κανονικές συνθήκες (STP). Επιπλέον θεωρούμε ότι είναι ιδανικό αέριο και ότι το πλάτος της ταλάντωσης της πίεσης είναι αυτό που προκαλείται από έναν τυπικό διάλογο μεταξύ δύο ανθρώπων. Τότε από υπολογισμούς προκύπτει ότι το πλάτος της ταλάντωσης της θερμοκρασίας, που οφείλεται στο ηχητικό κύμα, είναι $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$, δηλαδή μηδαμινό. Εισάγοντας τη στοιβα στο εσωτερικό του αγωγού διαταράσσονται οι αρχικές αδιατάρακτες ταλαντώσεις θερμοκρασίας και σε μέτρο και σε φάση. Η διαταραχή αυτή δεν επεκτείνεται απεριόριστα σε όλο το αέριο που βρίσκεται

στον αγωγό, αλλά μόνο σε μία ποσότητα αερίου που γειτνιάζει με τη στοίβα. Η στοίβα επηρεάζει το αέριο που βρίσκεται σε μία μικρή απόσταση γύρω από αυτήν. Η απόσταση αυτή ονομάζεται **βάθος θερμικής διείσδυσης**, συμβολίζεται με δ_κ και δίνεται από την εξίσωση (1.2).

$$\delta_\kappa = \frac{\sqrt{(2 \cdot \kappa)}}{\omega} \quad (1.2)$$

Όπου ω ($\omega = 2\pi f$) είναι η κυκλική συχνότητα του κύματος, f η συχνότητα, κ η θερμική διαχυτότητα του αερίου (για τον αέρα $\kappa = 21 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) και εκφράζεται ως:

$$\kappa = \frac{K}{\rho_m \cdot c_p} \quad (1.3)$$

Όπου K είναι η θερμική αγωγιμότητα του αερίου, ρ_m η μέση πυκνότητα του αερίου στο εσωτερικό της μηχανής και c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του αερίου. Το βάθος θερμικής διείσδυσης εκφράζει την απόσταση στην οποία η θερμότητα μπορεί να διαχυθεί μέσω του αερίου σε χρονικό διάστημα $1/\omega$. Για παράδειγμα για τον αέρα και για 1000 Hz προκύπτει ότι $\delta_\kappa = 0.1 \text{ mm}$. Σαν κόμβος ταχύτητας όπου η ταλάντωση της ταχύτητας (παροχής) του πακέτου είναι μηδέν εμφανίζεται στις δύο άκρες του σωλήνα ενώ σαν αντικόμβος ταχύτητας όπου η ταλάντωσή ταχύτητας είναι μέγιστη εμφανίζεται το κέντρο του σωλήνα. Το μέγιστο πλάτος πίεσης δηλαδή ο αντικόμβος ταχύτητας εμφανίζεται στις δύο άκρες του σωλήνα ενώ κόμβος πίεσης όπου δεν υπάρχει ταλάντωση της πίεσης εμφανίζεται το κέντρο του σωλήνα.

Το πλάτος ταλάντωσης της θερμοκρασίας του αερίου εξαρτάται από δύο παράγοντες: από την αδιαβατική συμπίεση και εκτόνωση που υφίσταται, λόγω της ταλάντωσης της πίεσης στο στάσιμο κύμα και στην παλινδρομική κίνηση του αερίου και στην κλίση θερμοκρασίας της στοίβας (∇T_m) κατά

την κατεύθυνση x , του μήκους της. Υπάρχει όμως μία τιμή της κλίσης θερμοκρασίας της στοιβάς για την οποία το πλάτος ταλάντωσης της θερμοκρασίας του αερίου μηδενίζεται. Αυτή η κλίση θερμοκρασίας ονομάζεται “**κρίσιμη κλίση θερμοκρασίας**” και συμβολίζεται με ∇T_{crit} .

Οι ιδιότητες του ρευστού και η γεωμετρία του στάσιμου κύματος, για αυτή την κλίση θερμοκρασίας συμβάλλουν ώστε οι αλλαγές στη θερμοκρασία εξαιτίας των ταλαντώσεων της πίεσης να εξουδετερώνουν αυτές εξαιτίας της παλινδρομικής κίνησης του αερίου. Διαιρώντας την τιμή της μέσης κλίσης θερμοκρασίας της στοιβάς με την τιμή της κρίσιμης κλίσης θερμοκρασίας έχουμε την τιμή του “συντελεστή κλίσης θερμοκρασίας” Γ , δηλαδή ισχύει ότι:

$$\Gamma = \frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}} \quad (1.4)$$

Ο συντελεστής αυτός συγκρινόμενος με τη μονάδα καθορίζει αν η μηχανή είναι κινητήρια ή αντλία θερμότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί η ροή θερμότητας κατά μήκος των πλακών της στοιβάς (\dot{Q}_2) και η συνολική παραγόμενη ακουστική ισχύς (\dot{W}_2) είναι ανάλογες της ποσότητας $(\Gamma - 1)$. Για την τιμή του συντελεστή κλίσης θερμοκρασίας διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

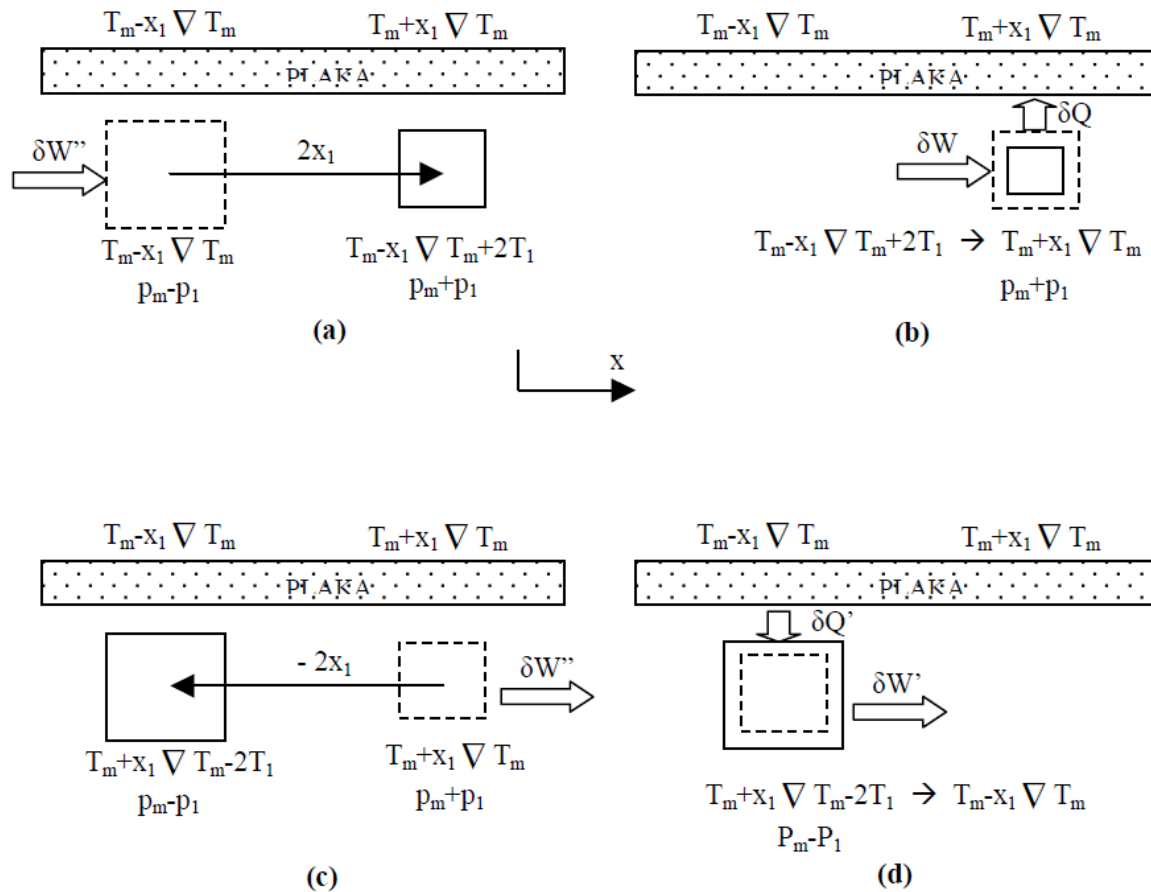
$\nabla T_m = \nabla T_{crit} \Rightarrow \Gamma - 1 = 0$. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε ροή θερμότητας που σημαίνει ότι δεν έχουμε ταλαντώσεις θερμοκρασίας και συνεπώς ούτε ακουστική ισχύ.

$\nabla T_m > \nabla T_{crit} \Rightarrow \Gamma - 1 > 0$. Σε αυτή την περίπτωση η θερμότητα ρέει προς τον κόμβο πίεσης και παράγεται ακουστική ισχύς κοντά στις πλάκες της στοιβάς. Για αρκετά μεγάλες κλίσεις θερμοκρασίας είναι $\Gamma - 1 > 0$ και η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμότερο στο ψυχρότερο μέρος της στοιβάς και παράγεται ακουστική ισχύς, κάτι που συμβαίνει στις κινητήριες μηχανές.

$\nabla T_m < \nabla T_{crit} \Rightarrow \Gamma - 1 < 0$. Σε αυτή την περίπτωση η θερμότητα απομακρύνεται από τον κόμβο πίεσης και η ακουστική ισχύς απορροφάται κοντά στις πλάκες της στοιβάς. Για μικρές κλίσεις της θερμοκρασίας ισχύει ότι $\Gamma - 1 < 0$ και η μεταφορά της θερμότητας γίνεται από την ψυχρότερη προς τη

θερμότερη περιοχή της στοίβας. Για να γίνει αυτή η μεταφορά απορροφάται ακουστική ισχύς, κάτι που συμβαίνει στις αντλίες θερμότητας.

Για να μπορέσουμε να καταλάβουμε καλύτερα το θερμοακουστικό φαινόμενο, θα ερευνηθεί η συμπεριφορά ενός πακέτου κινούμενου μέσα σε μία ακουστική ταλάντωση που έχουν κατανομή θερμότητας ∇T_m .



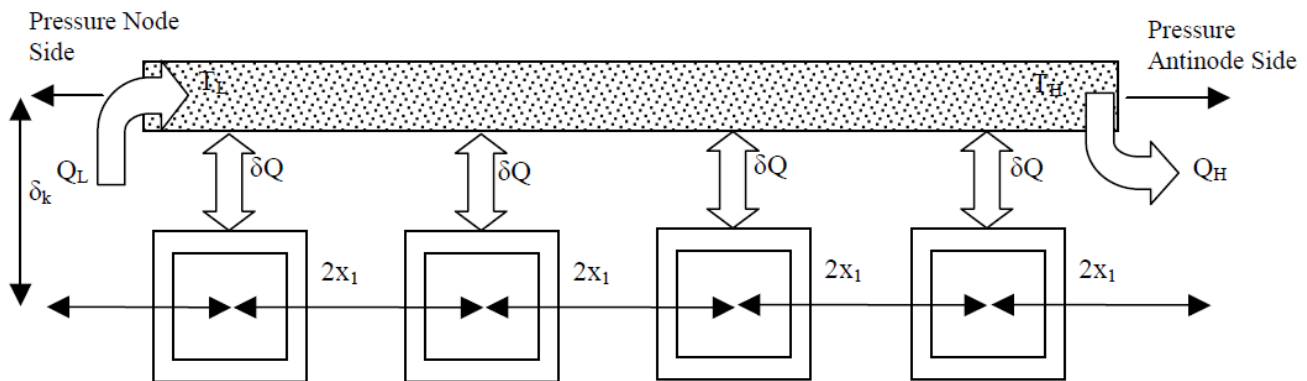
Σχήμα 1-15. Συμπεριφορά κινούμενου πακέτου μέσα σε μία ακουστική ταλάντωση [43]

Η κατεύθυνση της θερμότητας στα σχήματα 1-15a κ 1-15b καθορίζει αν το σύστημα είναι θερμική μηχανή ή αντλία θερμότητας. Στο σχήμα 1-15a όπως το πακέτο ρευστού κινείται, η θερμοκρασία του αυξάνει λόγω του ότι αυξάνει κ η πίεση. Δυο θερμοκρασίες είναι σημαντικές για αυτό το κινούμενο πακέτο:

Η θερμοκρασία μετά από την αδιαβατική συμπίεση και η θερμοκρασία της παρακείμενης επιφάνειας μετά τη συμπίεση. Εάν η θερμοκρασία του πακέτου είναι μεγαλύτερη από αυτήν της επιφάνειας, η θερμότητα μεταφέρεται από το πακέτο στην επιφάνεια και αντίστροφα. Αυτές οι δύο περιπτώσεις καθορίζουν αν το σύστημα είναι θερμική μηχανή ή αντλία θερμότητας.

Στο σχήμα 1-15d η θερμοκρασία του πακέτου ρευστού είναι χαμηλότερη από της επιφάνειας άρα η θερμότητα μεταφέρεται από την επιφάνεια στο πακέτο. Οπότε παρατηρούμε μία καθαρή μεταφορά θερμότητας στη διεύθυνση του $+x$ από το πακέτο [43].

Η μετατόπισή του πακέτου είναι μικρότερη απ το μήκος της στοίβας. Ως εκ τούτου η θερμότητα μεταφέρεται από τη μία άκρη στην άλλη από μια σειρά πακέτων. Η θερμότητα που εξάγεται από το πακέτο είναι ίση με τη θερμότητα που δόθηκε σε εκείνο το σημείο μισό κύκλο πριν [44].



Σχήμα 1-16. Μεταφορά θερμότητας από τη μια μεριά της στοίβας στην άλλη [38]

Οι πλάκες χρησιμοποιούνται για να αποθηκευτεί προσωρινά η θερμότητα. Στο Σχήμα 1-16, φαίνεται πως η θερμότητα μεταφέρεται από τα πακέτα ρευστού. Σαν αποτέλεσμα της μετάδοσης θερμότητας στον αντικόμβο πίεσης οι πλάκες στον κόμβο πίεσης κρυώνουν και στο αντικόμβο πίεσης ζεσταίνονται. Η θερμότητα της θερμής πλευράς αποβάλλεται στο περιβάλλον ενώ η ψυχρή πλευρά χρησιμοποιείται για ψύξη. Η μεταφορά θερμότητας εμφανίζεται σε βάθος θερμικής διείσδυσης. Τα πακέτα ρευστού

στην περιοχή εκτός βάθους θερμικής διείσδυσης συμπίεζονται και εκτονώνονται αδιαβατικά και αναστρέψιμα.

Ωστόσο, τα πακέτα αερίου που βρίσκονται γύρω από τις πλάκες και σε απόσταση μικρότερη ή ίση με δ_k από αυτές έχουν επαρκή θερμική επαφή με τη στοίβα, ώστε να συναλλάσσουν θερμότητα με αυτήν, αλλά την ίδια στιγμή η θερμική επαφή είναι τόσο ανεπαρκής ώστε να δημιουργείται χρονική υστέρηση μεταξύ της κίνησης και της μεταφοράς θερμότητας.

Ένας σημαντικός παράγοντας των συμβατικών θερμικών μηχανών είναι η διαδοχή των φάσεων. Για να επιτευχθεί η σωστή διαδοχή των φάσεων που απαιτείται για τον εκάστοτε κύκλο λειτουργίας των συμβατικών μηχανών, χρησιμοποιούνται κινούμενα μέρη, όπως έμβολα ή βαλβίδες, για να μετακινούν το εργαζόμενο ρευστό με σωστό χρονισμό, ώστε να ακολουθεί τον επιθυμητό θερμοδυναμικό κύκλο. Αυτή η διαδικασία στις θερμοακουστικές μηχανές επιτυγχάνεται με το στάσιμο ηχητικό κύμα. **Οι θερμοακουστικές μηχανές, δηλαδή, δεν έχουν κινούμενα μέρη**, αλλά η ηχητική διέγερση της μεταφοράς θερμότητας και η παραγωγή ή απορρόφηση της ηχητικής ισχύος οδηγούν σε ένα τύπο διαδοχής φάσεων των θερμοδυναμικών διεργασιών στο χρόνο. Βασικό στοιχείο της διαδοχής φάσεων στις ακουστικές μηχανές είναι η παρουσία δύο θερμοδυναμικών μέσων: του ρευστού και της στοίβας. Καθώς το ρευστό παλινδρομεί κατά μήκος της στοίβας, στην ακουστική συχνότητα, υφίσταται μεταβολές στη θερμοκρασία του. Ένα μέρος αυτών των θερμοκρασιακών αλλαγών προέρχεται από την αδιαβατική συμπίεση και εκτόνωση του ρευστού από τη μεταβολή της πίεσης λόγω του ηχητικού κύματος και η υπόλοιπη είναι συνέπεια της τοπικής θερμοκρασίας των πλακών της στοίβας. Η ροή θερμότητας μεταξύ του ρευστού και των πλακών δεν παράγει στιγμιαίες μεταβολές στη θερμοκρασία του ρευστού. Αντίθετα η ροή θερμότητας μεταξύ των δύο θερμοδυναμικών μέσων δημιουργεί μία χρονική υστέρηση, ή διαδοχή φάσεων στο χρόνο, μεταξύ της θερμοκρασίας, της πίεσης και της κίνησης, η οποία απαιτείται για να οδηγήσει το ρευστό στον επιθυμητό θερμοδυναμικό κύκλο. Έτσι μία απλή αλλά μη αντιστρεπτή μεταβολή – η ροή θερμότητας κατά μήκος μίας διαφοράς

θερμοκρασίας – είναι ουσιαστική για τη λειτουργία των θερμοακουστικών μηχανών.

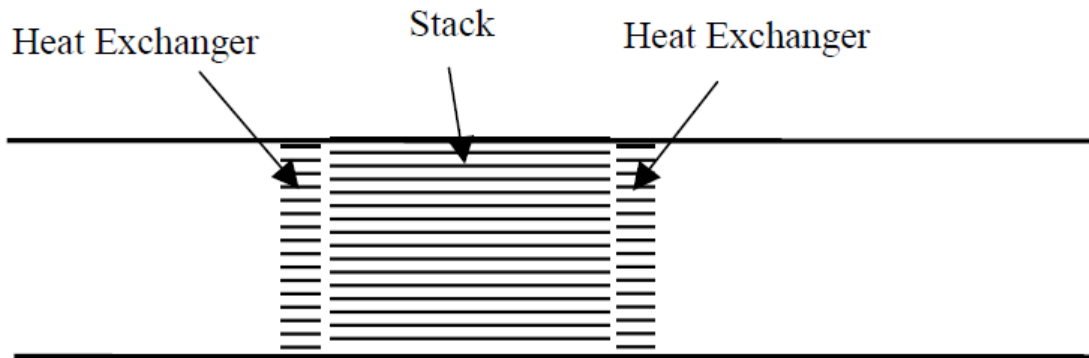
Σε μία πραγματική θερμοακουστική μηχανή οι ταλαντωτικές κινήσεις των πακέτων αερίου είναι ημιτονοειδείς. Για απλότητα, όμως, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι βηματική (γρήγορη κίνηση – στάση – γρήγορη κίνηση – στάση – κ.ο.κ.), ώστε ο βασικός θερμοδυναμικός κύκλος μίας μηχανής στάσιμου κύματος να μπορεί να παρασταθεί από δύο αντιστρεπτές αδιαβατικές και δύο μη αντιστρεπτές ισόθλιπτες μεταβολές. Αυτές οι μεταβολές προσομοιάζουν στον κύκλο Brayton.

Το ρευστό εκτελεί ταλαντωτική κίνηση με πλάτος $2x_l$ και συχνότητα αυτήν του κύματος (f). Εκτός από την παλινδρομική κίνηση του ρευστού, ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται είναι η ταλάντωση της θερμοκρασίας του, η οποία γίνεται με πλάτος $2T_a$ και συχνότητα αυτήν του κύματος.

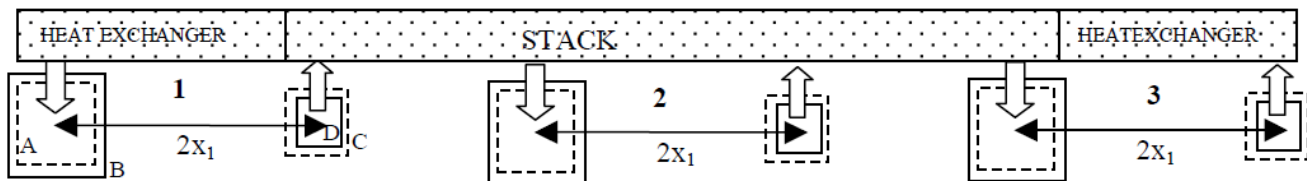
1.3.1.2 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι εναλλάκτες θερμότητας που είναι τοποθετημένοι στις δύο άκρες της στοίβας προσφέρουν συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού του εναλλάκτη πρέπει να είναι η μεγαλύτερη δυνατή. Ο χαλκός έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και είναι καλό υλικό για εναλλάκτη θερμότητας.

Οι εναλλάκτες είναι και αυτοί φτιαγμένοι από παράλληλες πλάκες όπως η στοίβα. Θα πρέπει να προσέχουμε οι εναλλάκτες θερμότητας να μην παρεμποδίζουν την ταλάντωσή του αερίου όταν τοποθετούνται κοντά στην στοίβα. Οι θέσεις της στοίβας και των εναλλακτών φαίνονται στο σχήμα 1-17.



Σχήμα 1-17. Θέσεις της στοίβας και των εναλλακτών φαίνονται στο σχήμα.[38]

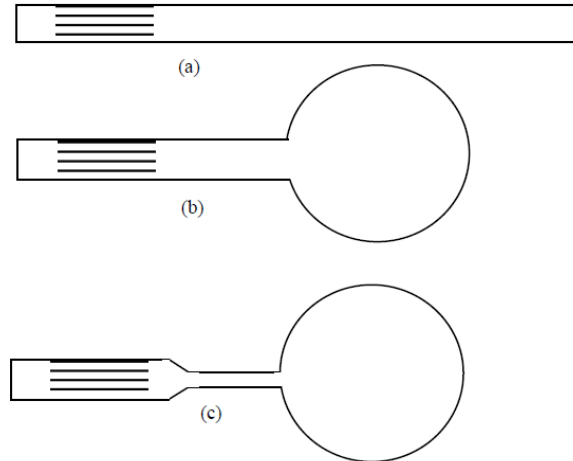


Σχήμα 1-18. Η μεταφορά θερμότητας από τα πακέτα ρευστού μεταξύ στη στοίβα και τους εναλλάκτες.[38]

Στο σχήμα φαίνονται τρία πακέτα που μεταφέρουν θερμότητα. Ενώ το πακέτο 1 μεταφέρει θερμότητα από τον αριστερό εναλλάκτη στη στοίβα, το πακέτο στη μέση μεταφέρει θερμότητα από την αριστερή πλευρά της στοίβας στη δεξιά και το πακέτο 3 από την στοίβα στο δεξί εναλλάκτη. Αφού το εύρος της μετατόπισης του πακέτου είναι $x_l = l v / \omega$ το μήκος του εναλλάκτη θα πρέπει να είναι $2x_l = 2l v / \omega$, όπου x είναι το εύρος της μετατόπισης v_l το εύρος της ταχύτητας και ω η γωνιακή συχνότητα.

1.3.1.3 ANTHXEIO

Το άλλο κοινό στοιχείο των θερμοακουστικών μηχανών είναι το αντηχείο (resonator)



Σχήμα 1-19. Τρία αντηχεία που έχουν την ίδια συχνότητα συντονισμού και την ίδια γεωμετρία στοίβας.

Οι απώλειες ισχύος του αντηχείου (b) είναι περίπου οι μισές από αυτές του κυλινδρικού αντηχείου (a).

Οι απώλειες ισχύος του αντηχείου Hofler (c) είναι ακόμη μικρότερες.[43]

Αυτό είναι μία κοιλότητα που μέσα του περιέχονται η στοίβα, οι εναλλάκτες θερμότητας και το εργαζόμενο αέριο. Το μήκος του αντηχείου, το οποίο όσο μικρότερο είναι τόσο λιγότερες οι απώλειες ισχύος του, είναι συνήθως υποπολλαπλάσιο του μήκους (λ) του ηχητικού κύματος. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να ρυθμίζουμε τη συχνότητα συντονισμού στο εσωτερικό του αντηχείου καθορίζοντας το μήκος του αντηχείου. Η συχνότητα συντονισμού (f) ως συνάρτηση του μήκους του αντηχείου (L) για ένα κυλινδρικό αντηχείο είναι:

$$f = \frac{\sqrt{K \cdot R \cdot T_m}}{\lambda} = \frac{\sqrt{K \cdot R \cdot T_m}}{j \cdot L} \quad (1.5)$$

Όπου $L = \frac{\lambda}{j}$ όπου συνήθως $j=2$ ή $j=4$.

Η αντλία θερμότητας, ανάλογα με τον τύπο της, μπορεί να έχει ένα επιπλέον μέρος από την κινητήρια μηχανή, την ακουστική πηγή.

1.3.1.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΠΗΓΗ

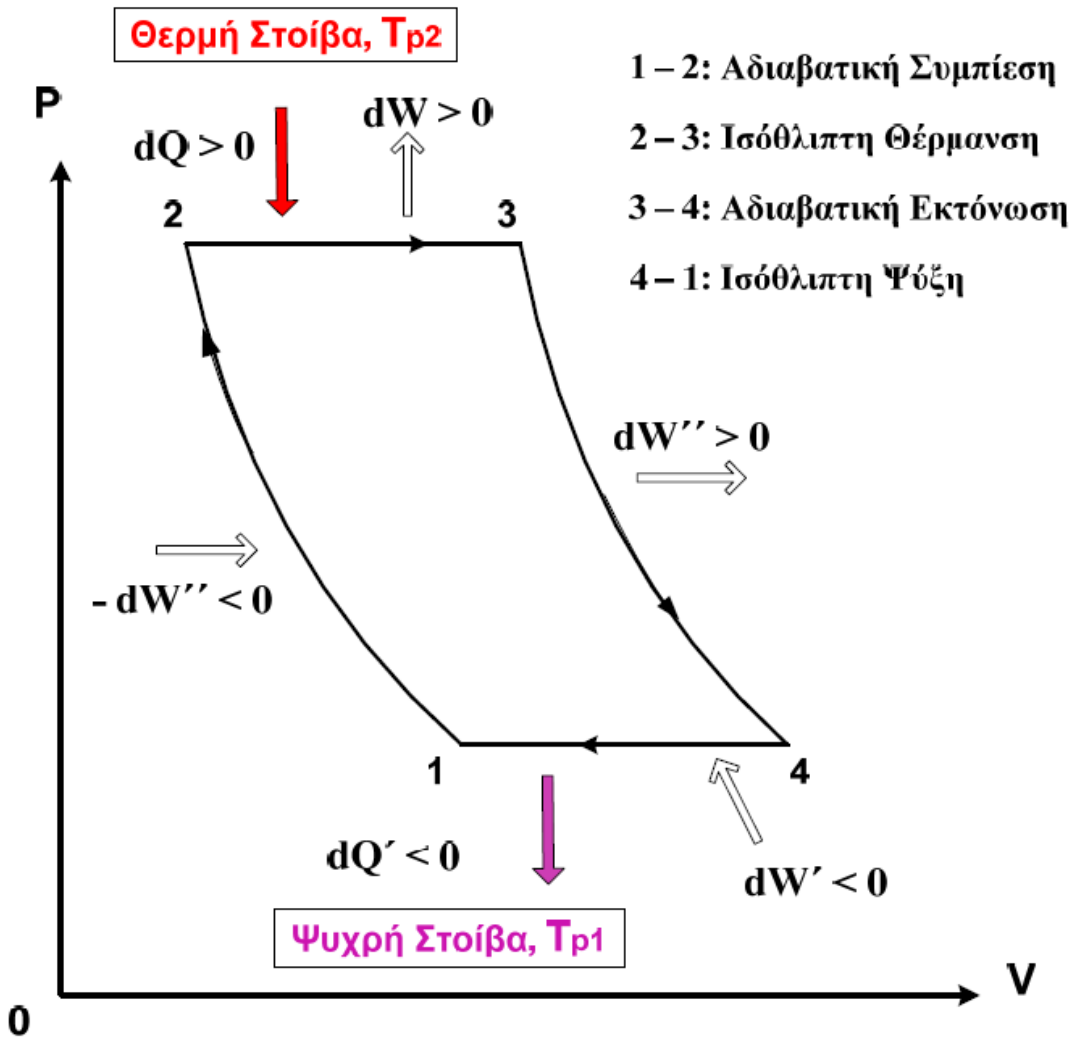
Οι θερμοακουστικοί ψύκτες χρειάζονται μία ακουστική πηγή να οδηγήσει το σύστημα και τη μεταφορά θερμότητας. Το σύστημα μπορεί να παράγει ακουστική ισχύ από μόνο του, μπορεί επίσης να χρησιμοποιεί μια εξωτερική ακουστική πηγή όπως ένα μεγάφωνο.

Η ηλεκτρακουστική απόδοση εκφράζει την αναλογία του ήχου που παράγεται προς τον ηλεκτρισμό που χρησιμοποιείται. Η απόδοση των μεγαφώνων του εμπορίου είναι συνήθως 4-5%. αυτό σημαίνει πως το υπόλοιπο 95% μετατρέπεται σε θερμότητα. Επομένως στα θερμοακουστικά συστήματα χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένες υψηλής απόδοσης ακουστικές πηγές (π.χ. Η απόδοση του SETAC έχει φτάσει το 80%). Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρακουστική απόδοση τόσο μεγαλύτερος και ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος. ο Tijani έδειξε ότι όσο πιο κοντά βρίσκεται η συχνότητα αντήχησης του ηχείου στη συχνότητα που εργάζεται το σύστημα αυξάνει η ακουστική απόδοση του ηχείου [45].

1.3.2 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Στην κινητήρια μηχανή προσδίδουμε θερμότητα και ως ωφέλιμο έργο παίρνουμε ακουστική ισχύ. Για να λειτουργήσει η μηχανή θερμαίνουμε το ένα τμήμα της στοίβας (θερμό) μέσω του θερμού εναλλάκτη θερμότητας και ψύχουμε το άλλο (ψυχρό) μέσω του ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας παράγει ήχο και άρα την ωφέλιμη ακουστική ισχύ.

ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ



Σχήμα 1-20. Οι μεταβολές που υφίσταται το εργαζόμενο ρευστό σε μία θερμοακουστική κινητήρια μηχανή στάσιμου κύματος προσομοιάζουν στον κύκλο Brayton κινητήριας μηχανής.[46]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές που υφίσταται μία ποσότητα του εργαζόμενου ρευστού (“πακέτο ρευστού”) στο εσωτερικό της στοίβας μίας κινητήριας μηχανής φαίνονται στο σχήμα 1-20 και 1-22 και είναι:

Διεργασία 1-2, Αδιαβατική συμπίεση: το πακέτο ρευστού λόγω της ταλάντωσής του μετατοπίζεται από την ακραία του θέση (1) στην ακραία θέση (2) όπου επικρατεί μεγαλύτερη πίεση ($p_1 < p_2$) και συνεπώς συμπιέζεται αδιαβατικά. Λόγω της αδιαβατικής συμπίεσης αυξάνεται η

θερμοκρασία του από $T_1 = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m = T_{p1}$ σε $T_2 = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m + 2T_a$, όπου T_m είναι η μέση θερμοκρασία του ρευστού και της πλάκας της στοίβας και ∇T_m η κλίση θερμοκρασίας της στοίβας κατά την κατεύθυνση, x , του μήκους της. Επιπλέον το πακέτο επειδή μετατοπίζεται από μία περιοχή με χαμηλή πίεση σε μία περιοχή με υψηλή πίεση απορροφά έργο dW'' .

Διεργασία 2–3, Ισόθλιπτη θέρμανση: το ρευστό στη νέα του ακραία θέση (2) και στην νέα κατάσταση (2) έχει μικρότερη θερμοκρασία από τη στοίβα σε αυτή τη θέση ($T_2 < T_{p2}$) και έτσι το πακέτο απορροφά θερμότητα dQ από τη στοίβα υπό σταθερή πίεση, έως ότου (το πακέτο) να αποκτήσει τη θερμοκρασία της στοίβας στη συγκεκριμένη θέση $T_3 = T_{p2} = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m$. Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του υπό σταθερή πίεση, το πακέτο εκτονώνεται παράγοντας ωφέλιμο έργο dW .

Διεργασία 3–4, Αδιαβατική εκτόνωση: το πακέτο ρευστού μετατοπίζεται από τη θέση (2) στην παλιά θέση (1) όπου επικρατεί μικρότερη πίεση ($p_1 < p_2$) και συνεπώς εκτονώνεται αδιαβατικά. Λόγω της αδιαβατικής εκτόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του και γίνεται $T_4 = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m - 2T_a < T_3$. Επιπλέον επειδή το πακέτο μετατοπίστηκε από μία περιοχή με υψηλή πίεση σε μία περιοχή με χαμηλή πίεση αποδίδει έργο dW'' .

Διεργασία 4–1, Ισόθλιπτη ψύξη: το ρευστό στη θέση (1) και κατάσταση (4) έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη στοίβα σε αυτή τη θέση ($T_{p1} < T_4$) και έτσι το πακέτο προσδίδει θερμότητα dQ' στη στοίβα υπό σταθερή πίεση, έως το πακέτο να αποκτήσει τη θερμοκρασία της στοίβας στη συγκεκριμένη θέση ($T_{p1} = T_1$). Λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του υπό σταθερή πίεση, το πακέτο συμπιέζεται και απορροφά έργο dW' .

Στο θερμοδυναμικό κύκλο που περιγράψαμε παραπάνω για την κινητήρια μηχανή, θερμότητα απορροφάται από το πακέτο ρευστού κατά τη διεργασία 2–3 και αποβάλλεται κατά τη διεργασία 4–1. Έτσι το πακέτο ρευστού υφίσταται ανά κύκλο:

i) ισόθλιπτη θέρμανση σε υψηλή πίεση (εκτόνωση) και

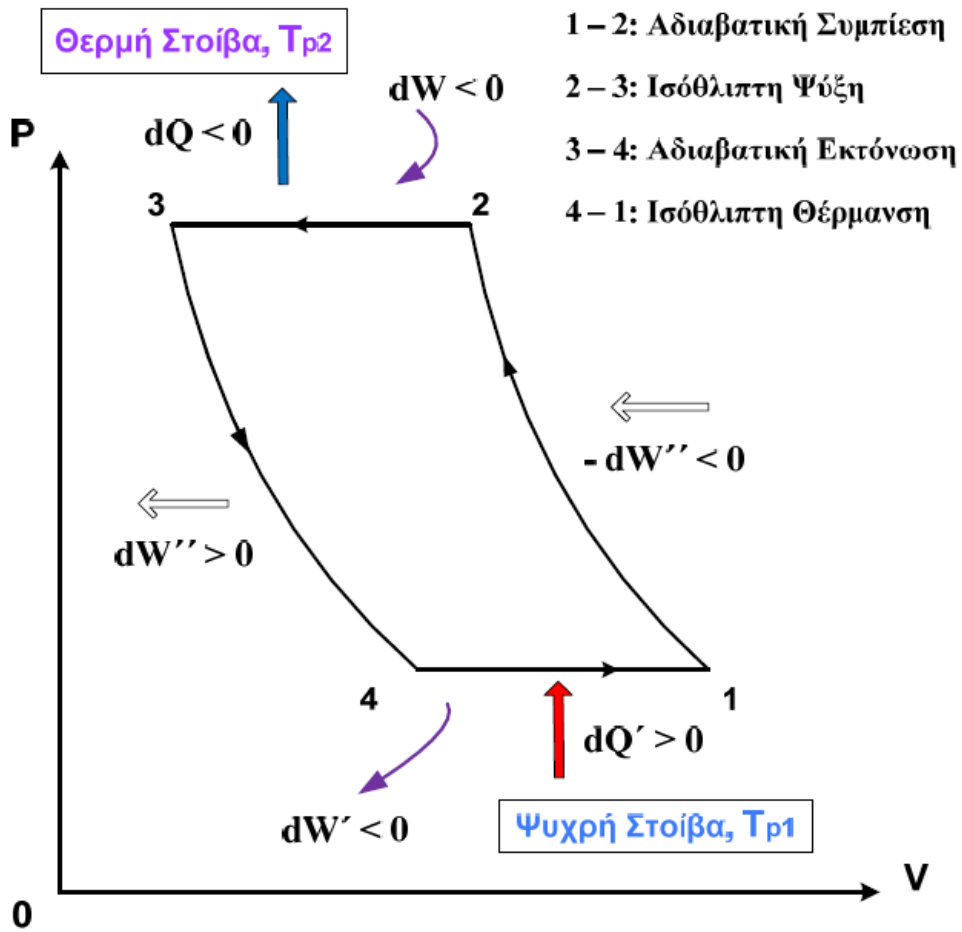
ii) ισόθλιπτη ψύξη σε χαμηλή πίεση (συμπίεση).

Άρα το πακέτο ρευστού παράγει ανά κύκλο ωφέλιμο έργο ($dW - dW'$).

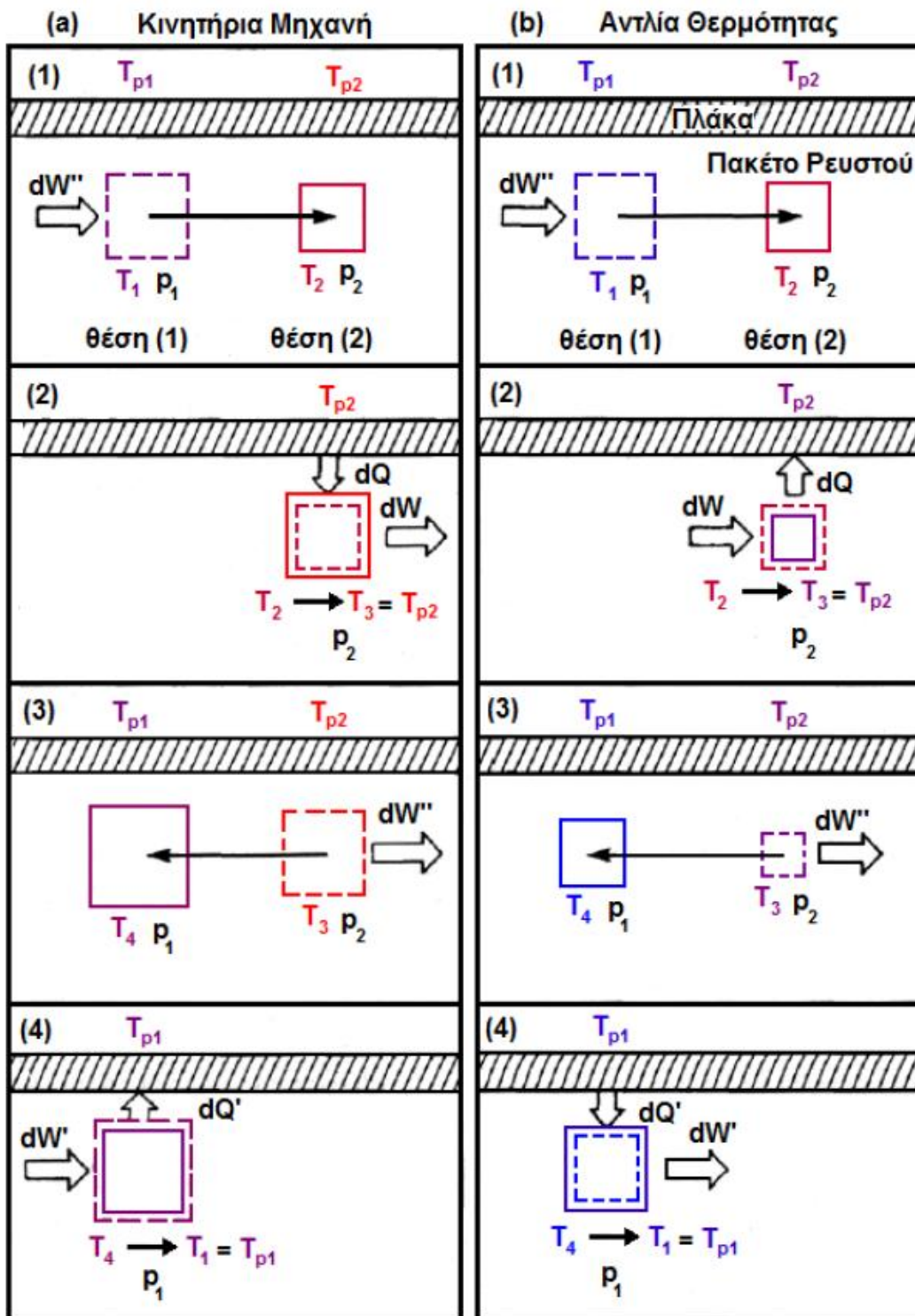
1.3.3 ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Στην αντλία θερμότητας προσδίδουμε ακουστική ισχύ για να αντλήσουμε θερμότητα από μία δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας σε μία δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας. Για να λειτουργήσει η μηχανή πρέπει με κάποιο τρόπο να δημιουργήσουμε ένα στάσιμο ηχητικό κύμα στο αντηχείο της. Το ηχητικό κύμα εγείρει ταλαντώσεις θερμοκρασίας στο εργαζόμενο ρευστό και αυτό με τη σειρά του απορροφώντας την ακουστική ισχύ του κύματος αντλεί θερμότητα κατά μήκος των πλακών της στοίβας. Οι θερμοδυναμικές μεταβολές που υφίσταται μία ποσότητα του εργαζόμενου ρευστού (“πακέτο ρευστού”) στο εσωτερικό της στοίβας μίας αντλίας θερμότητας φαίνονται στο σχήμα 1-21 και 1-22 και είναι:

ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 1-21. Οι μεταβολές που υφίσταται το εργαζόμενο ρευστό σε μία θερμοακουστική αντλία θερμότητας στάσιμου κύματος προσομοιάζουν στον κύκλο Brayton αντλίας θερμότητας. [46]



Σχήμα 1-22. Παλινδρομική κίνηση ενός πακέτου ρευστού στο εσωτερικό της στήβας

($T_{p1} < T_{p2}$). Επιπλέον παρουσιάζονται οι ροές θερμότητας και έργου για:

a. Κινητήρια Μηχανή b. Αντλία Θερμότητας [43, 46]

Διεργασία 1–2, Αδιαβατική συμπίεση: το πακέτο ρευστού λόγω της ταλάντωσής του μετατοπίζεται από την ακραία του θέση (1) στην ακραία θέση (2) όπου επικρατεί μεγαλύτερη πίεση ($p_1 < p_2$) και συνεπώς συμπιέζεται αδιαβατικά. Λόγω της αδιαβατικής συμπίεσης αυξάνεται η θερμοκρασία του από $T_1 = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m = T_{p1}$ σε $T_2 = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m + 2T_a$. Επιπλέον το πακέτο επειδή μετατοπίζεται από μία περιοχή με χαμηλή πίεση σε μία περιοχή με υψηλή πίεση απορροφά έργο dW'' .

Διεργασία 2–3, Ισόθλιπτη ψύξη: το ρευστό στη νέα του θέση (2) και στη νέα του κατάσταση (2) έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη στοιβα σε αυτή τη θέση ($T_{p2} < T_2$) και έτσι το πακέτο αποβάλλει θερμότητα dQ προς τη στοιβα υπό σταθερή πίεση, έως ότου (το πακέτο) να αποκτήσει τη θερμοκρασία της στοιβας στη συγκεκριμένη θέση $T_3 = T_{p2} = T_m + x_1 \cdot \nabla T_m$. Λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του υπό σταθερή πίεση, το πακέτο ψύχεται απορροφώντας έργο dW .

Διεργασία 3–4, Αδιαβατική εκτόνωση: το πακέτο ρευστού μετατοπίζεται από τη θέση (2) στην παλαιά θέση (1) όπου επικρατεί μικρότερη πίεση ($p_1 < p_2$) και συνεπώς εκτονώνεται αδιαβατικά. Λόγω της αδιαβατικής εκτόνωσης μειώνεται η θερμοκρασία του και γίνεται $T_4 = T_m - x_1 \cdot \nabla T_m - 2T_a < T_3$. Επιπλέον επειδή το πακέτο μετατοπίστηκε από μία περιοχή με υψηλή πίεση σε μία περιοχή με χαμηλή πίεση αποδίδει ωφέλιμο έργο dW'' .

Διεργασία 4–1, Ισόθλιπτη θέρμανση: το ρευστό στη θέση (1) και στην κατάσταση (4) έχει μικρότερη θερμοκρασία από τη στοιβα σε αυτή τη θέση ($T_4 < T_{p1}$) και έτσι το πακέτο απορροφά θερμότητα dQ' από τη στοιβα υπό σταθερή πίεση, έως ότου (το πακέτο) να αποκτήσει τη θερμοκρασία της στοιβας στη συγκεκριμένη θέση ($T_1 = T_{p1}$). Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του υπό σταθερή πίεση, το πακέτο εκτονώνεται και αποδίδει ωφέλιμο έργο dW' . Στο θερμοδυναμικό κύκλο της αντλίας θερμότητας που περιγράψαμε παραπάνω (σχήμα 1-22), θερμότητα αποβάλλεται από το πακέτο ρευστού κατά τη διεργασία 2 – 3 και απορροφάται κατά τη διεργασία 4 – 1. Έτσι το πακέτο ρευστού υφίσταται ανά κύκλο:

i) ισόθλιπτη ψύξη σε υψηλή πίεση (συμπίεση) και

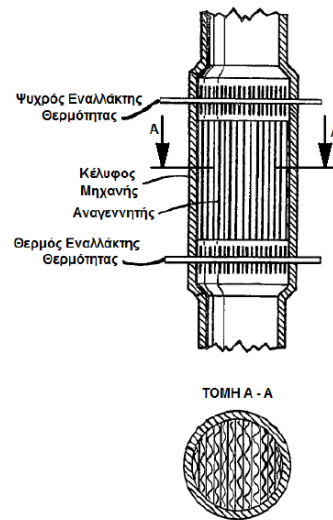
ii) ισόθλιπη θέρμανση σε χαμηλή πίεση (εκτόνωση).

Άρα το πακέτο ρευστού καταναλώνει ανά κύκλο έργο ($dW - dW'$).

Παρατηρούμε ότι και στις δύο μηχανές το ρευστό κατά την αδιαβατική εκτόνωση αποδίδει έργο dW'' και κατά την αδιαβατική συμπίεση απορροφά ακριβώς το ίδιο ποσό, δηλαδή, dW'' . Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο, αφού οι μεταβολές της θερμοκρασίας για τις δύο διεργασίες σε κάθε μηχανή είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσες, δηλαδή $(T_2 - T_1) = (T_3 - T_4) = 2T_a$. [46]

1.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Οι μηχανές τρέχοντος κύματος λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν και οι μηχανές στάσιμου κύματος. Μία μηχανή τρέχοντος κύματος μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί επίσης είτε ως κινητήρια μηχανή ή ως αντλία θερμότητας. Όταν λειτουργεί ως κινητήρια μηχανή, η θερμότητα μετατρέπεται σε ηχητικά τρέχοντα κύματα λόγω της ύπαρξης μίας κλίσης θερμοκρασίας μέσα στη μήτρα. Αυτή η ακουστική ισχύς (τρέχον ηχητικό κύμα) μπορεί να μετατραπεί σε πιο συμβατικές μορφές όπως ηλεκτρική ή μηχανική. Αντίστροφα όταν λειτουργεί ως αντλία θερμότητας, τα ηχητικά τρέχοντα κύματα προσδίδουν την απαιτούμενη ισχύ (ηχητική ισχύς) ώστε να πραγματοποιηθεί άντληση της θερμότητας κατά μήκος της κλίσης θερμοκρασίας μέσα στη μήτρα.

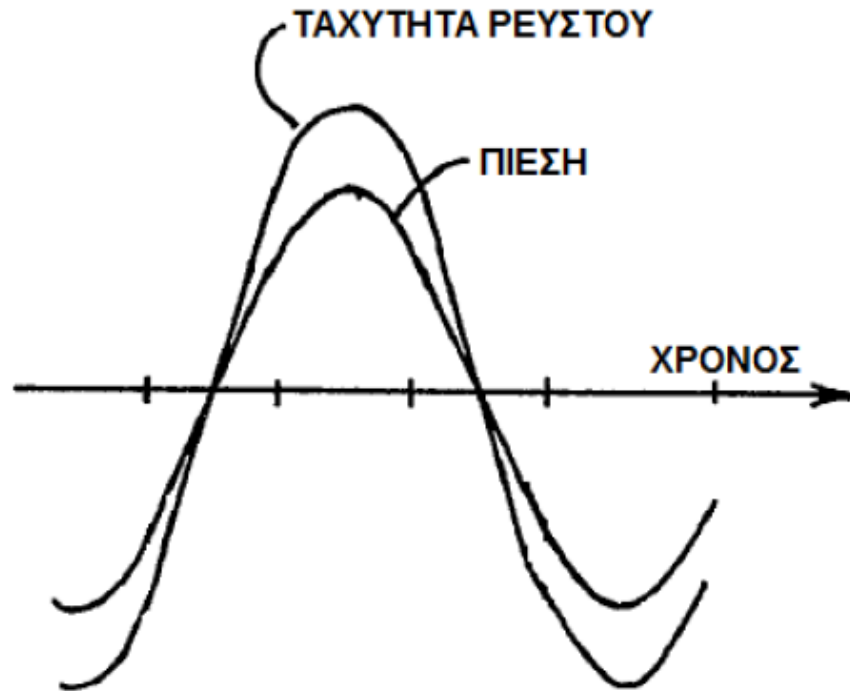


Σχήμα 1.23. Αναγεννητής μηχανής τρέχοντος κύματος

Βασικό τμήμα των μηχανών τρεχόντων κυμάτων είναι ο αναγεννητής (regenerator). Ο αναγεννητής είναι η βασική αιτία εμφάνισης του θερμοακουστικού φαινομένου. Η αλληλεπίδραση του ηχητικού κύματος με το εργαζόμενο αέριο της μηχανής και εν συνεχεία η αλληλεπίδραση του αερίου με το στερεό σύνορο του αναγεννητή είναι η αιτία ενίσχυσης (κινητήρια μηχανή) ή απορρόφησης (αντλία θερμότητας) της ισχύος των τρεχόντων ηχητικών κυμάτων. Ο αναγεννητής βρίσκεται ανάμεσα σε δύο εναλλάκτες θερμότητας που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη κλίση θερμοκρασίας για τη λειτουργία των μηχανών (σχήμα 1-23), έναν ψυχρό και ένα θερμό. Συνήθως ο ένας από τους δύο βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ ο άλλος ανάλογα με τη λειτουργία της μηχανής είναι θερμότερος ή ψυχρότερος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι η μήτρα του αναγεννητή αποτελείται από κάποιο πορώδες υλικό. Οι πόροι του υλικού έχουν μικρή υδραυλική ακτίνα, ώστε το εργαζόμενο ρευστό, στον αναγεννητή, να βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με τη μήτρα γύρω από αυτό. Βέβαια, η υδραυλική ακτίνα των πόρων δεν είναι τόσο μικρή που να εμποδίζει τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων μέσα από τον αναγεννητή. Ο αναγεννητής μπορεί να έχει διάφορες μορφές, αυτή που εικονίζεται στο σχήμα 1-23, βελτιστοποιεί την απόδοσή του.

Θα υποθέσουμε, για τις μηχανές τρέχοντος κύματος ότι το εργαζόμενο ρευστό είναι ιδανικό αέριο, όπως κάναμε και για τις μηχανές στάσιμου κύματος. Άρα θα ισχύει η καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων. Από την εξίσωση αυτή παρατηρούμε ότι τα τρία μεγέθη, θερμοκρασία, πίεση και όγκος συνδέονται με μία ισότητα. Μεταβάλλοντας, δηλαδή, ένα από τα τρία μεγέθη, πρέπει να μεταβληθεί και άλλο ένα τουλάχιστον. Το ηχητικό κύμα δεν είναι τίποτα άλλο από ταλαντώσεις πίεσης και ταχύτητας κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσής του. Οι ταλαντώσεις αυτές παρουσιάζονται στο αέριο μέσα στο οποίο διαδίδεται το κύμα. Έτσι βάσει της καταστατικής εξίσωσης παρατηρούμε ότι το αέριο μέσα στο οποίο διαδίδεται το ηχητικό κύμα θα παρουσιάζει ταλαντώσεις στη θερμοκρασία και τον όγκο του, λόγω της ταλάντωσης της πίεσής του.

Η μεγάλη διαφορά με τις μηχανές στάσιμου κύματος είναι ότι στο τρέχον κύμα οι ταλαντώσεις της πίεσης και της ταχύτητας είναι σε φάση (σχήμα 1-24). Έτσι υπάρχει διαχωρισμός των διεργασιών που υφίσταται το εργαζόμενο ρευστό, σε αντίθεση με το στάσιμο κύμα. Συνεπώς δεν είναι απαραίτητο ο αναγεννητής της μηχανής να προκαλεί καθυστέρηση στη μεταφορά θερμότητας, όπως συμβαίνει στις μηχανές στάσιμου κύματος με τη στοίβα. Ο αναγεννητής των μηχανών τρεχόντων κυμάτων πρέπει να εξασφαλίζει πολύ καλή θερμική επαφή με το αέριο.



Σχήμα 1-24. Πίεση και ταχύτητα αερίου, μέσω του οποίου διαδίδεται ένα τρέχον κύμα, ως συνάρτηση του χρόνου.

Για ένα αέριο, που περιέχεται σε έναν αναγεννητή με σωστό προσανατολισμό και με κλίση θερμοκρασίας, η θετική ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα το αέριο να μετακινείται προς το θερμό άκρο και να θερμαίνεται. Αντίθετα η αρνητική ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του αερίου.

Ένας σημαντικός παράγοντας των συμβατικών θερμικών μηχανών είναι η διαδοχή των φάσεων. Για να επιτευχθεί η σωστή διαδοχή των φάσεων που απαιτείται για τον εκάστοτε κύκλο λειτουργίας των συμβατικών μηχανών, χρησιμοποιούνται κινούμενα μέρη, όπως έμβολα ή βαλβίδες, για να μετακινούν το εργαζόμενο ρευστό με σωστό χρονισμό, ώστε να ακολουθεί τον επιθυμητό θερμοδυναμικό κύκλο. Αυτή η διαδικασία στις θερμοακουστικές μηχανές τρέχοντος κύματος επιτυγχάνεται με το τρέχον ηχητικό κύμα. **Οι θερμοακουστικές μηχανές, δηλαδή, δεν έχουν κινούμενα μέρη,** αλλά η ηχητική διέγερση της μεταφοράς θερμότητας και η παραγωγή ή απορρόφηση

της ηχητικής ισχύος οδηγούν σε ένα τύπο διαδοχής φάσεων των θερμοδυναμικών διεργασιών στο χρόνο. Επιπλέον σε μία κινητήρια, για παράδειγμα, μηχανή με έμβολα το ωφέλιμο έργο που παράγει το εργαζόμενο μέσο μεταβιβάζεται στα έμβολα της μηχανής, δηλαδή στο αίτιο που προκαλεί την κίνηση του αερίου. Έτσι στις θερμοακουστικές μηχανές το ωφέλιμο έργο που παράγει το εργαζόμενο ρευστό απορροφάται από το ηχητικό κύμα με αποτέλεσμα την ενίσχυσή του.

Βασικό στοιχείο της διαδοχής φάσεων στις μηχανές τρέχοντος κύματος είναι η παρουσία δύο θερμοδυναμικών μέσων: του ρευστού και της μήτρας του αναγεννητή. Καθώς το ρευστό παλινδρομεί κατά μήκος του αναγεννητή, στην ακουστική συχνότητα, υφίσταται μεταβολές στη θερμοκρασία του. Ένα μέρος αυτών των θερμοκρασιακών αλλαγών προέρχεται από τη θερμική συμπίεση και εκτόνωση του ρευστού από τη μεταβολή της πίεσης, λόγω του ηχητικού κύματος και η υπόλοιπη είναι συνέπεια της τοπικής θερμοκρασίας της μήτρας του αναγεννητή.

Αντίθετα με αυτό που συμβαίνει στις μηχανές στάσιμου κύματος, όπου η στοίβα προκαλεί υστέρηση στη μεταφορά θερμότητας, στις μηχανές τρέχοντος κύματος ο αναγεννητής πρέπει να εξασφαλίζει την άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ρευστού και της μήτρας του. Αυτό το γεγονός είναι που κάνει τη μηχανή τρέχοντος κύματος να έχει μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης από τη μηχανή στάσιμου κύματος. Έτσι μία απλή μεταβολή – η ροή θερμότητας κατά μήκος μίας διαφοράς θερμοκρασίας – είναι ουσιαστική για τη λειτουργία των θερμοακουστικών μηχανών.

Όσον αφορά στο αέριο, μόνο τα “πακέτα αερίου” που βρίσκονται σε απόσταση το πολύ δ_c από το στερεό σύνορο της μήτρας του αναγεννητή είναι αυτά που αλληλεπιδρούν με αυτή για την παραγωγή ή απορρόφηση της ακουστικής ισχύος και τη μεταφορά θερμότητας. Η υπόλοιπη ποσότητα αερίου συμπίεζεται και εκτονώνεται χωρίς να παίρνει μέρος στις συναλλαγές θερμότητας και ισχύος.

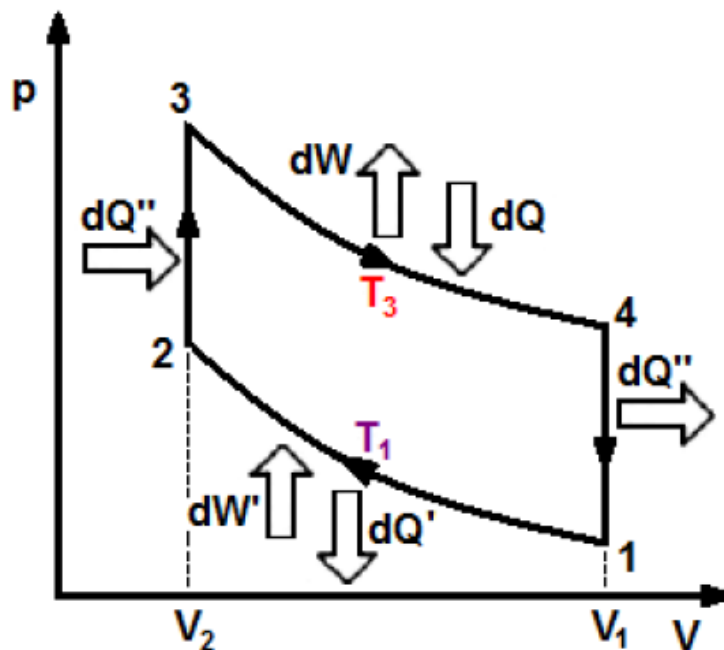
1.4.1 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Στην κινητήρια μηχανή προσδίδουμε θερμότητα και ως ωφέλιμο έργο παίρνουμε ακουστική

ισχύ (τρέχον κύμα). Για να λειτουργήσει η μηχανή θερμαίνουμε το ένα τμήμα της μήτρας του αναγεννητή (θερμό) μέσω του θερμού εναλλάκτη θερμότητας και ψύχουμε το άλλο (ψυχρό) μέσω του ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας παράγει ήχο και άρα την ωφέλιμη ακουστική ισχύ.

Τα ηχητικά κύματα στο εσωτερικό της μηχανής κατευθύνονται από το ψυχρό τμήμα του αναγεννητή προς το θερμό. Το ηχητικό κύμα εξαναγκάζει το ρευστό να κινηθεί προς το θερμό τμήμα του αναγεννητή με αποτέλεσμα να θερμαίνεται και να εκτονώνεται, ενώ όταν επιστρέφει στο ψυχρό τμήμα, ψύχεται και συμπιέζεται.

Οι μεταβολές που υφίσταται ένα πακέτο ρευστού στο εσωτερικό του αναγεννητή καθώς το κύμα διαδίδεται μέσα του είναι: αύξηση της πίεσης και συμπίεση, ροή του πακέτου προς το θερμό άκρο και θέρμανση, πτώση της πίεσης και εκτόνωση και τελικά ροή προς το ψυχρό άκρο και ψύξη.



Σχήμα 1-25 Οι μεταβολές που υφίσταται το εργαζόμενο ρευστό σε μία θερμοακουστική κινητήρια μηχανή τρέχοντος κύματος είναι ίδιες με αυτές στον κύκλο Stirling κινητήριας μηχανής.[43, 46]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές που υφίσταται μία ποσότητα του εργαζόμενου ρευστού (“πακέτο

ρευστού”) στο εσωτερικό της μήτρας του αναγεννητή μίας κινητήριας μηχανής φαίνονται στα σχήματα 1-25 και 1-27 και είναι:

Διεργασία 1–2, Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση: το πακέτο ρευστού συμπιέζεται λόγω της αύξησης της πίεσης που προκαλεί το ηχητικό κύμα. Όμως λόγω του γεγονότος ότι βρίσκεται κοντά στο ψυχρότερο τμήμα του αναγεννητή, δεν αλλάζει η θερμοκρασία του $T_1=T_2$, οπότε θα μειωθεί ο όγκος του ($V_1>V_2$) και άρα θα απορροφήσει έργο.

Διεργασία 2–3, Ισόογκη θέρμανση: το ρευστό λόγω της αύξησης της ταχύτητάς του μετατοπίζεται προς τη θερμότερη περιοχή του αναγεννητή. Η θερμοκρασία του πακέτου ρευστού σε αυτή τη θέση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τοπική θερμοκρασία του αναγεννητή ($T_2<T_{p2}$). Φθάνοντας το πακέτο αερίου στην ακραία θέση της ταλάντωσης του απορροφά θερμότητα υπό σταθερό όγκο ($V_2=V_3$), από τον αναγεννητή, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία του ($T_2<T_3=T_{p2}$).

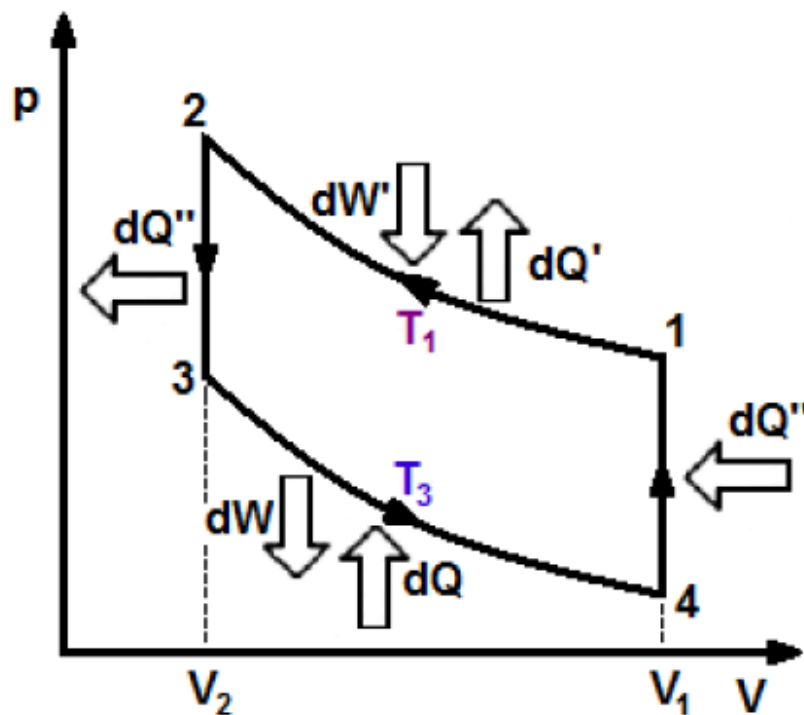
Διεργασία 3–4, Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση: σε αυτή τη φάση το πακέτο ρευστού βρίσκεται στο θερμότερο τμήμα του αναγεννητή. Η πίεση στην περιοχή αυτή αρχίζει να μειώνεται, λόγω του κύματος, οπότε το πακέτο εκτονώνεται ($V_3<V_4$) ισοθερμοκρασιακά $T_3=T_4$, παράγοντας έργο.

Διεργασία 4–1, Ισόογκη ψύξη: το ρευστό μετατοπίζεται στην αρχική του θέση, λόγω της παλινδρομικής του κίνησης. Το πακέτο αερίου στη συγκεκριμένη θέση έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από την τοπική θερμοκρασία του αναγεννητή σε αυτή τη θέση ($T_4>T_{p1}$). Το τμήμα του αναγεννητή σε αυτή τη θέση είναι ψυχρότερο από το πακέτο, οπότε το πακέτο αποδίδει κάποιο ποσό θερμότητας, υπό σταθερό όγκο ($V_4=V_1$), για να επιστρέψει στην αρχική του θερμοκρασία ($T_4>T_1=T_{p1}$). Άρα το πακέτο ρευστού παράγει ανά κύκλο ωφέλιμο έργο ($dW - dW'$).

1.4.2 ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

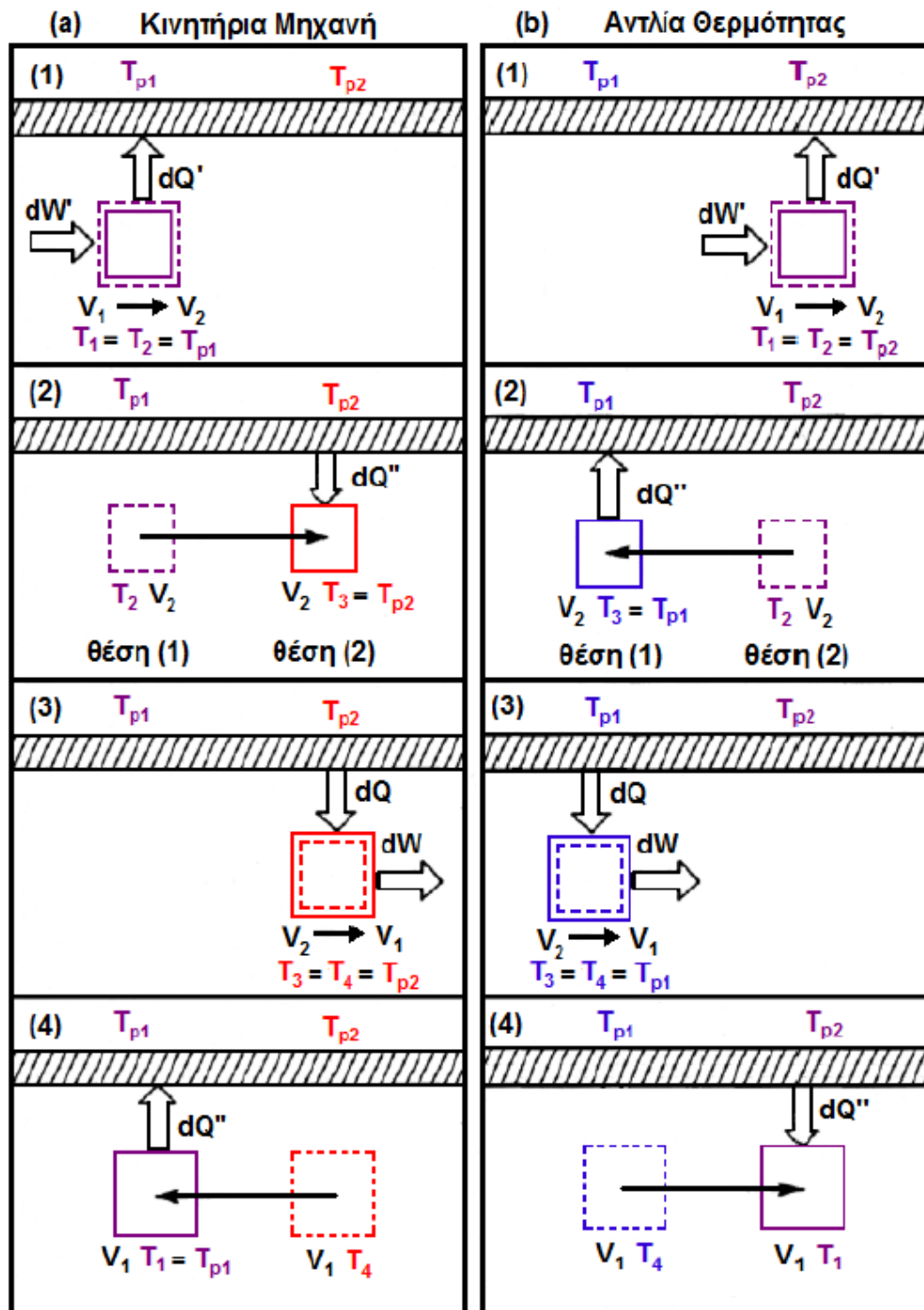
Στην αντλία θερμότητας προσδίδουμε ακουστική ισχύ για να αντλήσουμε θερμότητα από μία

δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας σε μία δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας. Για να λειτουργήσει η μηχανή πρέπει με κάποιο τρόπο να δημιουργήσουμε ένα τρέχον ηχητικό κύμα στο εσωτερικό της. Το ηχητικό κύμα εγείρει ταλαντώσεις θερμοκρασίας στο εργαζόμενο ρευστό και αυτό με τη σειρά του απορροφώντας την ακουστική ισχύ του κύματος αντλεί θερμότητα κατά μήκος της μήτρας του αναγεννητή. Τα ηχητικά κύματα στο εσωτερικό της μηχανής κατευθύνονται από το ψυχρό τμήμα του αναγεννητή προς το θερμό.



Σχήμα 1-26. Οι μεταβολές που υφίσταται το εργαζόμενο ρευστό σε μία θερμοακουστική αντλία θερμότητας τρέχοντος κύματος είναι ίδιες με αυτές στον κύκλο Stirling αντλίας θερμότητας.[43,46]

Οι μεταβολές που υφίσταται ένα πακέτο ρευστού στο εσωτερικό του αναγεννητή καθώς το κύμα διαδίδεται μέσα του είναι: αύξηση της πίεσης και συμπίεση, ροή του πακέτου προς το θερμό άκρο και ψύξη, πτώση της πίεσης και εκτόνωση και τελικά ροή προς το ψυχρό άκρο και θέρμανση



Σχήμα 1-27. Παλινδρομική κίνηση ενός πακέτου ρευστού στο εσωτερικό του αναγεννητή ($T_{p1} < T_{p2}$).

Επιπλέον παρουσιάζονται οι ροές θερμότητας και έργου για: a. Κινητήρια Μηχανή b. Αντλία

Θερμότητας [43, 46]

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές που υφίσταται μία ποσότητα του εργαζόμενου ρευστού (“πακέτο ρευστού”) στο εσωτερικό της μήτρας του αναγεννητή μίας αντλίας θερμότητας φαίνονται στα σχήματα 1-26 και 1-27 και είναι:

Διεργασία 1–2, Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση: το πακέτο ρευστού συμπιέζεται λόγω της αύξησης της πίεσης που προκαλεί το ηχητικό κύμα. Όμως λόγω του γεγονότος ότι βρίσκεται κοντά στο ψυχρότερο τμήμα του αναγεννητή, δεν αλλάζει η θερμοκρασία του $T_1=T_2$, οπότε θα μειωθεί ο όγκος του ($V_1>V_2$) και άρα θα απορροφήσει έργο.

Διεργασία 2–3, Ισόογκη ψύξη: το ρευστό λόγω της αύξησης της ταχύτητάς του μετατοπίζεται προς την ψυχρότερη περιοχή του αναγεννητή. Η θερμοκρασία του πακέτου ρευστού σε αυτή τη θέση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τοπική θερμοκρασία του αναγεννητή ($T_2>T_{p1}$). Φθάνοντας το πακέτο αερίου στην ακραία θέση της ταλάντωσης του αποδίδει θερμότητα υπό σταθερό όγκο ($V_2=V_3$), στον αναγεννητή, με αποτέλεσμα να μειωθεί η θερμοκρασία ($T_2>T_3=T_{p1}$) του.

Διεργασία 3–4, Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση: σε αυτή τη φάση το πακέτο ρευστού βρίσκεται στο θερμότερο τμήμα του αναγεννητή. Η πίεση στην περιοχή αυτή αρχίζει να μειώνεται, λόγω του κύματος, οπότε το πακέτο εκτονώνεται ($V_3<V_4$) ισοθερμοκρασιακά $T_3=T_4$, παράγοντας έργο.

Διεργασία 4 – 1, Ισόογκη θέρμανση: το ρευστό μετατοπίζεται στην αρχική του θέση, λόγω της παλινδρομικής του κίνησης. Το πακέτο αερίου στη συγκεκριμένη θέση έχει μικρότερη θερμοκρασία από την τοπική θερμοκρασία του αναγεννητή σε αυτή τη θέση $T_4<T_{p2}$. Το τμήμα του αναγεννητή σε αυτή τη θέση είναι ψυχρότερο από το πακέτο, οπότε το πακέτο απορροφά κάποιο ποσό θερμότητας, υπό σταθερό όγκο ($V_4=V_1$), για να επιστρέψει στην αρχική του θερμοκρασία ($T_4<T_1=T_{p2}$). Άρα το πακέτο ρευστού καταναλώνει ανά κύκλο έργο ($dW - dW'$). Το κάθε πακέτο αερίου σε κάθε κύκλο μεταφέρει μια μικρή ποσότητα θερμότητας κατά μήκος της κλίσης θερμοκρασίας. Την ποσότητα αυτή παραλαμβάνει το γειτονικό του πακέτο, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη μηχανή στάσιμου κύματος.

1.4.3 ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΑΕΡΙΑ

Για να μειωθεί το κόστος και η πολυπλοκότητα, πολλές πειραματικές και διδακτικές θερμοακουστικές συσκευές χρησιμοποιούν μόνο τον αέρα ως εργαζόμενο ρευστό. Ωστόσο, η πλειονότητα των θερμοακουστικών συστημάτων για εμπορική χρήση χρησιμοποιούν το ήλιο ή μίγματα δύο ευγενών αερίων όπως ήλιο ${}^4_2\text{He}$ και αργό ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ή ήλιο και ξένο ${}^{131}_{54}\text{Xe}$

Συχνά, η εκλογή του εργαζόμενου αερίου βασίζεται στην πυκνότητα θερμοακουστικής ισχύος, μία κλίμακα της οποίας καθόρισε ο Swift (1988) [43]. Η κλίμακα αυτή είναι το γινόμενο της μέσης πίεσης p_m , της ακουστικής ταχύτητας c και της επιφάνειας της εγκάρσιας τομής, δηλαδή $p_m \cdot c \cdot A$. Το γεγονός ότι το ήλιο έχει την υψηλότερη ηχητική ταχύτητα και τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από όλα τα ευγενή αέρια (Tijiani – 2001) [45] το κάνει μία εξαιρετική αρχική επιλογή σχεδίασης. Η υψηλή ηχητική ταχύτητα, η μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και το σχετιζόμενο αυξημένο δ_k επιτρέπουν την κατασκευή συσκευών με υψηλή συχνότητα χωρίς να είναι πολύ μικρών διαστάσεων. Η μεγάλη θερμική αγωγιμότητα αυξάνει το βάθος θερμικής διείσδυσης της συσκευής, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει τη γεωμετρία της δέσμης σε μεγέθη που μπορούν να κατασκευαστούν με σχετικά φθηνές μεθόδους κατεργασίας (Swift – 2002) [18].

Άλλα αδρανή αέρια, όπως το αργό ή το ξένο, προστίθενται στο ήλιο για να βελτιώσουν την απόδοση των θερμοακουστικών συστημάτων. Η προσθήκη τέτοιων βαρύτερων αερίων στο ήλιο είναι σχεδιασμένη να μειώνει τον αριθμό Prandtl, σ , του εργαζόμενου αερίου, ο οποίος με τη σειρά του μειώνει τις απώλειες ιξώδους διάχυσης (viscous dissipation losses) μέσα στο σύστημα (Swift – 2002) [18]. Οι Merkli και Thomann (1975) [47], παρατηρώντας ότι “όσο μικρότερος είναι ο αριθμός Prandtl τόσο μεγαλύτερα είναι τα θερμικά φαινόμενα (ψύξη, θέρμανση)”, πρότειναν ότι η αποτελεσματικότητα των θερμοακουστικών συσκευών θα μπορούσε να μεγιστοποιηθεί μέσω προσεκτικής επιλογής του εργαζόμενου αερίου. Πιο πρόσφατα, οι Wetzel και Herman (1997) [48] απέδειξαν ότι η χρήση ενός μίγματος 62 % ήλιο και 38 % ξένο οδήγησε σε διπλασιασμό του σχετικού

συντελεστή συμπεριφοράς (COP_r) του συστήματος. Ωστόσο, από σχεδιαστικής άποψης, η πυκνότητα ισχύος “θυσιάζεται” για την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Η προσθήκη του αερίου ξένο μείωσε πάρα πολύ την ταχύτητα του ήχου στο εργαζόμενο αέριο και κατ’ επέκταση την πυκνότητα ισχύος του συστήματος.

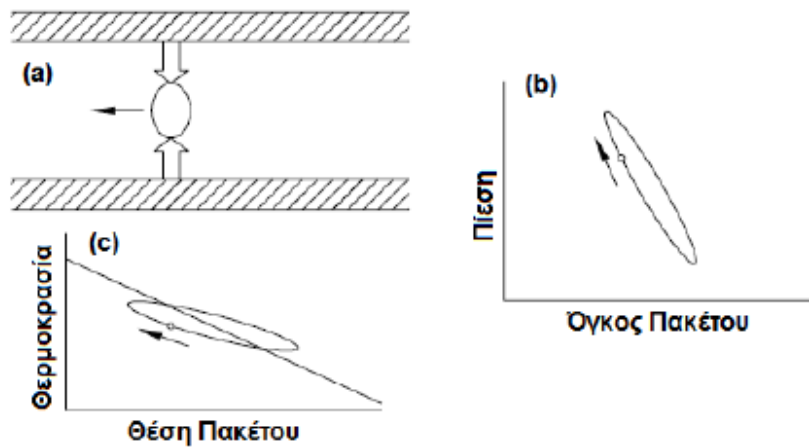
Οι θερμοακουστικές συσκευές που λειτουργούν με ήλιο είναι κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν σε ψυκτικά συστήματα στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση του ηλίου στη θερμοακουστική έναντι των συμβατικών ψυκτικών τεχνολογιών είναι:

- μηδενική συμβολή του στην υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP) από απευθείας εκπομπές,
- μηδενική συμβολή του στη διεύρυνση της τρύπας του όζοντος (ODP) από απευθείας εκπομπές,
- το εργαζόμενο αέριο δεν είναι τοξικό και εύφλεκτο και
- το εργαζόμενο αέριο δε χρειάζεται να ανακτηθεί όταν αντικαθίσταται.

Άλλα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σε ανταγωνιστικές τεχνολογίες ψύξης, όπως αμμωνία (NH_3), βουτάνιο (C_4H_{10}), προπάνιο (C_3H_8), υδροφθοράνθρακες (HFCs), χλωροφθοράνθρακες (CFCs), υδροφθοροχλωράνθρακες (HCFCs) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) έχουν ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη χρήση τους.

1.5 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

1.5.1 ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ



Σχήμα 1-28. Διάγραμμα μηχανής στάσιμου κύματος [46]

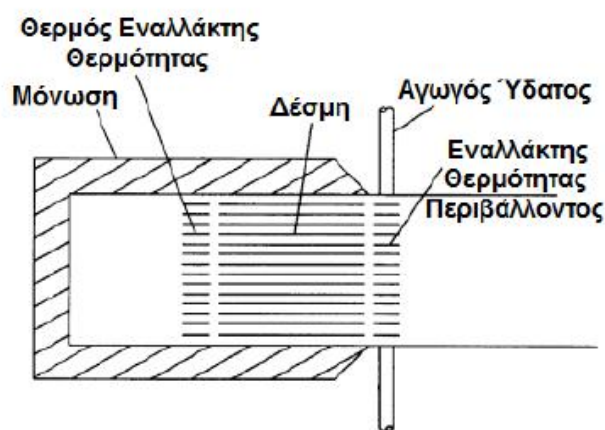
Στο σχήμα 1-28 (a) παρουσιάζεται το στιγμιότυπο της παλινδρόμησης ενός πακέτου αερίου. Σε αυτή τη χρονική στιγμή το πακέτο αερίου κινείται αριστερά (μαύρο βέλος) απορροφώντας θερμότητα από τα τοιχώματα του αγωγού (λευκά βέλη). Στο σχήμα 1-28 (b) παρατηρούμε ότι η πίεση και ο όγκος του πακέτου διαγράφουν μία έλλειψη, με ωρολογιακή φορά, στο χρόνο. Τέλος, στο σχήμα 1-28 (c) η ευθεία γραμμή παρουσιάζει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του αγωγού συναρτήσει της απόστασης, ενώ η έλλειψη είναι η θερμοκρασία του πακέτου ως συνάρτηση της θέσης του και του χρόνου [46].

Καθώς ένα τυπικό πακέτο αερίου παλινδρομεί κατά μήκος του άξονα του αγωγού, υφίσταται μεταβολές στη θερμοκρασία του που προκαλούνται από αδιαβατική συμπίεση και εκτόνωση του αερίου λόγω της ακουστικής πίεσης και από συναλλαγή θερμότητας με το στερεό τοίχωμα του αγωγού. Ένας θερμοδυναμικός κύκλος, με τη διαδοχή φάσεων που απαιτήθηκε από το Rayleigh, είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των ταλαντώσεων της πίεσης, της θερμοκρασίας, της θέσης και της θερμότητας. Η διαδοχή των φάσεων μεταξύ της κίνησης του αερίου και της πίεσής του είναι τέτοια που το αέριο κινείται προς τη θερμή περιοχή καθώς αυξάνεται η πίεση και προς την ψυχρή περιοχή

καθώς μειώνεται η πίεση. Σκόπιμα απαιτείται ατελής συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του αερίου και των στερεών τοιχωμάτων του αγωγού, ώστε να εισάγουμε σημαντική χρονική υστέρηση μεταξύ της κίνησης του αερίου και της θερμικής εκτόνωσής / συμπίεσής του, για να ικανοποιείται το κριτήριο του Rayleigh. Η διαδοχή φάσεων στο χρόνο που περιγράφηκε παραπάνω είναι αυτή ενός στάσιμου ακουστικού κύματος. Έτσι, ένα απλό αντηχείο όπως ένα κλειστό άκρο – κλειστό άκρο με μήκος $\lambda / 2$ ή ένα κλειστό άκρο – ανοικτό άκρο με μήκος $\lambda / 4$, όπου λ είναι το μήκος του ακουστικού κύματος, μπορεί να παρέχει το απαραίτητο ακουστικό περιβάλλον. Για μέγιστη απόδοση, οι συσχετίσεις μεταξύ των απωλειών συνεκτικότητας, των απωλειών θερμικής χαλάρωσης και των απωλειών θερμικής αγωγιμότητας τοποθετούν τη δέσμη και τους εναλλάκτες θερμότητάς της σε μία περιοχή του κύματος που ισχύει: $Z \sim 5 \cdot \rho \cdot a$, όπου Z είναι το μέτρο της ειδικής ακουστικής αντίστασης, ρ η πυκνότητα του αερίου και a η ταχύτητα του ήχου.

Η διεργασία που παρουσιάζεται στο σχήμα 1-20 συμβαίνει στο εσωτερικό ενός μόνο αγωγού. Η κλίση της θερμοκρασίας συντηρείται από μία εξωτερική πηγή θερμότητας στο ένα άκρο του αγωγού και από ψύκτρες (heatsinks) κατά μήκος του αγωγού, αλλά και στο άλλο άκρο του. Ωστόσο, στις μηχανές στάσιμου κύματος η διεργασία που περιγράψαμε συμβαίνει σε πολλούς παράλληλους αγωγούς, οι οποίοι συμβάλλουν στην παραγωγή ακουστικής ισχύος. Μία τέτοια σειρά από παράλληλους αγωγούς, που τώρα ονομάζεται δέσμη, τοποθετήθηκε για πρώτη φορά σε αγωγό Sondhauss από το Feldman στα τέλη της δεκαετίας του 1960 [2, 42, 50, 51]. Αυτή η σημαντική ανακάλυψη μας επέτρεψε να τοποθετούμε μικρά κανάλια στο εσωτερικό αγωγών μεγάλης διαμέτρου, δημιουργώντας ένα μεγάλο όγκο ισχυρής παραγωγής θερμοακουστικής ισχύος, αφήνοντας το υπόλοιπο αντηχείο ελεύθερο και σχετικά χαμηλής κατανάλωσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας που βρίσκονται στα άκρα της δέσμης απαιτούνται για αποδοτική απορρόφηση και αποβολή των μεγάλων ποσών θερμότητας που χρειάζεται η δέσμη. Οι πρώτοι που αναφέρεται ότι έκαναν χρήση τέτοιων εναλλακτών θερμότητας ήταν οι Feldman (1966, 1970) [50, 51] και Wheatley (1985) [52]. Στη

φωτογραφία του σχήματος 1-29 η μηχανή (που φαίνεται και σε σχηματικό διάγραμμα) είναι αριστερά (στο φόντο) και ο ψύκτης είναι στο προσκήνιο. Το αντηχείο έχει μήκος $\lambda/2$, με τις ταλαντώσεις πίεσης στη μηχανή και στον ψύκτη να έχουν διαφορά φάσης 180° και παρόμοια πλάτη. Για τη μηχανή αυτή ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως ο λόγος της ροής της ακουστικής ισχύος που κινείται από τον εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος προς την ισχύ του θερμαντή που παρέχεται προς το θερμό εναλλάκτη θερμότητας από την καύση του φυσικού αερίου.

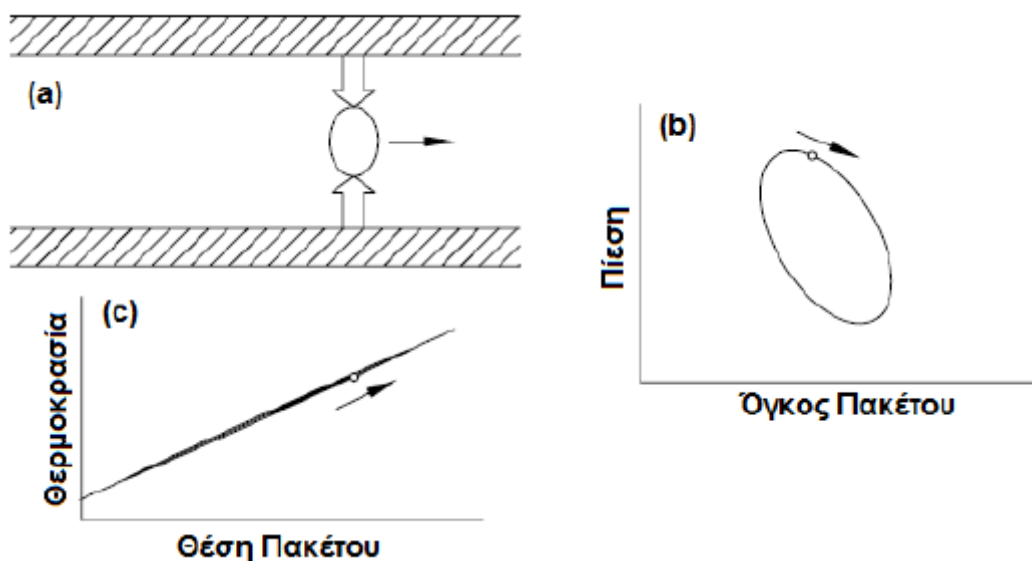


Σχήμα 1-29. Φωτογραφία και σχηματικό διάγραμμα μίας μηχανής στάσιμου κύματος που κατασκευάστηκε από την Cryenco (Wollan και συν. – 2002) [52].

1.5.2 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Στις μηχανές Stirling και στις μηχανές τρέχοντος κύματος η μετατροπή της θερμότητας σε ακουστική ισχύ συμβαίνει στον αναγεννητή, ο οποίος συνδέει ομαλά τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμού εναλλάκτη θερμότητας και του εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος και περιέχει μικρά κανάλια μέσα από τα οποία παλινδρομεί το αέριο. Τα κανάλια αυτά πρέπει να είναι αρκετά μικρότερα από αυτά που υπάρχουν στις δέσμες που περιγράψαμε παραπάνω και επαρκώς μικρά ώστε το αέριο που βρίσκεται μέσα στα κανάλια αυτά να είναι σε πολύ καλή τοπική θερμική επαφή με τα

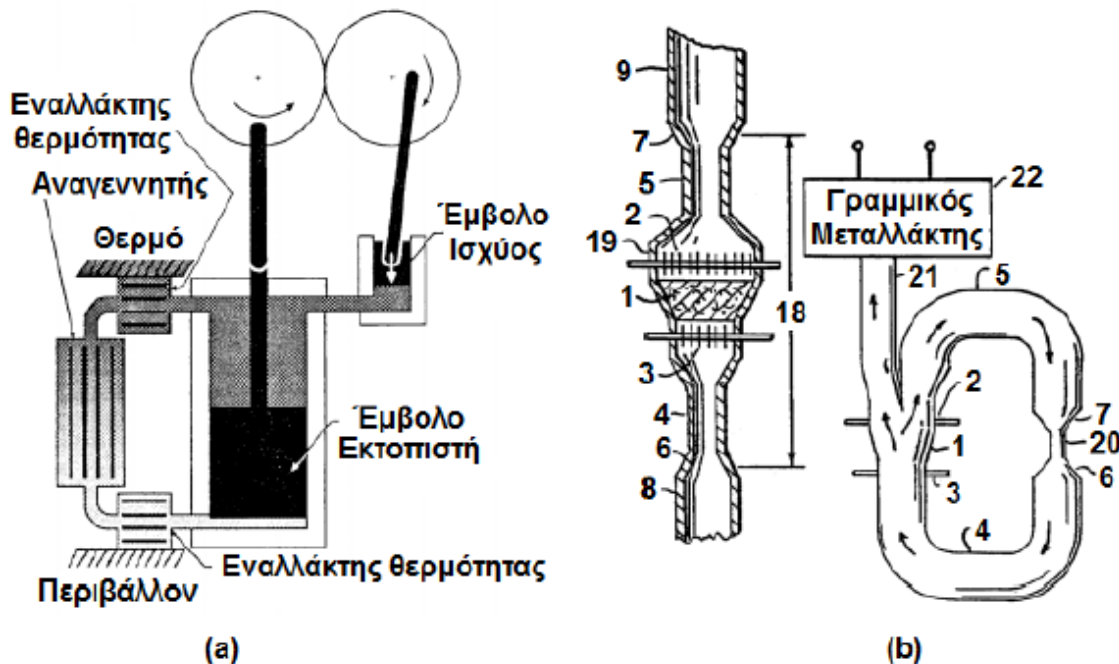
τοιχώματά τους. Συνήθως χρησιμοποιείται μία στερεά μήτρα, όπως μία στοίβα από κόσκινα λεπτού μεταλλικού πλέγματος. Ο κατάλληλος σχεδιασμός προκαλεί το αέριο στο κανάλι να κινηθεί προς το θερμό εναλλάκτη όταν η πίεση είναι υψηλή και προς τον εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος όταν η πίεση είναι χαμηλή, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-30. Ως εκ τούτου, η ταλαντούμενη θερμική εκτόνωση και συμπίεση του αερίου στον αναγεννητή, που εξαρτάται από την ταλάντωση κατά μήκος της κλίσης θερμοκρασίας του αερίου στους πόρους του αναγεννητή, έχει τη σωστή διαδοχή φάσεων στο χρόνο σε συμφωνία με την ταλάντωση της πίεσης, ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο του Rayleigh για την παραγωγή ισχύος.



Σχήμα 1-30. Οι διεργασίες στον αναγεννητή μίας μηχανής τρέχοντος κύματος.

Η διαδοχή φάσεων στο χρόνο που περιγράφηκε παραπάνω είναι αυτή ενός τρέχοντος ακουστικού κύματος, το οποίο μεταφέρει ακουστική ισχύ από την περιοχή με θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμή περιοχή. Σε αντίθεση με τις μηχανές στάσιμου κύματος, στις μηχανές τρέχοντος κύματος, η ακουστική ισχύς πρέπει να εγχυθεί (injected) στο άκρο του αναγεννητή που βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να δημιουργήσει περισσότερη ακουστική ισχύ· ο αναγεννητής είναι ενισχυτής της ακουστικής ισχύος. Ένα απλό κλειστό αντηχείο δεν μπορεί να

παρέχει την απαιτούμενη έγχυση ισχύος (power injection) στο άκρο του αναγεννητή που βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι είναι απαραίτητη η χρήση ενός περιβαλλοντικού εμβόλου (σχήμα 1-31a) ή ενός σπειροειδούς αντηχείου (σχήμα 1-32).



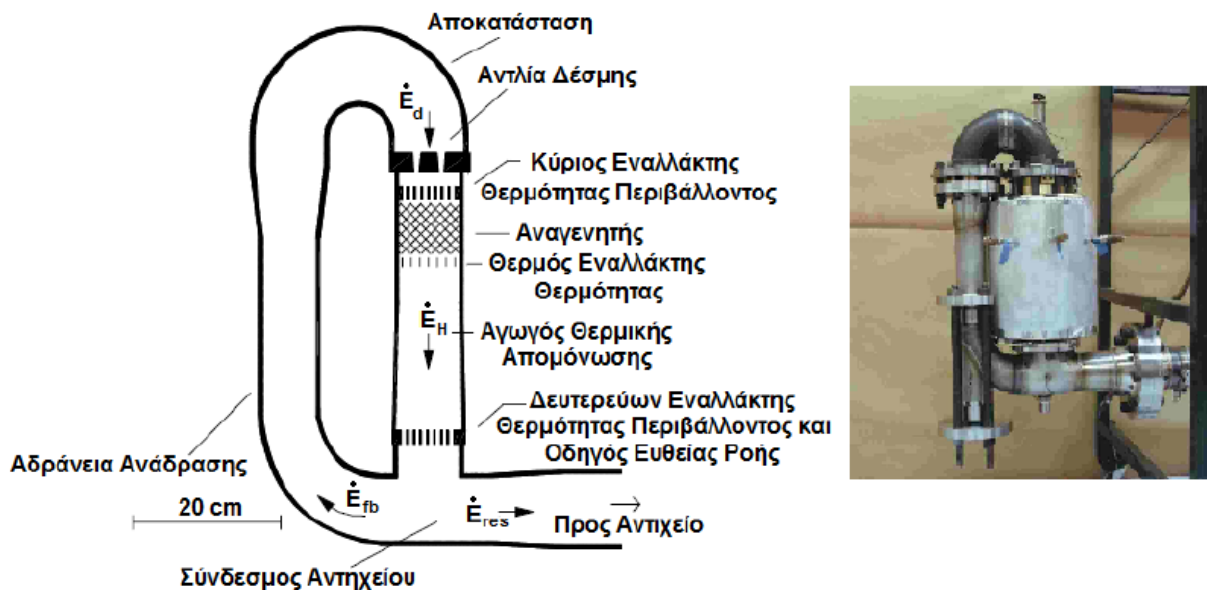
Σχήμα 1-31. (a) Σε μία μηχανή Stirling τα δύο έμβολα που παλινδρομούν με σωστή διαδοχή φάσεων στο χρόνο μεταφέρουν το αέριο σε δύο εναλλάκτες θερμότητας και έναν αναγεννητή μέσω ενός κύκλου συμπίεσης (κίνηση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμοκρασία του θερμού εναλλάκτη) και μέσω ενός κύκλου αποσυμπίεσης (κίνηση από τη θερμοκρασία του θερμού εναλλάκτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος). (b) Ο Ceperley παρατήρησε ότι τα υφιστάμενα φαινόμενα αποτελούσαν ένα ηχητικό κύμα και πρότεινε ότι τα έμβολα της μηχανής Stirling θα μπορούσαν να αφαιρεθούν αν τοποθετούνταν οι εναλλάκτες θερμότητας (2 και 3) και ο αναγεννητής (1) σε έναν κατάλληλο οδηγό ακουστικών κυμάτων (Ceperley –1979, 1985, 1982) [53, 54, 55].

Για υψηλότερη απόδοση, οι συμβιβασμοί μεταξύ των απωλειών συνεκτικότητας και των θερμικών απωλειών μας υποδεικνύουν τη θέση του αναγεννητή και των εναλλακτών θερμότητάς του

γύρω από μία περιοχή του κύματος όπου ισχύει: $z \sim 30 \cdot \rho \cdot \alpha$, όπου z είναι το μέτρο της ειδικής ακουστικής αντίστασης, ρ η πυκνότητα του αερίου και α η ταχύτητα του ήχου.

Οι Yazaki και συν. (1998) [56] παρουσίασαν μία μηχανή οδούντος κύματος παρόμοια με αυτή του Ceperley με μήκος διαδρομής, γύρω από τον δακτυλιοειδή οδηγό κύματος, σχεδόν ίσο με $2 \cdot \lambda$.

Περίπου την ίδια περίοδο, ο deBlock (1998, 2001) [57] και τα Los Alamos National Laboratories (Backhaus και Swift – 1999, 2000) [58, 59], εφεύραν μία μηχανή τρέχοντος κύματος με τους εναλλάκτες θερμότητας ενσωματωμένους σε έναν διογκωμένο δακτύλιο ακουστικής αντίστασης με μήκος πολύ μικρότερο του λ .



Σχήμα 1-32. Θερμοακουστική υβριδική μηχανή Stirling, με παραγωγή ισχύος 1 kW και βαθμό απόδοσης 30 %, χωρίς κινούμενα μέρη. Τα \dot{E} δείχνουν την κυκλοφορία και τη ροή της ακουστικής ισχύος (Wollan και συν. – 2002) [58, 59, 60].

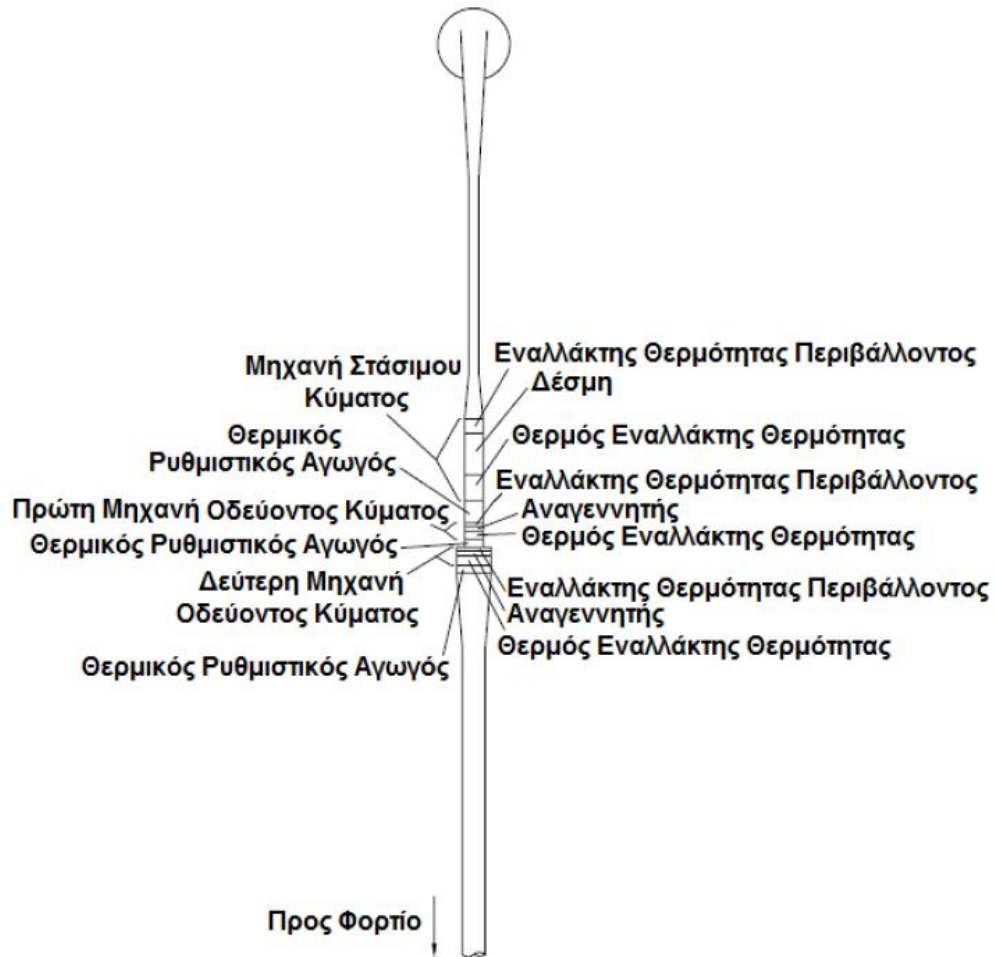
Το σχήμα 1-32 παρουσιάζει τη μηχανή των Los Alamos National Laboratories. Η μετατροπή της θερμότητας σε ακουστική ισχύ συμβαίνει στον αναγεννητή μεταξύ των δύο εναλλακτών θερμότητας, οι οποίοι είναι κατασκευαστικά και λειτουργικά όμοιοι με αυτούς μίας μηχανής Stirling. Ο σωστός

σχεδιασμός του ακουστικού δικτύου, που περιλαμβάνει κυρίως την αδράνεια ανάδρασης και την ένδοση (compliance), αναγκάζει το αέριο ,που βρίσκεται στα κανάλια του αναγεννητή, να κινηθεί προς το θερμό εναλλάκτη θερμότητας όταν η πίεση είναι υψηλή και προς τον κύριο εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος όταν η πίεση είναι χαμηλή. Η εξαιρετική θερμική επαφή μεταξύ του αερίου και της μήτρας του αναγεννητή διασφαλίζει ότι ικανοποιείται το κριτήριο του Rayleigh ακριβώς όπως και σε μία μηχανή Stirling, αλλά χωρίς κινούμενα μέρη. Ο αναγεννητής είναι συρμάτινων κόσκινων (wire screen) (Backhaus και Swift – 1999, 2000) [58, 59] η μηχανή παρήγαγε ακουστική ισχύ 710 W με βαθμό απόδοσης 30 %, ενώ με αναγεννητή παράλληλων πλακών(Backhaus και Swift – 2001) [61] η ισχύς που παράχθηκε ήταν 1750 W με τον ίδιο βαθμό απόδοσης (30 %). Η συσκευή αναλύεται στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος DeltaEC.

1.5.3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΕΧΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ

Κανένα από τα συστήματα που περιγράψαμε μέχρι τώρα δεν παρέχει υψηλή απόδοση, μεγάλη αξιοπιστία και χαμηλό κόστος κατασκευής. Για παράδειγμα, η παραδοσιακή μηχανή Stirling έχει υψηλή απόδοση, αλλά τα κινούμενα εξαρτήματά της (που απαιτούν στενά στεγανωτικά μεταξύ των εμβόλων και των κυλίνδρων που τα περιβάλλουν) περιορίζουν την αξιοπιστία και είναι υπεύθυνα για το υψηλό κόστος κατασκευής. Η θερμοακουστική υβριδική μηχανή Stirling (σχήμα 1-33) έχει υψηλή απόδοση και πολύ μεγάλη αξιοπιστία, αλλά η δακτυλιοειδής τοπολογία που απαιτείται είναι υπεύθυνη για το υψηλό κόστος κατασκευής για τους δύο παρακάτω λόγους. Αφ' ενός είναι δύσκολο να παράσχουμε την ευελιξία του δακτυλιοειδούς δοχείου πίεσης, για να διευκολυνθεί η θερμική εκτόνωση του θερμού εναλλάκτη θερμότητας και των γύρω θερμών εξαρτημάτων, αφ' ετέρου δε πρέπει να εφοδιάσουμε τη μηχανή με κάποια δομή ελέγχου, ώστε να ανακόπτεται η συνεχής ροή Gedeon γύρω από το δακτύλιο. Τέλος, οι θερμοακουστικές μηχανές στάσιμων κυμάτων με δέσμη είναι αξιόπιστες και φθηνές στην κατασκευή τους, αλλά η απόδοσή τους είναι μόλις τα $2/3$ της απόδοσης των

συστημάτων με αναγεννητή. Ελπίζοντας να συνδυάσουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά από τα συστήματα που περιγράψαμε παραπάνω, οι Backhaus και Swift (2002) [62] ξεκίνησαν να κατασκευάσουν ένα συνδυασμό τέτοιων μηχανών. Αυτός ο συνδυασμός αποτελείται από μία μηχανή στάσιμου κύματος συνδεδεμένη σε σειρά με δύο μηχανές τρέχοντος κύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-33. Και οι τρεις μηχανές έχουν ένα μέγιστο πίεσης στο στάσιμο κύμα, ενώ η δέσμη είναι τοποθετημένη σε μία θέση όπου ισχύει $z \sim 5 \cdot \rho \cdot a$ και οι αναγεννητές σε θέσεις όπου το z είναι μέγιστο. Οι δύο συνδεδεμένοι σε σειρά αναγεννητές παρέχουν μεγάλη ενίσχυση της μικρής ποσότητας ακουστικής ισχύος που παράγεται από τη μικρή μονάδα δέσμης. Μόνο το 20 % της ακουστικής ισχύος παράγεται στη δέσμη. Έτσι, η συγκριτικά χαμηλή απόδοση της δέσμης έχει μικρή επίδραση στο βαθμό απόδοσης ολόκληρου του συστήματος. Η γραμμική τοπολογία απλοποιεί τα προβλήματα θερμικής εκτόνωσης και εξαλείφει τη συνεχή ροή Gedeon.



Σχήμα 1-33. Μηχανή στάσιμου κύματος εν σειρά με δύο μηχανές τρέχοντος κύματος. Η μηχανή έχει μία δέσμη, δύο αναγεννητές τους απαραίτητους παρακείμενους εναλλάκτες θερμότητας και ανάμεσά τους τους θερμικούς ρυθμιστικούς αγωγούς, που παρέχουν υψηλή απόδοση σε μία απλή και αξιόπιστη κατασκευή. Το τμήμα του αντηχείου που παρουσιάζεται στο σχήμα έχει μήκος $\lambda/2$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ DeltaEC

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ DeltaEC

(Τα παρακάτω έχουν γραφτεί με βάση το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος [63], και την αποκτούμενη εμπειρία από τη χρήση του.)

Το DeltaEC (Design Environment for Low-Amplitude Thermo Acoustic Energy Conversion) (Σχεδιασμός περιβάλλοντος για χαμηλού πλάτους θερμοακουστικούς μετατροπείς ενέργειας) είναι ένα πρόγραμμα που μπορεί να υπολογίσει λεπτομέρειες για το πως συμπεριφέρεται κάποια θερμοακουστική μηχανή ή μπορεί να βοηθήσει το χρήστη να σχεδιάσει εξοπλισμό ώστε να πετύχει την απαιτούμενη απόδοση.

Το πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί από τα Los Alamos National Laboratories για λογαριασμό της υπηρεσίας διαχείρισης εθνικής ενέργειας και πυρηνικής ασφάλειας των Η.Π.Α. και είναι διαθέσιμο δωρεάν για τους υποψήφιους χρήστες από τη σελίδα τους στον παρακάτω σύνδεσμο:

<http://www.lanl.gov/thermoacoustics/DeltaEC.html>

Το DeltaEC ολοκληρώνει αριθμητικά σε μία χωρική διάσταση χρησιμοποιώντας μια χαμηλό πλάτους ακουστική προσέγγιση και ημιτονοειδή χρονική εξάρτηση. Ολοκληρώνει την εξίσωση “κύμα” και μερικές φορές άλλες εξισώσεις όπως η ενεργειακή εξίσωση, για ένα αέριο (ή ένα εξαιρετικά συμπιεστό, θερμοδυναμικά ενεργό υγρό), για μια δοθείσα από το χρήστη γεωμετρία. Η γεωμετρία δίνεται σαν μια αλληλουχία από τμήματα (segments) -όχι πάνω από 200- όπως αγωγούς (ducts), ενδόσεις (compliances), μετατροπείς (transducers), θερμοακουστικές στοίβες (stacks) και αναγεννητές (regenerators).

Το DeltaEC πάντα υποθέτει χρονική εξάρτηση του $e^{i\omega t}$ οπότε η συνάρτηση κύματος είναι επί της ουσίας η δευτέρας τάξης διαφορική εξίσωση του Helmholtz για το σύμπλεγμα εύρους πίεσης $p_I(x)$ η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν δύο πρώτης τάξης διαφορικές εξισώσεις για το $p_I(x)$ και του πλάτους ογκομετρικής παροχής $U_I(x)$. Η ολοκλήρωση αυτών των διαφορικών εξισώσεων γίνεται σε κάθε τμήμα ως προς την πίεση, την παροχή όγκου και άλλες μεταβλητές έως ότου οι τιμές τους να ταυτιστούν στους κόμβους μεταξύ των σημείων.

Στις στοίβες και στους αναγεννητές η λύση του ακουστικού προβλήματος για τις πιέσεις, τις ροές όγκου βρίσκεται συγχρόνως με τη λύση της εξίσωσης της ροής ενέργειας. Η ροή ενέργειας διαμέσου της στοίβας και του αναγεννητή ελέγχεται με θερμοκρασίες ή/και ροές θερμότητας στους γειτονικούς εναλλάκτες θερμότητας. Για τα δυαδικά μίγματα στους αγωγούς διαχωρισμού μίγματος, η λύση της εξίσωσης “κύμα” βρίσκεται ταυτόχρονα που στην εξίσωση περιγράφεται σαν “ροή mole των συστατικών του μίγματος”, που αν αντιστραφεί βρίσκεται το ελαφρύ γραμμομοριακό κλάσμα σαν συνάρτηση της θέσης. Επίσης, υποστηρίζεται η προσομοίωση ακουστικών συσκευών με σταθερή ροή.

Με την πολλαπλών παραμέτρων “μέθοδο στόχευσης” το DeltaEC για να προσομοιώσει μια ποικιλία από συνθήκες δυαδικών μιγμάτων, δίνει στο χρήστη μια σημαντική ελευθερία επιλογής για το ποιές μεταβλητές θα υπολογιστούν ως λύσεις. Για παράδειγμα σε ένα απλό ακουστικό αντηχείο το DeltaEC μπορεί να υπολογίσει την εμπέδηση εισόδου (input impedance) σα συνάρτηση της συχνότητας, ή τη συχνότητα αντήχησης για δεδομένη γεωμετρία και αέριο, ή το απαιτούμενο μήκος για την επιθυμητή συχνότητα αντήχησης κ.ο.κ.

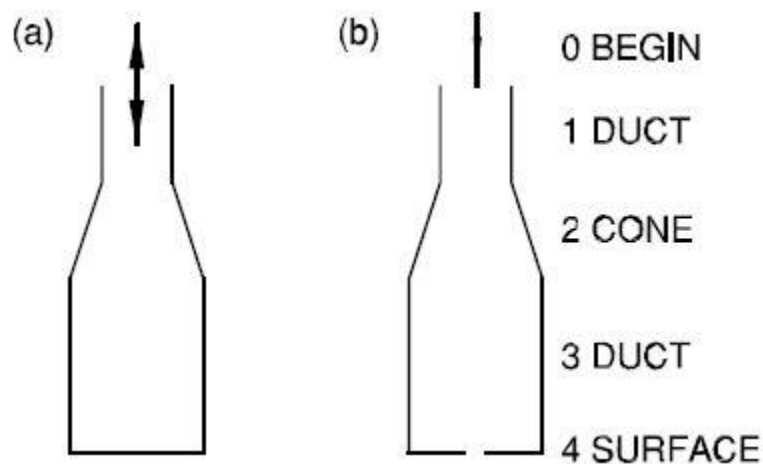
Τα δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα μπορούν να εισαχθούν στη διεπαφή χρήστη του DeltaEC ή και με τη χρήση οποιοδήποτε κειμενογράφου. Τα αποτελέσματα μπορούν να εξεταστούν από τη διεπαφή χρήστη του προγράμματος ή κάποια εφαρμογή κειμενογράφου του λειτουργικού συστήματος, να παρουσιαστούν σε διαγράμματα από το πρόγραμμα ή από οποιοδήποτε λογισμικό γραφικών. Ο υπολογιστικός πυρήνας του DeltaEC μεταγλωττίζεται από τη FORTRAN77 και η διεπαφή χρήστη

είναι κατασκευασμένη σε Python.

2.2 Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ DeltaEC

2.2.1 ΑΠΛΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ BOTTLE

Θα χρησιμοποιήσουμε το απλό παράδειγμα bottle για να κάνουμε μια μικρή εισαγωγή στη χρήση του προγράμματος DeltaEC. Φυσώντας στο στόμιο ενός μπουκαλιού παράγεται ένας ευχάριστος ηχητικός τόνος. Σ' αυτό το παράδειγμα θα υπολογίσουμε τη συχνότητα αυτού του τόνου για συγκεκριμένες διαστάσεις μπουκαλιού ενώ θα εξερευνήσουμε τη διεπαφή χρήστη, τρέχοντας την αριθμητική ολοκλήρωση.



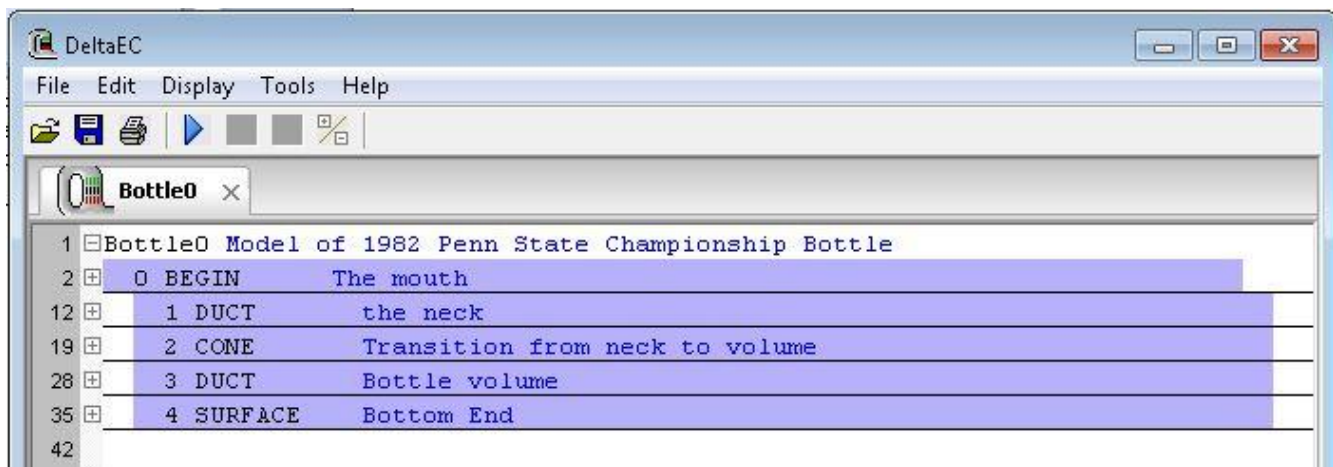
Σχήμα 2-1. Μπουκάλι (a)συμβατική αναπαράσταση (b) αναπαράσταση για το DeltaEC.

Για να μπορέσουμε να κάνουμε τα παραπάνω θα πρέπει να προσομοιώσουμε το μπουκάλι σύμφωνα με αυτά που μπορεί το DeltaEC να διαβάσει. Οπότε όπως φαίνεται στο σχήμα 2-1 το μπουκάλι μπορεί να παρασταθεί με τα παρακάτω τμήματα: στόμιο, λαιμός, μετάβαση τον κύριο όγκο του μπουκαλιού, κύριος όγκος μπουκαλιού, πυθμένας. Οπότε στο DeltaEC θα έχουμε BEGIN, DUCT, CONE, DUCT, SURFACE. Όπως επανειλημμένα τονίζει το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος για αποφυγή λαθών δεν θα δημιουργήσουμε ένα νέο αρχείο αλλά θα τροποποιήσουμε το ήδη υπάρχον <bottle0.out>.

Ανοίγουμε το αρχείο <bottle0.out>. Στο αρχείο αυτό έχει προσομοιωθεί ένα μπουκάλι με τις εξής διαστάσεις. Λαιμός: επιφάνεια διατομής: 0.0002141 m^2 , περίμετρος: 0.05187 m , μήκος 0.01778 m , μετάβαση τον κύριο όγκο του μπουκαλιού: άνω επιφάνεια διατομής: 0.0002141 m^2 , άνω περίμετρος: 0.05187 m , μήκος: 0.1003 m , κάτω επιφάνεια διατομής: 0.001868 m^2 , κάτω περίμετρος: 0.1532 m , κύριος όγκος μπουκαλιού: επιφάνεια διατομής: 0.001868 m^2 , περίμετρος: 0.1532 m , μήκος: 0.127 m .

Οι αρχικές συνθήκες του παραδείγματος στο στόμιο είναι μέση πίεση 1 bar , συχνότητα 300 Hz , αρχική θερμοκρασία 300 K , πίεση ταλαντώσεων (πλάτος 1 Pa , φάση 0), παροχή (πλάτος $0.0001 \text{ m}^3/\text{sec}$, φάση 0) μπορούμε να αλλάξουμε οποιαδήποτε και οσοδήποτε από αυτές τις διαστάσεις και αρχικές τιμές και να βάλουμε τις τιμές του μπουκαλιού που θέλουμε να εξετάσουμε.

Οπότε το μοντέλο έχει ως εξής:



2.2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ (SEGMENTS) ΠΟΥ ΑΝΑΓΝΩΡΙΖΕΙ ΤΟ DeltaEC

BEGIN απαιτείται αμέσως μετά το TITLE (τίτλος) πρόκειται για το μηδενικό τμήμα. Περιέχει καθολικές για το σύστημα μεταβλητές όπως μέση πίεση, είδος αερίου συχνότητα καθώς και αρχικές συνθήκες για μεταβλητές που μεταβάλλονται σχετικά με το x όπως p_1 , U_1 και μέση θερμοκρασία.

SURFACE μια περιοχή επιφάνειας με απώλειες πίεσης υστέρησης στο βάθος θερμικής διεύδυσης. συνήθως χρησιμοποιείται στο τέλος ή στην αρχή αγωγών.

DUCT ένας αγωγός με απώλειες στα τοιχώματά του αν η περίμετρος του είναι μη μηδενική. Η

ξεχωριστή είσοδος επιφάνειας και περιμέτρου περιλαμβάνει αγωγούς οποιουδήποτε σχήματος διατομής, στρωτής ή τυρβώδους ροής.

CONE ο κώνος χρησιμοποιείται για την μετάβαση μεταξύ αγωγών διαφορετικών μεγεθών.

Χρησιμοποιεί την εξίσωση απωλειών κόρνας του Webster, στρωτής ή τυρβώδους ροής.

HX ή **TX** εναλλάκτης θερμότητας παράλληλων πλακών ή κυλινδρικών σωλήνων. Χρησιμοποιείται για εισαγωγή ή απόρριψη θερμότητας στο μοντέλο.

STKLAB, **STKRECT**, **STKCIRC** και **STKPIN** στοίβα παράλληλων πλακών, τετραγωνικών ή ορθογωνίων πόρων, κυψελοειδών πόρων, κυκλικών πόρων. Χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθούν οι στοίβες των θερμοακουστικών μηχανών στάσιμου κύματος.

STKSCREEN, **STKPOWERLW** αναγεννητής συρμάτινων κόσκινων ή άλλου τύπου αναγεννητής χρησιμοποιείται για να μοντελοποιηθούν οι αναγεννητές των μηχανών Stirling και των μηχανών τρέχοντος κύματος.

COMPLIANCE ακουστική ένδοση πχ ένας όγκος γεμάτος με αέριο. Απώλειες υστέρησης πίεσης στην επιφάνεια.

IMPEDANCE αντίσταση συγκεντρωμένων παραμέτρων. Καθορισμός αντίστασης και αδρανειακής αντίδρασης.

IDUCER και **VDUCER** οδηγούμενοι από ρεύμα και οδηγούμενοι από τάση μετατροπείς (transducers) με παραμέτρους ανεξάρτητους από τη συχνότητα. Συνδεδεμένοι από τη μία μεριά των αγωγών ή άλλων τμημάτων.

ISPEAKER και **VSPEAKER** ηλεκτροδυναμικοί μετατροπείς οδηγούμενοι από ρεύμα και από τάση με παραμέτρους τη μάζα το γινόμενο δύναμης $B-l$ κλπ, ώστε ο συντελεστής αντίστασης να εξαρτάται από τη συχνότητα, συνδεδεμένοι από τη μία πλευρά μιας αλληλουχίας αγωγών ή άλλων τμημάτων.

IEDUCER και **VEDUCER**, **IESPEAKER** και **VESPEAKER** οι τέσσερις μετατροπείς που δεν έχουν "E" σαν δεύτερο γράμμα στο όνομά τους, συνδέονται με πλευρικής διακλάδωσης διατάξεις,

όπου η “πίσω μεριά” του μετατροπέα βρίσκεται εκτός του υπολογιστικού τόπου του DeltaEC.

Οι τέσσερις αντίστοιχες “E”nclosed (κλειστού χώρου) εκδόσεις των μετατροπέων, είναι αυτές που στην μία πλευρά του μετατροπέα βρίσκεται το προηγούμενο τμήμα και στην άλλη το επόμενο, ώστε η παροχή όγκου να παραμένει σταθερή κατά μήκος του τμήματος.

BRANCH και **TBRANCH** μία ανεξάρτητη της συχνότητας πλευρικής διακλάδωσης αντίσταση.

OPNBRANCH και **PISTBRANCH** μία εξαρτημένη από τη συχνότητα πλευρικής διακλάδωσης αντίσταση με χαρακτηριστικά συχνότητας της ακτινικής αντίστασης ανοίγματος 4π και 2π γωνίας στερεού, αντίστοιχα.

UNION χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποιο **BRANCH** για να δημιουργήσει βρόγχους στο μοντέλο.

HARDEND ένα λογιστικό τελικό σημείο που χρησιμοποιείται για να θέσει $U_l = 0$ στο τέλος του μοντέλου.

SOFTEND ένα λογιστικό τελικό σημείο που χρησιμοποιείται για να θέσει $p_l = 0$, χρησιμοποιείται για να ορίσει ένα κατοπτρικής εικόνας επίπεδο σε μία συμμετρική συσκευή με κόμβο πίεσης στο κέντρο συμμετρίας. Επίσης χρησιμοποιείται για βρόγχους και δίκτυα τμημάτων, για να σημαδέψει μια περιοχή που θα συνδεθεί σε άλλο σημείο του μοντέλου.

ANCHOR και **INSULATE** υποθέτει ότι τα μόνα τμήματα της μηχανής που μπορεί να εισέλθει και να εξέλθει ισχύς είναι οι εναλλάκτες, οι ηλεκτρακουστικοί μετατροπείς τα **BRANCH**, **TBRANCH**,

OPNBRANCH και **PISTBRANCH** τα **BEGIN**, **SOFTEND** και **HARDEND**

MINOR ελάχιστονες απώλειες (minor losses).

2.2.3 GUESSES-TARGETS

Εάν απλά τρέξουμε το πρόγραμμα, θα μας βγάλει μη μηδενική την παροχή όγκου U_l στον πυθμένα. (Στην πραγματικότητα σαν να είναι τρύπιος ο πυθμένας) αυτό σημαίνει πως οι αρχικές τιμές

της πίεσης και της ταχύτητας είναι ασύμβατες με ένα πραγματικό μπουκάλι που είναι σφραγισμένος ο πυθμένας του. Αυτό το πρόβλημα το DeltaEC το λύνει με τη μέθοδο στόχευσης που επιτρέπει οι οριακές συνθήκες στο τέλος του μοντέλου (ή οπουδήποτε αλλού στο μοντέλο) να “στοχεύονται” στις επιθυμητές τιμές.

Για να θέσουμε στο μοντέλο τους κατάλληλους στόχους (targets) χρειάζεται να εισάγουμε ένα επιπρόσθετο τμήμα στο τέλος του μοντέλου. (Για να εισάγουμε νέο τμήμα κάνουμε κλικ στο Insert που βρίσκεται στο μενού Edit, ή πληκτρολογούμε “i”, ή κάνουμε δεξί κλικ κάτω από το τελευταίο τμήμα και επιλέγουμε Append.). Εισάγουμε ένα HARDEND στο τέλος του μοντέλου μετά το SURFACE. Για να είναι η παροχή 0 στον πυθμένα θα πρέπει το μέτρο και η φάση της να είναι 0 . Άρα, θα θέσουμε 5a και 5b στο HARDEND σαν targets (κάνοντας κλικ στο Possible targets του HARDEND ή κάνοντας Add Targ στο παράθυρο guess–target).

Έχουμε τώρα δυο targets τα οποία θα κάνουν $U_I = 0$ στον πυθμένα του μοντέλου κάτι απαραίτητο για ένα κανονικό μπουκάλι. Πρέπει τώρα να διαλέξουμε 2 μεταβλητές τις οποίες το DeltaEC θα μπορέσει να προσαρμόσει ώστε να πετύχει αυτά τα targets. Οι μεταβλητές αυτές θέτονται ως guesses “εικασίες”. Το DeltaEC θα μεταβάλλει όποιες δυο μεταβλητές του επιτραπεί να χειριστεί ως guess ώστε να βρει τη λύση στο ακουστικό πρόβλημα για να γίνει μηδέν η παροχή όγκου στο HARDEND. Το τι θα επιλέξουμε ως guess εξαρτάται από τη συνθήκη που δοκιμάζουμε το μοντέλο. Αν έχουμε δηλαδή υπόψη ένα αντηχείο που οδηγείται από σταθερού πλάτους παροχή όγκου ή από σταθερού πλάτους πίεση κ.ο.κ

Κατ' αρχήν θα θεωρήσουμε -αυθαίρετα- σταθερή παροχή όγκου στο $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ και θα αφήσουμε το DeltaEC να ρυθμίσει το p_1 . Θα προσθέσουμε $0d$ (για το μέτρο της πίεσης) και $0e$ (για τη φάση της πίεσης) σαν guesses (κάνοντας διπλό κλικ ή δεξί κλικ στις μεταβλητές και επιλέγοντας guess, ή κάνοντας Add Guess στο παράθυρο guess–target). Έχοντας ισάριθμα guesses και targets, μπορώ να τρέξω το DeltaEC. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται από τη διεπαφή χρήστη ως εξής:

```

bottle modified* x
1 bottle modified Model of 1982 Penn State Championship Bottle
2 0 BEGIN The mouth
3 1.0000E+05 a Mean P Pa
4 300.00 b Freq Hz
5 300.00 c TBeg K
6 Gues 31.870 d |p| Pa
7 Gues 7288.6 e Ph(p) deg
8 1.0000E-04 f |U| m^3/s
9 0.0000 g Ph(U) deg
10 Optional Parameters
11 air Gas type
12 1 DUCT the neck
13 2.1410E-04 a Area m^2 13.283 A |p| Pa
14 5.1870E-02 b Perim m 87.993 B Ph(p) deg
15 1.7780E-02 c Length m 1.0117E-04 C |U| m^3/s
16 Master-Slave Links -2.2943E-02 D Ph(U) deg
17 Optional Parameters 3.8320E-05 E Htot W
18 ideal Solid type 2.3264E-05 F Edot W
19 2 CONE Transition from neck to volume
20 2.1410E-04 a AreaI m^2 21.556 A |p| Pa
21 5.1870E-02 b PerimI m -89.834 B Ph(p) deg
22 0.1003 c Length m 8.2669E-05 C |U| m^3/s
23 1.8680E-03 d AreaF m^2 -9.0517E-02 D Ph(U) deg
24 0.1532 e PerimF m 3.8320E-05 E Htot W
25 Master-Slave Links 3.9917E-06 F Edot W
26 Optional Parameters
27 ideal Solid type
28 3 DUCT Bottle volume
29 1.8680E-03 a Area m^2 27.999 A |p| Pa
30 0.1532 b Perim m -89.971 B Ph(p) deg
31 0.1270 c Length m 2.1757E-08 C |U| m^3/s
32 Master-Slave Links -89.971 D Ph(U) deg
33 Optional Parameters 3.8320E-05 E Htot W
34 ideal Solid type 3.0458E-07 F Edot W
35 4 SURFACE Bottom End
36 1.8680E-03 a Area m^2 27.999 A |p| Pa
37 -89.971 B Ph(p) deg
38 3.9396E-16 C |U| m^3/s
39 -35.82 D Ph(U) deg
40 3.8320E-05 E Htot W
41 ideal Solid type 3.2299E-15 F Edot W
42 5 HARDEND Change Me
43 Targ 0.0000 a R(1/z) 27.999 A |p| Pa
44 Targ 0.0000 b I(1/z) -89.971 B Ph(p) deg
45 3.9396E-16 C |U| m^3/s
46 -35.82 D Ph(U) deg
47 Possible targets 3.8320E-05 E Htot W
48 3.2299E-15 F Edot W
49 1.7786E-12 G R(1/z)
50 2.4618E-12 H I(1/z)
51

Inc# 1; Tries=27; Err= 1.5185E-08
Solution time: 0.06 seconds -- Done

Result: Success

```

Για να βεβαιωθούμε ότι το DeltaEC έτρεξε σωστά πρέπει να εμφανίζεται στο Run Monitor κάτω ακριβώς από την κύρια οθόνη με πράσινο χρώμα η λέξη “Success” (επιτυχία) που σημαίνει ότι το DeltaEC έτρεξε με επιτυχία. Στην ίδια οθόνη εμφανίζεται ότι το πρόγραμμα χρειάστηκε 0.06

seconds για να λύσει το πρόβλημα καθώς και ότι ολοκλήρωσε 27 φορές κατά μήκος του x ενώ ρύθμιζε τα *guesses* πλησιάζοντας όλο και περισσότερο τα *targets* μέχρι να φτάσει αρκετά κοντά, κάνοντας συνολικό σφάλμα $1.5185 \cdot 10^{-08}$.

Η διεπαφή χρήστη παρουσιάζει τα αποτελέσματα με πράσινο χρώμα (πριν τρέξουμε το πρόγραμμα εμφανίζονταν μηδενικά (ή μη) κόκκινα πλαγιαστά γράμματα) υποδηλώνοντας ότι πλέον τα αποτελέσματα ταιριάζουν με τα νούμερα εισόδου (με μπλε γράμματα).

Το DeltaEC παρουσιάζει αποτελέσματα για τη μέση πίεση (μέτρο και φάση), τη μέση παροχή όγκου (μέτρο και φάση), την ακουστική ισχύ $\dot{E} = \frac{1}{2} Re[p_1 \tilde{U}_1]$, και τη συνολική ισχύ για καθένα από τα τμήματα του μοντέλου.

Το DeltaEC έδωσε επίσης τιμές στις μεταβλητές που έχουμε ορίσει ως *guesses*. Η τιμή στη μεταβλητή θ_e , 7288.6 φαίνεται λίγο παράξενη μέχρι να αντιληφθούμε ότι το DeltaEC δεν καταλαβαίνει ότι όταν ολοκληρώνει μπορεί να αφαιρεί πολλαπλάσια το 360° . Αν τώρα αφαιρέσουμε 7200° από την τιμή της θ_e και ξανατρέξουμε το πρόγραμμα, τα αποτελέσματα θα είναι τα ακόλουθα:

1	bottle modified Model of 1982 Penn State Championship Bottle						
2	0 BEGIN The mouth						
3	1.0000E+05	a	Mean P	Pa			
4	300.00	b	Freq	Hz			
5	300.00	c	TBeg	K			
6	Gues 31.870	d	p	Pa			
7	Gues 88.622	e	Ph(p)	deg			
8	1.0000E-04	f	U	m ³ /s			
9	0.0000	g	Ph(U)	deg			
10	Optional Parameters						
11	air	Gas type					
12	1 DUCT the neck						
13	2.1410E-04	a	Area	m ²	13.283	A p Pa	
14	5.1870E-02	b	Perim	m	87.993	B Ph(p) deg	
15	1.7780E-02	c	Length	m	1.0117E-04	C U m ³ /s	
16	Master-Slave Links				-2.2943E-02	D Ph(U) deg	
17	Optional Parameters				3.8320E-05	E Htot W	
18	ideal	Solid type				2.3264E-05	F Edot W
19	2 CONE Transition from neck to volume						
20	2.1410E-04	a	AreaI	m ²	21.556	A p Pa	
21	5.1870E-02	b	PerimI	m	-89.834	B Ph(p) deg	
22	0.1003	c	Length	m	8.2669E-05	C U m ³ /s	
23	1.8680E-03	d	AreaF	m ²	-9.0517E-02	D Ph(U) deg	
24	0.1532	e	PerimF	m	3.8320E-05	E Htot W	
25	Master-Slave Links				3.9917E-06	F Edot W	
26	Optional Parameters						
27	ideal	Solid type					
28	3 DUCT Bottle volume						
29	1.8680E-03	a	Area	m ²	27.999	A p Pa	
30	0.1532	b	Perim	m	-89.971	B Ph(p) deg	
31	0.1270	c	Length	m	2.1757E-08	C U m ³ /s	
32	Master-Slave Links				-89.971	D Ph(U) deg	
33	Optional Parameters				3.8320E-05	E Htot W	
34	ideal	Solid type				3.0458E-07	F Edot W
35	4 SURFACE Bottom End						
36	1.8680E-03	a	Area	m ²	27.999	A p Pa	
37					-89.971	B Ph(p) deg	
38					6.8827E-18	C U m ³ /s	
39					92.140	D Ph(U) deg	
40					3.8320E-05	E Htot W	
41	ideal	Solid type				-9.6287E-17	F Edot W
42	5 HARDEND Change Me						
43	Targ 0.0000	a	R(1/z)		27.999	A p Pa	
44	Targ 0.0000	b	I(1/z)		-89.971	B Ph(p) deg	
45					6.8827E-18	C U m ³ /s	
46					92.140	D Ph(U) deg	
47	Possible targets				3.8320E-05	E Htot W	
48					-9.6287E-17	F Edot W	
49					-5.3023E-14	G R(1/z)	
50					-1.9546E-15	H I(1/z)	

2.2.4 ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Ας δούμε τώρα πως βρίσκουμε τη συχνότητα αντήχησης, δηλαδή την απάντηση στο αρχικό μας

ερώτημα. Πρώτα να σκεφτούμε ότι σύμφωνα με τη φυσική δεν μπορούμε να έχουμε την p_1 και $U_{1\sigma}$ διαφορά φάσης. Άρα θα κάνουμε τις απαραίτητες αλλαγές στο μοντέλο μας. Θα αλλάξουμε την τιμή του θ σε θ και θα το αφαιρέσουμε από τη λίστα των guess έτσι το DeltaEC δε θα μπορεί να μεταβάλει την τιμή του. Μετά θα προσθέσουμε το θ_b , τη συχνότητα, στη λίστα των guess. Θα εκτελέσουμε ξανά το πρόγραμμα βρίσκοντας τη συχνότητα αντήχησης ίση με 194.99 Hz ενώ η αντίστοιχη πίεση είναι 0.66394 Pa . Οπότε το παράθυρο guess-target θα είναι ως εξής:

Guesses:				Targets:				Results	
desc	addr	value	unit	desc	addr	value	addr	value	unit
BEGIN:Freq	0b	194.99	Hz	HARDE:R(1/z)	5a	0.0000	5G	8.1473E-16	
BEGIN: p	0d	0.66394	Pa	HARDE:I(1/z)	5b	0.0000	5H	6.0870E-14	

Γνωρίζουμε, όμως, ότι το αντηχείο έχει παραπάνω από μία συχνότητα συντονισμού. Για να βρούμε άλλη μία, τροποποιούμε το θ_b να είναι 600 Hz και τρέχουμε ξανά το πρόγραμμα. Με αυτή την αρχική τιμή της μεταβλητής guess, το DeltaEC συγκλίνει σε μια δεύτερη συχνότητα στα 1029.7 Hz .

Το DeltaEC μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε φυσικά κατάλληλη μεταβλητή εισόδου σαν μεταβλητή guess. Μπορούμε να υπολογίσουμε για ποιά θερμοκρασία έχουμε για δεδομένη συχνότητα αντήχησης χρησιμοποιώντας θ_c αντί για θ_b σαν guess ή χρησιμοποιώντας $1c$ σαν guess μπορούμε να υπολογίσουμε το απαιτούμενο μήκος του λαιμού για δεδομένη συχνότητα αντήχησης και θερμοκρασία.

Το DeltaEC έχει μια βιβλιοθήκη αερίων που περιέχει τρία δυαδικά μίγματα αερίων: He-Xe, He-Ar και Ne-Xe. Το γραμμομοριακό κλάσμα ορίζεται με τη μορφή μεταβλητής στο τμήμα BEGIN. Για παράδειγμα He-Ar που περιέχει 88.9% ήλιο και 11.1% αργό. Το γραμμομοριακό κλάσμα το ηλίου μπορεί να τεθεί ως μεταβλητή guess θ_j προσθέτοντας σαν guess.

2.3 PLOTTING

Το DeltaEC έχει ενσωματωμένο σχεδιογράφο (plotter) ο οποίος προβάλλει τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα σε γραφήματα. Ο plotter του DeltaEC μπορεί να παρουσιάσει δύο ειδών γραφήματα: γραφήματα κατάστασης (state plots) και γραφήματα προσαυξανόμενων στοιχείων (incremental plots).

Στα *γραφήματα κατάστασης*, η κατάσταση του κύματος και άλλων θερμοακουστικών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, η ροή ενέργειας κλπ παρουσιάζονται συναρτήσει του x για κάθε εκτέλεση του προγράμματος έχει συγκλίνει κανονικά. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο με επέκταση <.sp>.

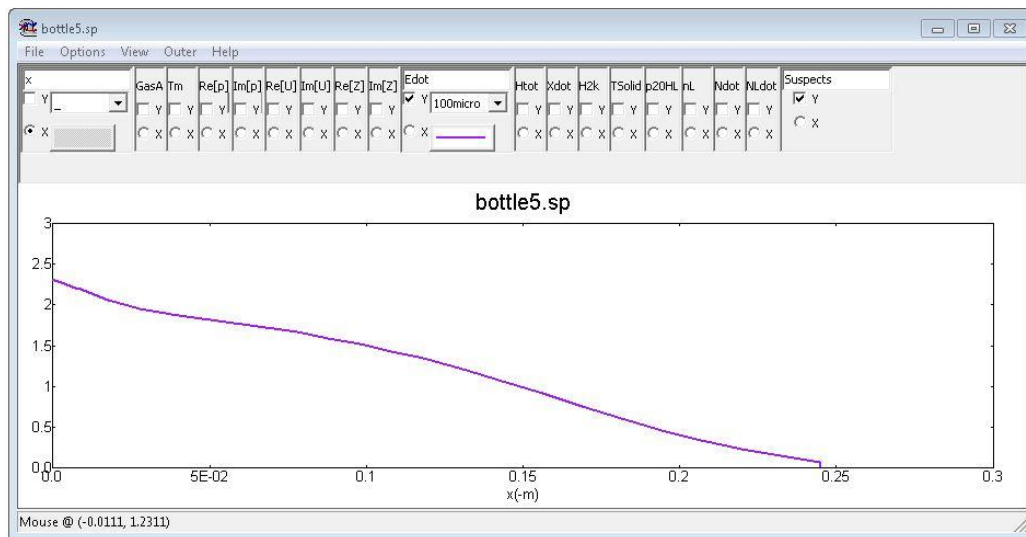
Στα *γραφήματα προσαυξανόμενων στοιχείων* παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ κάποιων μεταβλητών του μοντέλου για μία σειρά από εκτελέσεις του προγράμματος που έχουν συγκλίνει χρησιμοποιώντας μία ή δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που προσ αυξάνονται βηματικά μεταξύ των εκτελέσεων αυτών. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο με επέκταση <.ip>.

Ο σχεδιογράφος του DeltaEC έχει πολλές δυνατότητες μορφοποίησης. Οι καμπύλες μπορούν να προσδιοριστούν με διαφορετικά χρώματα, πάχη γραμμής ή τύπο γραμμής. Οι προεπιλεγμένες ετικέτες στους άξονες μπορούν να αντικατασταθούν και οι μονάδες των αξόνων μπορούν να αλλάξουν ανά πολλαπλάσια του 10. Η προβολή μπορεί να αλλάξει με zoom και μπορούν να χρησιμοποιηθούν λογαριθμικές κλίμακες. Οι καμπύλες μπορούν να εξεταστούν πολύ προσεκτικά μετακινώντας τον δρομέα του ποντικιού πάνω τους και διαβάζοντας τις οριζόντιες και κάθετες συντεταγμένες. Ο αριθμός των τμημάτων μπορεί να φανεί στα διαγράμματα δείχνοντας ταυτόχρονα που τελειώνει το κάθε τμήμα. Τα γραφικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σαν αρχεία <.jpg>, <.bmp> κλπ.

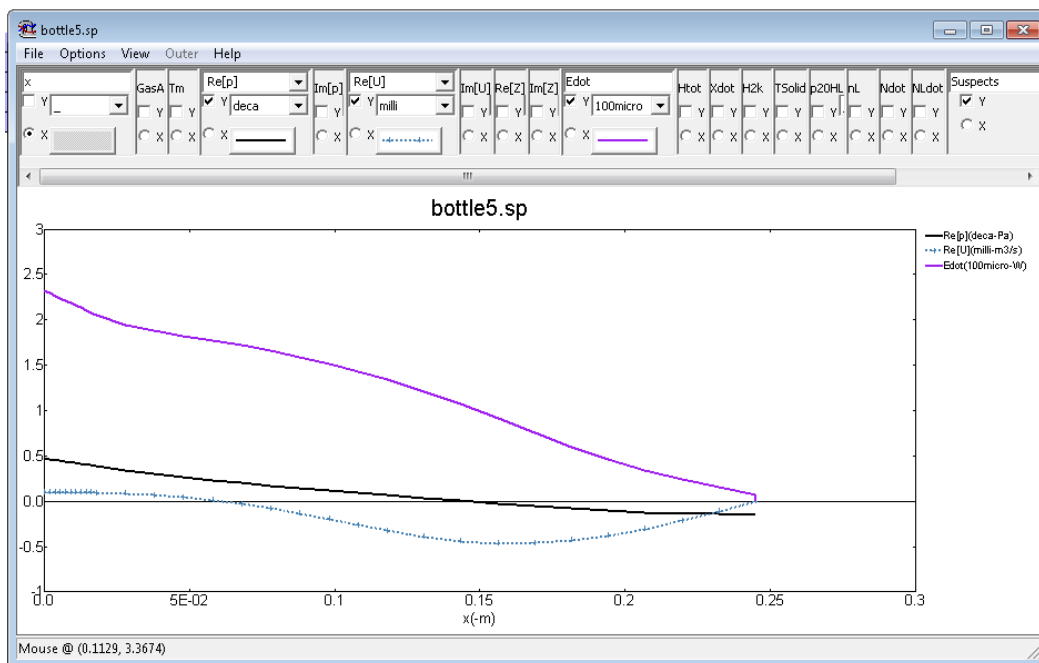
2.3.1 ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τα γραφήματα κατάστασης δείχνουν την παρούσα κατάσταση του μοντέλου. Το DeltaEC φτιάχνει αυτόματα ένα αρχείο <.sp> μετά από κάθε επιτυχημένη εκτέλεση. Αν ο χρήστης αλλάξει μία παράμετρο και ξανατρέξει το πρόγραμμα το DeltaEC αμέσως ενημερώνει το γράφημα ώστε να

συμβαδίζει με τη νέα αριθμητική κατάσταση του μοντέλου. Το DeltaEC υποδιαιρεί τα προς ολοκλήρωση τμήματα (όπως DUCT και STK) σε N_{int} τμήματα γράφοντας $N_{int} + 1$ γραμμές αριθμών στο αρχείο $\langle .sp \rangle$ για κάθε τμήμα. Ο σχεδιογράφος παρέχει δυνατότητα επιλογής ποιών και πόσων μεταβλητών θα παρουσιαστούν στο κάθε διάγραμμα καθώς και το χρώμα και το στυλ κάθε γραμμής όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2-2. Διάγραμμα ακουστικής ισχύος



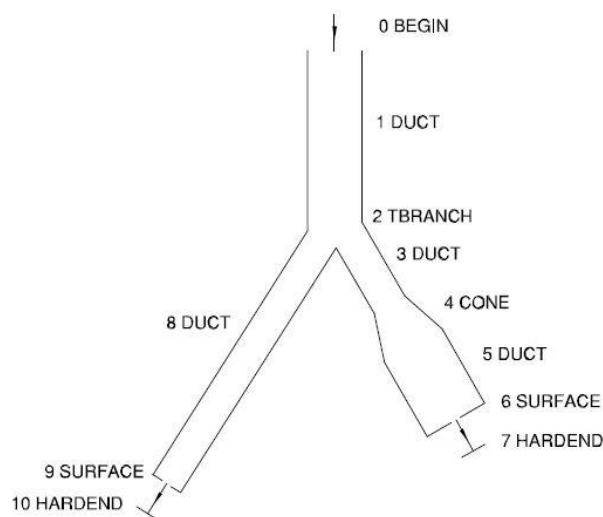
Σχήμα 2-3. Κοινή παρουσία σε διάγραμμα πλάτους παροχής, πλάτους πίεσης και ακουστικής ισχύος.

2.3.1.1 CLONING

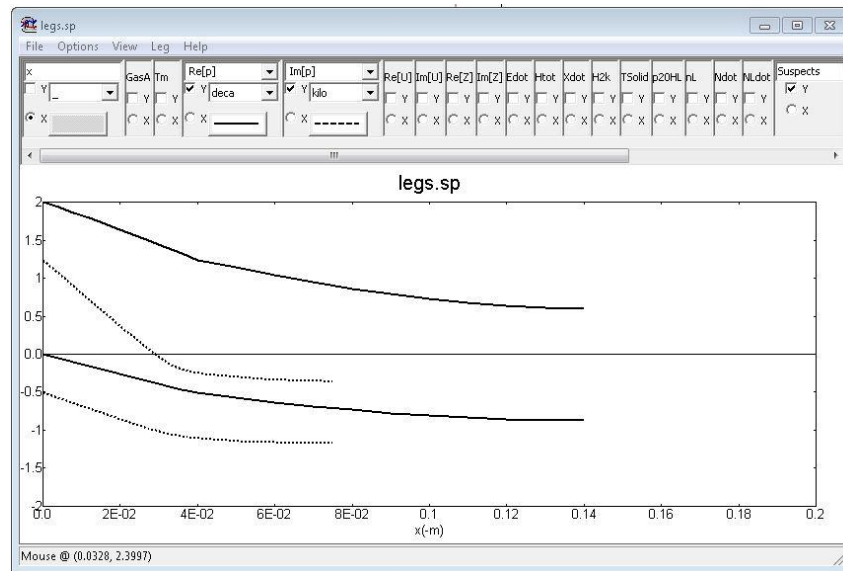
Εάν θέλουμε να φτιάξουμε πάνω από ένα διάγραμμα ταυτόχρονα αρκεί να πατήσουμε την εντολή «cloneplot» κ έτσι θα έχουμε όσα διαγράμματα χρειαζόμαστε. Μετά από κάθε επιτυχημένη εκτέλεση το DeltaEC θα ενημερώσει όλα τα γραφήματα ταυτόχρονα ώστε να συμβαδίζουν με τη νέα αριθμητική κατάσταση του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας clone plots ο χρήστης μπορεί να δείξει μια μεταβλητή ανά γράφημα.

2.3.1.2 LEGS.

Τα διακλαδούμενα μοντέλα που έχουν ένα ή παραπάνω TBRANCH ή/και δύο ή παραπάνω BEGIN είναι πολύπλοκα να παρουσιαστούν τοπολογικά. Το DeltaEC σπάει το αρχείο <.sp> σε πόδια (legs). Κάθε πόδι ξεκινάει από το σημείο $x=0$ και έτσι παρουσιάζονται γραφικά τα δεδομένα. Για παράδειγμα το σχήμα 2-4 δείχνει ένα διακλαδωμένο αντηχείο <legs.out> και το σχήμα 2-5 δείχνει το μέρος του στάσιμου κύματος της πίεσης σε αυτό το αντηχείο. Τα δεδομένα του κορμού είναι στη μία καμπύλη ενώ της παράπλευρης διακλάδωσης στην άλλη.



Σχήμα 2-4. Διακλαδωμένο αντηχείο



Σχήμα 2-5. Παρουσίαση στάσιμου κύματος πίεσης (πραγματικό και φανταστικό μέρος) σε διακλαδωμένο αντηχείο.

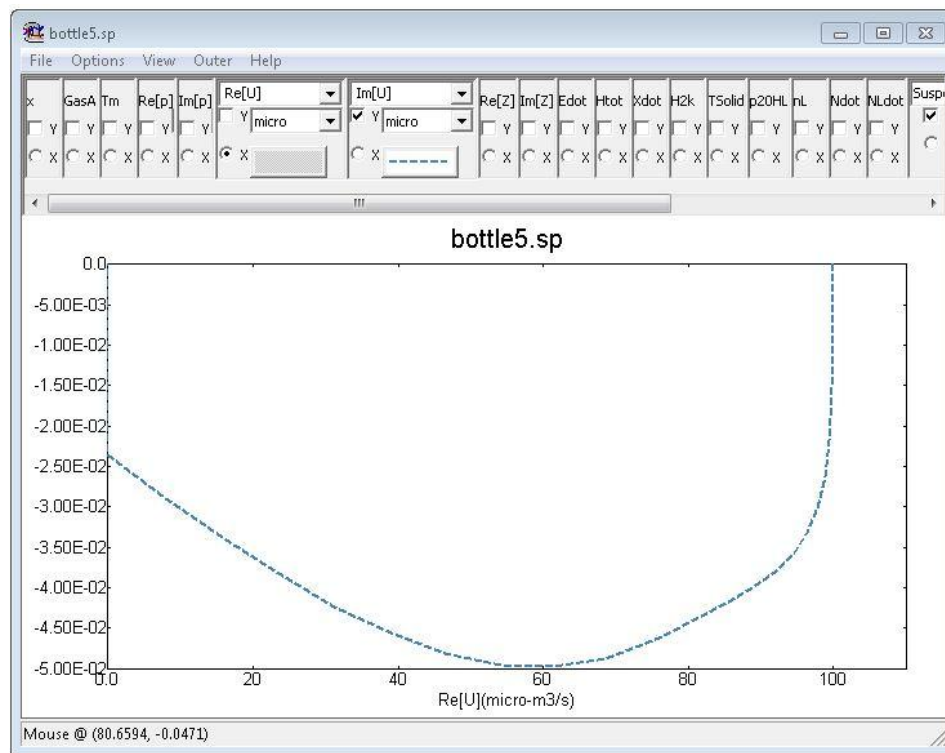
Χρησιμοποιώντας `clone plots` και `Legs` ο χρήστης μπορεί να δείξει μια μεταβλητή ανά γράφημα ή ένα πόδι ανά γράφημα με όλες τις μεταβλητές ενδιαφέροντος να εμφανίζονται σε αυτό.

2.3.1.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΗΣ

Οι μιγαδικές μεταβλητές p_1 και U_1 έχουν συνήθως το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τα θερμοακουστικά συστήματα. Το DeltaEC προσφέρει αρκετούς τρόπους παρουσίασης αυτών γραφικά. Τα διαγράμματα κατάστασης έχουν σαν προεπιλογή τα $Re[p_1]$, $Im[p_1]$ και πολύ εύκολα επιλέγοντας τα αντίστοιχα κουτάκια μπορούμε να δείξουμε $Re[U_1]$, $Im[U_1]$. Η αναλογία του πραγματικού και του φανταστικού μέρους $Z = \frac{p_1}{U_1}$ εμφανίζεται εξίσου εύκολα. Όλα τα παραπάνω μπορούν να εμφανιστούν ανά μέγεθος ή ανά φάση.

Στις μηχανές στάσιμου κύματος είναι πιο χρήσιμα τα διαγράμματα που δείχνουν p_1 και U_1 σαν συνάρτηση του x . Ωστόσο, στις μηχανές τρέχοντος κύματος, τα διαγράμματα φάσης συχνά

προσφέρουν ζωτικής σημασίας εικόνα οπότε περιλαμβάνονται και αυτά στο σχεδιογράφο του DeltaEC. Για να φτιάξουμε διαγράμματα φάσης επιλέγουμε $Re[p_1]$ ή $Re[U_1]$ αντί για x στον άξονα των x και $Im[p_1]$ ή $Im[U_1]$ στον άξονα των y . Τα διαγράμματα φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για μιγαδικές μεταβλητές, p_1 και U_1 . Στα διαγράμματα φάσης οι μιγαδικές μεταβλητές αναπαρίστανται στο μιγαδικό επίπεδο με το πραγματικό μέρος στον οριζόντιο άξονα και το φανταστικό στον κάθετο. Κάποιος μπορεί να φανταστεί ότι οι φασιδείκτες ενός διαγράμματος φάσης περιστρέφονται με αντιωρολογιακή φορά γύρω από το αρχικό σημείο με συχνότητα κύματος. Έτσι οι πραγματικές μεταβλητές που αναπαρίστανται από τους φασιδείκτες είναι οι χρονικά εξαρτώμενες προβολές των φασιδεικτών στον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 2-6. Διάγραμμα φάσης παροχής

2.3.2 ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΑΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

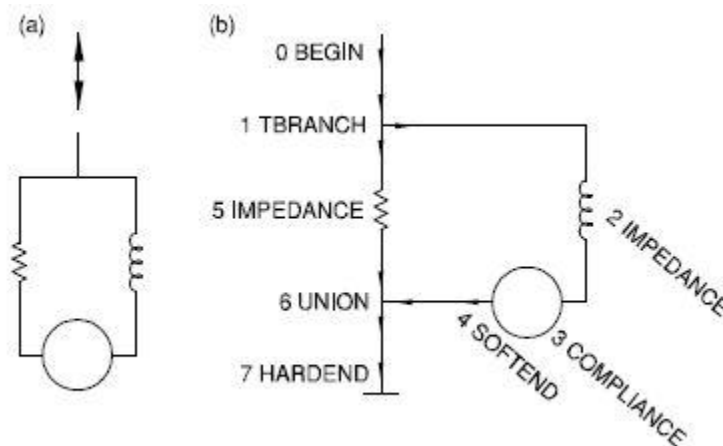
Το DeltaEC επιτρέπει γραφήματα προσανξανόμενων στοιχείων με αυτόματη αύξηση (ή μείωση)

μιας ή δυο ανεξαρτήτων μεταβλητών και επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις του προγράμματος.

Αυτή η δυνατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για να μείνει σε σύγκλιση το DeltaEC ενώ αλλάζει μία ανεξάρτητη μεταβλητή μέσω πολύ μικρών “ασφαλών” βημάτων -μία απότομη αλλαγή στην τιμή της μεταβλητής θα αποτύγχανε να συγκλίνει, είτε για να συνοψίσουμε τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής που αλλάζει, μαζί με μια ή περισσότερες εξαρτημένες μεταβλητές σε ένα αρχείο με επέκταση <.ip>. Ο χρήστης μπορεί να χαράξει το διάγραμμα από το αρχείο <.ip> είτε με το σχεδιογράφο του προγράμματος είτε με οποιοδήποτε άλλο πρόγραμμα γραφικών.

2.3.2.1 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΑΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα μια κατασκευή που περιέχει βρόγχο. Μια τέτοια είναι ένα οδηγούμενο δίκτυο, παραλλήλου LRC που θα βρούμε στα έτοιμα παραδείγματα με τίτλο <Irc1b.out>. η συσκευή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



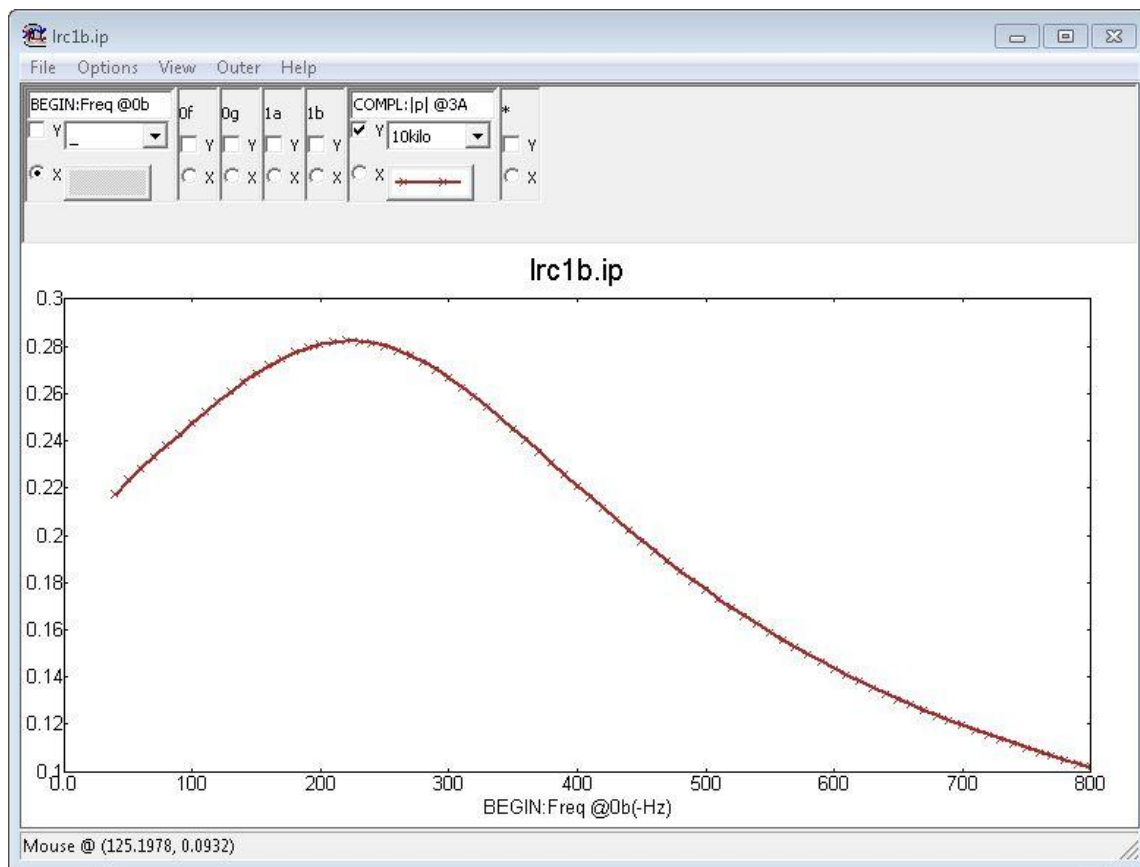
Σχήμα 2-7. Σχηματική απεικόνιση LRC

Με τη χρήση των διαγραμμάτων προσαυξανόμενων στοιχείων θα δούμε την εξάρτηση του πλάτους της πίεσης από τη συχνότητα. Στο τμήμα BEGIN κάνουμε διπλό κλικ στη συχνότητα και τσεκάρουμε το κουτάκι incplot. Ορίζουμε εκκίνηση από τα 40 Hz, στα 800 Hz, σε 77 βήματα των 10 Hz. Στο

τιμήμα COMPLIANCE θα κάνουμε επίσης διπλό κλικ στην πίεση A και θα τσεκάρουμε το κουτάκι plot (dependent). Αφού τρέξουμε το πρόγραμμα το παράθυρο incremental plot θα είναι ως εξής:

Independent:						Dependent:			
Outer:			Inner:			addr	desc	value	unit
addr	desc	unit	addr	desc	unit	addr	desc	value	unit
0b	Freq	Hz				0f	U	0.036557030	m ³ /s
Start: 40.0						0g	Ph(U)	-23.8805298	deg
End: 800.0						1a	Re(Zb)	27877.57543	Pa-s/m ³
Step: 10.0						1b	Im(Zb)	72173.39198	Pa-s/m ³
Points: 77						3A	p	1018.190203	Pa

Αφού ανοίξουμε το σχεδιογράφο του DeltaEC (με την εντολή plot ip file) θα εμφανιστεί το παρακάτω διάγραμμα.

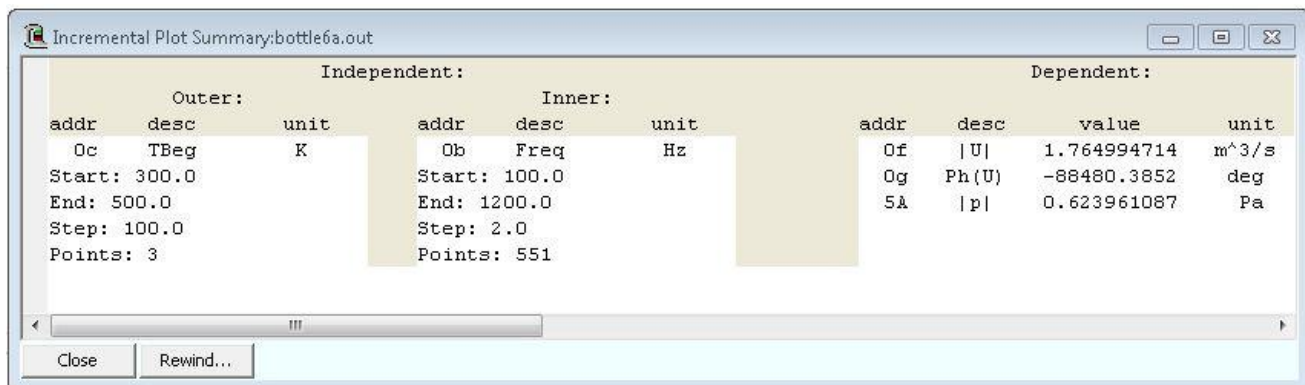


Σχήμα 2-8. Η πίεση (πλάτος) στο τμήμα COMPLIANCE για τις διάφορες συχνότητες ταλάντωσης

2.3.2.1 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΑΥΞΑΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

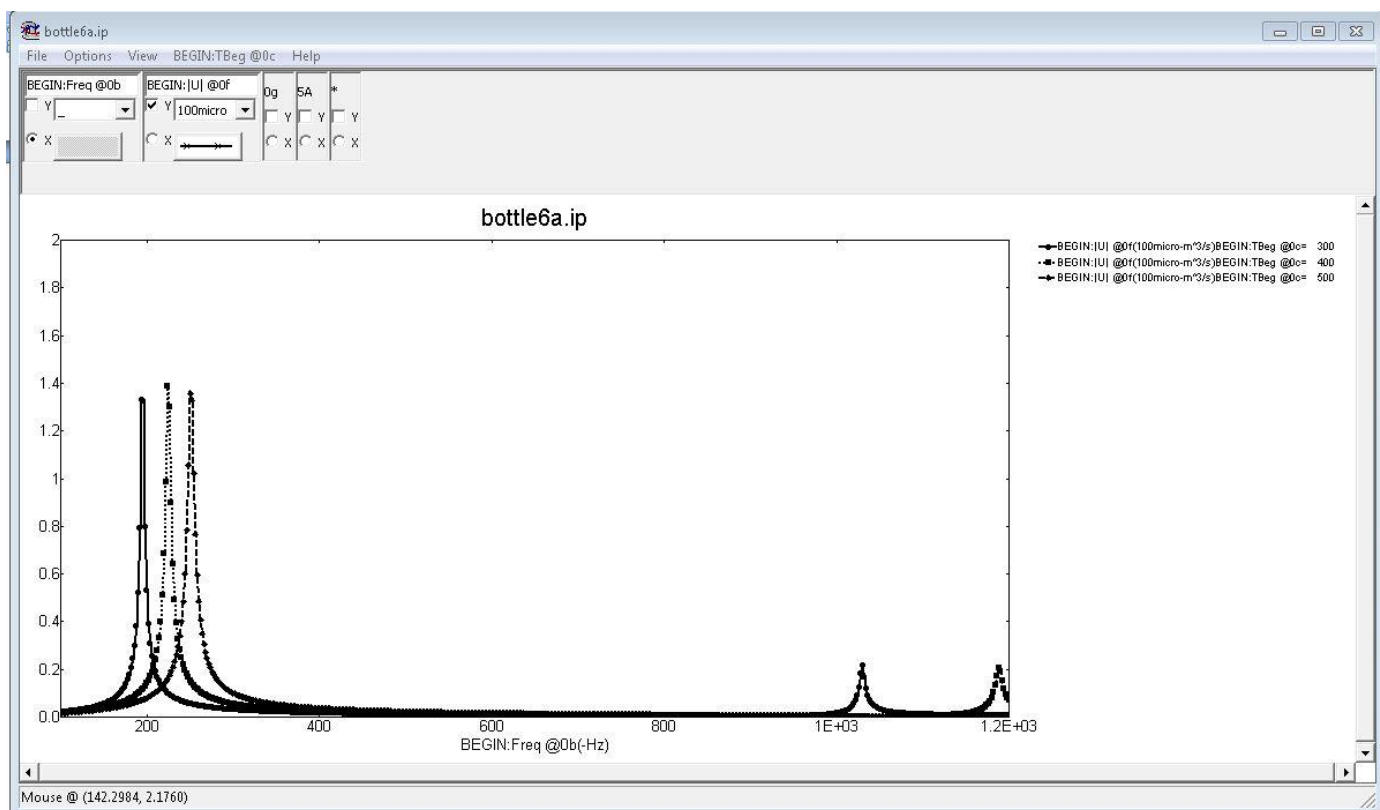
Εάν θέλουμε να έχουμε δύο ανεξάρτητες μεταβλητές θα πρέπει να εργαστούμε όπως στο παρακάτω παράδειγμα.

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα *bottle* που είδαμε πριν κάνοντας κλικ στο Plot box της παραμέτρου Edit για να ρυθμίσουμε τις τιμές. Θέτουμε στο outer loop την T_m να ξεκινάει από τους $300K$ ως τους $500K$ με 100 βήματα δηλαδή το γράφημα θα γίνει για τρεις θερμοκρασίες $300K, 400K$ και $500K$ και στο inner loop την f από τα $100 Hz$ στα $1200 Hz$ σε 551 βήματα των $2 Hz$. Προσθέτουμε επίσης την πίεση στον πυθμένα του μπουκαλιού $5A$ σαν εξαρτημένη μεταβλητή. Μετά την εκτέλεση του προγράμματος το παράθυρο incremental plot θα είναι ως εξής:



Outer:			Inner:			Dependent:			
addr	desc	unit	addr	desc	unit	addr	desc	value	unit
Oc	TBeg	K	Ob	Freq	Hz	Of	U	1.764994714	m ³ /s
Start: 300.0			Start: 100.0			Og	Ph(U)	-88480.3852	deg
End: 500.0			End: 1200.0			5A	p	0.623961087	Pa
Step: 100.0			Step: 2.0						
Points: 3			Points: 551						

Αφού ανοίξουμε το σχεδιογράφο του DeltaEC θα εμφανιστεί το παρακάτω διάγραμμα:

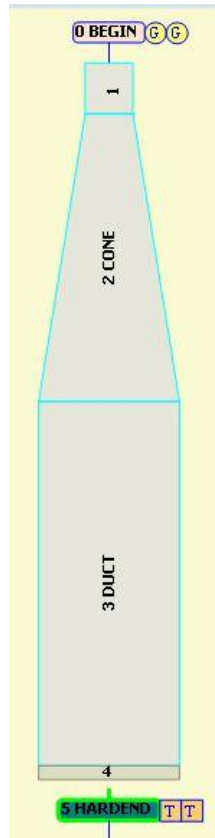


Σχήμα 2-9. Η πίεση στον πυθμένα του μπουκαλιού συναρτήσεται της συχνότητας για τις τρεις τιμές της θερμοκρασίας (300K, 400K, 500K).

2.4 ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

2.4.1 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ

Είναι δυνατόν να δούμε τη γεωμετρία ενός μοντέλου απλά κάνοντας κλικ στο “view schematic”



Σχήμα 2-10. Σχηματική αναπαράσταση Bottle

Η σχηματική αναπαράσταση είναι σε κλίμακα: στον άξονα του x οι διαστάσεις είναι ανάλογες του μήκους, ενώ στον κάθετο άξονα οι διαστάσεις είναι ανάλογες του πλάτους. Κρατώντας πατημένο shift και χρησιμοποιώντας τα βελάκια κάνουμε μεγέθυνση (με το πάνω) και σμίκρυνση (με το κάτω). Με το `</>` μπορούμε να έχουμε οριζόντια ή κάθετη προβολή.

2.4.2 ΑΕΡΙΑ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΑ

Το DeltaEC αναγνωρίζει πολλά αέρια και στερεά και είναι προγραμματισμένο να υπολογίζει τις ιδιότητές τους όπως πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και ιξώδες. Τα αέρια ορίζονται στο τμήμα

BEGIN και τα στερεά σε κάθε πραγματικό φυσικό τμήμα. Το DeltaEC συμπεριλαμβάνει τα παρακάτω αέρια: ξηρό αέρα, υγρό αέρα, ομίχλη, ήλιο, νέον, μίγματα He-Xe, He-Ar, Ne-Xe, υδρογόνο, δευτέριο, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, προϊόντα καύσης φυσικού αερίου, υγρό νάτριο, ευτηκτικό μίγμα υγρού νατρίου-ποτασίου. Για τα αέρια χρησιμοποιείται η καταστατική εξίσωση των αερίων (για ιδανικά αέρια). Τα υγρά έχουν τις δικές τους καταστατικές εξισώσεις. Επίσης τα παρακάτω στερεά: κάπτον, μυλάρ, ανοξείδωτο ατσάλι, μολυβδαίνιο, βολφράμιο, χαλκό, νικέλιο, και ιδανικό στερεό. Το ιδανικό στερεό έχει πάρα πολύ υψηλή θερμική χωρητικότητα, πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα.

Επιπλέον, το DeltaEC επιτρέπει στους χρήστες να καθορίσει εξωτερικά, ορισμένα από το χρήστη αέρια και στερεά τα οποία δεν προϋπάρχουν στη βιβλιοθήκη του. Οι ιδιότητες τους καθορίζονται σύμφωνα με τα T_m και p_m από τους συντελεστές που έχει γράψει ο χρήστης σε ένα αρχείο κειμένου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα μέχρι πέντε τέτοια στερεά και πέντε τέτοια αέρια.

2.4.3 Η ΙΔΙΟΤΗΤΑ SAMEAS

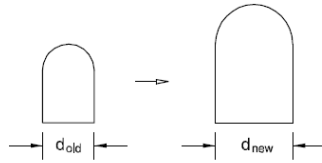
Η ιδιότητα *sameasnl* θεωρεί μια παράμετρο εισόδου σε ένα τμήμα σαν τιμή κάπου αλλού. Αυτό βοηθάει ιδιαίτερα στην αποφυγή τυπογραφικών λαθών και είναι εξαιρετικά χρήσιμο να συνδέει γειτονικά τμήματα που θέλουμε να αλλάζουν (πχ να μεγεθύνονται) όλα μαζί όταν αλλάζει το μέγεθος της συσκευής.

2.4.4 MASTER-SLAVELINKS

Όταν οι γεωμετρικές μεταβλητές αλλάζουν σε ένα μοντέλο, είτε από το χρήστη, μέσω της “μεθόδου στόχευσης”, είτε από το DeltaEC μέσω του “προγράμματος γραφήματος προσαυξανόμενων στοιχείων” υπάρχουν συχνά κάποιες γεωμετρικές σχέσεις μέσω κάποιων παραμέτρων που θα πρέπει να παραμείνουν ως έχουν. Για παράδειγμα αν η διατομή ενός αγωγού αυξηθεί συνήθως αυξάνεται και η αντίστοιχη περίμετρος. Άλλη μία συνήθης απαίτηση είναι να μεγαλώνει σε μήκος ένα τμήμα ενώ ένα άλλο μικραίνει ώστε να μένει σταθερό το συνολικό μήκος της συσκευής. Οι σύνδεσμοι κυρίου-

υποτελούς (Master–slave links) είναι διαθέσιμοι σε μερικά τμήματα για αυτό ακριβώς το σκοπό.

Αν θεωρήσουμε για παράδειγμα έναν αγωγό DUCT του οποίου η διατομή είναι τετράγωνο όπου στη μία του πλευρά έχει προστεθεί εξωτερικά ένα ημικύκλιο



Σχήμα 2-8. Αλλαγή περιμέτρου αγωγού όταν αλλάζει το εμβαδόν διατομής του με τη χρήση συνδέσμων κυρίου-υποτελούς Master–slave link.

Το εμβαδόν διατομής είναι:

$$A = \frac{1}{2} \pi d^2 + d^2 \quad (2.1)$$

Η περίμετρος είναι:

$$\Pi = \frac{\pi}{2} d + 3d \quad (2.2)$$

Παρατηρούμε ότι η ποσότητα C:

$$C = \frac{\Pi^2}{A} = \frac{(\pi + 6)^2}{\pi/2 + 4} \approx 15.001 \quad (2.3)$$

παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη του μεγέθους του αγωγού. Επιπρόσθετα παραδείγματα είναι $c = 4$

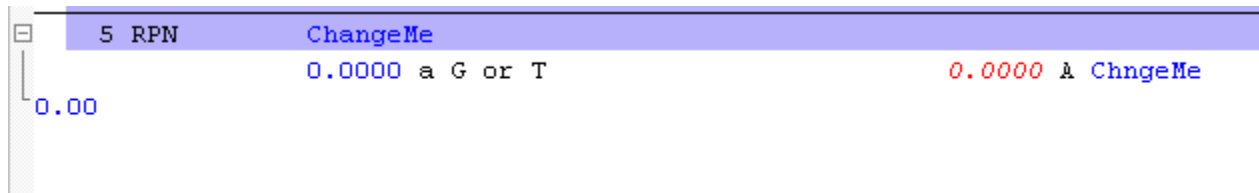
για κυκλικό αγωγό και $c = 16$ για τετράγωνο. Όταν λοιπόν αλλάξει η τιμή του εμβαδού διατομής σε έναν αγωγό, το DeltaEC θυμάται το σταθερό c και το χρησιμοποιεί να αλλάξει την περίμετρο σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = \sqrt{c \cdot A} \quad (2.4)$$

Έτσι η κυκλική διατομή παραμένει κυκλική κοκ.

2.4.5 RPN

Το τμήμα RPN επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργεί μη τυποποιημένα guesses, targets και απλούς αλγεβρικούς υπολογισμούς σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου. Η τυποποίηση αυτού του σημείου φαίνεται παρακάτω:



Η είσοδος “a” είναι ένας πραγματικός αριθμός ο οποίος μπορεί να είναι είτε guess, είτε target, είτε/και ένας αριθμός που θα χρησιμοποιηθεί μεταγενέστερα σε υπολογισμούς δια μέσω των συνδέσμων sameas. Η δεύτερη γραμμή “b” εκφράζει έναν τύπο, μια αλγεβρική διαδικασία που ορίζεται από τον χρήστη. το ReversePolishNotation (RPN) είναι μια αλγεβρική τεχνική κωδικοποίησης χωρίς παρενθέσεις. Περισσότερα για το RPN μπορεί να βρει κανείς στις οδηγίες χρήσης των περισσότερων επιστημονικών υπολογιστών τσέπης καθώς και στο [81].

Το RPN χρησιμοποιεί αριθμούς (ή αποτελέσματα ή δεδομένα κάπου στο μοντέλο) και τους αποθηκεύει σε μια στοίβα. Όταν χρησιμοποιούμε έναν μοναδιαίο τελεστή όπως cos, log, ή sqrt, αυτός παίρνει έναν αριθμό από τη στοίβα, επενεργεί σ’ αυτόν και επιστρέφει το αποτέλεσμα στη στοίβα.

Όταν χρησιμοποιούμε ένα δυαδικό τελεστή όπως + ή * παίρνει δύο αριθμούς τους συνδυάζει κατάλληλα (προσθέτει, πολλαπλασιάζει κλπ.) και επιστρέφει το αποτέλεσμα στη στοίβα. Αν υπάρχουν στη στοίβα αριθμοί που δεν εμπλέκονται στις πράξεις, απλά μετακινούνται μέσα στη στοίβα ώστε να μην εμφανίζονται κενά και να μη χαθεί κανένας αριθμός.

Το τμήμα RPN αναγνωρίζει τις συνήθεις τριγωνομετρικές λογαριθμικές, εκθετικές και αλγεβρικές συναρτήσεις που υπάρχουν σε ένα κοινό επιστημονικό υπολογιστή τσέπης, όπως και υπερβολικές συναρτήσεις και συναρτήσεις. Η περισσότερες από αυτές τις συναρτήσεις δέχονται και μιγαδικές τιμές.

Άλλες συναρτήσεις μετατρέπουν μιγαδικούς αριθμούς με το συνήθη τρόπο (πραγματικό-φανταστικό μέρος, μέγεθος-φάση). Κάνοντας κλικ στο κουμπί ShowOps το πρόγραμμα εμφανίζει μια υπενθύμιση για τις διαθέσιμες λειτουργίες και μεταβλητές του RPN, σαν το παρακάτω.

Unary Operations:	sto	sqrt	sqrd	~	abs	inv	log	log10	exp	tenx
	sin	cos	tan	asin	acos	atan	sinr	cosr	tanr	asinr
	acosr	atanr	sinh	cosh	tanh	J0	J1	Y0	Y1	
Binary Operations:	+	-	*	/	^	min	max	atan2r	atan2	cmplx
	cmplxr									
Complex Operations:	mag	real	imag	arg	argr	conj				
Swap stack members:	a<>b									
Numeric Variables:	pi	i	#	lstx	rcf	inp				
State Variables:	w	f	pm	Tm	p1	U1	Edot	Htot	H2k	Xdot
	Ndot	p20HL	p20tot	nL	NLdot					
Property Variables:	gamma	a	beta	rho	cp	enth	k	mu	dn	dk
	rhos	cs	ks	ds	kT	D12	mL	mH	m	
Other Variables:	Tzero	nLzero	F1	vol	x					
Reassignments:	=f	=pm	=Tm	=p1	=U1	=H2k	=Ndot	=p20HL	=nL	=NLdot
	=Tzero	=nLzro	=F1	=vol						

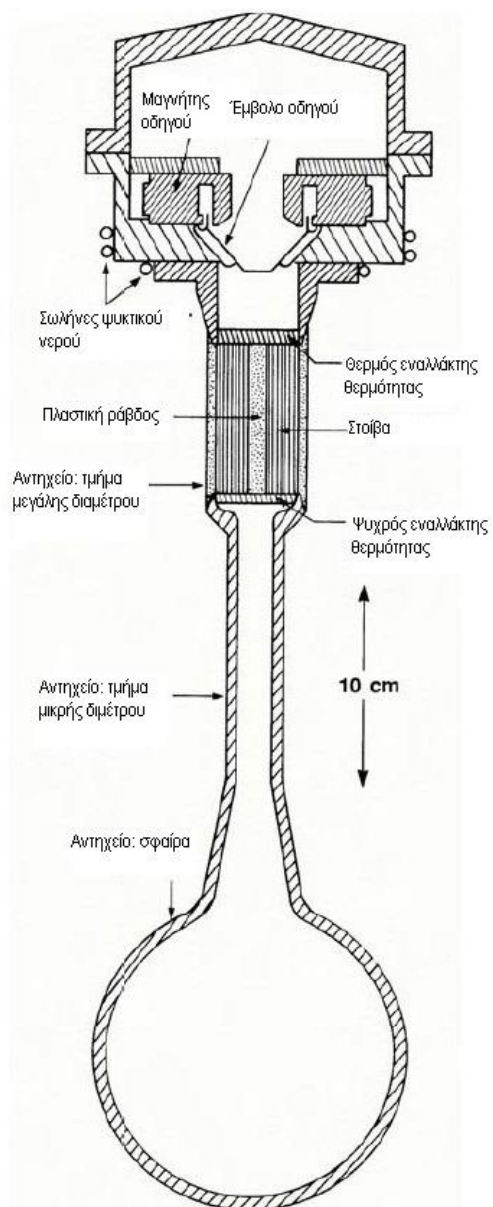
Σχήμα2-9. Διαθέσιμες λειτουργίες και μεταβλητές του RPN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

DeltaEC

3.1 ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΨΥΚΤΗΣ HOFLER

3.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ



Σχήμα3-1. Ο θερμοακουστικός ψύκτης Hofler [43]

Ο θερμοακουστικός ψύκτης του Hofler περιγράφεται στη διατριβή του [12] και συνοψίζεται στα [30] και [43]. Η συσκευή φαίνεται στο σχήμα 3-1. Αποτελείται από ένα γεμισμένο με αέριο αντηχείο που οδηγείται από ένα ηχείο και περιέχει μία στοίβα πλακών και τους εναλλάκτες θερμότητας. Η στοίβα αποτελείται από μία μεγάλου μήκους, πλάτους 8cm , πάχους 0.08mm κορδέλα από πλαστικό (Kapton), σπειροειδώς τυλιγμένη γύρω από μια πλαστική ράβδο, φτιάχνοντας έτσι μια κατασκευή μήκους 8cm και διαμέτρου 3.8cm . Αυτό το υλικό επιλέχθηκε γιατί είναι κατασκευαστικά ανθεκτικό, έχει σχεδόν μηδενικό δείκτη θερμικής χωρητικότητας στοίβας ($\epsilon_s \approx 0$), και μηδενική αγωγή θερμότητας στην κλίση θερμοκρασίας.

Καθένας από τους δύο εναλλάκτες θερμότητας είναι φτιαγμένος από ορθογώνιες λωρίδες χαλκού, βρίσκεται πολύ κοντά στα δυο άκρα της στοίβας και έχει πολύ καλή θερμική επαφή με τα κοντινά τοιχώματα του αντηχείου. Ο χαλκός χρησιμοποιείται εξ αιτίας της μεγάλης θερμικής του αγωγιμότητας. Τα φύλλα χαλκού του ψυχρού εναλλάκτη έχουν πλάτος 2.5mm στη φορά της ακουστικής ταλάντωσης, 0.25mm πάχος ενώ τα κενά μεταξύ τους είναι 0.5mm . Τα φύλλα χαλκού του θερμού εναλλάκτη έχουν πλάτος 6.4mm , 0.25mm πάχος και τα κενά μεταξύ τους είναι 0.38mm . Οι διαστάσεις των δύο εναλλακτών διαφέρουν γιατί ο θερμός εναλλάκτης χρειάζεται να άγει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από τον ψυχρό, ενώ απ' το ψυχρό περνούν μεγαλύτερες ακουστικές ταχύτητες. Το κενό μεταξύ της στοίβας και του θερμού εναλλάκτη είναι μικρότερο από 0.1mm επειδή το πλάτος της ακουστικής μετατόπισης εκεί, κοντά στον κόμβο ταχύτητας του στάσιμου κύματος είναι πολύ μικρό.

Οι θερμοκρασίες του κάθε εναλλάκτη μετρώνται με τη χρήση δύο θερμοστοιχείων στον καθένα, ένα κοντά στο κέντρο του και ένα στα κοντινά τοιχώματα του αντηχείου. Η τυπική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των τοιχωμάτων και του κέντρου του εναλλάκτη είναι 2°C . Ο θερμός εναλλάκτης κρατιέται σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση ρέοντος νερού διαμέσω της συγκολλημένης σωλήνωσης στα γειτονικά τοιχώματα του αντηχείου.

Το αντηχείο περιέχει ήλιο σε πίεση 10 bar ενώ η συχνότητα αντήχησης είναι 500 Hz . Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες στο ψυχρό μέρος ενός θερμοακουστικού ψύκτη γιατί

έχουν δύο δυσμενή αποτελέσματα: απορροφούν ακουστική ισχύ και προσθέτουν επιπλέον θερμικό φορτίο στον ψύκτη. Το αντηχείο αποτελείται από ένα τμήμα μεγάλης διαμέτρου, ένα τμήμα μικρής διαμέτρου και μια σφαίρα στη σειρά. Ο αντικόμβος πίεσης βρίσκεται στο κορυφαίο σημείο του τμήματος με μεγάλη διάμετρο ενώ ο αντικόμβος ταχύτητας κοντά στον τέλος του τμήματος με τη μικρή διάμετρο. Το αντηχείο έχει μήκος $\lambda/4$ του μήκους κύματος.

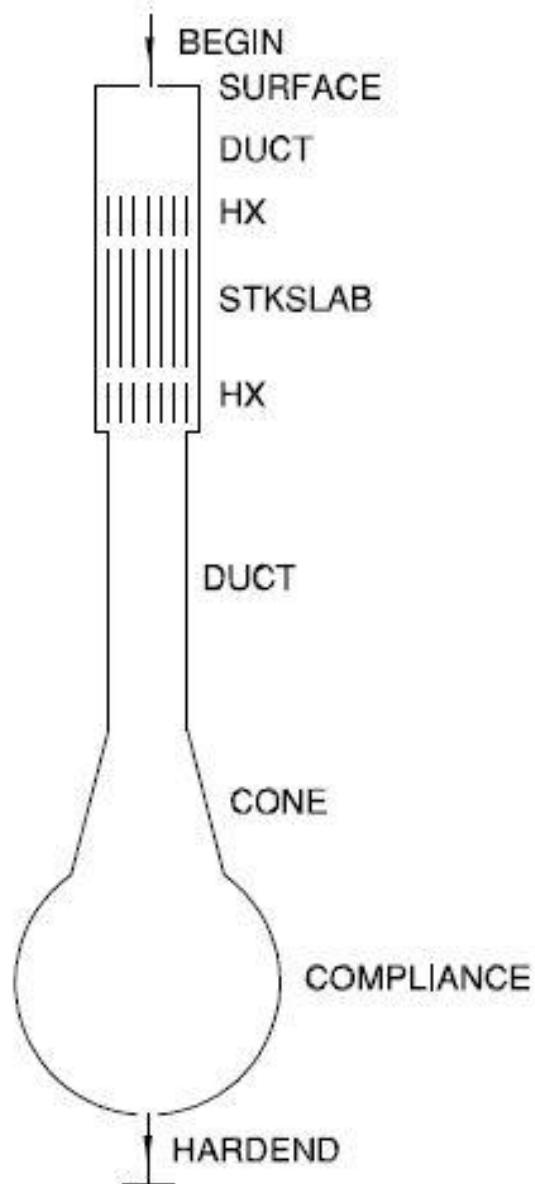
Το τμήμα με τη μεγάλη διάμετρο το οποίο περιέχει τη στοίβα, τους εναλλάκτες άρα και την κλίση της θερμοκρασίας είναι φτιαγμένο από υαλονήματα και εποξικά καλυμμένο για μεγαλύτερη αντοχή και θερμομόνωση. Είναι επίσης σκεπασμένο με μια θερμικά κατεργασμένη μεταλλική ταινία για να εμποδιστεί η διάχυση του ηλίου εκτός του αντηχείου. Κοντά στους εναλλάκτες το αντηχείο είναι φτιαγμένο από χαλκό για να διευκολυνθεί η μεταφορά θερμότητας. Το σφαιρικό και κωνικό τμήμα του αντηχείου είναι φτιαγμένο από ηλεκτρολυμένη λαμαρίνα από κράμα χαλκού νικελίου.

Ο ηλεκτρακουστικός μεταγωγέας ισχύος που χρησιμοποιείται για την οδήγηση του ψύκτη, είναι τοποθετημένος στον αντικόμβο πίεσης, 5 cm απόσταση από το θερμό άκρο της στοίβας. Πρόκειται για ένα τροποποιημένο, μεσαίου εύρους, υψηλής πιστότητας ηχείο. Το κάλυμμα του ηχείου έχει αντικατασταθεί από ένα λεπτό έμβολο αλουμινίου σε σχήμα κώνου το οποίο είναι καλυμμένο με εποξικό περίβλημα. Το έμβολο και το περίβλημά του επί της ουσίας, προσαρμόζει το πηνίο φωνής (διαμέτρου 5 cm) για να αντέχει τις υψηλές πιέσεις. Ο οδηγός αυτός μπορεί προσδώσει 13 W ακουστική ισχύος στο αντηχείο με βαθμό απόδοσης μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος σε ακουστική 20%. Η παραγόμενη θερμότητα από τον οδηγό απομακρύνεται με τη χρήση ρέοντος νερού σε θερμοκρασία δωματίου σε σωλήνωση συγκολλημένη στη θήκη του οδηγού. Η ακουστική ισχύς που προσδίδεται από τον οδηγό υπολογίζεται με ακρίβεια με τη χρήση ενός μικροσκοπικού αισθητήρα επιτάχυνσης στο έμβολο και με έναν αισθητήρα ακουστικής πίεσης προσκολλημένο σε κοντινή απόσταση.

3.1.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η συσκευή προσομοιώνεται ως εξής:

BEGIN-SURFACE-DUCT-HX-STKSLAB-HX-DUCT-CONE-COMPLIANCE



Σχήμα 3-2. Αναπαράσταση ψύκτη Hofler για το DeltaEC.

```

1  hofler mine Hofler's 1986 thermoacoustic refrigerator
2  0 BEGIN
3      1.0000E+06 a Mean P Pa
4  Gues      504.22 b Freq Hz
5  Gues      300.80 c TBeg K
6      3.0000E+04 d |p| Pa
7      0.0000 e Ph(p) deg
8  Gues      5.4172E-04 f |U| m^3/s
9      0.0000 g Ph(U) deg
10 Optional Parameters
11 helium Gas type
12 1 SURFACE driver end
13      1.1340E-03 a Area m^2      3.0000E+04 A |p| Pa
14      0.0000 B Ph(p) deg
15      5.3940E-04 C |U| m^3/s
16      0.0000 D Ph(U) deg
17      8.1258 E Htot W
18 ideal Solid type      8.0910 F Edot W
19 2 DUCT ambient temperature duct
20 Same 1a 1.1340E-03 a Area m^2      2.9736E+04 A |p| Pa
21      0.1190 b Perim m      -0.194 B Ph(p) deg
22      4.2600E-02 c Length m      2.8065E-03 C |U| m^3/s
23 Master-Slave Links      -79.231 D Ph(U) deg
24 Optional Parameters      8.1258 E Htot W
25 ideal Solid type      7.9350 F Edot W
26 3 HX ambient temperature heat exchanger
27 Same 1a 1.1340E-03 a Area m^2      2.9564E+04 A |p| Pa
28      0.6000 b GasA/A      -0.15023 B Ph(p) deg
29      6.3500E-03 c Length m      3.0845E-03 C |U| m^3/s
30      1.9000E-04 d y0 m      -81.162 D Ph(U) deg
31 Gues      -11.126 e HeatIn W      -3.000 E Htot W
32 Targ      300.00 f SolidT K      7.1231 F Edot W
33 Master-Slave Links      300.80 G GasT K
34 copper Solid type      300.00 H SolidT K
35 4 STKSLAB Stack
36 Same 1a 1.1340E-03 a Area m^2      2.6102E+04 A |p| Pa
37      0.7240 b GasA/A      1.4051 B Ph(p) deg
38      7.8500E-02 c Length m      6.8689E-03 C |U| m^3/s
39      1.8000E-04 d y0 m      -87.904 D Ph(U) deg
40      4.0000E-05 e Lplate m      -3.000 E Htot W
41 Master-Slave Links      1.0801 F Edot W
42      300.80 G TBeg K
43 kapton Solid type      223.49 H TEnd K

```

44	5 HX	Cold heat exchanger						
45	Same	1a	1.1340E-03	a Area	m ²	2.5923E+04	A p	Pa
46			0.6700	b GasA/A		1.4625	B Ph(p)	deg
47			2.5400E-03	c Length	m	6.9746E-03	C U	m ³ /s
48			2.5500E-04	d y0	m	-88.00	D Ph(U)	deg
49			3.0000	e HeatIn	W	-1.7764E-15	E Htot	W
50	Master-Slave Links					0.84865	F Edot	W
51	Possible targets					223.49	G GasT	K
52	copper	Solid type				223.76	H SolidT	K
53	6 DUCT	Cold Duct						
54			3.8400E-04	a Area	m ²	1743.5	A p	Pa
55			6.9400E-02	b Perim	m	0.66851	B Ph(p)	deg
56			0.1670	c Length	m	8.7228E-03	C U	m ³ /s
57	Master-Slave Links					-88.179	D Ph(U)	deg
58	Optional Parameters					-1.7764E-15	E Htot	W
59	ideal	Solid type				0.15293	F Edot	W
60	7 CONE							
61	Same	6a	3.8400E-04	a AreaI	m ²	4222.0	A p	Pa
62	Same	6b	6.9400E-02	b PerimI	m	-178.11	B Ph(p)	deg
63			6.6800E-02	c Length	m	8.5071E-03	C U	m ³ /s
64			1.1600E-03	d AreaF	m ²	-88.183	D Ph(U)	deg
65			0.1210	e PerimF	m	-1.7764E-15	E Htot	W
66	Master-Slave Links					2.3098E-02	F Edot	W
67	Optional Parameters							
68	ideal	Solid type						
69	8 COMPLIANCE end bulb							
70			4.9000E-02	a SurfAr	m ²	4222.0	A p	Pa
71			1.0600E-03	b Volume	m ³	-178.11	B Ph(p)	deg
72	Master-Slave Links					4.1375E-15	C U	m ³ /s
73						-99.267	D Ph(U)	deg
74						-1.7764E-15	E Htot	W
75	ideal	Solid type				1.6902E-12	F Edot	W
76	9 HARDEND	Change Me						
77	Targ		0.0000	a R(1/z)		4222.0	A p	Pa
78	Targ		0.0000	b I(1/z)		-178.11	B Ph(p)	deg
79	Targ		0.0000	c Htot	W	4.1375E-15	C U	m ³ /s
80						-99.267	D Ph(U)	deg
81						-1.7764E-15	E Htot	W
82						1.6902E-12	F Edot	W
83						3.0975E-13	G R(1/z)	
84						1.5704E-12	H I(1/z)	
85								

Στα δεδομένα (με μπλε χρώμα) έχουμε δώσει τις διαστάσεις και τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής σύμφωνα με το [43]. Στα αποτελέσματα (με πράσινο χρώμα) παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία: το πραγματικό (A) και φανταστικό (B) μέρος της πίεσης σε Pa, το πραγματικό (C) και φανταστικό (D) μέρος της ταχύτητας του αερίου σε m^3/sec η συνολική ισχύς \dot{H}_{tot} σε Watt (E) και η ακουστική ισχύς \dot{E}_{dot} επίσης σε Watt (F) κάθε τμήματος. Στους εναλλάκτες παρουσιάζονται

επιπλέον η θερμοκρασία του αερίου (G) σε Kelvin καθώς και η στερεή θερμοκρασία (H) ενώ στη στοίβα οι θερμοκρασίες εισόδου (G) κ εξόδου (H) από τη στοίβα.

Οι μεταβλητές guess και target επιλέχθηκαν με τον εξής τρόπο: η ροή στον πυθμένα της συσκευής πρέπει να είναι μηδενική οπότε ορίζουμε 11a και 11b σαν target. Χρειαζόμαστε δηλαδή δύο συνεργαζόμενες μεταβλητές guess στο τμήμα BEGIN. Θα μπορούσε να είναι η μιγαδική τιμή της ταχύτητας U_1 αλλά λόγω το ότι η μηχανή λειτουργεί με αντήχηση και η πίεση και η ταχύτητα είναι σε φάση θα θέσουμε ως guess τη συχνότητα f (0b) και το πλάτος της ταχύτητας $|U_1|$ (0f) αφήνοντας έτσι τις φάσεις της ταχύτητας και της πίεσης ίσες και μηδέν σαν συνθήκη αντήχησης. Ξέρουμε επίσης ότι ο πυθμένας της συσκευής είναι θερμικά μονωμένος, άρα δεν υπάρχει συναλλαγή ενέργειας εκεί άρα θέτουμε 9c σαν target. Ακόμα, ότι η θερμοκρασία στον εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος, παραμένει σταθερή και ίση με 300 K , άρα ακόμα μία μεταβλητή target η 3f. Η ηλεκτρική ισχύς στον ψυχρό εναλλάκτη είναι 3 W . Η απορριπτόμενη θερμότητα στον εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος 3e είναι μία ακόμη μεταβλητή guess καθώς και η αρχική θερμοκρασία αερίου 0c αφού είναι μεταβλητές οι οποίες θέλουμε το DeltaEC να υπολογίσει.

Guesses:				Targets:				Results		
desc	addr	value	unit	desc	addr	value	addr	value	unit	
BEGIN:Freq	0b	504.22	Hz	HX:SolidT	3f	300.00	3H	300.00	K	
BEGIN:TBeg	0c	300.80	K	HARDE:R(1/z)	9a	0.0000	9G	3.0975E-13		
BEGIN: U	0f	5.4172E-04	m ³ /s	HARDE:I(1/z)	9b	0.0000	9H	1.5704E-12		
HX:HeatIn	3e	-11.126	W	HARDE:Htot	9c	0.0000	9E	-1.7764E-15W		

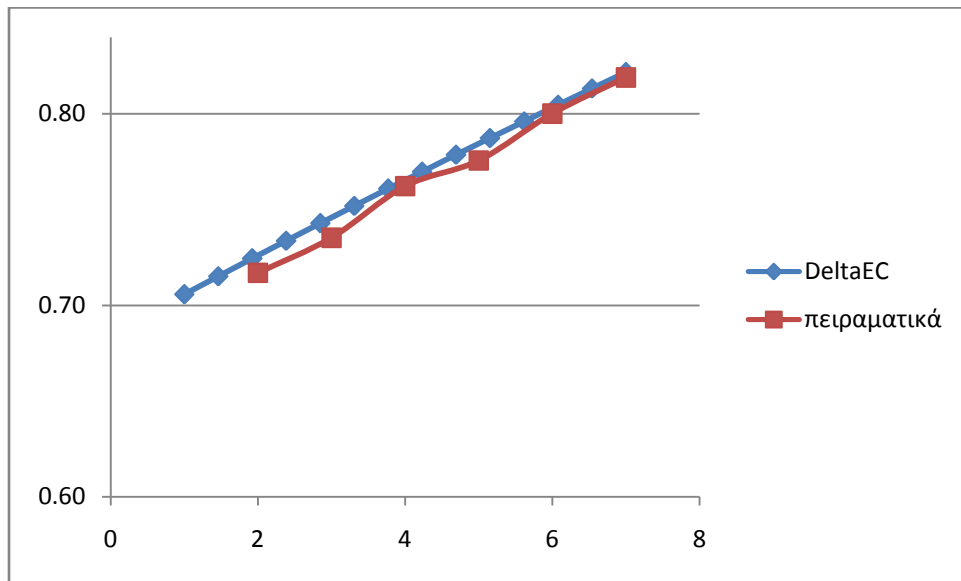
Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται λογικά. Τώρα για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά του [43] θα προσθέσουμε τα εξής τμήματα RPN:

Το ένα θα υπολογίζει την ακαθάριστη ψυκτική ισχύ, το δεύτερο το λόγο ψυχρότερης-θερμότερης

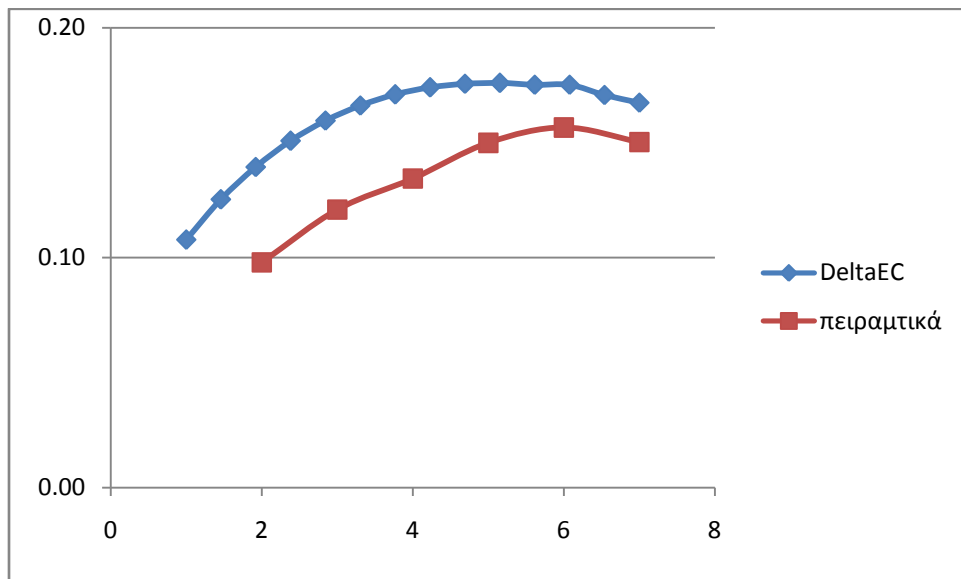
θερμοκρασίας και το τρίτο το συντελεστή απόδοσης $COP = \dot{Q}_{C,gross} / \dot{E}$ προς το συντελεστή απόδοσης Carnot $COP_{Carnot} = T_C / (T_0 - T_C)$.

85	10 RPN	gross cooling power			
86		0.0000 a G or T	P	3.8487	A ChngeMe
87	5e 5F +				
88	11 RPN	temprature ratio			
89		0.0000 a G or T	P	0.74586	A ChngeMe
90	5H 3H /				
91	12 RPN	cop/cop carnot			
92		0.0000 a G or T	P	0.16208	A ChngeMe
93	10A 1F / 5H 3H 5H - / /				
94					

και θα τρέξουμε το DeltaEC ώστε να φτιαχτούν τα παρακάτω διαγράμματα:



(α)

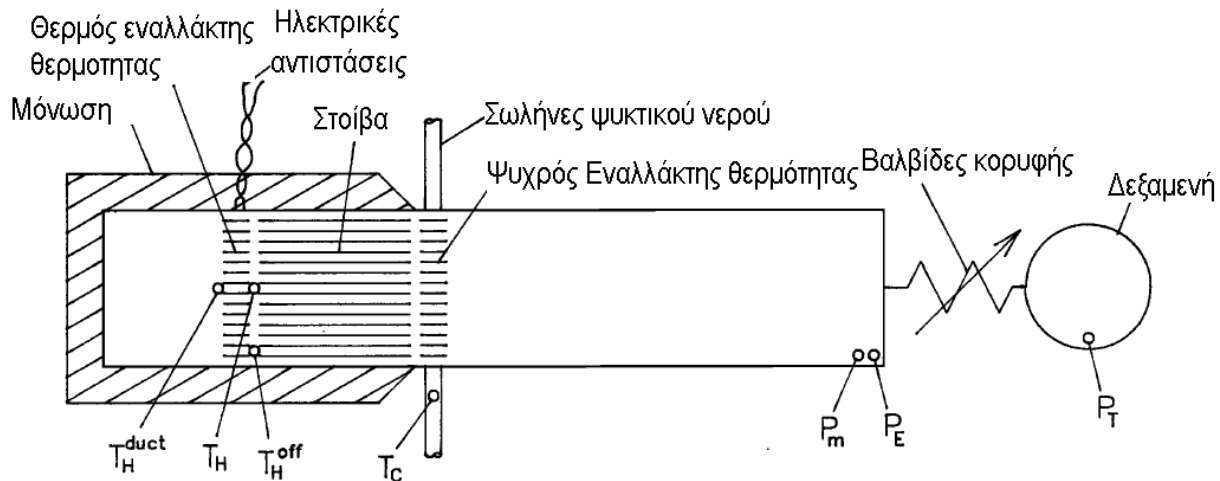


(β)

Σχήμα 3-3. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά του DeltaEC. (α) Λόγος θερμοκρασιών προς την ηλεκτρική ισχύ του θερμαντήρα. (β) Βαθμός απόδοσης κανονικοποιημένος με το βαθμό απόδοσης Carnot προς την ηλεκτρική ισχύ του θερμαντήρα.

3.2 ΜΗΧΑΝΗ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ



Σχήμα 3-4. Σχηματική απεικόνιση της συσκευής (όχι σε κλίμακα), οι μικροί κύκλοι δείχνουν τη θέση των αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας. [44]

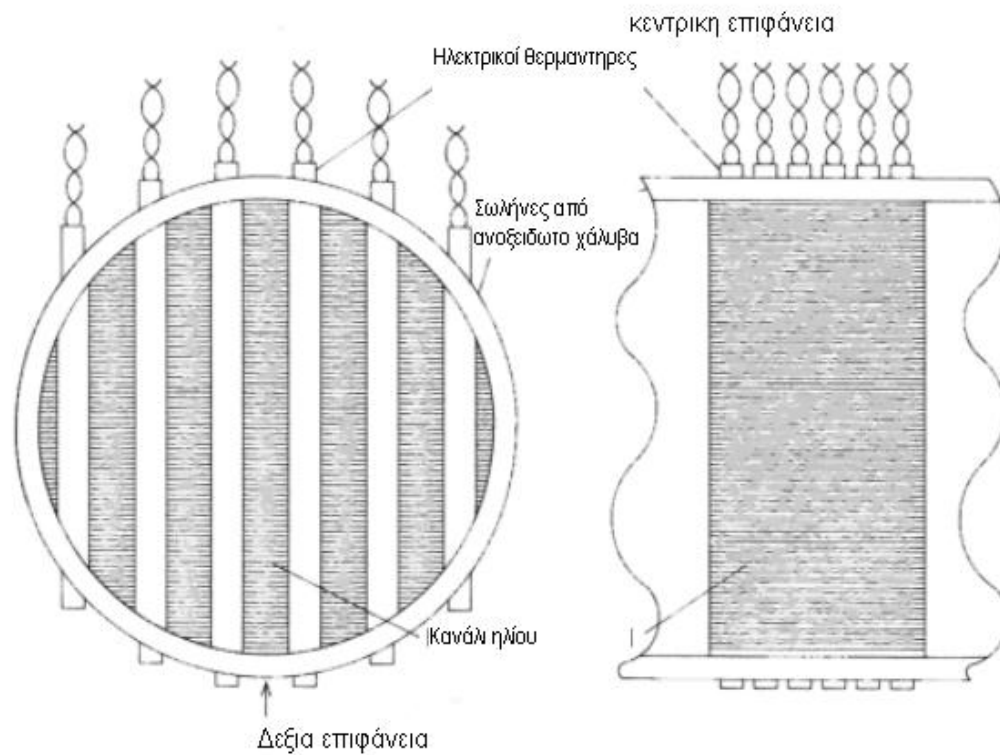
Η συσκευή, όπως κατασκευάστηκε και αναλύεται στο [44] παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 3-4. Χρησιμοποιήθηκε πειραματικά από τα Los Alamos National Laboratories για να γίνουν μετρήσεις σε αυτές τις συνθήκες. Αποτελείται από ένα κυλινδρικό αντηχείο που περιέχει ήλιο εσωτερικής διαμέτρου 12.7 cm και μήκους 4.32 m περιέχοντας μια θερμοακουστική μηχανή στο ένα άκρο και ένα ακουστικό φορτίο στο άλλο.

Θα παρουσιάσουμε τη συσκευή από όπως φαίνεται στο σχήμα 3-4 από τα αριστερά προς τα δεξιά. Το αριστερότερο τμήμα του αντηχείου με μήκος 61.8 cm και εσωτερική διάμετρο 12.8 cm εκτείνεται από το αριστερό άκρο της συσκευής ως τον κόμβο μεταξύ της στοιβάς και του ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας. Αποτελείται από ένα σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους τοιχωμάτων 6.6 mm και ένα καπάκι πάχους 1.9 cm συγκολλημένο στο αριστερό άκρο. Είναι θερμικά μονωμένος από μερικά στρώματα κεραμικού μανδύα ινών (πυριτικό αργίλιο) συνολικού μήκους περίπου 8 cm . Τα

πρώτα 27.9 cm αυτού του τμήματος, που περιέχουν ήλιο, θα αναφέρονται ως “θερμός αγωγός”.

Μερικές χάλκινες μπάρες πάχους 6 mm είναι τοποθετημένες μέσα στο θερμό αγωγό αξονικά για να το βοηθήσει να φτάσει σε κατάσταση εσωτερικής θερμικής ισορροπίας πιο γρήγορα από το σκέτο ανοξειδωτο χάλυβα. Τα επόμενα 6.0cm περιέχουν το θερμό εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος τροφοδοτείται ηλεκτρικά. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-5, ο θερμός εναλλάκτης αποτελείται από 36 ηλεκτρικές αντιστάσεις ενταγμένες σε έναν πίνακα πτερυγίων νικελίου, σχηματίζοντας 400 τετραγωνικά κανάλια ηλίου μήκους 6.0 cm (κατά μήκους του άξονα του αντηχείου), πάχους 0.97 mm και τυπικού πλάτους 1.27 cm. Η συνολική ακάλυπτη επιφάνεια που καταλαμβάνει το αέριο είναι 50.8 cm², δηλαδή το 39.3% της επιφάνειας του σωλήνα.

Για την κατασκευή του θερμού εναλλάκτη ξεκινάμε με φύλλα νικελίου πάχους 0.46 mm (το υλικό των πτερυγίων) και 0.96 mm. Αυτά τοποθετούνται κατάλληλα και συγκολλούνται χρησιμοποιώντας καθαρό χαλκό ως κράμα συγκόλλησης για να σχηματίσουν μία τετραγωνική επιφάνεια που περιέχει εκατοντάδες κανάλια επιφάνειας 0.97 X 1.27 mm. Η επιφάνεια αυτή είναι κατασκευασμένη με 12.8 cm διάμετρο, 6.0 cm μήκος και τοποθετείται με επίχρισμα κεραμευτικής μέσα στο σωλήνα ανοξειδωτου χάλυβα. Στη συνέχεια, ανοίγονται 36 τρύπες στην διάταξη εγκάρσια στον άξονα του σωλήνα, με 6 τρύπες τοποθετημένες σε 6 παράλληλες εξάδες να ισαπέχουν από κάθε μια από τις 6 περιοχές μεταξύ των φτερών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-5 σε κάθε μία από τις τρύπες τοποθετούνται με τη βοήθεια πρέσας, σωλήνες λεπτών τοιχωμάτων από ανοξειδωτο χάλυβα και συγκολλούνται στο σωλήνα και από τα δύο άκρα. Τέλος, τοποθετούνται 36 ραβδοειδείς αντιστάτες θέρμανσης, διαμέτρου 6.3-mm, με επίχρισμα κεραμευτικής μέσα στους λεπτών τοιχωμάτων σωλήνες.



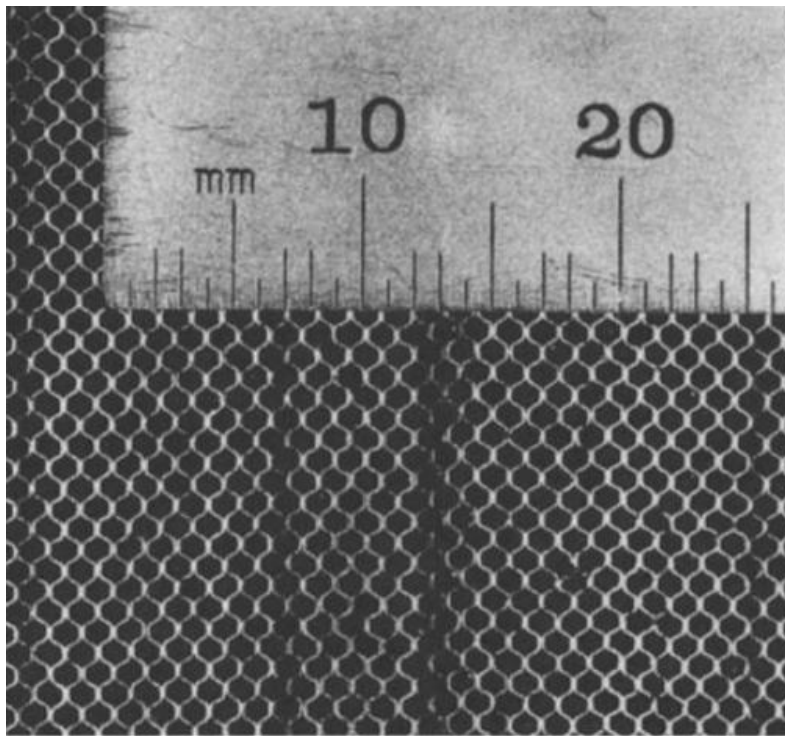
Σχήμα 3-5. Σχηματική απεικόνιση του θερμού εναλλάκτη θερμότητας υπό κλίμακα. Οριζόντια και κάθετη όψη.[44]

Οι θερμαντήρες είναι συνδεδεμένοι μέσω χαμηλής αντίστασης ρυθμιζόμενων αντιστατών σε τρεις μηχανικά συζευγμένους αυτομετασχηματιστές και μετά στην τριφασική τροφοδοσία στα 60 Hz . Οι ρυθμιζόμενοι αντιστάτες επιλέχθηκαν ώστε ο εναλλάκτης να είναι χωρικά ομοιόμορφος παρά τα διαφορετικά μήκη και αντιστάσεις των διαφορετικών θερμαντήρων. Με ένα τριφασικό βατόμετρο μετράμε με ευκολία την ισχύ \dot{Q}_H που παρέχεται στον εναλλάκτη, με ακρίβεια $\pm 2\%$.

Τρία θερμοστοιχεία τύπου-K (σχήμα 3-4) κάνουν δυνατή τη μέτρηση της θερμοκρασίας κοντά στο θερμό εναλλάκτη, με ακρίβεια $\pm 1^\circ\text{C}$. Το ένα από τα θερμοστοιχεία τοποθετείται μεταξύ της στοίβας και του θερμού εναλλάκτη στο κενό του σωλήνα. Σημειώνουμε αυτή τη θερμοκρασία σαν T_H . Ένα δεύτερο θερμοστοιχείο τοποθετείται πάλι μεταξύ της στοίβας και του θερμού εναλλάκτη αυτή τη φορά στη μέση μίας από των εκτός κέντρου, ομάδων πτερυγίων. Σημειώνουμε τη θερμοκρασία αυτή

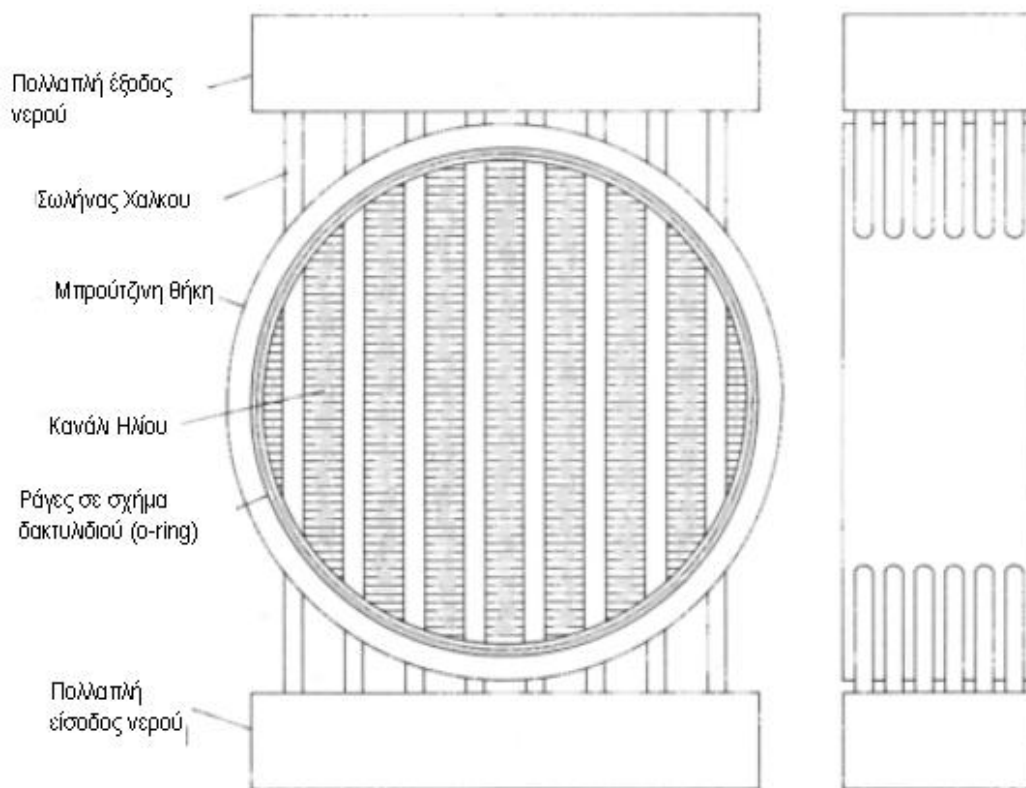
σαν T_H^{off} . Παρατηρούμε ότι: $|T_H^{off} - T_H|$ είναι μικρότερη των 9°C και τυπικά μικρότερη των 3°C, ενδεικτικό ότι υπάρχει καλή πλευρική ομοιομορφία στην συσκευή. Το τρίτο θερμοστοιχείο βρίσκεται στο θερμό αγωγό, κοντά στον θερμό εναλλάκτη και στο κέντρο του σωλήνα. Σημειώνουμε αυτή τη θερμοκρασία σαν T_H^{duct} . Παρατηρούμε ότι η $|T_H^{duct} - T_H|$ βρίσκεται κοντά στο αναμενόμενο πλάτος της αναμενόμενης θερμοκρασίας ταλάντωσης στον ψυχρό αγωγό. [43]

Η στοίβα γεμίζει τα εναπομείναντα 27.9 cm του μονωμένου σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα. Αποτελείται από μια σειρά από 6 κομμάτια, διαθέσιμα στο εμπόριο, κυψέλης. Κάθε κομμάτι είναι διαμέτρου 12.8 cm και μήκους 4.62 cm, κατασκευασμένο από πάχους 0.10 mm φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα με ονομαστικό μέγεθος κελιού κυψέλης 1.02mm. Αβαθείς εγκοπές ανοίγονται στο κοντινότερο κομμάτι στο θερμό εναλλάκτη για να φιλοξενηθούν τα δύο θερμοστοιχεία αλλά και για να εμποδιστεί η έμφραξη οποιουδήποτε κελιού της κυψέλης από τις στερεές περιοχές του θερμού εναλλάκτη θερμότητας.



Σχήμα 3-6. Στοίβα [44]

Παρότι οι υπολογισμοί μας δείχνουν ότι οι στοίβες παράλληλων πλακών έχουν σημαντικά υψηλότερη απόδοση και/ή πυκνότητα ισχύος, επιλέχθηκε η κυψελοειδής επειδή ήταν φτηνότερη και τα κελιά της ήταν ομοιόμορφα. Στη φωτογραφία (σχήμα 3-6) δείχνει ότι τα κελιά της κυψέλης δεν είναι τέλεια εξάγωνα πλάτους 1.02mm . Μετά από μερικές απλές μετρήσεις βρέθηκε ότι το 81% της επιφάνειας είναι κενό ώστε να καλυφθεί με ήλιο. Ένας ελεγκτήρας διαμέτρου 0.914mm διαπερνά όλα τα κελιά της κυψέλης ενώ ένας ελεγκτήρας διαμέτρου 0.940mm μόνο τα μισά. Μια προσεκτική ματιά στο σχήμα 3-6 δείχνει τα εξάγωνα να είναι ελαφρώς επιμηκυμένα, με ένα εσωτερικό χάρισμα 1.06mm προς την μακρά διεύθυνση και τυπική υδραυλική καμπυλότητα $(1/4) \times 0.97\text{mm}$. Παρακάτω τα κελιά θα προσομοιωθούν σαν κύκλοι διαμέτρου 1.0mm , διάσταση που βρίσκεται στο μέσο της εμβέλειας των μετρήσεων.



Σχήμα 3-7. Σχηματική απεικόνιση του ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας σε κλίμακα[44]

Επόμενο στοιχείο κατά μήκος της συσκευής είναι ο ψυχρός εναλλάκτης θερμότητας, με γεωμετρία όπως φαίνεται στο σχήμα 3-7, παρόμοια με του θερμού εναλλάκτη, αλλά με τρεχούμενο νερό στη θέση των ηλεκτρικών θερμαντήρων. Εκτείνεται σε 5.1 cm κατά μήκος της συσκευής. Οι 48 σωλήνες χαλκού εσωτερικής διαμέτρου 3 mm , χωρισμένες σε 8 ομάδες των 6 είναι στερεωμένοι με ελαφριά συγκόλληση στην ορειχάλκινη θήκη εσωτερικής διαμέτρου 12.7 cm και στα πολλά χάλκινα φτερά πάχους 0.25 mm και απόστασης 0.81 mm . Η συνολική ελεύθερη επιφάνεια για το ήλιο είναι 61.6 cm^2 (το 49% της εσωτερικής επιφάνειας της θήκης), χωρισμένη σε τετραγωνικά κανάλια πάχους 0.81 mm και πλάτους 10.3 mm εκτός από αυτά που βρίσκονται κοντά στη θήκη. Υπάρχουν αβαθείς εγκοπές στη μεριά προς τη στοίβα για να εμποδιστεί η έμφραξη οποιουδήποτε κελιού της κυψέλης από οποιοδήποτε στερεό τμήμα του εναλλάκτη.

Η θήκη του ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας σφραγίζεται από τον σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα με ένα λαστιχένιο δακτυλίδι O-ring. Ένα θερμοστοιχείο στο νερό που τροφοδοτεί τους 48 σωλήνες μετρά τη θερμοκρασία T_c . Η παροχή νερού ψύξης του συστήματος στον εναλλάκτη είναι $800\text{ cm}^3/\text{s}$.

Τα υπόλοιπα 3.65 m της συσκευής, τα οποία θα αποκαλούμε “ψυχρός αγωγός”, αποτελείται από δύο κομμάτια σε σειρά, εσωτερικής διαμέτρου 12.7 cm και πάχους τοιχώματος 6 mm σωλήνα αλουμινίου. Τα δύο αυτά κομμάτια ενώνονται με τη θήκη του ψυχρού εναλλάκτη και με το ψυχρό καπάκι με λαστιχένια δακτυλίδια. Τέσσερις μανδύες ψυκτικού νερού περικλείουν περίπου το μισό από το συνολικό μήκος των δύο αυτών σωλήνων, χρήσιμοι ώστε να κρατούν τη θερμοκρασία του ψυχρού αγωγού κοντά στη θερμοκρασία δωματίου, ακόμα και όταν 100 W ακουστικής ισχύος απάγονται σε αυτόν.

Το δεξί άκρο του ψυχρού αγωγού είναι κλεισμένο με ένα ορειχάλκινο κυλινδρικό περίβλημα πάχους 3.8 cm . Ένα δυναμικό μανόμετρο είναι τοποθετημένο σ' αυτό το περίβλημα για να μετρά τη συχνότητα λειτουργίας f και το πλάτος πίεσης του άκρου P_E . Εκτιμούμε ακρίβεια μετρήσεων της δυναμικής πίεσης $\pm 2\%$.

Η μέση πίεση P_m στη συσκευή επίσης παρακολουθείται στο δεξί άκρο χρησιμοποιώντας ένα πιεσόμετρο Bourdon συνδεδεμένο με τη συσκευή μέσω ενός υψηλής αντίστασης, τριχοειδούς μετρητή. Ο μετρητής δίνει ακρίβεια $\pm 0.04 \text{ bar}$.

Τέλος, ένα μεταβλητό ακουστικό φορτίο, του οποίου η διάχυση ισχύος μετράται με ακρίβεια, επισυνάπτεται στο δεξί άκρο του ψυχρού αγωγού. Αποτελείται από μια δεξαμενή 22900 cm^3 , συνδεδεμένη στο δεξί άκρο μέσω τριών παράλληλων, υδρόψυκτων, μυτερών βαλβίδων, ώστε να επιτρέπει στην ακουστική ισχύ να διαχέεται στις βαλβίδες μέσω της ακουστικής ροής. Οπότε το μεταβλητό φορτίο είναι επί της ουσίας, το ακουστικό ισοδύναμο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος RC με μεταβλητό R. Οι μετρήσεις της δυναμικής πίεσης P_T στη δεξαμενή και η γνώση του όγκου της δεξαμενής, μας επιτρέπουν τον υπολογισμό της ταλαντευόμενης ογκομετρικής παροχής U στη δεξαμενή. Ο χρονικός μέσος όρος του γινομένου $(P_E - P_T) \cdot U$ δίνει την ισχύ που διαχέεται.

Για να πάρουμε τις μετρήσεις αυτές σ' αυτή τη συσκευή, ρυθμίζουμε την ισχύ στον θερμαντήρα στην επιθυμητή τιμή, περιμένοντας μέχρι η μηχανή να φτάσει σε σταθερή κατάσταση και καταγράφουμε όλες τις πιέσεις, θερμοκρασίες, συχνότητα και ισχύ του θερμαντήρα.

Για να επιβεβαιώσουμε ότι το σύστημα έχει φτάσει σε σταθερή κατάσταση, παρακολουθούμε σε έναν καταγραφέα, περιμένοντας μέχρι η χαμηλή απόκλιση στην P_E να μην είναι πλέον ορατή συγκριτικά με τις διακυμάνσεις σε κλίμακα χρόνου περίπου 10 λεπτών. Αυτές οι διακυμάνσεις, τάξης μεγέθους 1%, είναι συγκρίσιμες σε μέγεθος και κλίμακα χρόνου με τις διακυμάνσεις της γραμμής τάσης των 60 Hz του εργαστηρίου. Στις μέγιστες τιμές ισχύος, η σταθερή κατάσταση επιτυγχάνεται σε περίπου 2 ώρες, ενώ για τις ελάχιστες τιμές ισχύος απαιτούνται πολλές ώρες. Τα δεδομένα παίρνονται εσκεμμένα σε ακανόνιστη σειρά, ώστε η μικρή διασπορά που παρατηρείται να είναι ενδεικτική της μακροπρόθεσμης επαναληψιμότητας του συστήματος.

Η μη γραμμικότητα στο μεταβλητό φορτίο παρουσιάζει μια μη αναμενόμενη και ενδιαφέρουσα επιπλοκή. Επειδή η ταλάντωση της ροής είναι τυρβώδης, μία δοθείσα βαλβίδα ρύθμισης απορροφά περισσότερη ισχύ ανά τετράγωνο πλάτους στα χαμηλά πλάτη ταλάντωσης παρά στα υψηλά. Εν τω

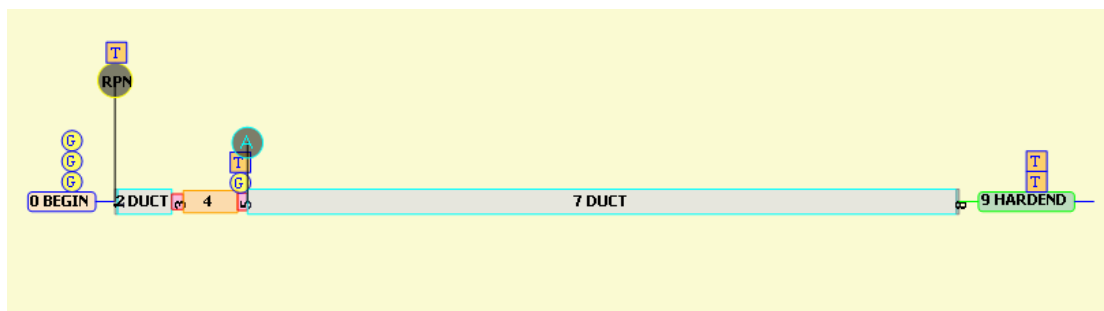
μεταξύ, όσο το πλάτος σιγά-σιγά αλλάζει καθώς προσεγγίζει τη σταθερή κατάσταση, αλλάζει επίσης και η εμπέδιση του φορτίου, έτσι μια ή δύο επαναρυθμίσεις στις βαλβίδες απαιτούνται κατά τη διάρκεια κάθε προσέγγισης σε σταθερή κατάσταση για να επιτευχθεί η ζητούμενη εμπέδιση φορτίου.

Η όχληση στα υψηλά πλάτη έχει σαν αποτέλεσμα να εμποδίζεται η σταθερή κατάσταση λειτουργίας στα χαμηλά πλάτη και/ή ανοίγει τη βαλβίδα ρύθμισης φορτίου. Αν το κατώφλι της αστάθειας υπερβληθεί, είτε χαμηλώνοντας τη θερμότητα είτε ανοίγοντας τις βαλβίδες, το εύρος της πίεσης ξεκινά να ταλαντώνεται με περίοδο μερικών δεκάδων δευτερολέπτων. Αυτή η περιβάλλουσα ταλάντωση μεγαλώνει εκθετικά μέχρι που σε μερικά λεπτά οι ταλαντώσεις σταματούν ολοκληρωτικά. Η μηχανή τότε ενεργοποιείται και απενεργοποιείται με περίοδο μίας ώρας ή περισσότερο. Σ' αυτή την κατάσταση η T_H στην αρχή αυξάνεται όσο ο θερμοαντήρας θερμαίνει το θερμό εναλλάκτη θερμότητας και τα γειτονικά εξαρτήματα. Κάποια στιγμή η θερμοκρασία αυξάνεται και η μηχανή ξεκινά να ταλαντώνεται ταχύτατα φτάνοντας πλάτη πολύ μεγαλύτερα του 1 bar . Τελικά αυτές οι υψηλού πλάτους ταλαντώσεις ψύχουν την T_H και οι ταλαντώσεις σταματούν.

3.2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η συσκευή με βάση τα παραπάνω και το [44] προσομοιώνεται ως εξής:

BEGIN-SURFACE-DUCT-HX-STKCIRC-HX-DUCT-ANCHOR-SURFACE-HARDEND-RPN



Σχήμα 3-8. Σχηματική αναπαράσταση συσκευής

και μετά την εκτέλεση του προγράμματος τα αποτελέσματα είναι:

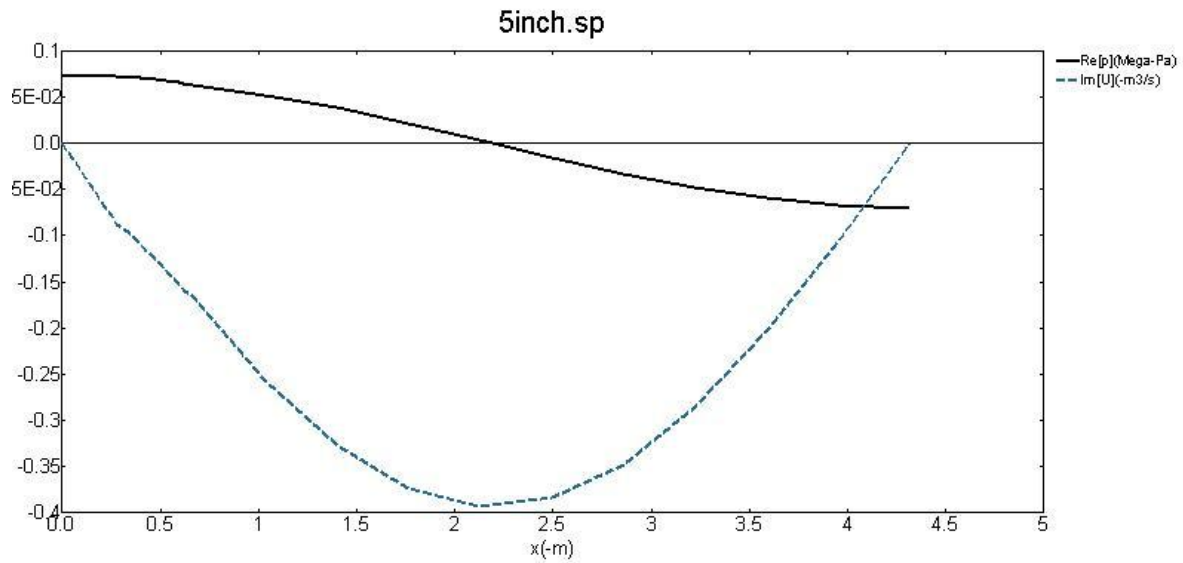
Sinch* x										
1	▢	Sinch	Five-Inch	Thermoacoustic	Engine					
2	▢	0	BEGIN	Initial						
3				1.3800E+06	a	Mean P	Pa			
4		Gues		121.16	b	Freq	Hz			
5		Gues		557.92	c	TBeg	K			
6		Gues		7.3549E+04	d	p	Pa			
7				0.0000	e	Ph(p)	deg			
8				0.0000	f	U	m ³ /s			
9				0.0000	g	Ph(U)	deg			
10						Optional Parameters				
11		helium				Gas type				
12	▢	1	SURFACE	Hot End						
13				1.2920E-02	a	Area	m ²	7.3549E+04	A	p Pa
14								0.0000	B	Ph(p) deg
15								3.3316E-05	C	U m ³ /s
16								180.00	D	Ph(U) deg
17								0.0000	E	Htot W
18		ideal				Solid type		-1.2252	F	Edot W
19	▢	2	DUCT	Hot Duct						
20		Same	1a	1.2920E-02	a	Area	m ²	7.2686E+04	A	p Pa
21				0.4030	b	Perim	m	5.5059E-03	B	Ph(p) deg
22				0.2790	c	Length	m	8.7694E-02	C	U m ³ /s
23						Master-Slave Links		-90.209	D	Ph(U) deg
24						Optional Parameters		0.0000	E	Htot W
25		ideal				Solid type		-11.907	F	Edot W
26	▢	3	HX	Hot HX						
27		Same	1a	1.2920E-02	a	Area	m ²	7.1519E+04	A	p Pa
28				0.3930	b	GasA/A		0.38756	B	Ph(p) deg
29				6.0000E-02	c	Length	m	9.6763E-02	C	U m ³ /s
30				4.8300E-04	d	y0	m	-91.20	D	Ph(U) deg
31				2210.0	e	HeatIn	W	2210.0	E	Htot W
32						Master-Slave Links		-95.846	F	Edot W
33						Possible targets		557.92	G	GasT K
34		ideal				Solid type		563.81	H	SolidT K
35	▢	4	STKCIRC	Honey Stack						
36		Same	1a	1.2920E-02	a	Area	m ²	6.5700E+04	A	p Pa
37				0.8100	b	GasA/A		2.7530	B	Ph(p) deg
38				0.2790	c	Length	m	0.15991	C	U m ³ /s
39				5.0000E-04	d	radius	m	-85.386	D	Ph(U) deg
40				5.0000E-05	e	Lplate	m	2210.0	E	Htot W
41						Master-Slave Links		170.63	F	Edot W
42								557.92	G	TBeg K
43		stainless				Solid type		306.39	H	TEnd K

44	5 HX	Ambient HX						
45		1.2670E-02	a Area	m ²	6.3081E+04	A p	Pa	
46		0.4860	b GasA/A		3.2510	B Ph(p)	deg	
47		5.0800E-02	c Length	m	0.16758	C U	m ³ /s	
48		4.0600E-04	d y0	m	-85.829	D Ph(U)	deg	
49	Gues	-2125.1	e HeatIn	W	84.898	E Htot	W	
50	Targ	303.00	f SolidT	K	84.898	F Edot	W	
51	Master-Slave Links				306.39	G GasT	K	
52	ideal	Solid type			303.00	H SolidT	K	
53	6 ANCHOR	subsequent duct is water jacketed						
54	7 DUCT	Ambient Duct						
55	Same 5a	1.2670E-02	a Area	m ²	6.9652E+04	A p	Pa	
56		0.3990	b Perim	m	-176.59	B Ph(p)	deg	
57		3.6500	c Length	m	1.8500E-05	C U	m ³ /s	
58	Master-Slave Links				-176.59	D Ph(U)	deg	
59	Optional Parameters				0.6443	E Htot	W	
60	ideal	Solid type			0.6443	F Edot	W	
61	8 SURFACE	Ambient End						
62	Same 5a	1.2670E-02	a Area	m ²	6.9652E+04	A p	Pa	
63					-176.59	B Ph(p)	deg	
64					5.9054E-16	C U	m ³ /s	
65					-87.915	D Ph(U)	deg	
66					4.7707E-13	E Htot	W	
67	ideal	Solid type			4.7707E-13	F Edot	W	
68	9 HARDEND	target this to seal the end						
77	10 RPN	ensure all ambient-duct dissipation goes to water jacket						
78	Targ	0.0000	a G or T		-1.1369E-13	A ChngMe		
79	5E 5F -							
80								

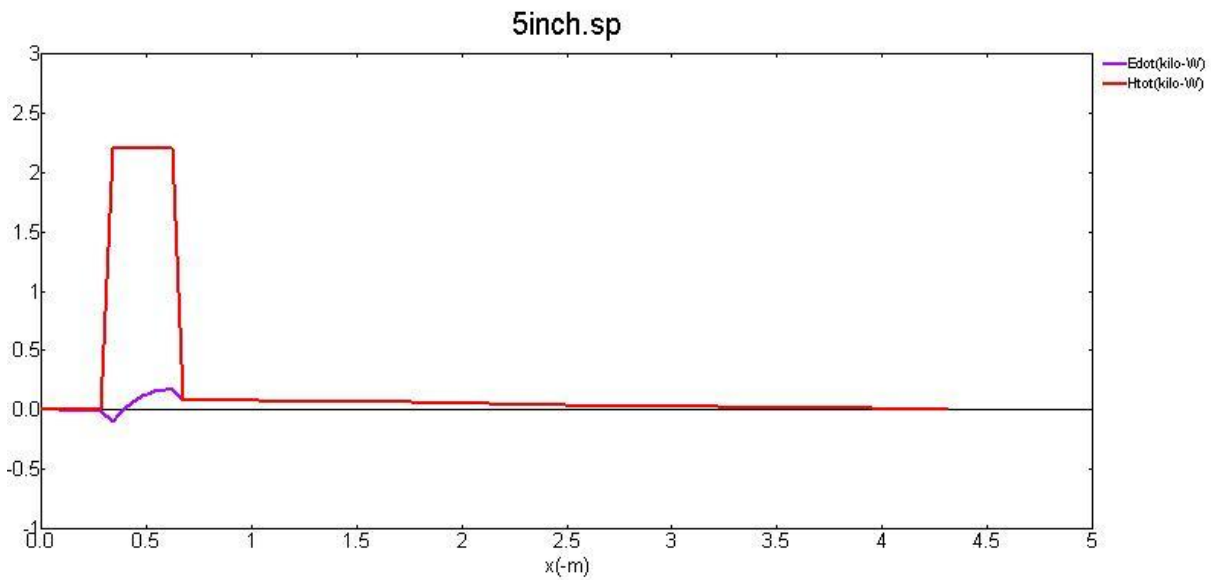
Στα δεδομένα (με μπλε χρώμα) έχουμε δώσει τις διαστάσεις και τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής σύμφωνα με το [44]. Στα αποτελέσματα (με πράσινο χρώμα) παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία: το πραγματικό (A) και φανταστικό (B) μέρος της πίεσης σε Pa , η το πραγματικό (C) και φανταστικό (D) μέρος της ταχύτητας του αερίου σε m^3/sec η συνολική ισχύς \dot{H}_{tot} σε $Watt$ (E) και η ακουστική ισχύς \dot{E}_{dot} επίσης σε $Watt$ (F) κάθε τμήματος. Στους εναλλάκτες παρουσιάζονται επιπλέον η θερμοκρασία του αερίου (G) σε $Kelvin$ καθώς και η στερεή θερμοκρασία (H) ενώ στις στοίβες οι θερμοκρασίες εισόδου (G) κ εξόδου (H) από τη στοίβα.

Η επιλογή guess και target έγινε με βάση και πάλι το [44]. Πιο συγκεκριμένα τα 9a και 9b, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της $1/z_n$ έχουν επιλεγεί σαν targets για να θέσουν τη $U_l = 0$ στο κλειστό άκρο του αντηχείου. Οι υπόλοιπες επιλογές για το ποιές μεταβλητές θα είναι targets ή guesses

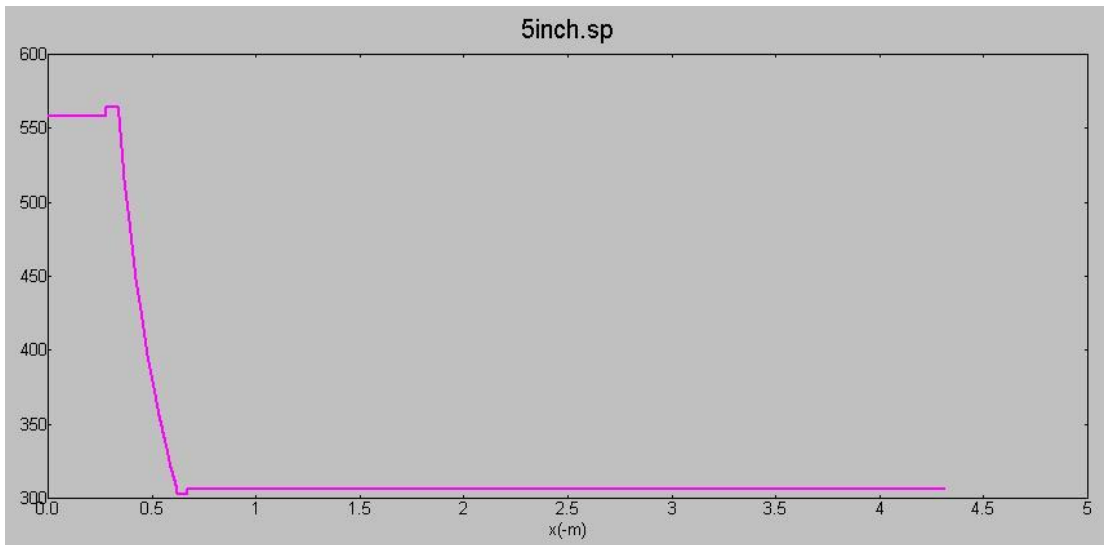
έγιναν με βάση τα όσα αναφέρονται στο [44], στο οποίο ο ενσωματωμένος εξοπλισμός οδηγείται από μία είσοδο σταθερής θερμότητας (είσοδος 3e) και ο εναλλάκτης θερμότητας περιβάλλοντος κρατιέται σε σταθερή θερμοκρασία (target 5f). Η συχνότητα 0b τίθεται σαν guess επειδή θέλουμε το DeltaEC να μας πει σε ποιά συχνότητα το σύστημα θα έπρεπε να ταλαντώνεται αυθόρμητα. Η αρχική πίεση και θερμοκρασία 0d και 0e τίθενται επίσης ως guesses, επειδή θέλουμε το DeltaEC να μας πει τη θερμή θερμοκρασία και το πλάτος της πίεσης στο οποίο το σύστημα θα πρέπει να ταλαντώνεται για τη δοθείσα θερμότητα εισόδου. Οι τελευταίες target και guess, 10a και 5e, επιτρέπουν στο DeltaEC να υπολογίσει την απορριπτόμενη θερμότητα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, υπό τον περιορισμό ότι $\dot{E} = \dot{H}_{tot}$ στη διεπαφή μεταξύ του εναλλάκτη θερμότητας περιβάλλοντος και του μακρού περιβάλλοντος αγωγού του αντηχείου. Αυτό το κρίνουμε ως μια λογική συνθήκη φραγής ενέργειας για το μοντέλο, επειδή ο αγωγός του αντηχείου είναι υδρόψυκτος στη συσκευή αυτή, έτσι η θερμότητα που προκύπτει από την \dot{E} που διαχέεται αναμένεται μάλλον να απομακρύνεται τοπικά από το νερό (αυτό βέβαια δεν είναι απολύτως αληθές), το οριακό στρώμα της θερμοακουστικής διεργασίας αναδιανέμει ενέργεια κατά μήκος του x . Για να ισχύει αυτή η συνθήκη φραγής ενέργειας, το τμήμα ANCHOR ακριβώς πριν το τελικό DUCT παρακάμπτει την προκαθορισμένη συμπεριφορά των τμημάτων που ακολουθούν (θερμικά μονωμένο εκτός από τους εναλλάκτες) διασφαλίζοντας έτσι ότι $\dot{H}_{2,k} = \dot{E}$. Παρακάτω παρουσιάζεται γραφικά η συμπεριφορά της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ισχύος κατά μήκος της μηχανής.



Σχήμα 3-9. Γραφική παρουσίαση του πλάτους της πίεσης (μαύρο) και της φάσης της ταχύτητας (μπλε διακεκομμένο) συναρτήσει του x .

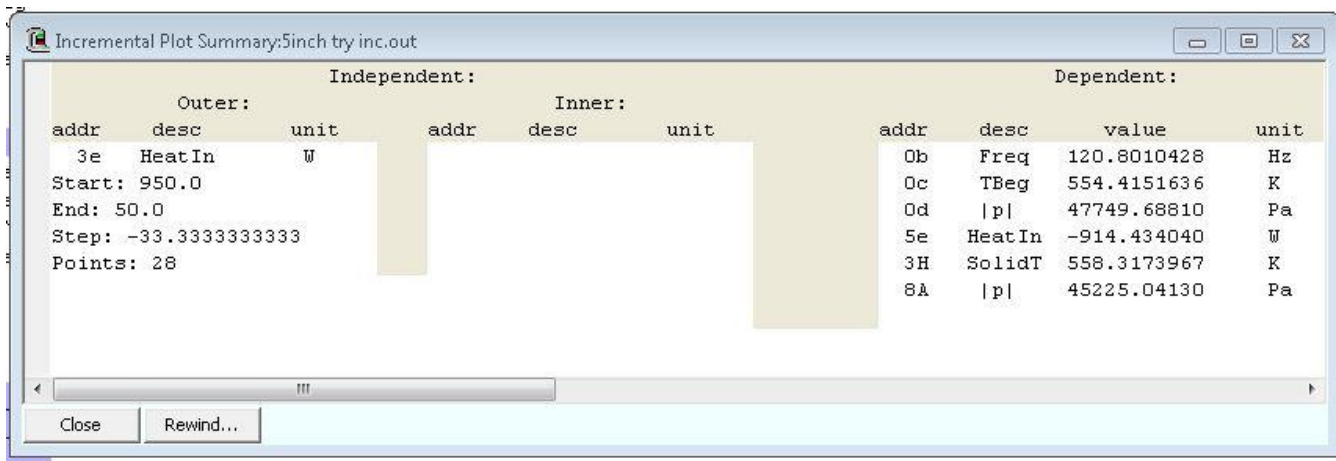


Σχήμα 3-10. Ακουστική (μωβ) και συνολική ισχύς κατά μήκος του x . Η απότομες αλλαγές στην συνολική ισχύ φανερώνουν τη θέση της στοιβάς.



Σχήμα 3-11. Η θερμοκρασία (σε K) κατά μήκος της συσκευής.

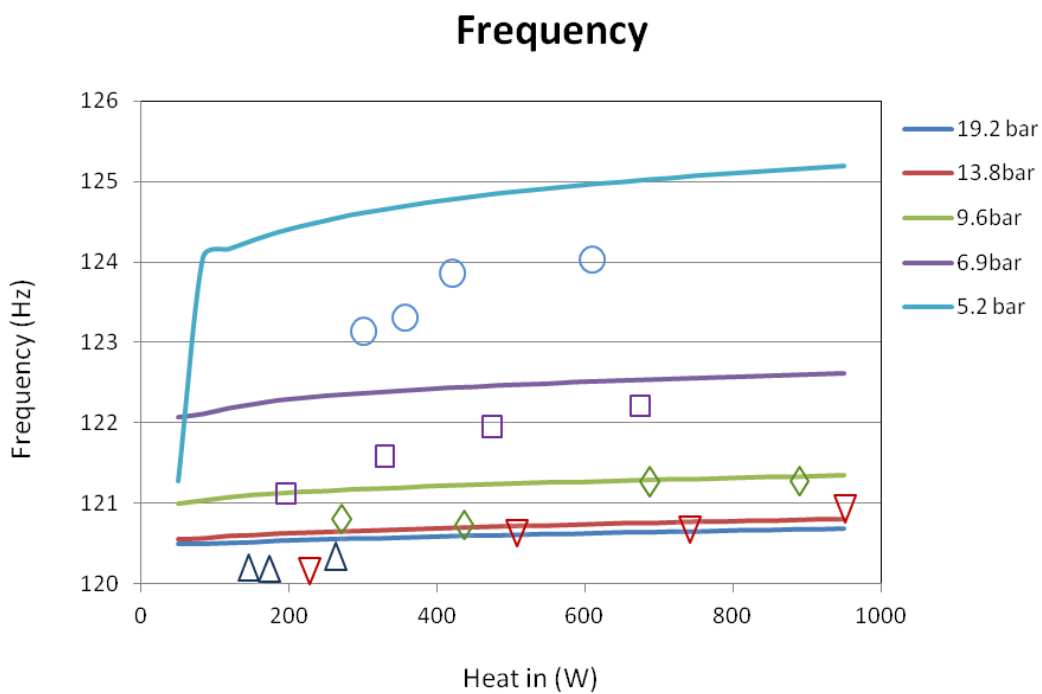
Για να συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά του DeltaEC για τη μηχανή αυτή, ξαναπηγαίνουμε στο DeltaEC και ρυθμίζουμε τις παραμέτρους ώστε το παράθυρο plot να γίνει:



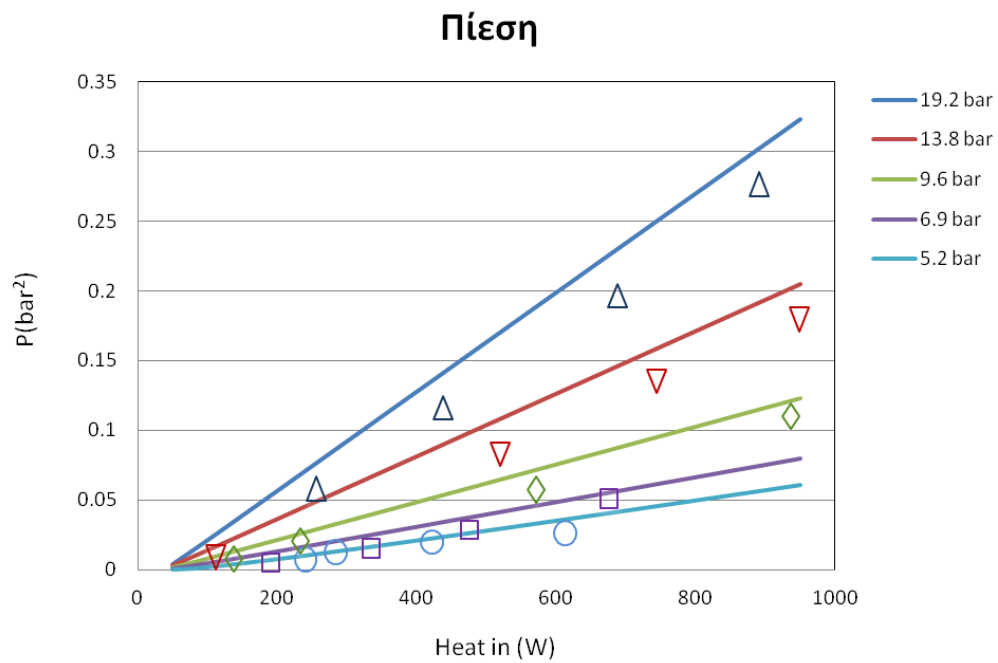
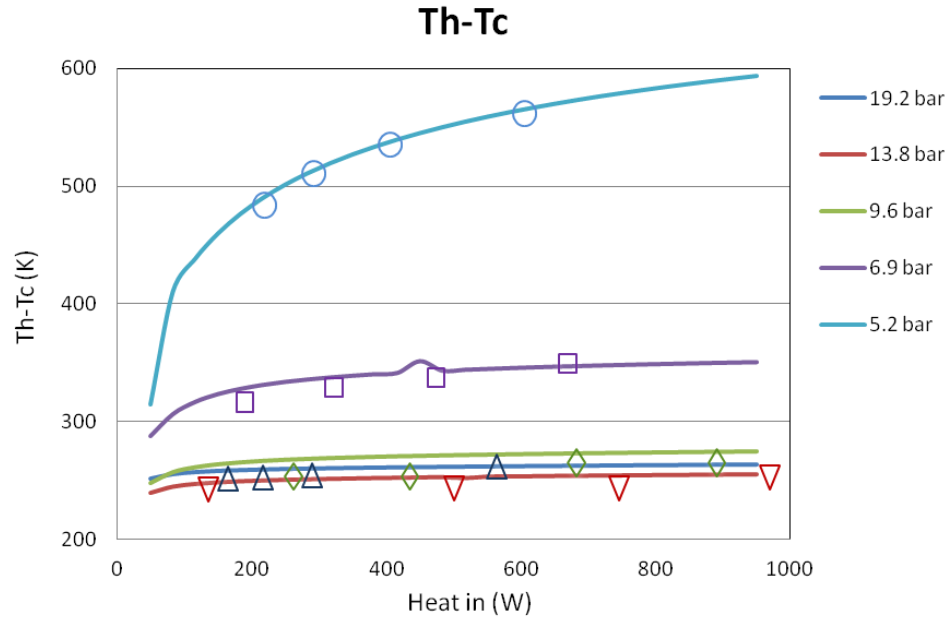
Προσθέτοντας 3H και 8A λίστα των εξαρτημένων μεταβλητών γραφήματος και θέτοντας 3e σαν ανεξάρτητη μεταβλητή, θέτοντας την αρχική, τελική τιμή και την τιμή του βήματος.

Στη συνέχεια ρυθμίζουμε τη μέση πίεση να είναι 19.2 bar και ξανατρέχουμε το πρόγραμμα. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία ρυθμίζουμε τη μέση πίεση στα 13.8 bar και ξανατρέχουμε το πρόγραμμα,

προσαρτώντας τα αποτελέσματα στο αρχείο <.ip> Εκτελούμε το πρόγραμμα άλλες τρεις φορές με τις πιέσεις 9.6, 6.9 και 5.2 bar. Βγαίνουμε από το DeltaEC και διαβάζουμε το αρχείο <.ip> σε ένα πρόγραμμα γραφικών μετατρέποντας το πλάτος της πίεσης στο ψυχρό άκρο από Pascal σε bar τετραγωνίζοντας τον αριθμό. Αφαιρώντας 303 Kelvin από την T_H και προσθέτοντας την διαρροή θερμότητας στο δωμάτιο στην Q_H . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο γράφημα του σχήματος 3-12. Αυτές οι καμπύλες διαφέρουν ελαφρώς από αυτές της [44], εξ αιτίας της συμπερίληψης των μικρών θερμοκρασιακών διαφορών -αέριο σε στερεό- στους εναλλάκτες στο DeltaEC.



(a)



Σχήμα 3- 12. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά του DeltaEC. (a) Συχνότητα. (b) Θερμοκρασιακή διαφορά (c) τετράγωνο της πίεσης προς την ενέργεια του θερμαντήρα για πέντε διαφορετικές πιέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ

4.1 ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ

Η επαλληλία της σταθερής και της ταλαντωτικής ροής δημιουργεί πολλά ενδιαφέροντα φαινόμενα τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν με το DeltaEC. Η μη μηδενική σταθερή ροή επηρεάζει βαθιά την $T_m(x)$ στις στοίβες και τους αναγεννητές, δημιουργεί ολισθήσεις της συχνότητας (φαινόμενο Doppler), αυξάνει την τυρβώδη διάχυση της ακουστικής ισχύος στους αγωγούς και προκαλεί μικρή εξάρτηση του χρονικού μέσου όρου της πίεσης κατά μήκος του x . Σε συστήματα όπως ο ψύκτης του Reid που περιγράφεται παρακάτω, η εξαναγκασμένη από εξωτερικούς παράγοντες σταθερή ροή μας δίνει τη δυνατότητα να προσδίδουμε ψυχρό αέριο χωρίς τη χρήση ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η σταθερή ροή προκαλείται από τις ίδιες τις ταλαντώσεις, φαινόμενο το οποίο ονομάζεται «κύμα συνεχούς ροής» (streaming), κάτι που σε ορισμένες περιπτώσεις προσπαθούμε να εξαλείψουμε (όπως στο θερμοακουστικό υβριδικό κινητήρα Stirling), ενώ σε άλλες περιπτώσεις προσπαθούμε να το κάνουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χωρίς κατάχρηση της διάχυσης της ακουστικής ισχύος (όπως στον εναλλάκτη θερμότητας αυτόνομης κυκλοφορίας).

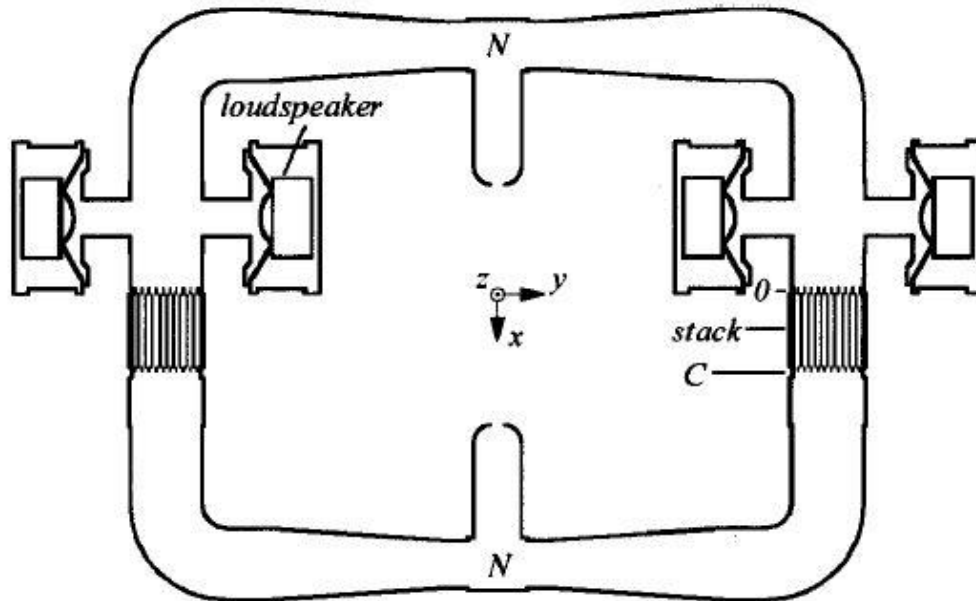
Το DeltaEC υπολογίζει σαν σταθερή ροή \dot{N} , τα mole/sec που ρέουν μέσα στα τμήματα στη διεύθυνση του x με θετική φορά. Μπορεί να οριστεί ή να είναι guess στο τμήμα BEGIN

Η σταθερή ροή μεταφέρει ισχύ $\dot{H}_N = \dot{N}mw_m$ όπου m είναι η μοριακή μάζα και w_m η μέση ενθαλπία ανά μονάδα μάζας.

Η συνολική ισχύς είναι $\dot{H}_{tot} = \dot{H}_{2,k} + \dot{H}_N$ όπου ισχύς της ταλαντωτικής ροής.

4.2 Ο ΨΥΚΤΗΣ ΣΤΑΣΙΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΟΥ REID

4.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ



Σχήμα 4-1. Ο ψύκτης στάσιμου κύματος του Reid. Σχηματική αναπαράσταση υπό κλίμακα. Τα κενά μεταξύ της στοίβας και του εναλλάκτη δεν είναι υπό κλίμακα. [64]

Ο ψύκτης στάσιμου κύματος του Bob Reid [64] είναι φτιαγμένος για τη μελέτη μεγάλης, μη μηδενικής σταθερής ροής \dot{N} στις στοίβες. Το στάσιμο κύμα έχει κόμβους στο κέντρο της κορυφής και στο κέντρο του πυθμένα και εκτός φάσης αντικόμβους πίεσης κοντά στα δεξιά και τα αριστερά ζεύγη ηχείων. Η σταθερή ροή του εργαζόμενου αερίου εισέρχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στον άνω κόμβο πίεσης. Η ροή ψύχεται καθώς περνάει από τις στοίβες έτσι ψυχρό αέριο ρέει από το αντηχείο και εξέρχεται από τον αντικόμβο πίεσης. Η ακουστική ισχύς δεν χάνεται από τις σωληνώσεις επειδή η ροή εισέρχεται και εξέρχεται από τους κόμβους πίεσης.

Μια σχηματική παρουσίαση της συσκευής φαίνεται στο σχήμα 4-1 με τις εσωτερικές διαστάσεις σχεδιασμένες σε κλίμακα. Το σπειροειδές αντηχείο έχει συνολικό εσωτερικό όγκο 0.0915 m^3 που γεμίζονται με μίγμα 92% ήλιο και 8% αργό σε μέση πίεση 3.23 bar . Το σύστημα μπορεί να

λειτουργεί επιτυχώς και με ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά με το μίγμα ηλίου-αργού επιτυγχάνονται μεγαλύτερες και με μεγαλύτερη ακρίβεια μετρούμενες ισχύεις. Τέσσερα ηχεία οδηγούν το αέριο στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού, με ένα ζεύγος στη μία πλευρά του αντηχείου που βρίσκεται σε φάση με το άλλο ζευγάρι στην άλλη μεριά του αντηχείου. Οι δύο κόμβοι πίεσης του στάσιμου κύματος μαρκαρισμένοι με ‘N’ χωρίζουν το αντηχείο σε δύο συμμετρικά μισά (δεξιά κ αριστερό) και παρέχουν βολικές τοποθεσίες είσοδο και έξοδο σταθερής ροής. Οι στοίβες και οι εναλλάκτες τοποθετούνται ώστε να ισχύει $|p_1|/\rho_m a|u_1|$ στο μέσο της στοίβας, όπου a είναι η ταχύτητα του ήχου. Παρ’ ότι αυτή η τοποθέτηση δημιουργεί σημαντικές απώλειες ιξώδους, μειώνει την κλίση της θερμοκρασίας ώστε οι απώλειες θερμότητας μέσω αγωγής να είναι μηδενικές. Για κυκλοφοριακή σταθερότητα σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η συσκευή έχει προσανατολισμό όπως φαίνεται στο σχήμα με τις πλευρές των στοιβών προς το περιβάλλον να κοιτάνε προς τα πάνω.

Το αντηχείο είναι φτιαγμένο από σωλήνα πολυβυνιλοχλωριδίου, ενώ περιβλήματα αλουμινίου περιέχουν τα ηχεία και μερικά κατασκευασμένα κατά παραγγελία εξαρτήματα στερεωμένα μεταξύ τους με κόλλα ή βιδωτά λαστιχένια περιβλήματα. Οι τέσσερις μεγάλου μήκους κωνικοί διαχύτες μειώνουν το περιεχόμενο των αρμονικών στο στάσιμο κύμα σε μηδενικά επίπεδα. Αισθητήρες δυναμικής πίεσης τοποθετούνται σε έξι σημεία στο αντηχείο για να επιβεβαιώσουν ότι οι κόμβοι πίεσης είναι όντως κόμβοι και ότι το σχήμα του κύματος είναι το αναμενόμενο. Τα πλάτη και οι φάσεις των ταλαντούμενων πιέσεων, μετρώνται με έναν αναλυτή δυναμικού σήματος. Η θεμελιώδης συχνότητα αντήχησης των 94 Hz μετράται στο αντηχείο με διαφορά 0.5 Hz όταν χρησιμοποιήσουμε αέριο μίγμα του εμπορίου σε σχέση με το καθαρό εργαστηριακό μίγμα ηλίου-αργού.

Κάθε στοίβα αποτελείται από 142 παράλληλες πλάκες από υαλονήματα, πάχους 0.25 mm , μήκους 15.24 cm στη διεύθυνση της ακουστικής ταλάντωσης που περιέχεται σε ένα σωλήνα αντηχείου από πολυβυνιλοχλωρίδιο εσωτερικής διαμέτρου 15.32 cm . Το κενό μεταξύ των πλακών είναι 0.81 mm όπου διατηρείται από εποξικά καλυμμένα νάιλον μονόινα νήματα, στοιχισμένα κατά τη διεύθυνση της ακουστικής ταλάντωσης. Έτσι το 70% της επιφάνειας τα στοίβας παραμένει ανοιχτό ώστε να ρέει το

αέριο, διαμέσω των πολλών καναλιών ορθογώνιας διατομής μήκους 15.24 cm , ύψους 0.81 mm και πλάτους 12.7 mm , εκτός από κοντά στην περιφέρεια της στοίβας όπου πολλά κανάλια περικόπτονται από την κυκλικό σχήμα της στοίβας. Τα κενά μεταξύ της στοίβας είναι περίπου δύο φορές το βάθος θερμικής διείσδυσης του μίγματος ηλίου-αργού στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Τα υαλονήματα και το νάιλον χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τη θερμική αγωγή κατά μήκος των πλακών της στοίβας στη διεύθυνση της διάδοσης του ήχου.

Πέντε σωλήνες υποστήριξης από υαλονήματα διαμέτρου 3.2 mm εκτείνονται κατά μήκος της διαμέτρου της στοίβας κάθετα στις πλάκες, έχοντας μεταξύ τους κενά 2.54 cm , κατευθύνοντας θερμοστοιχεία μανδύα χαλκού τύπου κονσταντάν διαμέτρου 0.5 mm με «ειδικά όρια σφάλματος» εντός της στοίβας. Ο κόμβος των δέκα θερμοστοιχείων είναι κολλημένος με εποξική ρητίνη στην επιφάνεια μιας πλάκας σε δέκα αξονικά ισαπέχουσες θέσεις κατά μήκος του ορθογωνικού καναλιού στο κέντρο της στοίβας.

Πάνω από κάθε στοίβα και πολύ κοντά σ' αυτήν υπάρχει ένας υδρόψυκτος, θερμοκρασίας περιβάλλοντος εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει την άχρηστη θερμότητα από τον ψύκτη στο περιβάλλον. Ο εναλλάκτης εκτείνεται 1.27 cm κατά τη διεύθυνση της ακουστικής ταλάντωσης και βρίσκεται μέσα σε μια λαστιχένια θήκη σε σχήμα δακτυλιδιού. Η μονή όχθη του εναλλάκτη αποτελούμενη από οκτώ σωλήνες χαλκού εξωτερικής διαμέτρου 0.48 cm είναι συγκολλημένη με ελαφριά συγκόλληση στην ορειχάλκινη θήκη του εσωτερικής διαμέτρου 14.8 cm και στα 80 φύλλα χαλκού πυκνότητας 0.53 mm που απέχουν μεταξύ τους 1.27 mm . Ένα χάλκινο θερμοστοιχείο τύπου κονσταντάν μετράει τη θερμοκρασία ενός από τα φύλλα. Μία συνολική επιφάνεια 90 cm^2 (το 52% της επιφάνειας της θήκης) είναι ελεύθερη για το ταλαντούμενο αέριο. Η θερμική αντίσταση μεταξύ των σωλήνων χαλκού και του ρέοντος νερού μετρήθηκε $77^\circ\text{C}/\text{kW}$. Η θερμική αντίσταση από το μέσο του φύλλου χαλκού με τους γειτονικούς σωλήνες υπολογίζεται $4^\circ\text{C}/\text{kW}$.

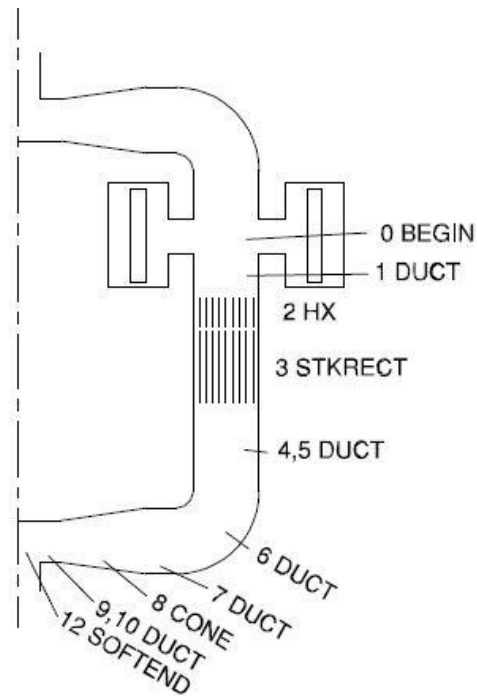
Ειδικές διακλαδώσεις είναι συνδεδεμένες στους σωλήνες εισόδου κ εξόδου του εναλλάκτη.

Ένα χάλκινο θερμοστοιχείο τύπου κωνσταντάν είναι βυθισμένο σε κάθε μία από αυτές τις διακλαδώσεις για να μετράει τη θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού. Ο ρυθμός ροής του νερού στον εναλλάκτη μετράται με ένα ροόμετρο μεταβλητής διατομής. Από τα δύο παραπάνω μετρούμενα μεγέθη υπολογίζεται ο ρυθμός απόρριψης θερμότητας. Το σφάλμα του υπολογισμένου ρυθμού απόρριψης θερμότητας είναι μικρότερο από $\pm 10\%$ από των ενδείξεων, έχει όμως ισχυρή εξάρτηση από τις θερμοακουστικές συνθήκες και το ρυθμός ροής του νερού.

Επιπλέον εναλλάκτες θερμότητας τοποθετούνται στα ψυχρά άκρα των δύο στοιβών. Αυτοί οι ηλεκτρικά θερμαινόμενοι «ψυχροί» εναλλάκτες θερμότητας δεν είναι χρήσιμοι για την ψύξη της σταθερής ροή του αερίου, επιτρέπουν όμως ευέλικτες μετρήσεις και έλεγχο στα πειράματα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τους εναλλάκτες αυτούς για να κρατηθεί η θερμοκρασία της στοιβας σε σταθερή θερμοκρασία ενώ αλλάζει η σταθερή ροή, η μόνη θερμοκρασιακή εξισορρόπηση που απαιτείται είναι στο εσωτερικό της στοιβας, έτσι η ο χρόνος εξισορρόπησης ελαχιστοποιείται και η συχνότητα αντήχησης του συστήματος παραμένει σταθερή. Κάθε ψυχρός εναλλάκτης αποτελείται από μία συνεχή κορδέλα χρωμονικελίνης πάχους $50.8 \mu m$ και πλάτους $6.35 mm$, υποστηριζόμενη από ένα πλαίσιο υαλονημάτων ώστε να σχηματίσει ένα πλέγμα από πίσω ως μπροστά. Η ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία δωματίου της κορδέλας είναι περίπου 30Ω . Η ισχύς από το εναλλασσόμενο ρεύμα ελεγχόμενης τάσης διαχέεται στην κορδέλα χρωμονικελίνης. Ένα ψηφιακό πολύμετρο μετράει την τάση (rms) κατά μήκος της κορδέλας ενώ ένα θερμοστοιχείο κοντά στο κέντρο του πλαισίου υαλονημάτων παρακολουθεί την τοπική θερμοκρασία.

4.2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να προσομοιώσουμε τη συσκευή αυτή στο DeltaEC, αρκεί να θεωρήσουμε μόνο το ένα μισό της συσκευής επειδή το άλλο μισό είναι πανομοιότυπο (με διαφορά φάσης 180°).



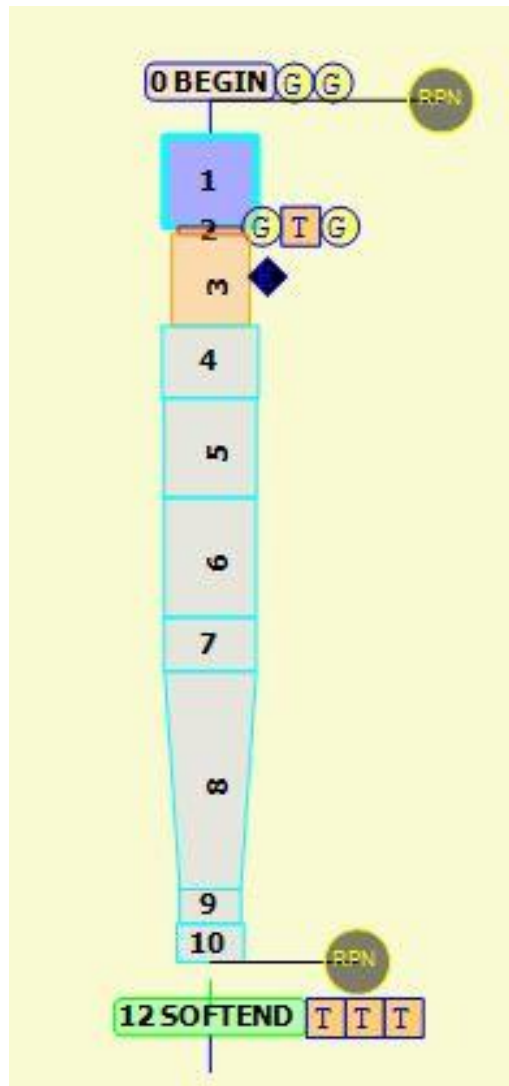
Σχήμα 4-2. Αναπαράσταση ψύκτη Reid.

Εστιάζοντας μόνο από θερμικής πλευράς, ξεκινάμε την προσομοίωση από το δεξί μισό κάτω ακριβώς από τα ηχεία και τελειώνοντάς το εκεί που ενώνεται με το αριστερό μισό, δηλαδή στη θύρα εξόδου της ροής στον πυθμένα. Το τι θα ορίσουμε στο τμήμα BEGIN και τι ως guess και target ακολουθεί την παρακάτω λογική:

Ο ψύκτης οδηγείται σε γνωστή συχνότητα, με γνωστό πλάτος πίεσης κοντά στα ηχεία, γνωστή παροχή αερίου σε γνωστή θερμοκρασία. Η θερμοκρασία του εναλλάκτη θερμότητας του περιβάλλοντος κρατείται σταθερή με ψυκτικό νερό. Κύριος στόχος είναι να μάθουμε τη θερμοκρασία εξόδου του νερού καθώς και κάποια άλλα μεγέθη.

Οπότε η προσομοίωση γίνεται ως εξής:

BEGIN-DUCT-HX-STCRCT-DUCT-DUCT-DUCT-DUCT-CONE-DUCT-DUCT-RPN-SOFTEND-RPN



Σχήμα 4-3. Σχηματική αναπαράσταση DeltaEC

Τα αποτελέσματα μετά την εκτέλεση του προγράμματος εμφανίζονται ως εξής:

reid4* x									
1	reid4 segments 1-7 < Bob 9/97; segs 8-14 < Hiller ntbk, pg one, 10/97								
2	0 BEGIN Initialize in main duct where drivers are attached								
3		3.2388E+05	a	Mean P	Pa				
4		92.000	b	Freq	Hz				
5		303.00	c	TBeg	K				
6		6500.0	d	p	Pa				
7		90.000	e	Ph(p)	deg				
8	Gues	-5.5064E-02	f	U	m^3/s				
9	Gues	188.72	g	Ph(U)	deg				
10		0.6700	i	Ndot	mol/s				
11		0.9200	j	nL					
12	Optional Parameters								
13	HeAr	Gas type							
14	1 DUCT Pre-stack Duct								
15		1.8430E-02	a	Area	m^2	6234.1	A	p	Pa
16		0.4813	b	Perim	m	89.694	B	Ph(p)	deg
17		0.1494	c	Length	m	7.3748E-02	C	U	m^3/s
18	Master-Slave Links								
19	Optional Parameters								
20	ideal	Solid type							
21	2 HX Ambient Heat exchanger								
22		1.7211E-02	a	Area	m^2	6169.1	A	p	Pa
23		0.5227	b	GasA/A		89.800	B	Ph(p)	deg
24		1.2700E-02	c	Length	m	7.4625E-02	C	U	m^3/s
25		6.3500E-04	d	y0	m	6.2375	D	Ph(U)	deg
26	Gues	-135.67	e	HeatIn	W	-66.741	E	Htot	W
27	Targ	300.00	f	SolidT	K	25.808	F	Edot	W
28	Gues	6.4297E-02	g	FracQN		302.37	G	GasT	K
29	Master-Slave Links								
30	copper	Solid type							
31	3 SIKRECT rectangular-pore stack								
32		1.8824E-02	a	Area	m^2	5547.7	A	p	Pa
33		0.7050	b	GasA/A		93.316	B	Ph(p)	deg
34		0.1524	c	Length	m	9.1542E-02	C	U	m^3/s
35		4.0640E-04	d	aa	m	3.8407	D	Ph(U)	deg
36		1.1811E-04	e	Lplate	m	-66.741	E	Htot	W
37		6.3500E-03	f	bb	m	2.3231	F	Edot	W
38	Master-Slave Links								
39						302.37	G	TBeg	K
40	kapton	Solid type							
41	4 DUCT From cold hx to bolt flange, + a half inch								
42		2.0180E-02	a	Area	m^2	5236.2	A	p	Pa
43		0.5036	b	Perim	m	93.302	B	Ph(p)	deg
44		0.1210	c	Length	m	0.1057	C	U	m^3/s
45	Master-Slave Links								
46	Optional Parameters								
47	ideal	Solid type							
48	5 DUCT Duct, beginning 1/2 in below big bolt flange								
49		1.8485E-02	a	Area	m^2	4700.4	A	p	Pa
50		0.4820	b	Perim	m	93.283	B	Ph(p)	deg
51		0.1650	c	Length	m	0.1220	C	U	m^3/s
52	Master-Slave Links								
53	Optional Parameters								
54	ideal	Solid type							
55	6 DUCT Elbow, 6 inch diam, 5 inch radius of curvature on centerline								
56		1.8240E-02	a	Area	m^2	3945.6	A	p	Pa

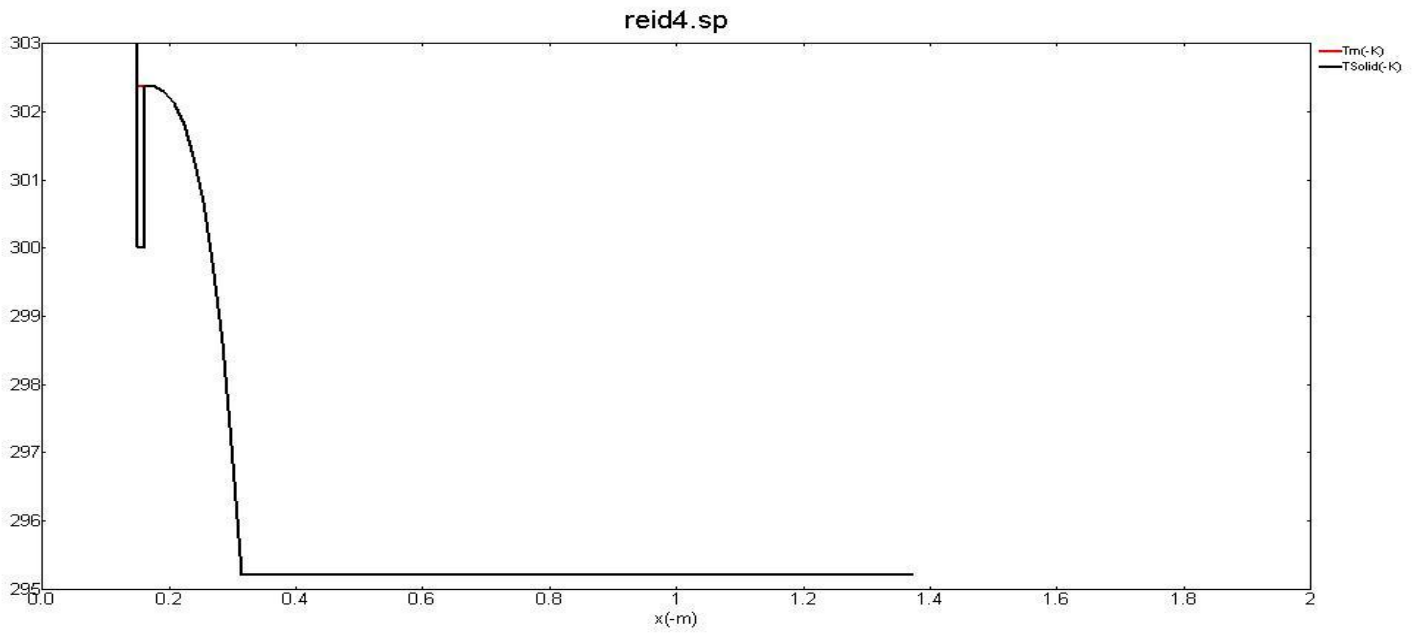
57		0.4788	b Perim	m		93.262	B Ph(p)	deg
58		0.2000	c Length	m		0.13898	C U	m ³ /s
59	Master-Slave Links					3.5917	D Ph(U)	deg
60	Optional Parameters					-66.741	E Htot	W
61	ideal	Solid type				1.5767	F Edot	W
62	7 DUCT	straight part of big black cone						
63		1.8240E-02	a Area	m ²		3579.9	A p	Pa
64		0.4788	b Perim	m		93.253	B Ph(p)	deg
65		8.9000E-02	c Length	m		0.14555	C U	m ³ /s
66	Master-Slave Links					3.5689	D Ph(U)	deg
67	Optional Parameters					-66.741	E Htot	W
68	ideal	Solid type				1.4373	F Edot	W
69	8 CONE	The long black plastic cone						
70	Same 7a	1.8240E-02	a AreaI	m ²		1137.8	A p	Pa
71	Same 7b	0.4788	b PerimI	m		93.224	B Ph(p)	deg
72		0.3635	c Length	m		0.15907	C U	m ³ /s
73	Same 9a	8.1070E-03	d AreaF	m ²		3.5295	D Ph(U)	deg
74	Same 9b	0.3192	e PerimF	m		-66.741	E Htot	W
75	Master-Slave Links					0.48204	F Edot	W
76	Optional Parameters							
77	ideal	Solid type						
78	9 DUCT	little straight section of black cone						
79		8.1070E-03	a Area	m ²		544.78	A p	Pa
80		0.3192	b Perim	m		93.241	B Ph(p)	deg
81		5.7200E-02	c Length	m		0.15949	C U	m ³ /s
82	Master-Slave Links					3.5299	D Ph(U)	deg
83	Optional Parameters					-66.741	E Htot	W
84	ideal	Solid type				0.21918	F Edot	W
85	10 DUCT	half the white "tee", up to the symmetry midpoint						
86		9.8100E-03	a Area	m ²		2.7612E-11	A p	Pa
87		0.3511	b Perim	m		113.82	B Ph(p)	deg
88		6.3500E-02	c Length	m		0.15968	C U	m ³ /s
89		1.0000E-03	d Srough			3.5311	D Ph(U)	deg
90	Master-Slave Links					-66.741	E Htot	W
91	Optional Parameters					-7.6446E-13	F Edot	W
92	ideal	Solid type						
93	11 RPN	Expect Htot = Edot + Ndot*m*enth						
94		0.0000	a G or T			-66.741	A ChngeMe	
95	Edot Ndot m * enth * +							
96	12 SOFTEND	pressure node						
97	Targ	0.0000	a Re(z)			2.7612E-11	A p	Pa
98	Targ	0.0000	b Im(z)			113.82	B Ph(p)	deg
99	TargSame 11A	-66.741	c Htot	W		0.15968	C U	m ³ /s
100						3.5311	D Ph(U)	deg
101						-66.741	E Htot	W
102						-7.6446E-13	F Edot	W
103						-8.4043E-16	G Re(z)	
104						2.2732E-15	H Im(z)	
105						295.21	I T	K
106						-23.968	J p20HL	Pa
107						0.9200	K nL	
108	13 RPN	U mean here (liter/sec)						
109		999.00	a G or T			5.0775	A ChngeMe	
110	Ndot m * rho / 1000 *							

Και εδώ όπως και στη μηχανή στάσιμου κύματος που μοντελοποιήθηκε προηγουμένως, έχοντας δώσει στα δεδομένα (με μπλε χρώμα) τις διαστάσεις και τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής σύμφωνα με το [64]. Η σημαντική διαφορά με τα προηγούμενα μοντέλα είναι ότι εδώ έχουμε ένα επιπλέον δεδομένο στο τμήμα BEGIN το N_{dot} (i) δηλαδή τη σταθερή ροή \dot{N} σε mol/sec. Το πρόγραμμα μας εμφανίζει στα αποτελέσματα (με πράσινο χρώμα) τα εξής στοιχεία: το πραγματικό (A) και φανταστικό (B) μέρος της πίεσης σε Pa, το πραγματικό (C) και φανταστικό (D) μέρος της ταχύτητας του αερίου σε m³/sec τη συνολική ισχύς \dot{H}_{tot} σε Watt (E) και την ακουστική ισχύ \dot{E}_{dot} επίσης σε Watt (F) κάθε τμήματος. Επιπλέον κατά τα γνωστά στους εναλλάκτες τη θερμοκρασία του αερίου (G) σε Kelvin καθώς και τη στερεή θερμοκρασία (H) και στις στοίβες τις θερμοκρασίες εισόδου (G) κ εξόδου (H) από τη στοίβα. Επιπλέον πληροφορούμαστε στον εναλλάκτη και στη στοίβα για την ισχύς της ταλαντωτικής ροής $\dot{H}_{2,k}$ (I).

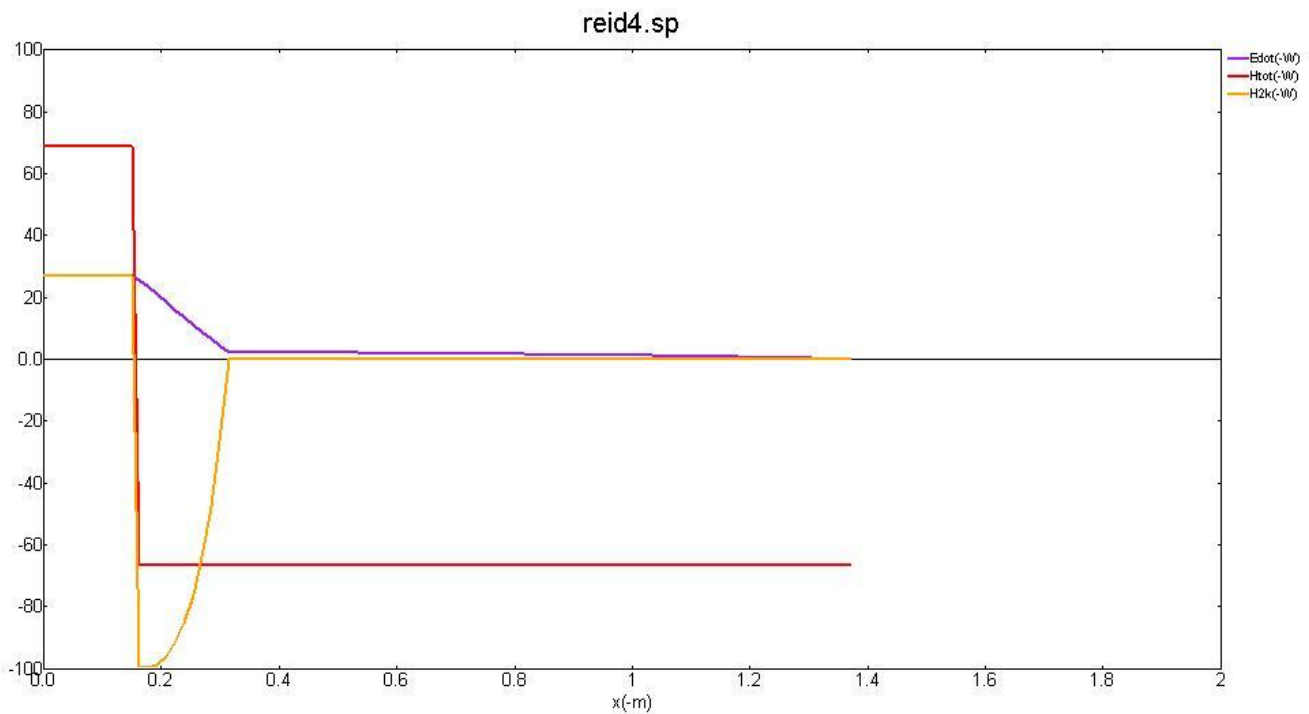
Η μεταβλητή εξόδου 3H μας πληροφορεί πως ο ψύκτης ψυχει το αέριο ως τους 295 Kelvin

addr	desc	%chng	value	unit	titl
3H	STKRE:TEnd	-0.00%	295.21	K	rect

Τα παρακάτω διαγράμματα μας δείχνουν λεπτομέρειες για τη θερμοκρασία κατά μήκος της συσκευής και ότι η ροή ενέργεια είναι ανεξάρτητη από το x στη στοίβα. Παρατηρούμε επίσης ότι η στερεή θερμοκρασία είναι ίση με τη θερμοκρασία του αερίου παντού εκτός από τον εναλλάκτη θερμότητας όπου το στερεό είναι ψυχρότερο του αερίου για να αφαιρείται η θερμότητα από το αέριο στο περιβάλλον.



Σχήμα 4-5. Η θερμοκρασία συναρτήσει του x . Η θερμοκρασία του αερίου (κόκκινο) ταυτίζεται με τη στερεή θερμοκρασία (μαύρο) εκτός του τμήματος που βρίσκονται οι εναλλάκτες και η στοίβα.



Σχήμα 4-6. Ροή ενέργειας στον ψύκτη, \dot{E} με μωβ, \dot{H}_{tot} με κόκκινο και $\dot{H}_{2,k}$ με κίτρινο.

Όταν $\dot{N} \neq 0$ οι οριακές συνθήκες ενέργειας στην αρχή και στο τέλος του μοντέλου είναι συνήθως

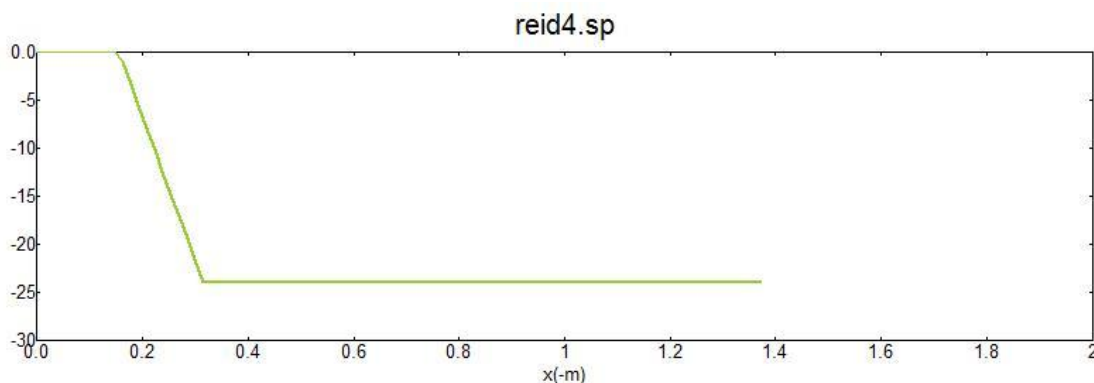
$$\dot{H}_{tot} = \dot{E} + \dot{N}mw_m \quad (3.1)$$

Στη φάση αυτή, οι συνθήκες θέτουν την συνολική ισχύ ως το άθροισμα της ακουστικής ισχύς και της ενθαλπίας της σταθερής ροής. Αυτή η συνθήκη σκοπίμως παραλείπει την αξονική θερμική αγωγή στο αέριο και το στερεό και τη μεταφορά θερμοακουστικής εντροπίας στο αέριο.

Αυτή η οριακή συνθήκη είναι κατάλληλη για μεγάλου μήκους, μεγάλης διαμέτρου αγωγό ή για άλλα τμήματα που ξεκινάνε ή τελειώνουν με $\dot{N} \neq 0$. Αυτή η συνθήκη συναντάται τόσο συχνά που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν προεπιλεγμένη στο τμήμα BEGIN

Μια καινούργια μεταβλητή, η $FracQN$, εμφανίζεται στο τμήμα HX τώρα που έχουμε ροή. Αυτή η μεταβλητή F_{QN} λέει στο DeltaEC το κλάσμα της θερμότητας του εναλλάκτη που χρησιμοποιείται για την αλλαγή ενέργειας στη σταθερή ροή. Το π υπόλοιπο κρατείται στην $\dot{H}_{2,k}$. Συχνά (όπως και εδώ) χρησιμοποιείται ως guess.

Η μεταβλητή εξόδου J στο SOFTEND (τμήμα 12) δίνει $p_{2,o,HL} = -24 Pa$ ενώ στο τμήμα BEGIN ήταν μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται $24 Pa$ στατικής πίεσης για να ωθήσουν τα $5 lit/sec$ αερίου μέσα από τη στοιβα και τον εναλλάκτη. Για να μάθουμε πόσο από την $p_{2,o,HL}$ χρησιμοποιεί ο εναλλάκτης κ πόσο η στοιβα κάνουμε το διάγραμμα της $p_{2,o,HL}$.

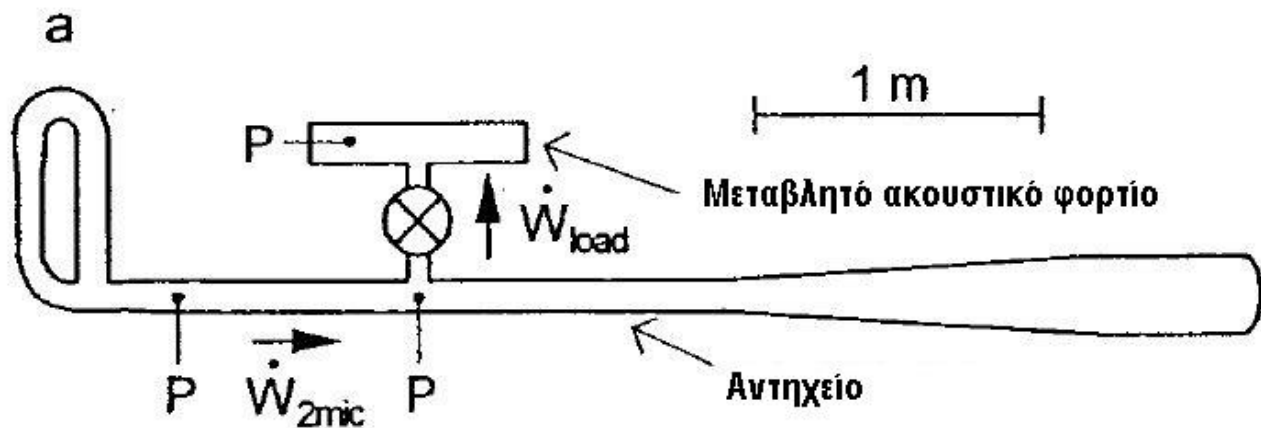


Σχήμα 4-7. Διάγραμμα της $p_{2,o,HL}$ συναρτήσει του x .

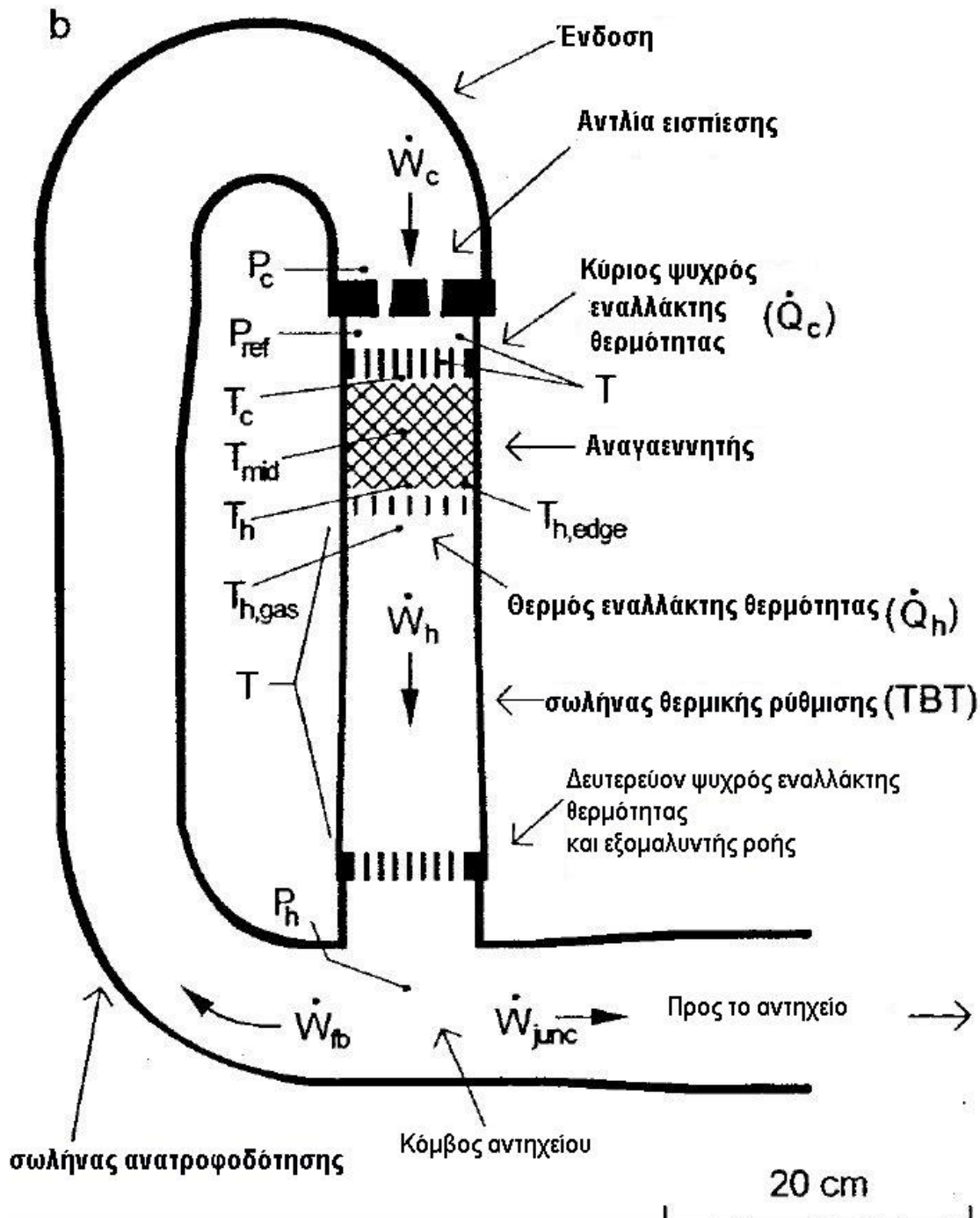
4.3 Η ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ STIRLING

4.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Η υβριδική θερμοακουστική μηχανή Stirling (thermoacoustic-Stirling hybrid engine TASHE)[59], είναι ένας τύπος θερμοακουστικής μηχανής που βασίζεται στα τρέχοντα κύματα και στην ιδανικά αναστρέψιμη μεταφορά θερμότητας. Η μηχανή αυτή υπερτερεί των μηχανών που βασίζονται στα στάσιμα κύματα και στην μη αναστρεπτή μεταφορά θερμότητας πάνω από 50%. Στο πιο αποδοτικό σημείο λειτουργίας, αποδίδει 710 W στο αντηχείο με θερμικό βαθμό απόδοσης 0.3 που αντιστοιχεί στο 41% του Carnot. Στο σημείο λειτουργίας με μέγιστη ισχύ αποδίδει 890 W με θερμικό βαθμό απόδοσης 0.22.



Σχήμα 4-8. Σχηματική αναπαράσταση της υβριδικής θερμοακουστικής μηχανής Stirling υπό κλίμακα[59].



Σχήμα 4-9. Σχηματική αναπαράσταση του δακτυλοειδούς μέρους της μηχανής[59].

Στο σχήμα 4-8 και σχήμα 4-9 φαίνεται η συσκευή σχεδιασμένη σε κλίμακα. Αποτελείται από το αντηχείο μήκους 1/4 του μήκους κύματος, που περιέχει ήλιο πίεσης 30 bar. Το μέρος της μηχανής σε σχήμα δακτυλίου περιέχει εναλλάκτες θερμότητας, αναγεννητές και άλλους αγωγούς απαραίτητους να

αναγκάσουν το ήλιο να εκτελέσει κύκλο του Stirling. Τα υπόλοιπα τμήματα βρίσκονται μετά τον κόμβο του αντηχείου και σχηματίζουν το αντηχείο με το μεταβλητό ακουστικό φορτίο.

Κοντά στην κορφή του δακτυλίου βρίσκεται ο κύριος ψυχρός εναλλάκτης θερμότητας. Ο εναλλάκτης αποτελείται από ένα κέλυφος 299 σωλήνων ανοξείδωτου χάλυβα εσωτερικής διαμέτρου 2.5 mm , μήκους 20 mm , συγκολλημένους σε δύο πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα επίσης, πάχους 1.6 mm . το πάχος των τοιχωμάτων των σωλήνων είναι 0.7 mm . Η διάμετρος του εναλλάκτη είναι 9.5 mm . Οι σωλήνες οι οποίοι είναι παράλληλοι στην ακουστική μετατόπιση μεταφέρουν ήλιο και ψύχονται με ψυχρό νερό (15°C) περνώντας από το κέλυφος. Στα υψηλά πλάτη η διακόρυφη μετατόπιση αερίου είναι περίπου ίση με το μήκος των σωλήνων και ο τυπικός αριθμός Reynolds στους σωλήνες είναι 3000 .

Κάτω από τον κύριο ψυχρό εναλλάκτη βρίσκεται ο αναγεννητής, ο οποίος είναι φτιαγμένος από μια στοίβα ύψους 7.3 cm από 120 σήτες από ανοξείδωτο χάλυβα, διαμέτρου 8.89 cm . Η διάμετρος του σύρματος της σήτας είναι 6 mm . Οι τυχαία στοιβαγμένες σήτες περιέχονται σε ένα περίβλημα λεπτών τοιχωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα για εύκολη αφαίρεση και τοποθέτηση. Το περίβλημα συγκολλείται στις δύο άκρες με 3 πλευρές από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 3.2 mm για να κρατηθούν οι σήτες σε αξονική διεύθυνση αλλά και για να δημιουργηθεί κενό μεταξύ του αναγεννητή και των γειτονικών εναλλακτών.

Στο άνω άκρο το κενό αυτό επιτρέπει στη ροή να εξαπλωθεί σε ολόκληρη την επιφάνεια του αναγεννητή μετά την έξοδό του από τα στενά περάσματα του κυρίου εναλλάκτη. Βασισμένοι στο βάρος του κόσκινου στον αναγεννητή, υπολογίζουμε την αραιότητα του όγκου σε $\phi = 0.72$ και την υδραυλική καμπυλότητα $r_h = 42\mu\text{m}$, μικρότερο δηλαδή από το βάθος θερμικής διεισδυσης δ_k το οποίο είναι από $140\mu\text{m}$ ως $460\mu\text{m}$. Το δοχείο πίεσης είναι φτιαγμένο από Inconel 625 (ASTM B446-Grade 2) και έχει πάχος τοιχωμάτων 4 mm . Αυτό το κράμα επιλέχθηκε για την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, υψηλές θερμοκρασίες καθώς και για τη συγκριτικά μικρή θερμική αγωγιμότητα που παρουσιάζει.

Το κάτω άκρο του αναγεννητή ακουμπά στο θερμό εναλλάκτη θερμότητας. Αποτελείται από

μία κορδέλα νικελίου-χρωμίου (Ni–Cr) πλάτους 0.64 cm και μήκους 3.5 m που περιελίσσει ένα αλουμινένιο πλαίσιο. Η κορδέλα χωρίζεται σε τρία ισομήκη τμήματα αντίστασης $4\ \Omega$ και οδηγούνται από τριφασική τάση 208 V σε σχηματισμό δέλτα. Οι ηλεκτρικοί αγωγοί εισέρχονται κάθετα στον άξονα του δοχείου της πίεσης κάτω ακριβώς από το θερμό εναλλάκτη. Αυτή η τοποθεσία επιλέχθηκε έτσι ώστε να μην ενοχλείται η ροή στο σωλήνα θερμικής ρύθμισης. Η ροή ισχύος στον εναλλάκτη μετريέται με τη χρήση ενός βατόμετρου του εμπορίου ακρίβειας 0.2% . Ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με 55 kW και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αερίου είναι $725\text{ }^\circ\text{C}$.

Ο σωλήνας θερμικής ρύθμισης (thermal buffer tube –TBT) είναι ένας κωνικός ανοιχτός κύλινδρος φτιαγμένος από Inconel 625 επίσης και ρυθμίζει τη θερμότητα μεταξύ της θερμοκρασίας του θερμού εναλλάκτη και της θερμοκρασίας δωματίου. Η εσωτερική του διάμετρος είναι πολύ μεγαλύτερη από το βάθος θερμικής διείσδυσης και το μήκος του πολύ μεγαλύτερο από την διακόρυφη μετατόπιση αερίου (4 cm) στα υψηλά πλάτη. Η εσωτερική επιφάνεια είναι επικαλυμμένη με 1 mm φινίρισμα για να εξασφαλιστεί ότι η τραχύτητα της επιφάνειας είναι πολύ μικρότερη από το ιξώδες και τα βάθη θερμικής διείσδυσης. Η πυκνότητα των τοιχωμάτων είναι 4 mm για ολόκληρο το μήκος του σωλήνα. Τα υψηλότερα 8 cm του σωλήνα θερμικής ρύθμισης είναι κανονικός κύλινδρος ενώ τα υπόλοιπα 16 cm έχουν 1.35° κωνική κλίση. Αυτό το σχήμα χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιηθεί το κύμα σταθερής ροής του οριακού στρώματος (Rayleigh streaming).

Στο κατώτερο άκρο του σωλήνα θερμικής ρύθμισης βρίσκεται ένας εξομαλυντής ροής φτιαγμένος από πέντε στρώματα από 22 χάλκινες σήτες με διάμετρο σύρματος 0.4 mm , ο οποίος εξασφαλίζει ότι η ροή εισέρχεται στον πυθμένα του σωλήνα θερμικής ρύθμισης χωρικά ομοιόμορφα. Πριν την τοποθέτηση του εξομαλυντή ροής, χανόταν περίπου 1 kW θερμότητας στην περιοχή αυτή.

Στη συνέχεια, υπάρχει ο δευτερεύον, υδρόψυκτος, ψυχρός εναλλάκτης θερμότητας κάτω από το κατώτερο μέρος του σωλήνα θερμικής ρύθμισης σε θερμοκρασία δωματίου. Περιέχει 109 σωλήνες ανοξείδωτου χάλυβα, εσωτερικής διαμέτρου 4.6 mm , μήκους 10 mm που είναι συγκολλημένοι σε δύο πλάκες από ανοξείδωτο ατσάλι πάχους 1.6 mm . Αν και οι δύο τύποι κύματος καταστέλλονται, τότε ο

εναλλάκτης αυτός εμποδίζει τη διαρροή θερμότητας από τα τοιχώματα του σωλήνα θερμικής ρύθμισης καθώς και τη διαρροή θερμότητας με ακτινοβολία από το θερμό εναλλάκτη.

Μερικά θερμοστοιχεία τύπου K τοποθετούνται για να γίνονται μετρήσεις στο τμήμα Stirling της μηχανής. Δύο θερμοστοιχεία τοποθετούνται κοντά στον κύριο ψυχρό εναλλάκτη, το ένα αιωρείται ελεύθερο σε έναν από τους σωλήνες και το άλλο τοποθετείται στο ήλιο, σε απόσταση 1 cm από τα εξαρτήματα του εναλλάκτη. Υπάρχουν επίσης άλλα 2 θερμοστοιχεία στην είσοδο και στην έξοδο του ψυχρού νερού τροφοδοσίας του εναλλάκτη. Αυτά τα τέσσερα θερμοστοιχεία μας επιτρέπουν να αξιολογήσουμε την απόδοση του εναλλάκτη. Εν συνεχεία τέσσερα θερμοστοιχεία βρίσκονται σε επαφή με την έδραση της σήτας του αναγεννητή. Το πρώτο βρίσκεται στο κέντρο του ψυχρού άκρου του αναγεννητή και τα άλλα τρία βρίσκονται μέσα σε στενές οπές που ανοίγονται στον αναγεννητή. Τα δύο θερμοστοιχεία τοποθετούνται το ένα κοντά στο θερμό άκρο και το άλλο αξονικά. Το τελευταίο θερμοστοιχείο βρίσκεται κοντά στο θερμό άκρο αλλά σε μια οπή 1 cm μέσα στον αναγεννητή. Τα τρία αυτά θερμοστοιχεία επιτρέπουν μετρήσεις της αξονικής θερμοκρασίας κατά μήκος του αναγεννητή. Αυτές οι θερμοκρασίες είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό και την εξάλειψη του κύματος συνεχούς ροής Gedeon. Το έντονο κύμα συνεχούς ροής ή φαινόμενο Rayleigh προκαλεί άνιση θέρμανση στην θερμή μεριά του αναγεννητή. Στην συγκεκριμένη μηχανή μετρήθηκαν θερμοκρασιακές διαφορές έως 90°C μεταξύ του κέντρου και των άκρων της θερμής μεριάς του αναγεννητή, πριν την τοποθέτηση του εξομαλυντή ροής. Μετά την τοποθέτησή του, η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά ήταν 30°C . τέλος υπάρχουν 8 θερμοστοιχεία στο εξωτερικό τοίχωμα του σωλήνα θερμικής ρύθμισης τοποθετημένα ανά 2.5 cm .

Στη συνέχεια, δεξιόστροφα στην σπείρα βρίσκονται ο κόμβος του αναγεννητή, ο σωλήνας ανατροφοδότησης και η ένδοση. Ο κόμβος είναι ένα εξάρτημα σχήματος T από ανοξείδωτο χάλυβα, ονομαστικής διαμέτρου $3\frac{1}{2}\text{ in}$. Η εσωτερική διάμετρος του είναι περίπου 9 cm ο σωλήνας ανατροφοδότησης αποτελείται από τρία ξεχωριστά τμήματα σωλήνωσης. Το πρώτο τμήμα είναι ένας σωλήνας μεγάλης καμπυλότητας μειούμενης διαμέτρου ονομαστικής τιμής από $3\frac{1}{2}\text{ in}$ σε 3 in . Το

μήκος τόξου του σωλήνα είναι 20.9 cm και η τελική εσωτερική διάμετρος 7.8 cm . Όλα τα γρέζια και οι ανωμαλίες στο εσωτερικό του σωλήνα έχουν εξαλειφθεί με λείανση και κατεργασία με φρέζα. Το επόμενο τμήμα είναι ο σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα ονομαστικής διαμέτρου 3 in μήκους 25.6 cm . Η εσωτερική διάμετρος αυτού του σωλήνα είναι επικαλυμμένη με $2\text{ }\mu\text{m}$ φινίρισμα για να μειωθούν οι απώλειες ιξώδους στα μεγάλα πλάτη. Στο τμήμα αυτό του σωλήνα υπάρχει ένας κόμβος ολίσθησης εξισορροπημένος από πίεση, ο οποίος επιτρέπει θερμική διαστολή στο σωλήνα θερμικής ρύθμισης και στη θήκη του αναγεννητή. Όταν η θερμή θερμοκρασία αυξάνει από $25\text{ }^\circ\text{C}$ σε $725\text{ }^\circ\text{C}$ αυτά τα στοιχεία διαστέλλονται περίπου $3\text{ }\mu\text{m}$. Χωρίς τον κόμβο ολίσθησης η τάση αυτή θα προκαλούσε παραμόρφωση στα θερμά στοιχεία. Το τελευταίο τμήμα είναι ένας κατεργασμένος κώνος που προσαρμόζεται στο σωλήνα ένδοσης ονομαστικής διαμέτρου 3 in , η αρχική του και η τελική του διάμετρος είναι 7.8 cm και 10.2 cm αντίστοιχα και το μήκος του 10.2 cm δίνοντας έτσι μία γωνία κώνου 13.5° . Αυτή η βαθμιαία αλλαγή της επιφάνειας, απαλές κυρτώσεις και λείες επιφάνειες χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες λόγω αποκόλλησης ροής και ιξώδους. Η ένδοση αποτελείται από 2 σωλήνες ονομαστικής διαμέτρου 4 in , μικρής καμπυλότητας φτιαγμένη από ανθρακούχο χάλυβα. Η εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα έχει υποστεί αμμοβολή για να αφαιρεθεί ένα στρώμα μπογιάς. Παρ' ότι αυτή η αφαίρεση έχει αφήσει την επιφάνεια αρκετά τραχιά οι ακουστικές ταχύτητες στην ένδοση είναι χαμηλές και έτσι η τραχιά επιφάνεια δεν θα πρέπει να επηρεάσει σημαντικά τις απώλειες. Ο εσωτερικός όγκος της ένωσης είναι 2830 cm^3 . Μεταξύ της ένδοσης και του κύριου ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας βρίσκεται μια συσκευή η οποία ονομάζεται με τον όρο αντλία εισπίεσης (jet pump) η οποία σταματά την ροή στάσιμου κύματος συνεχούς ροής Gedeon.

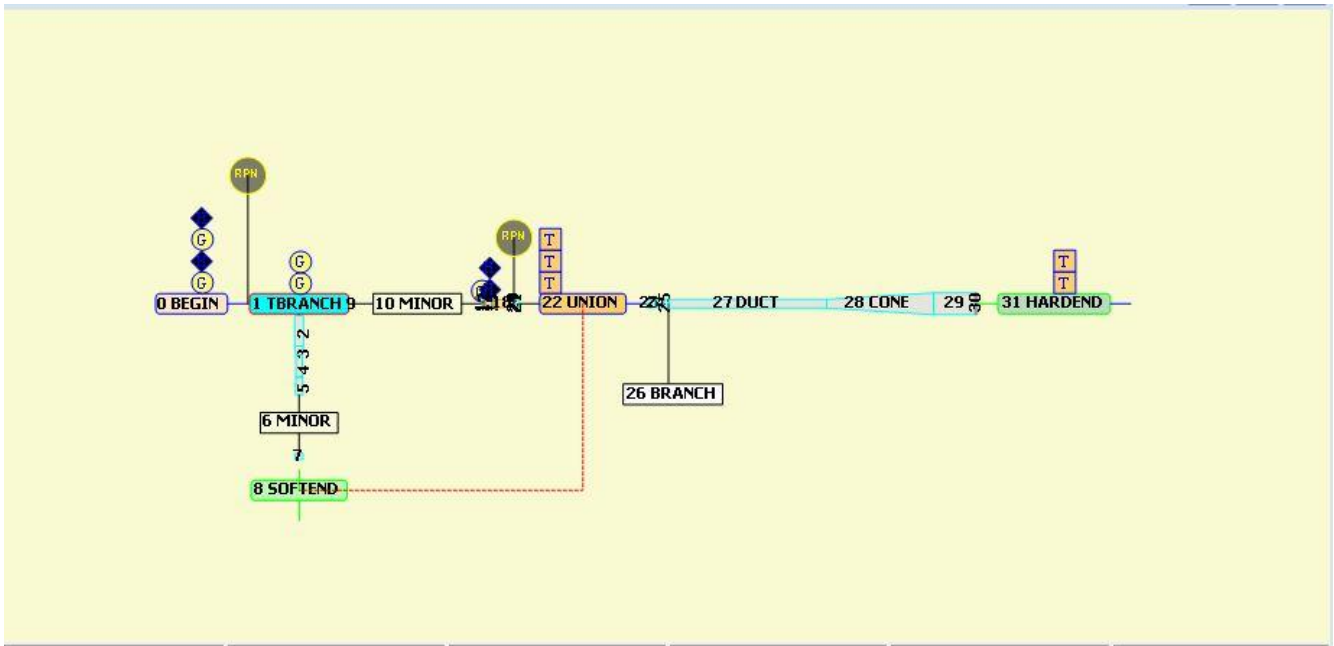
Το αντηχείο το οποίο ενώνεται στον κόμβο μεταξύ του σωλήνα θερμικής ρύθμισης και του αγωγού ανατροφοδότησης αποτελείται από τρεις τομείς. Ο πρώτος τομέας είναι ένας κατεργασμένος κωνικός σωλήνας από ανθρακούχο χάλυβα που μετατρέπει την ονομαστική διάμετρο $3\frac{1}{2}\text{ in}$ σχήματος T σε 4 in . Η αρχική και η τελική εσωτερική διάμετρος είναι 9 cm και 10.2 cm αντίστοιχα και το μήκος 10.2 cm δίνοντας έτσι 6.8° κωνικής κλίσης. Η μικρή αυτή κλίση χρησιμοποιείται για να εμποδιστεί η

αποκόλληση ροής απ' τα τοιχώματα του κώνου. Το κύριο τμήμα του αντηχείου είναι ένας σωλήνας 4 in ονομαστικής διαμέτρου μήκους 1.90 m. από ανθρακούχο χάλυβα. Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 10.2 cm και είναι επικαλυμμένη με 2 μm φινίρισμα. Η διάμετρος του αντηχείου αυξάνεται κοντά στον αντικόμβο ταχύτητας στο τέλος του κυρίου τμήματος του αντηχείου με σκοπό να μειωθούν οι ακουστικές ταχύτητες εκεί. Αυτή η αύξηση της επιφάνειας τείνει να αυξήσει τις απώλειες, αλλά η μείωση της ταχύτητας είναι πιο σημαντική στα μεγάλα πλάτη όπου οι ακουστικές απώλειες αυξάνουν όσο ο κύβος του πλάτους. Το τελευταίο τμήμα του αντηχείου αποτελείται από έναν κώνο με κλίση 7° που αυξάνει την εσωτερική διάμετρο από 10.2cm σε 25.5 cm μετά τα 1.22m. Η μεγάλη πλευρά του κώνου είναι κλεισμένη με έναν σωλήνα διαμέτρου 25.5 cm μήκους περίπου 52 cm που καταλήγει σε ένα 2:1 ελλειψοειδές καπάκι. Το κύριο τμήμα του αντηχείου έχει 3 διόδους διαμέτρου 1.6 cm. οι δύο από αυτές εντοπίζονται στο τέλος και η τρίτη στο κέντρο του αντηχείου. Ένα μεταβλητό ακουστικό φορτίο μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε από τις δύο διόδους κοντά στον κόμβο του αντηχείου. Δύο πιεζοαντιστάσεις, αισθητήρες πίεσης τοποθετούνται στο αντηχείο και μια τρίτη στο μεταβλητό ακουστικό φορτίο που μας επιτρέπει μετρήσεις W_{2mic} και W_{load} . Όλες οι μετρήσεις ακουστικής πίεσης γίνονται με έναν ενσωματωμένο ενισχυτή που χρησιμοποιεί την ακουστική πίεση πάνω από τον κύριο ψυχρό εναλλάκτη σαν σήμα αναφοράς.

4.3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.3.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ

Στην αρχή φτιάχνουμε το μοντέλο χωρίς σταθερή ροή. Η προσομοίωση της συσκευής φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4-10. Σχηματική αναπαράσταση συσκευής

Οι διαστάσεις και οι επιλογή συνθηκών λειτουργίας έγιναν με βάση το [64]. Η επιλογή των μεταβλητών $guess$ και $target$ έγινε με τον ακόλουθο τρόπο: Θέλουμε το πρόγραμμα να υπολογίσει τη συχνότητα και το πλάτος ταλάντωσης της πίεσης για δοσμένη \dot{Q}_H στο θερμό εναλλάκτη. Άρα τα $0b$ και $0d$ ορίζονται σαν $guess$ μεταβλητές. Για να έχουμε καλύτερη σύγκλιση προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις μεταβλητές $guess$ και $target$. Για αυτό το λόγο δε θα χρησιμοποιήσουμε την αρχική θερμοκρασία αερίου $0c$ ως $guess$ και τη στερεή θερμοκρασία του εναλλάκτη $12f$ σαν μεταβλητή $target$. Θα δώσουμε μια τιμή στο $0c$ ώστε να επιστρέφει στη μεταβλητή $12H$ κοντά στους 25°C . Επίσης αποφεύγουμε να θέσουμε τη θερμότητα του θερμού εναλλάκτη $20e$ σαν $guess$ και την $H_{tot} = 0$ σαν $target$ με τη χρήση ενός RPN (τμήμα 19) για να προβλεφτεί ότι η θερμότητα του θερμού εναλλάκτη θα είναι σύμφωνη με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο. Παρ' όλες τις απλουστεύσεις εξακολουθούμε να έχουμε 5 μεταβλητές $target$ και 5 μεταβλητές $guess$ καθώς και 31 τμήματα.

Guesses:				Targets:			
desc	addr	value	unit	desc	addr	value	Results addr value unit
BEGIN:Freq	0b	85.748	Hz	UNION: p	22b	2.6397E+05	22A 2.6397E+05 Pa
BEGIN: p	0d	3.1748E+05	Pa	UNION:Ph(p)	22c	1.1149	22B 1.1149 deg
TBRAN:Re(Zb)	1a	-1.8483E+07	Pa-s/m ³	UNION:T	22d	325.00	22G 325.00 K
TBRAN:Im(Zb)	1b	1.3735E+07	Pa-s/m ³	HARDE:R(1/z)	31a	0.0000	31G 6.8653E-14
TX:HeatIn	12e	-1594.9	W	HARDE:I(1/z)	31b	0.0000	31H -9.6579E-12

Και το σύνολο των αποτελεσμάτων είναι:

```

1  tashe1 Backhaus 1998 TASHE
2  0 BEGIN the setup
3      3.1030E+06 a Mean P Pa
4  Gues      85.748 b Freq Hz
5              325.00 c TBeg K
6  Gues      3.1748E+05 d |p| Pa
7              0.0000 e Ph(p) deg
8              0.0000 f |U| m^3/s
9              0.0000 g Ph(U) deg
10 Optional Parameters
11 helium Gas type
12  1 TBRANCH Split up the flow
13 Gues      -1.8483E+07 a Re(Zb) Pa-s/m^3      3.1748E+05 A |p| Pa
14 Gues      1.3735E+07 b Im(Zb) Pa-s/m^3      0.0000 B Ph(p) deg
15              -1263.0 c HtotBr W      1.3787E-02 C |U| m^3/s
16 Master-Slave Links      -143.38 D Ph(U) deg
17 Optional Parameters      -1263.0 E HtotBr W
18              -1756.6 F EdotBr W
19              1756.6 G EdotTr W
20  2 DUCT 180 bend plus brass connecting flange (pg 27 book 4)
21      8.1500E-03 a Area m^2      3.1146E+05 A |p| Pa
22              0.3200 b Perim m      0.22309 B Ph(p) deg
23              0.3540 c Length m      0.10379 C |U| m^3/s
24              6.0000E-04 d Srough      -96.128 D Ph(U) deg
25 Master-Slave Links      -1263.0 E Htot W
26 Optional Parameters      -1787.9 F Edot W
27 stainless Solid type
28  3 CONE 4" to 3" Concentric reducer (pg 36 book 4)
29      8.1070E-03 a AreaI m^2      3.0666E+05 A |p| Pa
30              0.3190 b PerimI m      0.31576 B Ph(p) deg
31              0.1020 c Length m      0.12429 C |U| m^3/s
32      Same 4a 4.5600E-03 d AreaF m^2 Mstr      -95.095 D Ph(U) deg
33              0.2390 e PerimF m 3d      -1263.0 E Htot W
34              6.0000E-04 f Srough      -1797.2 F Edot W
35 Master-Slave Links
36 Optional Parameters
37 stainless Solid type
38  4 DUCT 3" FB Duct - Length given in concept.skf
39      4.5600E-03 a Area m^2 Mstr      2.8655E+05 A |p| Pa
40              0.2390 b Perim m 4a      0.66946 B Ph(p) deg
41              0.2600 c Length m      0.16101 C |U| m^3/s
42              3.0000E-04 d Srough      -93.875 D Ph(U) deg
43 Master-Slave Links      -1263.0 E Htot W

```


86		0.1850	e	PerimF	m		1263.0	E	Htot	W
87		5.0000E-04	f	Strough			1742.9	F	Edot	W
88	Master-Slave Links									
89	Optional Parameters									
90	ideal	Solid type								
91	10 MINOR	minor loss here								
92	Same	9d	1.1400E-04	a	Area	m ²	3.0872E+05	A	p	Pa
93			0.8000	b	K+		-1.9125	B	Ph(p)	deg
94			7.0000E-02	c	K-		1.3576E-02	C	U	m ³ /s
95							35.646	D	Ph(U)	deg
96							1263.0	E	Htot	W
97							1661.2	F	Edot	W
98	11 DUCT	jetting space								
99			6.8250E-03	a	Area	m ²	3.0876E+05	A	p	Pa
100			0.2930	b	Perim	m	-1.9263	B	Ph(p)	deg
101			1.9000E-02	c	Length	m	1.1505E-02	C	U	m ³ /s
102			5.0000E-04	d	Strough		18.938	D	Ph(U)	deg
103	Master-Slave Links									
104	Optional Parameters									
105	ideal	Solid type								
106	12 TX	Main room temp water HX (pg 90 book 3)								
107			6.6580E-03	a	Area	m ²	3.0885E+05	A	p	Pa
108			0.2275	b	GasA/A		-2.0019	B	Ph(p)	deg
109			2.0400E-02	c	Length	m	1.1093E-02	C	U	m ³ /s
110			1.2700E-03	d	radius	m	13.880	D	Ph(U)	deg
111	Gues		-1594.9	e	HeatIn	W	-331.91	E	Htot	W
112	Master-Slave Links									
113	Possible targets									
114	stainless	Solid type								
114							292.83	H	SolidT	K
115	13 DUCT	Regen cold end dead space due to ribs (pg 91 book 3)								
116			4.9700E-03	a	Area	m ²	3.0886E+05	A	p	Pa
117			0.7400	b	Perim	m	-2.0051	B	Ph(p)	deg
118			3.1750E-03	c	Length	m	1.0960E-02	C	U	m ³ /s
119	Master-Slave Links									
120	Optional Parameters									
121	stainless	Solid type								
121							1647.0	F	Edot	W
122	14 STKSCREEN	Regenerator (pg 92 book 3) (Ks frac est:pg 20 book 4)								
123			6.2070E-03	a	Area	m ²	2.6942E+05	A	p	Pa
124			0.7190	b	VolPor		1.5875	B	Ph(p)	deg
125			7.3000E-02	c	Length	m	3.2517E-02	C	U	m ³ /s
126			4.2200E-05	d	rh	m	-38.62	D	Ph(U)	deg
127			0.3000	e	ksFrac		-331.91	E	Htot	W
128	Master-Slave Links									
128							3345.2	F	Edot	W

129					325.00	G	TBeg	K	
130	stainless	Solid type			825.00	H	TEnd	K	
131	15 DUCT	All regen hot end dead space (pg 92 book 3) (area is avg)							
132		4.6200E-03	a	Area	m ²	2.6937E+05	A	p Pa	
133		2.0000	b	Perim	m	1.5777	B	Ph(p) deg	
134		8.7000E-03	c	Length	m	3.3253E-02	C	U m ³ /s	
135		6.0000E-04	d	Srough		-40.241	D	Ph(U) deg	
136	Master-Slave Links					-331.91	E	Htot	W
137	Optional Parameters					3337.8	F	Edot	W
138	stainless	Solid type							
139	16 HX	HHX (pg 93 book 4) heat xfer area used/not acoustic area							
140		5.6970E-03	a	Area	m ²	2.6933E+05	A	p Pa	
141		0.9867	b	GasA/A		1.5724	B	Ph(p) deg	
142		6.3500E-03	c	Length	m	3.3918E-02	C	U m ³ /s	
143		7.9400E-04	d	y0	m	-41.855	D	Ph(U) deg	
144		3700.0	e	HeatIn	W	3368.1	E	Htot W	
145	Master-Slave Links					3317.3	F	Edot	W
146	Possible targets					825.00	G	GasT	K
147	stainless	Solid type			917.21	H	SolidT	K	
148	17 DUCT	hhx dead space (pg 94 book 3) stainless used for Qdot							
149		5.4400E-03	a	Area	m ²	2.6932E+05	A	p Pa	
150		0.2620	b	Perim	m	1.5689	B	Ph(p) deg	
151		3.6830E-03	c	Length	m	3.4307E-02	C	U m ³ /s	
152	Master-Slave Links					-42.544	D	Ph(U) deg	
153	Optional Parameters					3368.1	E	Htot	W
154	stainless	Solid type			3316.8	F	Edot	W	
155	18 STKDUCT	Straight section of pulse tube (pg 101 bk 4)							
156		7.0000E-03	a	Area	m ²	2.6659E+05	A	p Pa	
157		0.2963	b	Perim	m	1.2898	B	Ph(p) deg	
158		0.2400	c	Length	m	7.4923E-02	C	U m ³ /s	
159		1.1600E-03	d	WallA	m ²	-69.403	D	Ph(U) deg	
160	Master-Slave Links					3368.1	E	Htot	W
161						3302.0	F	Edot	W
162						825.00	G	TBeg	K
163	stainless	Solid type			325.00	H	TEnd	K	
164	19 RPN	how much heat must be rejected here? Resonator is insulated							
165		0.0000	a	G or T		-2105.1	A	ChngeMe	
166	16e 12e + ~								
167	20 TX	Small water Xger							
168		6.6580E-03	a	Area	m ²	2.6551E+05	A	p Pa	
169		0.2690	b	GasA/A		1.2238	B	Ph(p) deg	
170		1.0160E-02	c	Length	m	7.5413E-02	C	U m ³ /s	
171		2.2860E-03	d	radius	m	-69.552	D	Ph(U) deg	

172	Same 19A	-2105.1	e	HeatIn	W	1263.0	E	Htot	W	
173	Master-Slave Links					3296.6	F	Edot	W	
174	Possible targets					325.00	G	GasT	K	
175	ideal	Solid type				195.21	H	SolidT	K	
176	21 DUCT PT connector (see pg 55 book 4 and concept.skf)									
177		6.2070E-03	a	Area	m ²	2.6397E+05	A	p	Pa	
178		0.2790	b	Perim	m	1.1149	B	Ph(p)	deg	
179		5.1000E-02	c	Length	m	8.3718E-02	C	U	m ³ /s	
180		6.0000E-04	d	Srough		-71.543	D	Ph(U)	deg	
181	Master-Slave Links					1263.0	E	Htot	W	
182	Optional Parameters					3293.6	F	Edot	W	
183	stainless	Solid type								
184	22 UNION Rejoin									
185	8	a	SegNum			2.6397E+05	A	p	Pa	
186	TargSame	8A	2.6397E+05	b	p Sft	Pa	1.1149	B	Ph(p)	deg
187	TargSame	8B	1.1149	c	Ph(p)S	deg	0.28517	C	U	m ³ /s
188	TargSame	8I	325.00	d	TSoft	K	-86.76	D	Ph(U)	deg
189						-9.0949E-13	E	Htot	W	
190						1395.9	F	Edot	W	
191						325.00	G	T	K	
192	23 DUCT Section of 3.5" tee									
193		6.2070E-03	a	Area	m ²	2.5283E+05	A	p	Pa	
194		0.2790	b	Perim	m	1.0432	B	Ph(p)	deg	
195		9.5300E-02	c	Length	m	0.30118	C	U	m ³ /s	
196		6.0000E-04	d	Srough		-86.893	D	Ph(U)	deg	
197	Master-Slave Links					-9.0949E-13	E	Htot	W	
198	Optional Parameters					1371.3	F	Edot	W	
199	stainless	Solid type								
200	24 CONE 3.5" to 4" cone to adapt to resonator (pg 93 book 4)									
201		6.2070E-03	a	AreaI	m ²	2.4159E+05	A	p	Pa	
202		0.2790	b	PerimI	m	0.96559	B	Ph(p)	deg	
203		0.1040	c	Length	m	0.32033	C	U	m ³ /s	
204		8.1070E-03	d	AreaF	m ²	-87.034	D	Ph(U)	deg	
205		0.3200	e	PerimF	m	-9.0949E-13	E	Htot	W	
206		3.0000E-04	f	Srough		1350.5	F	Edot	W	
207	Master-Slave Links									
208	Optional Parameters									
209	stainless	Solid type								
210	25 DUCT Initial section of resonator									
211		8.1070E-03	a	Area	m ²	2.3601E+05	A	p	Pa	
212		0.3200	b	Perim	m	0.92688	B	Ph(p)	deg	
213		5.6000E-02	c	Length	m	0.33167	C	U	m ³ /s	
214		6.0000E-04	d	Srough		-87.112	D	Ph(U)	deg	

215	Master-Slave Links				-9.0949E-13	E	Htot	W	
216	Optional Parameters				1339.4	F	Edot	W	
217	stainless	Solid type							
218	26 BRANCH	RC dissipator							
219		4.0368E+07	a	Re(Zb)	Pa-s/m ³	2.3601E+05	A	p	Pa
220		0.0000	b	Im(Zb)	Pa-s/m ³	0.92688	B	Ph(p)	deg
221		0.0000	c	HtotBr	W	0.33152	C	U	m ³ /s
222	Master-Slave Links				-88.122	D	Ph(U)	deg	
223					-9.0949E-13	E	Htot	W	
224					649.42	F	Edot	W	
225					689.93	G	EdotBr	W	
226	27 DUCT	Continuation of resonator							
227	Same 25a	8.1070E-03	a	Area	m ²	2.1842E+04	A	p	Pa
228		0.3189	b	Perim	m	-177.74	B	Ph(p)	deg
229		1.8500	c	Length	m	0.5134	C	U	m ³ /s
230	Same 25d	6.0000E-04	d	Srough		-88.658	D	Ph(U)	deg
231	Master-Slave Links				-9.0949E-13	E	Htot	W	
232	Optional Parameters				89.553	F	Edot	W	
233	stainless	Solid type							
234	28 CONE	7 degree cone - 10.02" final diameter							
235	Same 27a	8.1070E-03	a	AreaI	m ²	9.2391E+04	A	p	Pa
236		0.3194	b	PerimI	m	-178.61	B	Ph(p)	deg
237		1.2502	c	Length	m	0.2426	C	U	m ³ /s
238		5.0870E-02	d	AreaF	m ²	-88.665	D	Ph(U)	deg
239		0.8000	e	PerimF	m	-9.0949E-13	E	Htot	W
240	Same 27d	6.0000E-04	f	Srough		10.927	F	Edot	W
241	Master-Slave Links								
242	Optional Parameters								
243	stainless	Solid type							
244	29 DUCT	10" duct P8							
245		5.0870E-02	a	Area	m ²	9.5273E+04	A	p	Pa
246		0.8000	b	Perim	m	-178.61	B	Ph(p)	deg
247		0.4850	c	Length	m	2.6682E-05	C	U	m ³ /s
248	Same 27d	6.0000E-04	d	Srough		-178.61	D	Ph(U)	deg
249	Master-Slave Links				-9.0949E-13	E	Htot	W	
250	Optional Parameters				1.2710	F	Edot	W	
251	stainless	Solid type							
252	30 SURFACE	end cap of resonator							
253		5.0900E-02	a	Area	m ²	9.5273E+04	A	p	Pa
254						-178.61	B	Ph(p)	deg
255						9.6010E-12	C	U	m ³ /s
256						91.795	D	Ph(U)	deg
257						-9.0949E-13	E	Htot	W

258	ideal	Solid type	3.2510E-09	F	Edot	W
259	31	HARDEND	end of duct			
260	Targ	0.0000	a	R(1/z)	9.5273E+04	A p Pa
261	Targ	0.0000	b	I(1/z)	-178.61	B Ph(p) deg
262					9.6010E-12	C U m ³ /s
263					91.795	D Ph(U) deg
264	Possible targets				-9.0949E-13	E Htot W
265					3.2510E-09	F Edot W
266					6.8653E-14	G R(1/z)
267					-9.6579E-12	H I(1/z)
268	32	RPN	temporary bug kluge			
269		0.0000	a	G or T	0.0000	A ChngMe
270	0.					
271						

Δίνοντας 3700 W στον θερμό εναλλάκτη, η συσκευή ταλαντώνεται στα 85.7 Hz με αρχικό πλάτος πίεσης 317 kPa . Η θερμή θερμοκρασία αερίου είναι 825 K και η θερμή θερμοκρασία του στερεού είναι 917 K .

addr	desc	%chng	value	unit	title
0b	BEGIN:Freq	-0.00%	85.748	Hz	the setup
0d	BEGIN: p	-0.00%	3.1748E+05	Pa	the setup
16G	HX:GasT	0.00%	825.00	K	HHX (pg 93 book 4) heat xfer area used/not acoustic area
16H	HX:SolidT	0.00%	917.21	K	HHX (pg 93 book 4) heat xfer area used/not acoustic area

4.3.2.2.ΣΤΑΘΕΡΗ ΡΟΗ ΣΤΗΝ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ STIRLING.

Για να έχουμε σταθερή ροή στο μοντέλο, αρκεί να προσθέσουμε τη μεταβλητή θ_i στο τμήμα BEGIN και να κάνουμε κλικ στο κουτάκι enable N_{dot} . Μετά από αυτή την αλλαγή παρατηρούμε ότι στο SOFTEND στο τμήμα 8 η $p_{2,0,HL} = -0,7\text{ kPa}$ το οποίο είναι το τέλος του τμήματος 22 TBRANCH στο οποίο η $p_{2,0,HL} = -4,129\text{ kPa}$. Υπάρχει λοιπόν μια διαφορά 4 kPa του χρονικού μέσου της πίεσης. Για να καλυφθεί αυτό θα πρέπει να προσθέσουμε την $p_{2,0,HL}$ στις μεταβλητές target. Η αντίστοιχη μεταβλητή guess θα είναι η \dot{N}_{br} στο τμήμα 1 για να υπολογίσει το DeltaEC πόσο κύμα συνεχούς ροής

Gedeon ρέει στο δοχείο.

Κάνουμε μια μικρή αύξηση στην \dot{N}_{br} και παρατηρούμε το τμήμα 22 για να δούμε ότι η $p_{2,0,HL}$ κινείται προς τη σωστή κατεύθυνση. Δεν πρέπει να κάνουμε αλλαγές μεγαλύτερες από 0.01 mol/s γιατί το DeltaEC δε θα συγκλίνει. Κάνουμε οπότε μικρές αλλαγές ώστε να συγκλίνουν οι $p_{2,0,HL}$ στα τμήματα 8 και 22. Τότε θέτουμε την 1d και την 22e σαν guess και target αντίστοιχα.

Πραγματοποιώντας αυτές τις αλλαγές και αυξάνοντας τον αριθμό των βημάτων της αριθμητικής παραγωγής από 10 σε 40 για να μην έχουμε αποκλίσεις στην $T_m(x)$ έχουμε:

Guesses:				Targets:			
desc	addr	value	unit	desc	addr	value	Results
BEGIN:Freq	0b	85.827	Hz	UNION: p	22b	2.4897E+05	22A 2.4897E+05 Pa
BEGIN: p	0d	3.0011E+05	Pa	UNION:Ph(p)	22c	1.3879	22B 1.3879 deg
TBRAN:Re(Zb)	1a	-1.5389E+07	Pa-s/m ³	UNION:T	22d	325.00	22G 325.00 K
TBRAN:Im(Zb)	1b	1.0335E+07	Pa-s/m ³	UNION:p2OHL	22e	-0.52366	22H -0.52366 Pa
TBRAN:NdotBr	1d	5.0842E-12	mol/s	HARDE:R(1/z)	31a	0.0000	31G -7.2157E-12
TX:HeatIn	12e	-2318.9	W	HARDE:I(1/z)	31b	0.0000	31H -2.1215E-10

Τα χαρακτηριστικά της μηχανής που μας ενδιαφέρουν γίνονται $f=86\text{Hz}$, $p_1=300 \text{ kPa}$, $T_{m,H}=701\text{K}$ και $T_{solid}=791\text{K}$. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πιο κοντά στα πραγματικά επειδή συμπεριλάβαμε στους υπολογισμούς μας το κύμα συνεχούς ροής Gedeon το οποίο μεταφέρει μεγάλη ποσότητα θερμότητας από το θερμό εναλλάκτη χωρίς να παράγει θερμοακουστική ισχύ.

addr	desc	%chnge	value	unit	title
0b	BEGIN:Freq	0.00%	85.827	Hz	the setup
0d	BEGIN: p	-0.00%	3.0011E+05	Pa	the setup
16G	HX:GasT	0.00%	700.79	K	HHX (pg 93 book 4) heat xfer area used/not acoustic area
16H	HX:SolidT	0.00%	790.85	K	HHX (pg 93 book 4) heat xfer area used/not acoustic area

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] Sondhauss, C., “ Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasröhren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite”, Ann. Phys., 79, 1,1850.
- [2] Feldman, K. T., “Review of the Literature on Sondhaus Thermoacoustic Phenomena”. J.Sound Vib., 7: 71 – 82, 1968.
- [3] Rijke, P. L., “Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen”, Ann. Phys., 107, 339,1859.
- [4] Lord Rayleigh, “The Theory of Sound”, 2nd ed., Vol.2, Sec.322, Dover, Newyork, 1945.
- [5] Carter, R.L., White, M. and Steele, A.M., (Private communication of Atomics International Division of North American Aviation, Inc.), 1962.
- [6]G. Kirchhoff, “Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gas auf die Schallbewegung”, Ann. Phys., 134, 177, 1868.
- [7] Rott, N., “Dumped and Thermally Driven Acoustic Oscillations in Wide and Narrow Tubes”, Z. Angew. Math. Phys., 20: 230 – 243, 1969.
- [8] Rott, N., “Thermally Driven Acoustic Oscillations”, Part III: Second – order Heat Flux, Z. Angew. Math. Phys., 26: 43 – 49, 1975.
- [9] Rott, N., “Thermoacoustics”, Adv. Appl. Mech., 20: 135 – 175, 1980.
- [10]Yazaki, T., Tominaga, A., and Narahara, Y., “Experiments on Thermally Driven Acoustic Oscillations of Gaseous Helium”, Jour. Low Temp. Phys., 41, 42-52, 1980.
- [11]Müller, A. and Lang, E., “Experimente Mit Thermisch Getriebenen Gas-Flüssigkeits-Schwingungen”, Z. Angew. Math. Phys., 36, 358-360, 1985.
- [12]Hofler, T.J., “Thermoacoustic refrigerator desing and performance”, PhD Thesis, Physics Department, University of California, San Diego, 1986.
- [13] Zinn, B., “Pulsating Combustion”, In F. J. Weinberg, editor, Advanced Combustion Methods,

pages 113 – 181, Academic, London, 1986.

- [14] Hofler, T. J., Wheatley, J. C., Swift, G. W. and Migliori, A, “Acoustic Cooling Engines”, US Patent No. 4,722,201, 1988.
- [15] Gifford, W. E. and Longsworth, R. C., “Pulse Tube Refriheration Progress”, *Adv.Cryogenic Eng.*, 10 B: 69 – 79, 1965.
- [16] Mikulin, E. L., Tarasov, A. A. and Shkrebyonock, M. P., “Low – Temperature Expansion Pulse Tubes”, *Adv. Cryogenic Eng.*, 29: 629 – 637, 1984.
- [17]Radebaugh, R., “ A Review of Pulse Tube Refrigeration”, *Adv. Cryogenic Eng.*, 35: 1191–1205, 1990.
- [18] Swift, G. W., “Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators”, Acoustical Society of America Publications, Sewickley PA, 2002.
- [19] Wheatley, J. C. and Cox, A., “Natural Engines”, *Physics Today*, 38: 50 – 57, August 1985.
- [20] Olson, J. R. and Swift, G. W., “Acoustic Streaming in Pulse Tube Refrigerators: Tapered Pulse Tubes”, *Cryogenics*, 37: 769 – 776, 1997.
- [21] Rott, N., “The Influence of Heat Conduction on Acoustic Streaming”, *Z. Angew.Math. Phys.*, 25: 417 – 421, 1974.
- [22] Spoor, P. S. and Swift, G. C., “Thermoacoustic Seperation of a He – Ar Mixture”, *Phys. Rev. Lett.*, 85: 1646 – 1649, 2000.
- [23] Geller, D. A. and Swift, G. C., “Thermoacoustic Enrichment of the Isotopes of Neon”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 115: 2059 – 2070, 2004.
- [24]Swift, G. C., “What Is Thermoacoustics – A Brief Description, With Technical Details and Citations”, Condensed Matter and Thermal Physics Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, April 28, 2004.
- [25] Gifford, W.E. and Longsworth, R.C., “Surface heat pumping”, *Adv. Cryog. Eng.*,11, 171, 1966.
- [26] Wheatley, J. C., Holfer, T., Swift, G. W. and Migliori, A., “Experiments with an

- Intrinsically Irreversible Heat Engine”, *Phys. Rev. Lett.* 50, 499, 1983.
- [27] Wheatley, J. C., Holfer, T., Swift, G. W. and Migliori, A., “An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine”, *J. Acoust. Soc. Am.* 74, 153, 1983.
- [28] Wheatley, J. C., Holfer, T., Swift, G. W. and Migliori, A., “Acoustical Heat Pumping Engine”, U.S. Patent No. 4,398,398, Aug. 16, 1983.
- [29] Wheatley, J. C., Holfer, T., Swift, G. W. and Migliori, A., “Intrinsically Irreversible Heat Engine”, U.S. Patent No. 4,489,553, Dec. 25, 1984.
- [30] Hofler, T. J., “Concepts for Thermoacoustic Refrigeration and a Practical Device”, *Proc. 5th Int. Cryocooler Conf.*, 18 – 19 Aug., Monterey, CA, 1988.
- [31] Wheatley, J. C. and Cox, A., “Natural Engines”, *Physics Today*, 38: 50 – 57, August 1985.
- [32] Wheatley, J. C., Swift, G. W., Migliori, A. and Hofler, T., “Heat – driven Acoustic Cooling Engine Having no Moving Parts”, U.S. Patent No. 4,858,441, Aug. 22, 1989.
- [33] Jones, R. R., “High – Tech Elite”, *R & D Magazine* 32 (10), 61, 1990.
- [34] Garret, S.L., Adef, J.A. and Hofler T.J., “Thermoacoustic refrigerator for space applications, *J. Thermophysics and Heat Transfer* “, 7, 595, 1993.
- [35] Garrett, S., “ThermoAcoustic Life Sciences Refrigerator”, NASA Tech. Report No. LS – 10114, Johnson Space Center, Space and Life Sciences Directorate, Huston TX, October 31, 1991.
- [36] <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/setac.htm>.
- [37] Johnson, R. A., Garrett, S. L., and Keolin, R. M., Thermoacoustic Cooling for Surface Combatants., *Naval Engineers Journal*, 112, 335, 2000.
- [38] Girgin, I., Turker M., “Thermoacoustic Systems As An Alternative To Conventional Coolers”, *Journal of Naval Science and Engineering* 2012, Vol.8, No.1, pp.14-32
- [39] Tijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H. and de Waele, A.T.A.M., “Design of thermoacoustic refrigerators”, *Cryogenics*, 42, 49-57, 2002

- [40] Qiu, L.M., Sun, D.M., Yan, W.L., Chen, P., Gan, Z.H., Zhang, X.J. and Chen, G.B., “Investigation on a thermoacoustically driven pulse tube cooler working at 80K”, *Cryogenics*, 45, 380-385, 2005.
- [41] Garrett, S. L., Hofler, T. J. and Perkins, D. K., “Thermoacoustic Refrigeration”, Refrigeration and Air Conditioning Technology Workshop, Breckenridge Hilton, Breckenridge, CO, June 23 – 25, 1993.
- [42] Corey, J., “On – Demand LOX & LN2 by On – Site Acoustic Liquefiers”, CFIC– Qdrive, 302 Tenth St., Troy, New York, 12180 USA, 2008.
- [43] Swift, G.W., “Thermoacoustic Engines”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 84, 1145-1180, 1988.
- [44] Swift, G.W., “ Analysis and performance of a large thermoacoustic engine”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 92, 1551-1563, 1992.
- [45] Tijani, M.E.H., “Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration”, Ph.D.Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [46] Μαργαρίτης, Κ., “θερμοακουστικές μηχανές Stirling ελεύθερων εμβόλων”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2001
- [47] Merkli, P. and Thomann, H., “Thermoacoustic effects in a resonance tube”, *J. Fluid Mech.* 70 (1), 161 – 177, 1975.
- [48] Wetzel, M. and Herman, C., “Design optimisation of thermoacoustic refrigerators”, *Int. J. Refrig.* 20 (1), 3 – 21, 1997.
- [49] Feldman, K. T., “Review of the Literature on Rijke Thermoacoustic Phenomena”, *J. Sound Vib.*, 7: 83 – 89, 1968.
- [50] Feldman, K. T., “A study of heat generated pressure oscillations in a closed end pipe”, PhD dissertation, Mechanical Engineering Department, Univ. of Mo., 1966.
- [51] Feldman, K. T. and Carter, R. L., “A study of heat driven oscillations in a gas”, *Trans. ASME C, J. Heat Trans.* 92, 536 – 541, 1970.
- [52] Wheatley, J. C., Hofler, T., Swift, G. W. and Migliori, A., “Understanding some simple

- phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines”, *Am. J. Phys.* 53, 147 – 162, 1985.
- [53] Ceperley, P. H., “A Pistonless Stirling Engine – The Travelling Wave Heat Engine”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 66: 1508 – 1513, 1979.
- [54] Ceperley, P. H., “Gain and Efficiency of a Short Travelling Wave Heat Engine”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 77: 1239 – 1244, 1985.
- [55] Ceperley, P. H., “Resonant travelling wave heat engine”, U.S. Patent 4,355,517, 1982.
- [56] Yazaki, T., Iwata, A., Maekawa, T. and Tominaga, A., “Travelling Wave Thermoacoustic Engine in a Looped Tube”, *Phys. Rev. Lett.*, 81: 3128 – 3131, 1998.
- [57] de Block, C. M., “Thermoacoustic System”, Dutch Patent: International Application Number PCT/NL98/00515, 1998, US Patent 6,314,740, November 13, 2001.
- [58] Backhaus, S. and Swift, G. W., “A Thermoacoustic – Stirling Heat Engine”, *Nature*, 399: 335 – 338, 1999.
- [59] Backhaus, S. and Swift, G. W., “A thermoacoustic – Stirling heat engine”, *J. Acoust. Soc. Am.* 107, 3148 – 3166, 2000.
- [60] Wollan, J. J., Swift, G. W., Backhaus, S. and Gardner, D. L., “Development of a thermoacoustic natural gas liquefier”, *Proceedings of AIChE Meeting, New Orleans LA, March 11 – 14, 2002.*
- [61] Backhaus, S. and Swift, G. W., “Fabrication and use of parallel-plate regenerators in thermoacoustic engines”, *Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Savannah GA, 29 July – 2 August, 2001.*
- [62] Backhaus, S. and Swift, G. W., “New varieties of thermoacoustic engines”, *Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration, Orlando FL, USA, July 8 – 11, 2002.*
- [63] Ward, B., Clark, J., and Swift, G.W., “DeltaEC, Version 6.3b11, User’s Guide”
Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2012.

- [64] Reid, R. S. and Swift, G. W., “Experiments with a flow-through thermoacoustic refrigerator, Los Alamos National Laboratory”, Los Alamos, New Mexico, 2000.
- [65] Garrett, S. L. , Perkins, D. K. and Gopinath, A., “Thermoacoustic refrigerator heat exchangers: Design, analysis, and fabrication.”, In Hewitt, G. F., editor, Heat Transfer 1994: Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference. Vol. 4, pages 375.380, Rugby, England, 1994. Institution of Chemical Engineers.
- [66] Radebaugh, R., “ Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler”, Proc. Institute of Refrigeration (London), pages 11.29, 2000.
http://cryogenics.nist.gov/Papers/Institute_of_Refrig.pdf, last viewed January, 2011.
- [68] Backhaus, S., Swift, G. W. and Reid., R. S., “High-temperature self-circulating thermoacoustic heat exchanger”, Appl. Phys. Lett., 87:014102, 2005.
- [69] Swift, G. W. and. Backhaus, S., “Gas diodes for thermoacoustic self-circulating heat exchangers”, In CP838, Innovations in Nonlinear Acoustics: 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics, edited by A. A. Atchley, V. W. Sparrow, and R. M. Keolian, pages 399.406, Melville, New York, 2001. American Institute of Physics.
- [70] Swift G. W. and Geller. D. A., “Continuous thermoacoustic mixture separation” J.Acoust. Soc. Am., 120:2648.2657, 2006. Erratum 124:2421, 2008.
- [71] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppers, A. B. and Sanders, J. V., “Fundamentals of Acoustics”, John Wiley and Sons, 4th edition, 1999.
- [72] Iguchi, M., Ohmi, M. and Maegawa K., “Analysis of free oscillating flow in a U-shaped tube”, Bull. JSME, 25:1398.1405, 1982.
- [73] Reverse Polish notation - Wikipedia, the free encyclopedia,
http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_polish_notation.
- [74] Urieli, I. and Berchowitz D. M., “Stirling Cycle Engine Analysis”, Adam Hilger, Bristol UK, 1984.

- [75] Organ, A. J., "Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine", Cambridge University Press, 1992.
- [76] Olson, J. R. and Swift, G. W., "Suppression of acoustic streaming in tapered pulse tubes", In R. G. Ross Jr., editor, Cryocoolers 10, pages 307.313. Plenum, New York, 1999.
- [77] Swift, G. W., Allen, M. S. and Wollan, J. J. "Performance of a tapered pulse tube". In R. G. Ross Jr., editor, Cryocoolers 10, pages 315.320. Plenum, New York, 1999.
- [78] Reid, R. S., Ward, W. C. and Swift, G. W., "Cyclic thermodynamics with open flow", Phys. Rev. Lett., 80:4617.4620, 1998.
- [79] Reid, R. S., Open cycle thermoacoustics. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, 1999.
- [80] Gedeon, D., "DC gas flows in Stirling and pulse-tube cryocoolers", In R. G. Ross, editor, Cryocoolers 9, pages 385.392. Plenum, New York, 1997
- [81] Swift, G. W. and Backhaus, S. "A resonant, self-pumped, circulating thermoacoustic heat exchanger." J. Acoust. Soc. Am., 116:2923.2938, 2004.
- [82] Tijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H. and de Waele, A.T.A.M., "Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator". Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, 2001.