

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΣΠΟΥΔΕΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

***“Ανάπτυξη φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα,
υπό συνθήκες μικροβαρύτητας”***



Χρήστος Σ. Πανούτσος

Βόλος
Μάιος 2001

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΣΠΟΥΔΕΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

***“Ανάπτυξη φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα,
υπό συνθήκες μικροβαρύτητας ”***

Χρήστος Σ. Πανούτσος

Εξεταστική Επιτροπή: Β. Μποντόζογλου, Αν. Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων
Μηχανικών Βιομηχανίας Π.Θ.
Θ. Καραπάντσιος, Λέκτορας Τμήματος Χημείας Α.Π.Θ.
Α. Μ. Σταματέλλος, Αν. Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων
Μηχανικών Βιομηχανίας Π.Θ.
Γ. Λυμπερόπουλος, Έπικ. Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων
Μηχανικών Βιομηχανίας Π.Θ.
Σπ. Καραμάνος, Λέκτορας Τμήματος Μηχανολόγων
Μηχανικών Βιομηχανίας Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ
29/5/2001



Στους γονείς μου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 666/1
Ημερ. Εισ.: 24-06-2004
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
532.052
ΠΑΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072593

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Βασικές Έννοιες	3
1.2.1 Διαλυτότητα – Δεδομένα Διαλυτότητας	3
1.2.2 Ανάπτυξη φυσαλίδων με αύξηση της θερμοκρασίας	6
1.2.3 Επίδραση της βαρύτητας	7
1.2.4 Συνθήκες μικροβαρύτητας – Παραβολικές πτήσεις	8
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	12
2.1 Ανάπτυξη φυσαλίδων με μεταφορά θερμότητας - Βρασμός	13
2.1.1 Είδη Βρασμού	13
2.1.2 Στάσιμος βρασμός	13
2.1.3 Οπτικοποίηση των συμβάντων στη καμπύλη βρασμού	15
2.1.4 Πυρήνωση φυσαλίδας	16
2.1.4.1 Είδη πυρήνωσης	17
2.1.4.2 Ετερογενής πυρήνωση στο στάσιμο βρασμό	17
2.1.5 Ανάπτυξη φυσαλίδων στο βρασμό πυρήνων	19
2.2 Επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου	23
2.3 Ανάπτυξη φυσαλίδων με μεταφορά μάζας	26
2.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	26
2.3.2 Διατύπωση εξίσωσης διάχυσης	29
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	32
3.1 Οι απαιτήσεις του πειράματος	33
3.1.1 Οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί των συστημάτων	34
3.1.2 Η πειραματική μας συσκευή	35
3.2 Τα θερμικά συστήματα	37
3.2.1 Ο θερμοστάτης και το σύστημα θερμικού ελέγχου	37
3.2.2 Η μονάδα του κελιού	38
3.2.2.1 Αποθήκευση των κελιών στην πειραματική μας συσκευή	39
3.2.3 Ο εναλλάκτης θερμότητας	39
3.3 Το σύστημα καταγραφής της εικόνας	40
3.4 Το εναλλάξιμο κελί	42
3.5 Τα οπτικά συστήματα	43
3.5.1 Απόψεις φωτισμού της φυσαλίδας	44
3.5.1.1 Ο φωτισμός του πειράματος επίπεδου θερμαντήρα	46
3.5.2 Περιορισμοί απόδοσης	46
3.5.2.1 Σφαιρική απόκλιση	47
3.5.2.2 Μείωση της σφαιρικής απόκλισης	48
3.5.2.3 Coma, ασιγματισμός, κύρτωση πεδίου και στρέβλωση	49

3.5.2.4 Χρωματική απόκλιση	49
3.5.3 Καθορίζοντας την οπτική διαδρομή	50
3.6 Οι θερμαντήρες	51
3.7 Η συσκευή κορεσμού και πλήρωσης των κελιών	53
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	54
4.1 Πειραματική διαδικασία	55
4.1.1 Κορεσμός και πλήρωση των κελιών	55
4.1.2 Προετοιμασία των πειραμάτων	56
4.1.3 Τα πειράματα	57
4.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων	60
4.2.1 Δεδομένα εικόνας	60
4.2.2 Δεδομένα προγράμματος <i>Snoopy</i>	64
4.2.3 Δεδομένα διαφοράς δυναμικού	66
4.2.4 Δεδομένα ποιότητας της βαρύτητας	68
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	70
5.1 Φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υγρών	71
5.2 Αποτελέσματα	72
5.2.1 Νερό	72
5.2.1 Επτάνιο	109
5.2.3 Γλυκερίνη - Νερό	128
5.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	134
5.3.1 Ημιεμπειρική προσαρμογή αποτελεσμάτων	134
5.3.2 Διερεύνηση εξάρτησης του ρυθμού ανάπτυξης	139
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	145
<i>Βιβλιογραφία</i>	148
<i>Ευχαριστίες</i>	150
<i>Παράρτημα</i>	151
A. Φωτογραφίες	152
B. Κώδικες	156
B.1 Κώδικας <i>Corel Photoshop</i>	156
B.2 Κώδικες <i>MatLab</i>	157
B.2.1 Κώδικας υπολογισμού οριζόντιας διαμέτρου	157
B.2.2 Κώδικας υπολογισμού κάθετης διαμέτρου	157
B.3 Κώδικας <i>Python</i>	159
B.4 Κώδικας <i>Mathematica</i>	160
Δ. Τα Μηχανικά Συστήματα	166
E. Οι θερμαντήρες	174
E.1 Ο σφαιρικός θερμαντήρας	174
E.2 Ο επίπεδος θερμαντήρας	176
ΣΤ. Οδηγίες χρήσης του προγράμματος <i>Snoopy</i>	177

Z. Υπολογισμός των P_{therm} και T_{therm}	180
H. Δεδομένα διαχυτότητας και επιφανειακής τάσης	184
H.1 Δεδομένα διαχυτότητας	184
H.2 Δεδομένα επιφανειακής τάσης	186
Θ. Ημ εμπειρική προσαρμογή των αποτελεσμάτων	188
Θ.1 Νερό	188
Θ.2 Επτάνιο	194
Θ.3 Γλυκερίνη	197
I. Πίνακες Μετασχηματισμού Laplace	199

Περίληψη

Σκοπός της παρούσης Μεταπτυχιακής Διατριβής είναι η μελέτη της ανάπτυξης φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα υγρού - αερίου. Η ανάπτυξη φυσαλίδων σε υγρά παίζει σημαντικό ρόλο σε φαινόμενα όπως η σπηλαιώση, ο βρασμός, αλλά και στη διεργασία του πολυμερισμού για την κατασκευή πολυμερικών αφρών, τη βιομηχανία κατασκευής γυαλιού, και τη βιομηχανία τροφίμων. Έξάλλου, η ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων επιδιώκεται σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως η επεξεργασία αποβλήτων νερού, οι βιολογικοί αντιδραστήρες και η οξυγόνωση του αίματος. Το φαινόμενο της ανάπτυξης φυσαλίδων είναι γενικά περίπλοκο, εμπλέκοντας ταυτόχρονη μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας, μεταξύ της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας και του υγρού που την περιβάλλει.

Τα πειράματα μας διεξήχθησαν σε συνθήκες μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της 26^{ης} Καμπάνιας Παραβολικών Πτήσεων της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος. Τα υγρά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που έγιναν ήταν το νερό, το επτάνιο και ένα μείγμα 80-20% κ.β. γλυκερίνης-νερού, ενώ το χρησιμοποιούμενο αέριο ήταν το διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος δινόταν ένας θερμικός παλμός, καθορισμένης θερμικής ισχύος και χρονικής διάρκειας, μέσω ενός εμβαπτισμένου στο διάλυμα θερμαντήρα, και η αναπτυσσόμενη φυσαλίδα καταγραφόταν σε βίντεο, έτσι ώστε να υπολογιστεί στη συνέχεια η μεταβολή της διαμέτρου της συναρτήσει του χρόνου. Η μέτρηση της διαμέτρου της φυσαλίδας έγινε με τη βοήθεια υπολογιστικού κώδικα, αναλύοντας τα δεδομένα εικόνας.

Η μορφή της καμπύλης μεταβολής της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας, που παρατηρήθηκε στα πειραματικά αποτελέσματα, είναι παραβολική για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης αυτής, όπου η διάμετρος της είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, και στη συνέχεια γραμμική, όπου η διάμετρος της φυσαλίδας είναι ανάλογη του χρόνου. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για τα τρία χρησιμοποιούμενα υγρά. Όταν η διάμετρος της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, ελέγχων μηχανισμός είναι η διάχυση μάζας και θερμότητας. Ο ρυθμός αύξησης της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας εξετάστηκε ως συνάρτηση της φύσης του υγρού, της προσφερόμενης θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη φυσαλίδων σε υγρά είναι μια διεργασία ζωτικής σπουδαιότητας για τη μελέτη σημαντικών φαινομένων όπως η σπηλαίωση, η πυρήνωση και ο βρασμός. Επίσης, παίζει σημαντικό ρόλο στη διεργασία του πολυμερισμού για την κατασκευή πολυμερικών αφρών, τη βιομηχανία κατασκευής γυαλιού, αλλά και τη βιομηχανία τροφίμων (αναψυκτικά, σαμπάνια). Έξάλλου, η ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων επιδιώκεται σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως:

- επεξεργασία αποβλήτων νερού
- βιολογικοί αντιδραστήρες
- στήλες πλημμύρισης
- αντιδραστήρες αερίου-υγρού
- οξυγόνωση του αίματος
- καθαρισμός των υγρών.

Η διεργασία ανάπτυξης φυσαλίδων είναι γενικά περίπλοκη, εμπλέκοντας ταυτόχρονη μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας και του υγρού που την περιβάλλει.

Σε ένα διάλυμα υγρού-αερίου αρχίζουν να σχηματίζονται φυσαλίδες όταν αυτό δεν μπορεί να περιέχει όλη την ποσότητα του αερίου που είναι διαλυμένο σ' αυτό, δηλαδή όταν το διάλυμα γίνεται *υπέρκορο*. Αυτό μπορεί να γίνει είτε αυξάνοντας τη θερμοκρασία, είτε μειώνοντας την πίεση, αφού όπως γνωρίζουμε η συγκέντρωση κορεσμού ενός υγρού σε αέριο εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το διάλυμα και την πίεση στην οποία υπόκειται αυτό. Στο παρελθόν έχει μελετηθεί εκτενέστερα η περίπτωση της ανάπτυξης φυσαλίδων όταν μειώνεται η πίεση στην οποία υπόκειται το διάλυμα [16]. Αντίθετα, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου, δεν έχει μελετηθεί η περίπτωση της ανάπτυξης φυσαλίδων όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.

Σκοπός της Μεταπτυχιακής αυτής Διατριβής είναι η μελέτη της ανάπτυξης φυσαλίδων σε ένα υγρό που περιέχει διαλυμένο αέριο όταν αυτό θερμαίνεται από έναν εβαπτυσμένο θερμαντήρα. Τα υγρά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που έγιναν ήταν το νερό, το επτάνιο και ένα μείγμα 80-20% κ.β. γλυκερίνης-νερού. Επιλέχθηκαν αυτά τα υγρά, για να μελετηθεί η επίδραση του ιξώδους (νερό - γλυκερίνη), και η επίδραση της επιφανειακής τάσης (νερό - επτάνιο), στην ανάπτυξη των φυσαλίδων. Το αέριο που χρησιμοποιήθηκε είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Για ν' αποφύγουμε την επίδραση της άνωσης, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτού του είδους τα πειράματα, τα πειράματα μας διεξήχθησαν σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Αυτό κατορθώθηκε κατά τη διάρκεια της 26^{ης} Καμπάνιας Παραβολικών Πτήσεων (26th Parabolic Flight Campaign) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency), η οποία έγινε στις 1-3 Ιουνίου του 1999 στο Bordeaux της Γαλλίας.

Τα πειράματα που έγιναν είχαν σαν στόχο τη μελέτη των δύο διαφορετικών φάσεων της ανάπτυξης φυσαλίδων: τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης, τα οποία ερευνήθηκαν με τη βοήθεια ενός μικρού σφαιρικού θερμαντήρα, και τα μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης, κατά τα οποία αναπτύσσονται πολλές φυσαλίδες ταυτόχρονα, για την μελέτη των οποίων χρησιμοποιήθηκε

ένας μεγαλύτερος επίπεδος θερμαντήρας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ξεκαθαρίσουμε ότι στα πλαίσια της παρούσης Μεταπτυχιακής Διατριβής θ' ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη μελέτη των αρχικών σταδίων ανάπτυξης των φυσαλίδων, δηλαδή με τα πειράματα που έγιναν στο μικρό σφαιρικό θερμαντήρα.

Η Μεταπτυχιακή αυτή Διατριβή διεξήχθη στο Εργαστήριο Φυσικών & Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος: “*Mass diffusion – induced bubble growth in microgravity conditions*”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA), το τηλεοπτικό κανάλι MEGA, και την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αυτό το ερευνητικό πρόγραμμα έγινε σε συνεργασία με τους Ολλανδούς συναδέλφους μας στο Ινστιτούτο Van der Waals-Zeeman (*Van der Waals-Zeeman Instituut*) του Πανεπιστημίου του Amsterdam (*Universiteit van Amsterdam*) της Ολλανδίας, στο οποίο κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου η πειραματική μας συσκευή.

1.2 Βασικές Έννοιες

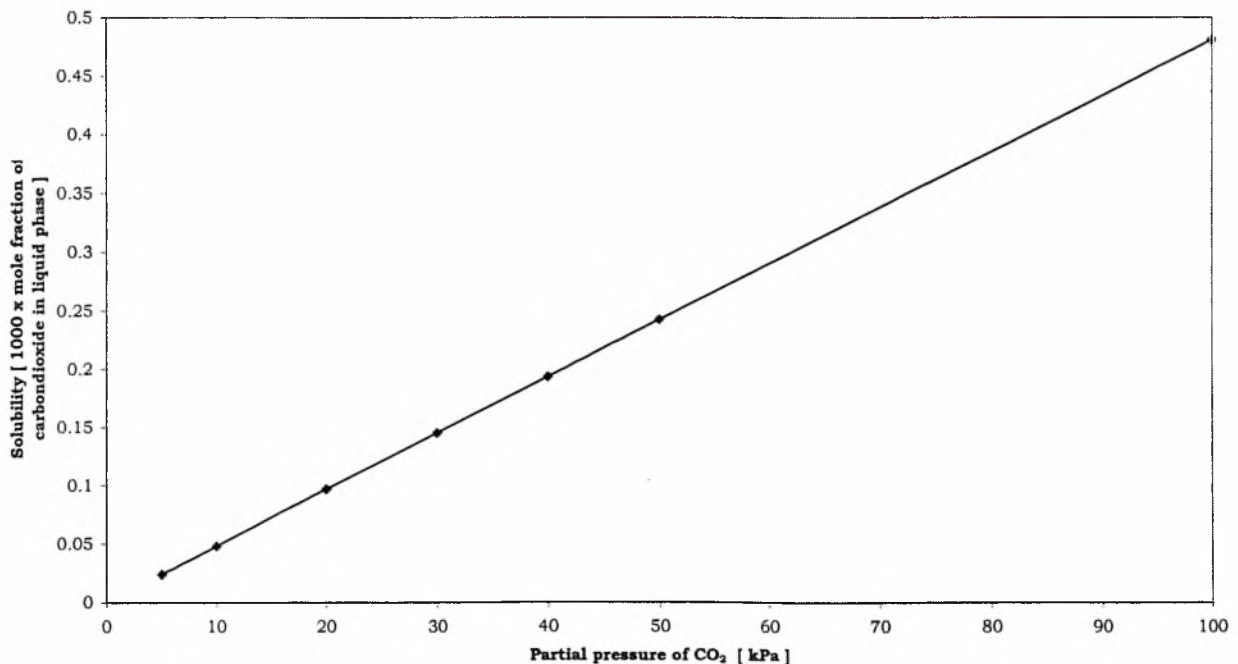
1.2.1 Διαλυτότητα – Δεδομένα Διαλυτότητας [1,2,3]

Αμέτρητα παραδείγματα στη φύση παρουσιάζουν την ικανότητα των υγρών να διαλύουν αέρια. Πράγματι, η ανθρώπινη ζωή δεν θα ήταν εφικτή αν το οξυγόνο δεν μπορούσε να διαλυθεί στο αίμα, αλλά ούτε και η θαλάσσια ζωή θα υπήρχε αν το οξυγόνο δεν διαλυόταν στο νερό. Ακόμη, τα μίγματα αερίων μπορούν να διαχωριστούν με απορρόφηση εξαιτίας του γεγονότος ότι διαφορετικά αέρια μπορούν να διαλυθούν σε ένα υγρό κατά διαφορετικά ποσοστά και έτσι, τα πιο πολλά αέρια μίγματα μπορούν να διαχωριστούν αν έρθουν σε επαφή με τον κατάλληλο διαλύτη, ο οποίος διαλύει ένα αέριο συστατικό περισσότερο από ένα άλλο.

Η διαλυτότητα, S_i , μιας διαλυμένης αέριας ουσίας σε ένα υγρό διαλύτη, ή διαφορετικά, η συγκέντρωση κορεσμού, C_{sat} , ενός διαλύματος σε αέριο, εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το διάλυμα, και την πίεση η οποία εφαρμόζεται σ' αυτό. Μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με το *Νόμο του Henry*, ο οποίος μπορεί να προσεγγιστεί για πολλά συστατικά με χαμηλές διαλυτότητες ως εξής:

$$S_i = C_{sat} = y_i \cdot P = \frac{1}{k_i} p_i \quad (1.1)$$

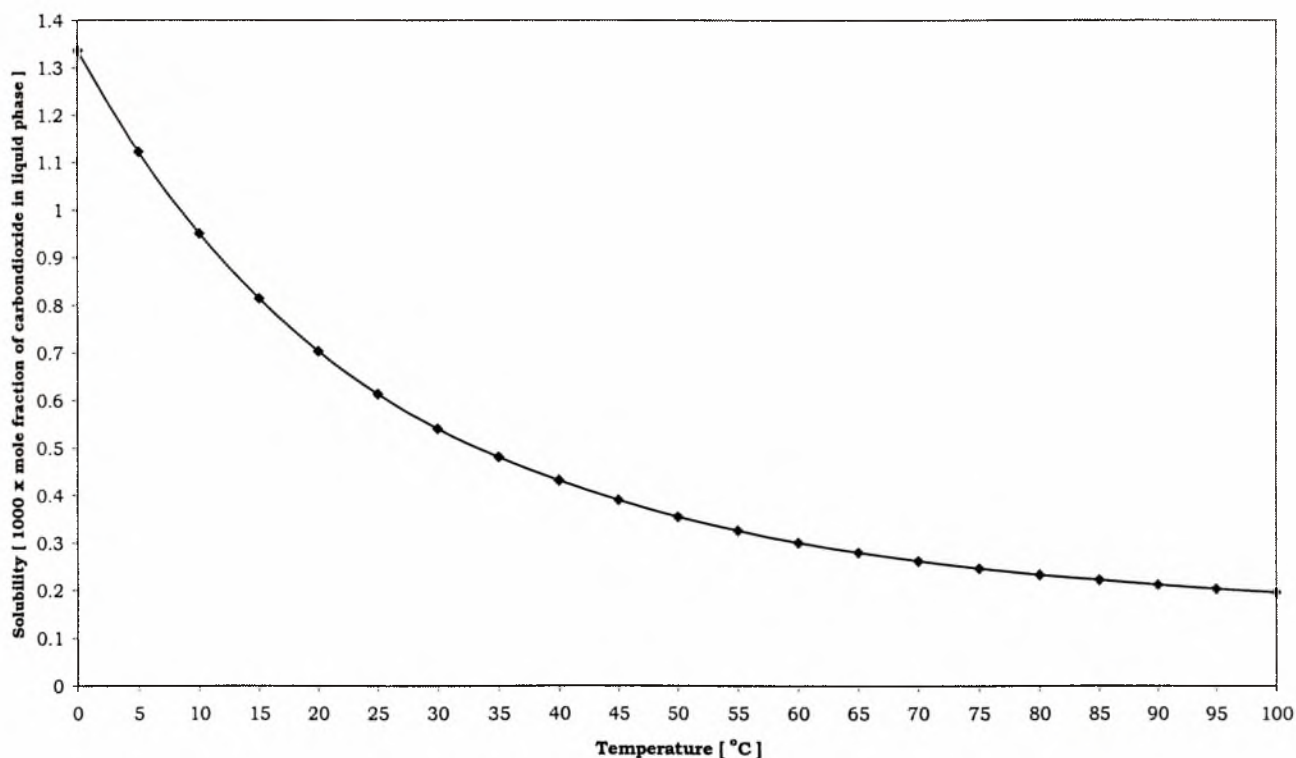
όπου S_i είναι η διαλυτότητα του αερίου i μετρούμενη σε κλάσματα mole, k_i είναι η σταθερά του *Νόμου του Henry* για αέριο i υπολογισμένη σε μονάδες πίεσης ανά κλάσμα mole, p_i είναι η μερική πίεση του αερίου i στην αέρια φάση η οποία είναι σε ισορροπία με το υγρό, P , είναι η ολική πίεση του συστήματος και y_i , είναι το γραμμομοριακό κλάσμα της αέριας φάσης.



Σχήμα 1.2.1 Διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό, συναρτήσει της μερικής πίεσης του διοξειδίου του άνθρακα, για θερμοκρασία 35 °C [2].

Η επίδραση της πίεσης στη διαλυτότητα φαίνεται ξεκάθαρα από την παραπάνω σχέση (1.1). Όταν αυξάνεται η μερική πίεση του αερίου, αυξάνεται και η διαλυτότητα. Αυτό φαίνεται παραστατικά στο Σχ. 1.2.1, όπου απεικονίζεται η διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό σαν συνάρτηση της μερικής πίεσης του διοξειδίου του άνθρακα, υπό σταθερή θερμοκρασία.

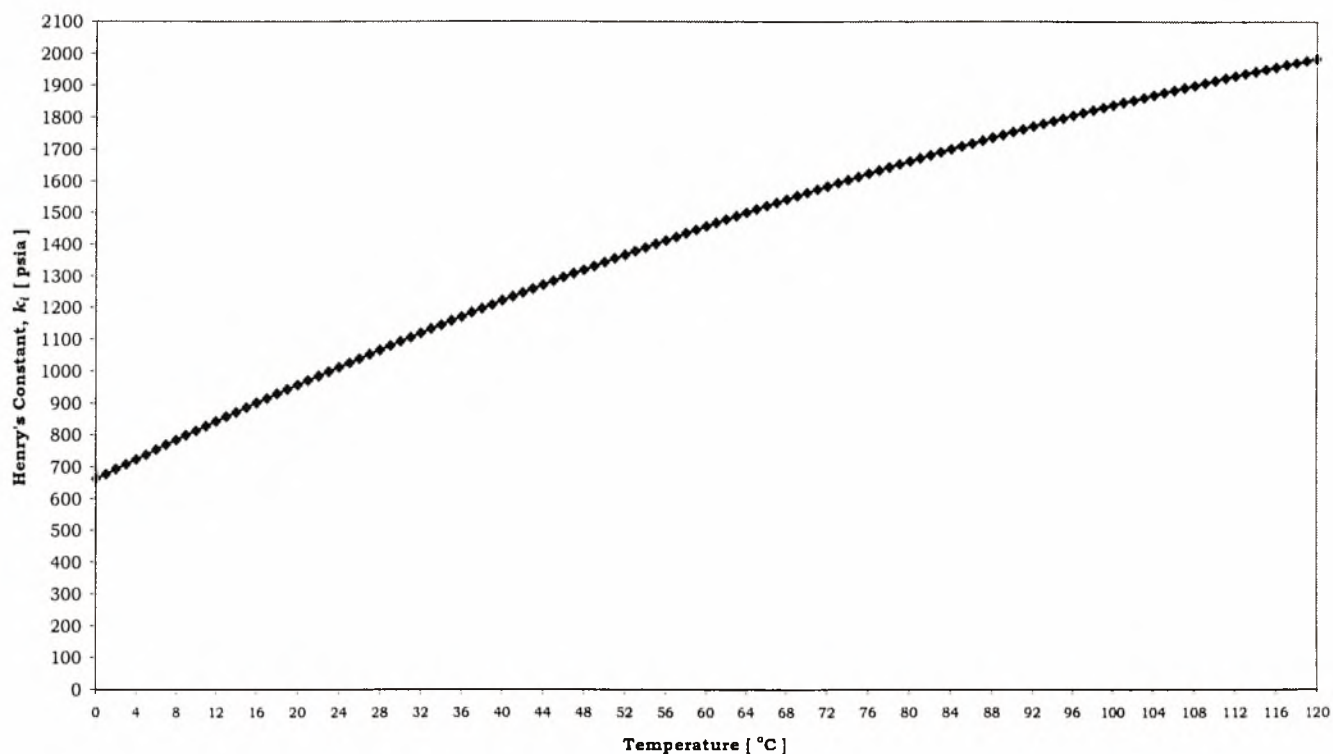
Η επίδραση της θερμοκρασίας τώρα, στη διαλυτότητα ενός αερίου σε ένα υγρό, οφείλεται στην εξάρτηση της σταθεράς του *Νόμου του Henry*, k_i , από τη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα η σταθερά του *Νόμου του Henry* είναι ανάλογη της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα όταν αυξάνεται η θερμοκρασία να μειώνεται η διαλυτότητα, όπως προκύπτει από τη σχέση (1.1). Αυτή η συμπεριφορά, πρέπει να τονίσουμε, ισχύει μόνο για αέρια χαμηλής διαλυτότητας, για τα οποία ισχύει και ο *Νόμος του Henry* με τη μορφή της σχέσης (1.1). Η εξάρτηση της διαλυτότητας από τη θερμοκρασία, όπως την περιγράψαμε παραπάνω, φαίνεται στο Σχ. 1.2.2, όπου απεικονίζεται η διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 1.2.2 Διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό, συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ατμοσφαιρική πίεση [2].

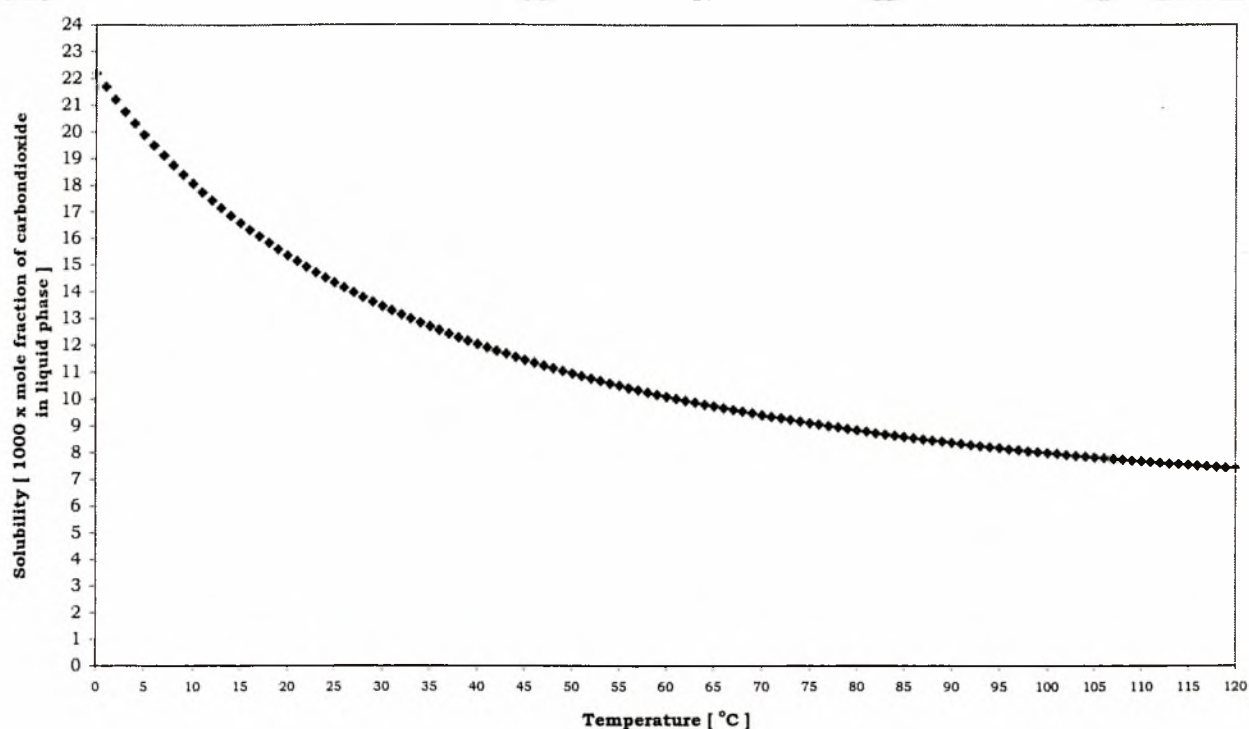
Τα υγρά των οποίων τη συμπεριφορά μελετήσαμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας ήταν το νερό, το κανονικό επτάνιο και ένα μείγμα 80-20% κ.β. γλυκερίνης-νερού. Το χρησιμοποιούμενο αέριο ήταν το διοξείδιο του άνθρακα. Δεδομένα διαλυτότητας διοξειδίου του άνθρακα στο νερό υπάρχουν εκτενώς στη βιβλιογραφία, και έχουν παρουσιαστεί στα Σχ. 1.2.1 και 1.2.2. Δυστυχώς, για το διάλυμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β. δεν καταφέραμε να βρούμε δεδομένα διαλυτότητας στη βιβλιογραφία. Όσον αφορά το επτάνιο, τώρα, καταφέραμε και υπολογίσαμε τη διαλυτότητα σε αυτό του διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της

θερμοκρασίας, από τη δημοσίευση των *Kalra et al.* [38]. Στη συγκεκριμένη δημοσίευση γίνεται υπολογισμός της σταθεράς του *Νόμου του Henry*, k_i , για το σύστημα κανονικού επτανίου-διοξειδίου του άνθρακα, σε τέσσερις τιμές της θερμοκρασίας: 37.5, 79.4, 121.1 και 204.1°C. Από τις παραπάνω τιμές καταφέραμε με παρεμβολή, χρησιμοποιώντας ένα δευτεροβάθμιο πολυώνυμο, να υπολογίσουμε τη τιμή της σταθεράς του *Νόμου του Henry*, k_i , για ένα εύρος θερμοκρασιών από 0 ως 120°C. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας φαίνονται στο Σχ. 1.2.3.



Σχήμα 1.2.3 Η εξάρτηση της σταθεράς του *Νόμου του Henry*, k_i , από τη θερμοκρασία για το σύστημα διοξειδίου του άνθρακα - καν. επτανίου [38].

Γνωρίζοντας τη τιμή της σταθεράς του *Νόμου του Henry*, k_i , συναρτήσει της θερμοκρασίας, μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τη διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο κανονικό επτάνιο, συναρτήσει της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας το *Νόμο του Henry*, όπως αυτός φαίνεται στη σχέση (1.1). Το κλάσμα *mole* του διοξειδίου του άνθρακα στην υγρή φάση θα είναι ίσο με το πηλίκο της μερικής πίεσης, p_i , του αερίου i στην αέρια φάση η οποία είναι σε ισορροπία με το υγρό, προς τη τιμή της σταθεράς του *Νόμου του Henry*, k_i , για κάθε τιμή της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των δεδομένων διαλυτότητας του διοξειδίου του άνθρακα στο κανονικό επτάνιο, φαίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 1.2.4.



Σχήμα 1.2.4 Διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο κανονικό επτάνιο, συναρτήσε της θερμοκρασίας, για ατμοσφαιρική πίεση [38].

1.2.2 Ανάπτυξη φυσαλίδων με αύξηση της θερμοκρασίας

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η αύξηση της θερμοκρασίας ή η μείωση της πίεσης έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαλυτότητας, ή αν το θέσουμε διαφορετικά, τη μείωση της συγκέντρωσης κορεσμού του αερίου στο διάλυμα. Η μείωση της συγκέντρωσης κορεσμού του αερίου στο διάλυμα έχει σαν αποτέλεσμα το γεγονός ότι το επιπλέον αέριο το οποίο δεν μπορεί να διαλυθεί στο υγρό να σχηματίσει φυσαλίδες.

Σκοπός της Μεταπτυχιακής αυτής Διατριβής, όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, είναι η μελέτη της ανάπτυξης φυσαλίδων σε ένα υγρό που περιέχει διαλυμένο αέριο, όταν αυξάνουμε τη θερμοκρασία του διαλύματος, και διατηρούμε την πίεση σταθερή. Οι λόγοι για τους οποίους διαλέξαμε να προκαλέσουμε την ανάπτυξη των φυσαλίδων στο διάλυμα με αύξηση της θερμοκρασίας αναλύονται παρακάτω.

Καταρχήν είναι τεχνολογικά ενδιαφέρον. Στις πραγματικές εφαρμογές πιο συχνά αναπτύσσονται φυσαλίδες λόγω αύξησης θερμοκρασίας παρά λόγω μείωσης της πίεσης. Αξίζει ν' αναφερθεί ότι σημαντικές εφαρμογές, όπως η απαέρωση στις διεργασίες παρασκευής τήγματος υάλου και πολυμερών, σχετίζονται με σχηματισμό φυσαλίδων λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας υπό σταθερή πίεση.

Επιπλέον, υπάρχει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον να δει κανείς ποσοτικά πως ανταγωνίζονται η μεταφορά θερμότητας και μάζας στο συγκεκριμένο φαινόμενο αλλά και γενικότερα. Οι ερευνητές διάλεξαν στο παρελθόν να μελετήσουν το σχηματισμό φυσαλίδων με μείωση της

πίεσης, για να ευκολύνουν τα πράγματα καθώς θα είχαν να μελετήσουν μόνο τη μεταφορά μάζας και όχι και της θερμοότητας

Το μόνο πρόβλημα που αντιμετωπίζει κανείς μελετώντας την ανάπτυξη φυσαλίδων αυξάνοντας τη θερμοκρασία είναι αυτό της διατήρησης της σταθερής πίεσης στην οποία υπόκειται το διάλυμα, όταν αυτό θερμαίνεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί τοποθετώντας μία λεπτή μεμβράνη ανάμεσα στο δοχείο που περιέχει το διάλυμα (όπως θα δούμε στη συνέχεια αυτό θα το ονομάσουμε *κελί*) και το εξωτερικό περιβάλλον. Με αυτό τον τρόπο αποκλείουμε κάθε ανταλλαγή μάζας, ενώ η πίεση και στις δύο πλευρές είναι η ίδια και σταθερή.

1.2.3 Επίδραση της βαρύτητας

Κάποιος θα μπορούσε να αναρωτηθεί: αφού είναι θεωρητικά πιο επιθυμητό να προκαλέσεις το σχηματισμό φυσαλίδων σε ένα διάλυμα υγρού-αερίου με αύξηση της θερμοκρασίας, γιατί δεν υπάρχει βιβλιογραφία που να εξετάζει αυτή την περίπτωση; Για τη διεξαγωγή ενός πειράματος είναι πολύ πιο εύκολο να προκαλέσεις το σχηματισμό φυσαλίδων χρησιμοποιώντας μία πτώση πίεσης. Υπάρχουν πολλοί λόγοι γι' αυτό.

Όταν θερμαίνεις ένα διάλυμα υγρού-αερίου για να προκαλέσεις το σχηματισμό φυσαλίδων, η θερμοότητα πρέπει να φθάσει σε όλο το διάλυμα. Αυτή η αγωγή θερμοότητας είναι μία σχετικά αργή διεργασία. Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί από μόνο του πρόβλημα, αλλά όταν ένα ρευστό θερμαίνεται, αλλάζει η πυκνότητα του – συνήθως μειώνεται. Κάτω από την επίδραση της γήινης βαρύτητας, η θερμαινόμενη ποσότητα της μάζας, εξαιτίας της μείωσης της πυκνότητας της, ανεβαίνει προς την επιφάνεια του ρευστού. Αυτή η συναγωγή διαταράσσει την ανάπτυξη φυσαλίδων ποικιλοτρόπως. Η ποσότητα του διαλύματος μέσα στην οποία θα μπορούσε ν' αναπτυχθεί μία φυσαλίδα, δεν θερμαίνεται τόσο όσο θα θερμαινόταν αν έμενε κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια. Αν αναπτυχθεί μία φυσαλίδα, η συναγωγή θα ανανεώσει το υγρό που την περιβάλλει. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τη διάχυση – και επομένως, το ρυθμό ανάπτυξης της φυσαλίδας.

Εκτός από τα παραπάνω προβλήματα, υπάρχει και άλλο ένα, πολύ σημαντικό: μία φυσαλίδα έχει πολύ πιο μικρή πυκνότητα από το υγρό που την περιβάλλει. Το γεγονός αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη κίνηση της φυσαλίδας προς την επιφάνεια του υγρού, εξαιτίας της επίδρασης της άνωσης. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση του χρόνου που μπορούμε να μελετήσουμε την ανάπτυξη της φυσαλίδας, αφού αυτή όταν φθάνει ένα κρίσιμο μέγεθος θα αναχωρεί από την θερμαινόμενη επιφάνεια.

Γιατί μία πτώση πίεσης δεν αντιμετωπίζει τα παραπάνω προβλήματα; Μία αύξηση της θερμοκρασίας παίρνει χρόνο για να γίνει αντιληπτή στο διάλυμα. Αντίθετα, η πτώση πίεσης διαδίδεται στο διάλυμα με μία ταχύτητα η οποία είναι ίση με τη ταχύτητα του ήχου. Έτσι, μετά από μία πολύ γρήγορη αποσυμπίεση, η μεταβολή της πίεσης γίνεται αντιληπτή σε όλο το διάλυμα και αμέσως αρχίζουν να σχηματίζονται φυσαλίδες σε όλη τη μάζα του διαλύματος. Οι φυσαλίδες, και σ' αυτή την περίπτωση, θα μετακινούνται προς την επιφάνεια του διαλύματος, αλλά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης των μπορούν να μελετηθούν πολύ καλά. Αφού δεν υπάρχει καμία συγκεκριμένη «πηγή» της μείωσης της πίεσης, οι φυσαλίδες θ' αναπτύσσονται παντού στο διάλυμα. Είναι πολύ πιθανό, να υπάρχει πάντα κάποια φυσαλίδα στην οποία μπορούμε να εστιάσουμε και να τη μελετήσουμε για κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι η επίδραση της άνωσης και η προκαλούμενη συναγωγή κάνουν πολύ δύσκολη τη μελέτη της ανάπτυξης φυσαλίδων κάτω από την επίδραση της γήινης βαρύτητας. Για να μελετήσουμε αποτελεσματικά, λοιπόν, την ανάπτυξη φυσαλίδων σε ένα διάλυμα υγρού-αερίου με αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος, πρέπει να βρούμε ένα τρόπο διεξαγωγής των πειραμάτων μας χωρίς την επίδραση της γήινης βαρύτητας. Ο μόνος τρόπος είναι η διεξαγωγή αυτών σε *συνθήκες μικροβαρύτητας*.

1.2.4 Συνθήκες μικροβαρύτητας – Παραβολικές πτήσεις [4,5]

Μέχρι πριν λίγα χρόνια, τα επιστημονικά πειράματα πάντα διεξάγονταν σε εργαστήρια στη Γη, και γι' αυτό τα επιστημονικά αποτελέσματα πάντα λαμβάνονταν κάτω από συνθήκες επίδρασης της γήινης βαρύτητας. Σε μερικές περιπτώσεις, η βαρύτητα δεν επηρεάζει το εξεταζόμενο φαινόμενο ή την εξεταζόμενη διεργασία, αλλά σε άλλες περιπτώσεις – όπως και στη δική μας – παίζει τόσο σημαντικό ρόλο που είναι δυνατό να κρύβει κάποια άλλα σημαντικά φαινόμενα που συμβαίνουν στο σύστημα ή να εμποδίζει την εξέλιξη των εξεταζόμενων φαινομένων. Πρόσφατα, νέες ευκαιρίες για έρευνα αναπτύχθηκαν με την εποχή του διαστήματος, και έγινε εφικτή η διεξαγωγή πειραμάτων σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

Υπάρχουν τρία κύρια πλεονεκτήματα για να εκτελέσει κάποιος τα πειράματα του σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Πρώτον, τα πρωτογενή φαινόμενα μπορούν να εξεταστούν χωρίς την επίδραση της βαρύτητας. Δεύτερον, κατά τη διάρκεια της εξέτασης κάποιων συστημάτων, μπορούν να προκύψουν νέα φαινόμενα που μπορεί να είναι σημαντικά, αλλά τα οποία δεν είχαν αποκαλυφθεί εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας. Τρίτον, μπορούν ν' αναπτυχθούν νέες κατασκευαστικές διεργασίες οι οποίες εκμεταλλεύονται το νέο περιβάλλον. Σαν παραδείγματα για το τελευταίο μπορεί να αναφέρει κανείς την παραγωγή στο διάστημα νέων καθαρών κρυστάλλων και νέων μεταλλικών κραμάτων.

Επίπεδα μικροβαρύτητας

Αν και έχει ευρέως υποτεθεί ότι στο Διάστημα υπάρχει μηδενική βαρύτητα, αυτό δεν είναι απολύτως σωστό. Από το γεγονός αυτό προκύπτει και η ορολογία «*μικροβαρύτητα*» ή «*μειωμένη βαρύτητα*», αντί του όρου «*μηδενική βαρύτητα*».

Συνθήκες μικροβαρύτητας μπορεί να προσομοιάσει κανείς, μέχρι έναν ορισμένο βαθμό, σε εργαστήρια στη Γη, αλλά μπορούν να εξασφαλιστούν κάτω από διάφορες πλατφόρμες, όπως οι εξής (αναφέρονται σε σειρά ελάττωσης της χρονικής διάρκειας):

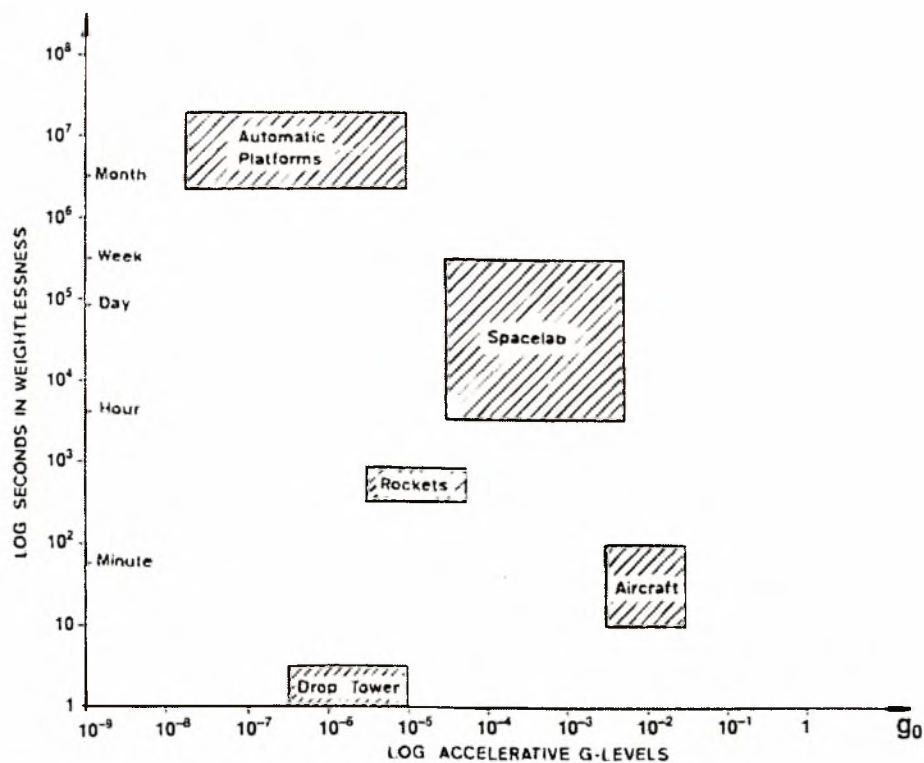
- Δορυφόροι
- Διαστημικοί σταθμοί σε τροχιά
- Ρουκέτες
- Αεροσκάφη (παραβολικές πτήσεις)
- Drop towers

Σε κάθε μία από τις παραπάνω πλατφόρμες, μπορούν να διεξαχθούν πειράματα, αλλά σε διαφορετικά επίπεδα μικροβαρύτητας για τη κάθε μία (Σχ. 1.2.5), τα οποία εξαρτώνται από την

απόλυτη περιστροφή και τη γωνιακή επιτάχυνση της πλατφόρμας, τις δυνάμεις που ενεργούν πάνω σ' αυτή, και τις ανομοιομορφίες των εξωτερικών πεδίων.

Η επιλογή της πλατφόρμας εξαρτάται πρωταρχικά από τις απαιτήσεις του πειράματος, σε διάρκεια και επίπεδο μικροβαρύτητας, και επίσης στο αν χρειάζεται να μεταβάλλονται οι συνθήκες του πειράματος κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας, κατά την οποία περίπτωση ο ερευνητής θα πρέπει να είναι παρών. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι βέβαια και η οικονομική άποψη του θέματος, αφού όπως καταλαβαίνει κανείς, η διεξαγωγή ενός πειράματος π.χ. σε ένα διαστημικό σταθμό είναι πολύ πιο δαπανηρή από ότι σε μία παραβολική πτήση.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας επιλέξαμε τη πλατφόρμα των παραβολικών πτήσεων. Αυτό έγινε για τρεις λόγους. Πρώτον, η χρονική διάρκεια (20-25 sec) και το επίπεδο της μικροβαρύτητας (10^{-2} - $10^{-3}g$) είναι άκρως ικανοποιητικά για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας. Δεύτερον, το κόστος της διεξαγωγής των πειραμάτων μας σε παραβολικές πτήσεις είναι προσιτό. Τρίτο, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μπορούμε ν' αλληλεπιδρούμε με την πειραματική μας συσκευή. Σε μία παραβολική πτήση δύο ή τρεις ερευνητές συνοδεύουν τη πειραματική συσκευή μέσα στο αεροσκάφος. Μπορούν να χειρίζονται και να αλλάζουν τις συνθήκες του πειράματος ανάλογα με τα αποτελέσματα που παίρνουν. Αφού η λειτουργία της πειραματικής συσκευής γίνεται χειροκίνητα, δεν χρειάζεται να κατασκευαστεί κάποιο ακριβό σύστημα τηλεχειρισμού της συσκευής. Επίσης, αφού χρειάζεται να ανανεώσουμε το διάλυμα - όταν αυτό θα έχει εκκενωθεί από αέριο - θα πρέπει να μπορούμε να προσεγγίσουμε τον εξοπλισμό μας.

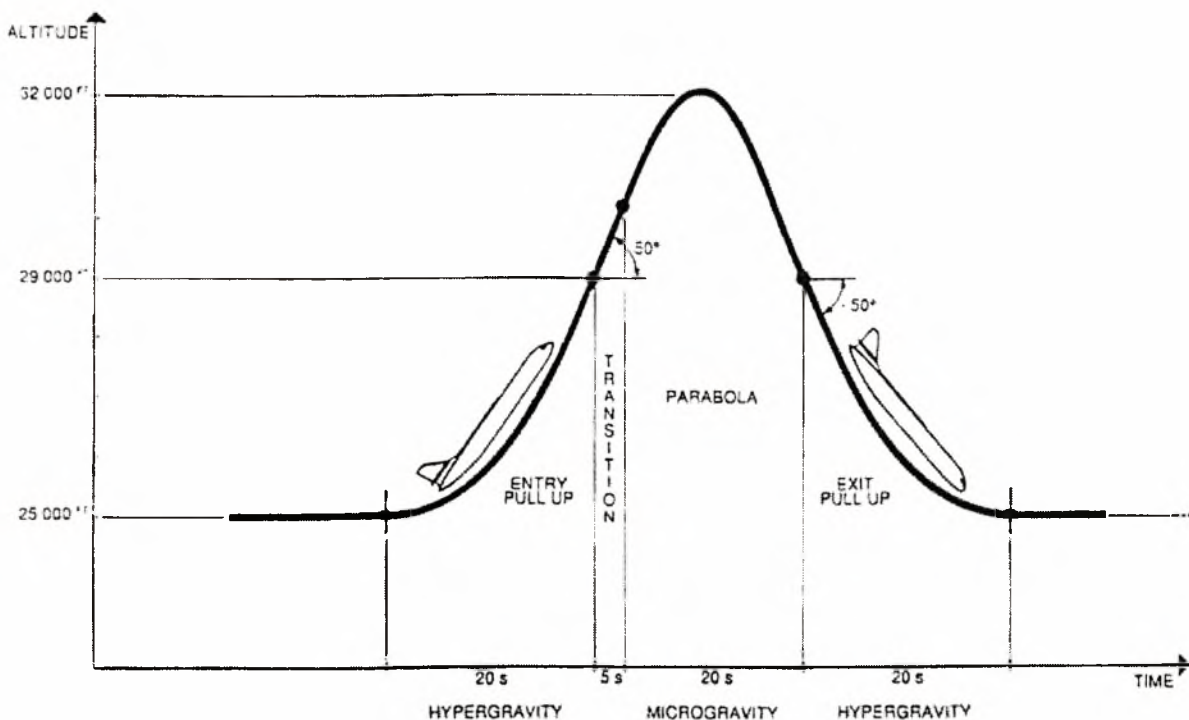


Σχήμα 1.2.5 Ονομαστικά επίπεδα βαρύτητας συναρτήσει της χρονικής διάρκειας που επιτυγχάνεται με τις κύριες πλατφόρμες μικροβαρύτητας [4].

Παραβολικές πτήσεις

Οι παραβολικές πτήσεις είναι ένας από τους πιο οικονομικούς τρόπους διεξαγωγής πειραμάτων σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Κατά τη διάρκεια μιας παραβολικής πτήσης ένα αεροπλάνο μεταβάλλει το ύψος του με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε στο εσωτερικό του αεροσκάφους να μην νιώθει κανείς επιτάχυνση σχετικά με τα τοιχώματα του αεροσκάφους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν η πορεία του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια της πτήσης του είναι παραβολή, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2.6. Η περίοδος της ελεύθερης πτώσης δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, γιατί διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος συντριβής του αεροπλάνου. Πριν και μετά από κάθε παραβολή, κατά τη διάρκεια της περιόδου της ανόδου (pull-up period) και της περιόδου της καθόδου (pull-out period), επιτυγχάνονται επίπεδα βαρύτητας ίσα με 1.8g (Υπερβαρύτητα).

Μία καμπάνια παραβολικών πτήσεων αποτελείται από τρεις μέρες. Κάθε μέρα διεξάγεται μία πτήση. Κατά τη διάρκεια κάθε πτήσης διεξάγονται 30 παραβολές. Οι παραβολές γίνονται σε ομάδες των τριών, με ένα λεπτό διάστημα ανάμεσα τους. Μετά από κάθε ομάδα, υπάρχει ένα διάστημα τεσσάρων λεπτών, και μετά από κάθε 10 παραβολές, υπάρχει μία μεγαλύτερη παύση κατά την οποία αλλάζουν οι πιλότοι της πτήσης, και ο οποίος χρόνος μπορεί



Σχήμα 1.2.6 Τροχιά παραβολικής πτήσης (ESA/CNES Caravelle Aircraft) [4].

να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή των παραμέτρων του πειράματος. Ο σχεδιασμός της διεξαγωγής των πειραμάτων έγινε λαμβάνοντας υπ' όψιν αυτό το χρονικό πρόγραμμα.

Στην πραγματικότητα, όλη η πειραματική μας συσκευή σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς ενός αεροπλάνου. Οι διαστάσεις της πειραματικής συσκευής δεν μπορούν να ξεπερνούν κάποια όρια γιατί αυτή θα πρέπει να περνάει από την πόρτα του αεροπλάνου. Η

ισχύς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι περιορισμένη, αφού η ισχύς που χρειάζεται για όλα τα πειράματα καλύπτεται από το αεροπλάνο. Η μάζα της πειραματικής μας συσκευής θα πρέπει επίσης να είναι περιορισμένη, αφού το ολικό βάρος όλων των πειραμάτων πρέπει να είναι μικρότερο από την ικανότητα του αεροπλάνου. Ένας άλλος λόγος που το βάρος της πειραματικής μας συσκευής πρέπει να είναι περιορισμένο είναι ότι έπρεπε να τη μεταφέρουμε μόνοι μας μέσα στο αεροπλάνο.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, έπρεπε να κάνουμε τον εξοπλισμό μας όσο το δυνατόν πιο ανθεκτικό. Οι δονήσεις κατά τη διάρκεια της απογείωσης ή κατά τη διάρκεια της πτήσης θα μπορούσαν να μετατοπίσουν κάποιο κομμάτι της πειραματικής μας συσκευής. Αν αυτό το κομμάτι ήταν η παροχή ρεύματος, δεν θα υπήρχε κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα: η συσκευή θα εξακολουθούσε να λειτουργεί. Αν όμως μετατοπιζόταν κάποιο εξάρτημα του οπτικού συστήματος (π.χ. ένας φακός) το αποτέλεσμα θα ήταν καταστροφικό για όλο το πείραμα.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνεται η θεωρητική βάση του προβλήματος που μελετάται στα πλαίσια της Μεταπτυχιακής αυτής Διατριβής. Αρχικά αναφέρονται κάποιες βασικές ιδέες για το *στάσιμο βρασμό πυρήνων*, ο οποίος είναι ένα φαινόμενο που έχει αρκετές ομοιότητες με την *ανάπτυξη φυσαλίδων ελεγχόμενης από μεταφορά μάζας*, και το οποίο έχει μελετηθεί εκτενέστερα, τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά. Στη συνέχεια, καταστρώνονται οι βασικές εξισώσεις επίλυσης του θερμοκρασιακού πεδίου του παρόντος προβλήματος, με τις κατάλληλες παραδοχές, συνοριακές και αρχικές συνθήκες. Τέλος, διατυπώνονται οι εξισώσεις της διάχυσης συνοδευόμενες από τις συνοριακές και αρχικές συνθήκες, και κλείνουμε το κεφάλαιο παραθέτοντας βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι - σε αντίθεση με την εκτενή βιβλιογραφία σε θέματα βρασμού και ισοθερμοκρασιακής μεταφοράς μάζας - πολύ λίγα είναι γνωστά (τόσο από πλευράς πειραμάτων όσο και θεωρητικής - υπολογιστικής προσομοίωσης) για το παρόν πρόβλημα. Αυτό σε ένα βαθμό δικαιολογείται από τη συνθετότητα του προβλήματος εξαιτίας της σύζευξης των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μεταφοράς μάζας. Πράγματι, όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια, η ανάπτυξη των φυσαλίδων ελέγχεται από τη διάχυση του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα. Όμως, τόσο η ωθούσα δύναμη (διαφορά συγκέντρωσης διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα κοντά και μακριά από τη διεπιφάνεια) όσο και η διαχυτότητα μεταβάλλονται έντονα με τη θερμοκρασία.

2.1 Ανάπτυξη φυσαλίδων με μεταφορά θερμότητας - Βρασμός

Ο βρασμός έχει μελετηθεί εκτεταμένα τις τελευταίες δεκαετίες και αρκετά είναι γνωστά για τα σχετικά φαινόμενα. Η παρακάτω σύνοψη βασίζεται στον Whalley [6].

2.1.1 Είδη Βρασμού

Ο βρασμός μπορεί να χωριστεί σε κατηγορίες σύμφωνα με το μηχανισμό με τον οποίο λαμβάνει χώρα, και σύμφωνα με τη γεωμετρία του προβλήματος. Οι τρεις μηχανισμοί βρασμού είναι:

- **Βρασμός πυρήνων** (nucleate boiling), όπου σχηματίζονται φυσαλίδες αέριας φάσης (συνήθως σε μία στερεή επιφάνεια),
- **Βρασμός συναγωγής**, (convective boiling), όπου η θερμότητα μεταφέρεται διαμέσου ενός λεπτού υμένα υγρής φάσης – το υγρό τότε εξατμίζεται στη διεπιφάνεια ατμού-υγρού χωρίς να σχηματίζονται φυσαλίδες, και
- **Βρασμός υμένα** (film boiling), όπου η θερμαινόμενη επιφάνεια καλύπτεται από έναν υμένα αέριας φάσης – η θερμότητα μεταφέρεται διαμέσου της αέριας φάσης, και το υγρό εξατμίζεται στη διεπιφάνεια ατμού-υγρού.

Οι δύο κύριες γεωμετρίες που συναντούμε στο βρασμό είναι:

- **Στάσιμος βρασμός** (pool boiling), όπου ο βρασμός συμβαίνει σε μία θερμαινόμενη στερεά επιφάνεια μέσα σε μία δεξαμενή υγρού το οποίο, εκτός από τη συναγωγή που προκαλείται από το βρασμό, είναι στάσιμο, και
- **Βρασμός ροής** (flow boiling), όπου το υγρό αντλείται διαμέσου ενός θερμαινόμενου καναλιού, που συνήθως είναι ένας σωλήνας.

Ο βρασμός πυρήνων και ο βρασμός υμένα συμβαίνουν τόσο στο στάσιμο βρασμό, όσο και στο βρασμό ροής, αλλά ο βρασμός συναγωγής συνήθως συμβαίνει σε βρασμό ροής.

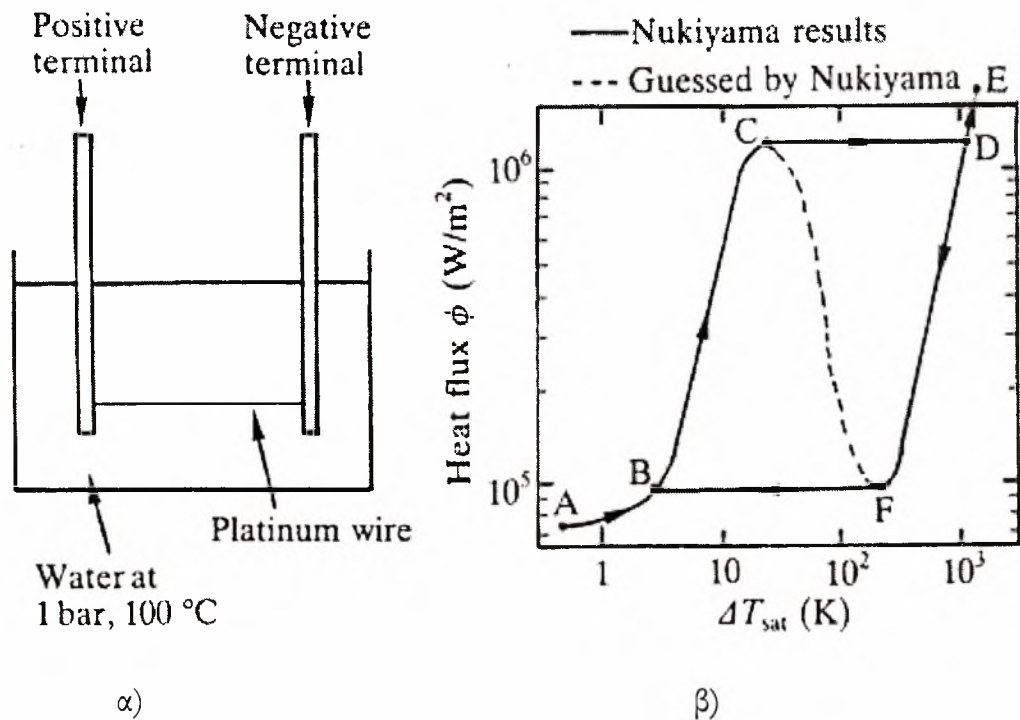
2.1.2 Στάσιμος βρασμός

Το 1934 ο Nukiyama εκτέλεσε το πείραμα που φαίνεται στο Σχ. 2.1.1(α). Ένα σύρμα από πλατίνα, βυθισμένο σε νερό, θερμαινόταν ηλεκτρικά. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρρεε το σύρμα και η τάση που εφαρμοζόταν στα άκρα του δημιουργούσαν την ισχύ, και επομένως η *ροή θερμότητας* μπορούσε να υπολογιστεί. Επίσης, μέσω της μέτρησης της αντίστασης του σύρματος μπορούσε να μετρηθεί και η θερμοκρασία του. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 2.1.1(β). Η καμπύλη της ροής θερμότητας, ϕ , ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας ΔT_{sat} (η οποία είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας του τοιχώματος και της θερμοκρασίας κορεσμού του υγρού), είναι η *καμπύλη βρασμού*. Οι περιοχές της καμπύλης είναι:

- | | |
|---------------|--|
| A στο B | φυσική συναγωγή σε μονοφασικό υγρό – δεν υπάρχει βρασμός σε αυτή την περιοχή |
| B στο C | βρασμός πυρήνων, και |
| F στο D στο E | βρασμός υμένα |

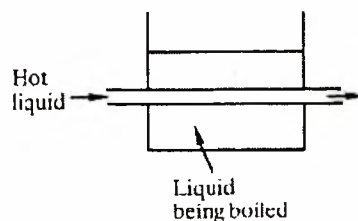
Τα σημαντικά σημεία της καμπύλης είναι:

- B το ξεκίνημα του βρασμού πυρήνων
- C το σημείο της αστοχίας (burnout) της θερμαινόμενης επιφάνειας, όπου η ροή θερμότητας είναι ίση με τη κρίσιμη ροή θερμότητας, και
- F το ελάχιστο σημείο βρασμού υμένα



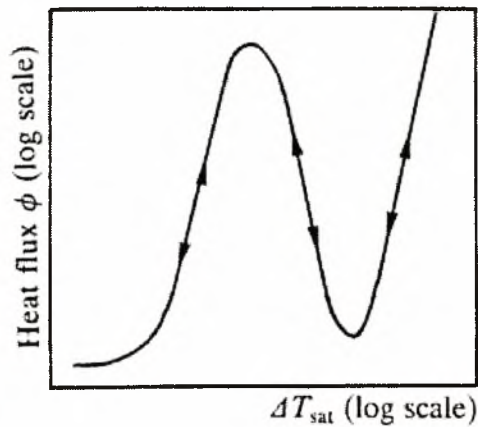
Σχήμα 2.1.1 α) Πείραμα στάσιμου βρασμού στο οποίο η ροή θερμότητας ελέγχεται, και β) Καμπύλη βρασμού από μία επιφάνεια στην οποία ελέγχεται η ροή θερμότητας [6].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι όταν, όπως στην περίπτωση της πειραματικής διάταξης που φαίνεται στο Σχ. 2.1.1(α), η ροή θερμότητας ελέγχεται, υπάρχει στην καμπύλη βρασμού ένας βρόγχος υστέρησης. Ολόκληρη η καμπύλη (η οποία φαίνεται στο Σχ. 2.1.1(β) με διακεκομμένη γραμμή) την υπέθεσε πρώτος ο Nukiyama, και μπορεί να προκύψει με το να ελέγξει κανείς τη θερμοκρασία παρά τη ροή θερμότητας. Αυτό μπορεί να γίνει, για παράδειγμα, θερμαίνοντας την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας μέσω της ροής ζεστού υγρού, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.1.2.



Σχήμα 2.1.2 Πείραμα στάσιμου βρασμού κατά το οποίο ελέγχεται η θερμοκρασία του τοιχώματος [6].

Η ροή θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας την πτώση της θερμοκρασίας του ζεστού υγρού. Η καμπύλη βρασμού που προκύπτει φαίνεται στο Σχ. 2.1.3. Πρέπει ν' αναφερθεί ότι σ' αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει καμία υστέρηση. Το τμήμα της καμπύλης βρασμού μεταξύ του C και του F είναι γνωστό ως η περιοχή του μεταβατικού βρασμού (transition boiling).

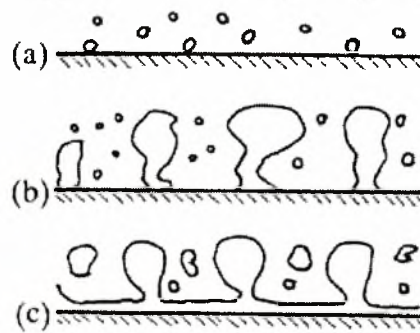


Σχήμα 2.1.3 Καμπύλη βρασμού η οποία προκύπτει όταν ελέγχεται η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας [6].

2.1.3 Οπτικοποίηση των συμβάντων στη καμπύλη βρασμού

Άμεσες οπτικές και φωτογραφικές αποδείξεις φανερώνουν τα παρακάτω.

1. Η περιοχή του βρασμού πυρήνων (BC στο Σχ. 2.1.1(β)) αποτελείται από δύο μέρη:
 - a) την περιοχή που υπάρχουν μόνο φυσαλίδες, οι οποίες συμπεριφέρονται ανεξάρτητα (όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1.4(a)), και
 - b) την περιοχή όπου υπάρχουν slugs και “κολώνες”, όπου οι φυσαλίδες αρχίζουν να συγχωνεύονται και ν' αναχωρούν από την θερμαινόμενη επιφάνεια με τη μορφή jets τα οποία στη συνέχεια σχηματίζουν μεγάλες φυσαλίδες, ή slugs, πάνω από την επιφάνεια (βλ. Σχ. 2.1.4(b)).
2. Την περιοχή βρασμού υμένα (FDE στο Σχ. 2.1.1(β)), κατά την οποία η θερμαινόμενη επιφάνεια καλύπτεται από ένα στρώμα ατμού (βλ. Σχ. 2.1.4(c)). Το υγρό δεν έρχεται σε επαφή με τη θερμαινόμενη επιφάνεια. Η επιφάνεια της αέριας φάσης είναι ασταθής, και φυσαλίδες απελευθερώνονται απ' αυτήν προς το υγρό.
3. Η περιοχή του μεταβατικού βρασμού (FC στο Σχ. 2.1.1(β)), είναι μία σύνθετη περιοχή όπου τμήματα της επιφάνειας βρίσκονται σε κατάσταση βρασμού υμένα, και άλλα σε κατάσταση πυρήνιου βρασμού όπου αναπτύσσονται slugs και “κολώνες”.



Σχήμα 2.1.4 Αποτελέσματα οπτικοποίησης σε πυρηνικό βρασμό και βρασμό υμένα [6].

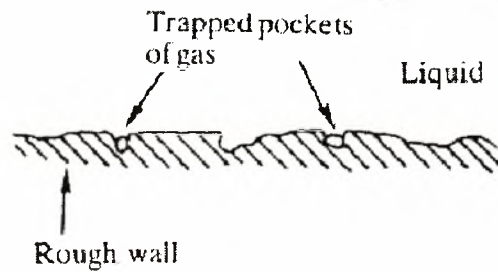
2.1.4 Πυρήνωση φυσαλίδας

Η διεργασία σχηματισμού της φυσαλίδας είναι γνωστή ως *πυρήνωση*. Είναι ανάλογη με πολλούς τρόπους με τη κρυσταλλική πυρήνωση. Ένα διάλυμα άλατος μπορεί να ψυχθεί μέχρι να γίνει υπέρκορο, αλλά πριν ένας κρύσταλλος μπορέσει ν' αρχίσει ν' αναπτύσσεται, θα πρέπει να έχει κάτι πάνω στο οποίο ν' αρχίσει ν' αναπτύσσεται: μία τραχεία επιφάνεια, σωματίδια ακαθαρσίας ή ένα μικρό κρύσταλλο. Η πυρήνωση φυσαλίδας ενός διαλυμένου αερίου, έτσι ώστε να σχηματίσει φυσαλίδες αερίου σε ένα υγρό, μπορεί να τις δει κανείς σε ένα ποτήρι που περιέχει ανθρακούχο ποτό. Προσεκτική παρατήρηση θα δείξει ότι οι φυσαλίδες αερίου:

1. σχηματίζονται σε μία επιφάνεια πάνω στο γυάλινο δοχείο,
2. αναχωρούν από το ίδιο σημείο της επιφάνειας σε μορφή μίας αλυσίδας φυσαλίδων, και
3. συχνά ξεκινούν από το ίδιο σημείο αν αδειάσει κανείς το δοχείο και το ξαναγεμίσει.

Αν το υγρό είναι καθαρό (δηλαδή δεν περιέχει σωματίδια ακαθαρσίας) οι φυσαλίδες δεν παρατηρούνται να σηκώνονται από ένα σημείο μέσα στο κυρίως σώμα του υγρού, μακριά από την επιφάνεια.

Είναι φανερό ότι οι ιδιότητες της επιφάνειας είναι πολύ σημαντικές σε όλα αυτά τα φαινόμενα πυρήνωσης: κρυσταλλοποίηση, σχηματισμός αέριων φυσαλίδων, και πυρηνικός βρασμός. Η επιφάνεια, όταν την παρατηρήσει κανείς με τη βοήθεια υψηλής ανάλυσης μικροσκόπιο, δεν είναι λεία: περιέχει αυλακώσεις και ρωγμές σε μία πολύπλοκη μορφή. Με το να λειάνει κανείς όλο και περισσότερο την επιφάνεια, το μόνο που καταφέρνει είναι να μειώσει τη κλίμακα μεγέθους των αυλακώσεων και των ρωγμών. Μία πολύ μεγενθυμένη διατομή της επιφάνειας μπορεί να μοιάζει μ' αυτή του Σχ. 2.1.5. Οι ρωγμές και οι χαραμάδες δεν αποτελούν από μόνες τους σημεία πυρήνωσης για τις φυσαλίδες: θα πρέπει να περιέχουν επίσης θύλακες αερίου, πιθανώς αέρα που εγκλωβίστηκε όταν το δοχείο γεμίστηκε με υγρό. Απ' αυτούς τους θύλακες παγιδευμένου αέρα αρχίζουν ν' αναπτύσσονται οι φυσαλίδες αερίου κατά τη διάρκεια του πυρηνικού βρασμού.



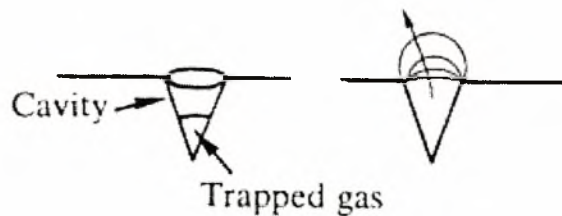
Σχήμα 2.1.5 Επιφάνεια βρασμού σε μεγέθυνση [6].

2.1.4.1 Είδη πυρήνωσης

Ο συνήθης τύπος πυρήνωσης είναι αυτός που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα: πυρήνωση σε μία στερεή επιφάνεια. Αυτή ονομάζεται *ετερογενής πυρήνωση* γιατί εμπλέκονται ένα στερεό και ένα υγρό. Σε ακραίες περιπτώσεις, όπου δεν υπάρχουν σημεία πυρήνωσης στα τοιχώματα του δοχείου, μπορεί να συμβεί *ομογενής πυρήνωση*. Αυτή είναι πυρήνωση που συμβαίνει στο κυρίως μέρος του υγρού μακριά από τα τοιχώματα του δοχείου. Η ομογενής πυρήνωση συμβαίνει όταν, με τη βοήθεια διεργασιών που συμβαίνουν τυχαία, ένας αριθμός από ενεργητικά μόρια συνέρχονται μεταξύ τους και σχηματίζουν μία μικρή, πολύ περιορισμένη, περιοχή “αερίου”. Αυτή η περιοχή αερίου μπορεί στη συνέχεια ν’ αναπτυχθεί γρήγορα. Όταν αρχίσει η ομογενής πυρήνωση οι αέριες φυσαλίδες αναπτύσσονται με εκρηκτικό ρυθμό.

2.1.4.2 Ετερογενής πυρήνωση στο στάσιμο βρασμό

Η ιδανική κοιλότητα, η οποία φαίνεται στο Σχ. 2.1.6, είναι κωνικού σχήματος και έχει άνοιγμα κυκλικού σχήματος. Καθώς η φυσαλίδα μεγαλώνει, η ακτίνα καμπυλότητας της αλλάζει.



Σχήμα 2.1.6 Η ιδανική κοιλότητα πυρήνωσης [6].

Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας της φυσαλίδας συμβαίνει όταν η φυσαλίδα σχηματίζει ένα ημισφαίριο στο στόμιο της κοιλότητας. Η ακτίνα καμπυλότητας τότε είναι φυσικά, ίση με την ακτίνα R του ανοίγματος της κοιλότητας.

Αν η πίεση μέσα στη φυσαλίδα είναι p_B (N/m^2), τότε

$$p_B = p_\infty + \frac{2\sigma}{r} \quad (2.1)$$

όπου p_∞ είναι η πίεση του υγρού (N/m^2), και r είναι η ακτίνα της φυσαλίδας (m). Τώρα, η p_B είναι μέγιστη όταν $r = R$ (η ακτίνα της κοιλότητας). Η θερμοκρασία του τοιχώματος T_w θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε να εξατμίσει το υγρό σε μία πίεση ίση με p_B (βλ. Σχ. 2.1.7), επομένως, για ν' αναπτυχθεί η φυσαλίδα, θα πρέπει:

$$T_w > T_{sat} + \frac{dT}{dp}(p_B - p_\infty) \quad (2.2)$$

Η κλίση της καμπύλης πίεσης ατμών μπορεί να βρεθεί από την σχέση του *Clausius-Clapeyron*:

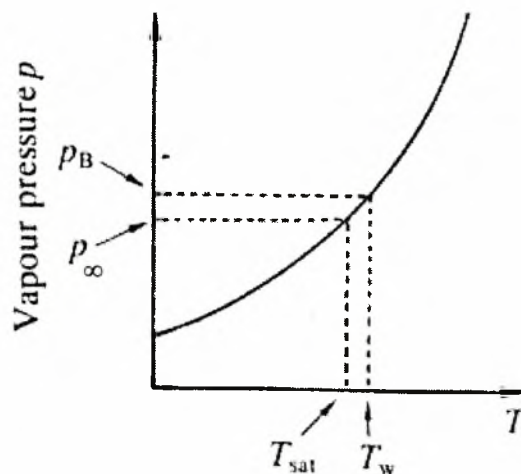
$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{(u_g - u_l)T_{sat}} \quad (2.3)$$

Όπου λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσης (J/kg), T_{sat} είναι η θερμοκρασία κορεσμού (K), και u_g και u_l είναι οι ειδικοί όγκοι του ατμού και του υγρού (m^3/kg). Έτσι αν $u_g \gg u_l$ και, αφού $u_g = 1/\rho_g$, τότε

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T_{sat}}{\lambda \rho_g} \quad (2.4)$$

και η ανισότητα γίνεται:

$$T_w > T_{sat} + \frac{2\sigma}{R} \frac{T_{sat}}{\lambda \rho_g} \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.1.7 Καμπύλη πίεσης ατμών: υπερθέρμανση που χρειάζεται για την πυρήνωση [6].

Αν η ΔT_{sat} είναι η τιμή της διαφοράς ($T_w - T_{sat}$) στην οποία αρχίζει η πυρήνωση, τότε η ακτίνα της κοιλότητας, R_{cav} , δίνεται από τη σχέση:

$$R_{cav} = \frac{2\sigma T_{sat}}{\rho_g \lambda \Delta T_{sat}} \quad (2.6)$$

Αν το μέγεθος της κοιλότητας είναι γνωστό, τότε ξεκάθαρα το μέγεθος της υπερθέρμανσης του τοιχώματος ΔT_{sat} το οποίο χρειάζεται για να ξεκινήσει ο βρασμός πυρήνων μπορεί να υπολογιστεί. Οι πραγματικές επιφάνειες, φυσικά, μπορούν να περιέχουν ένα εύρος από μεγέθη κοιλότητων. Καθώς η υπερθέρμανση του τοιχώματος ΔT_{sat} μεγαλώνει, κοιλότητες που έχουν όλο και μικρότερη ακτίνα μπορούν να γίνουν ενεργές και να ξεκινήσουν πυρήνωση.

2.1.5 Ανάπτυξη φυσαλίδων στο βρασμό πυρήνων

Ο βρασμός πυρήνων μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν η κυρίως μάζα του υγρού (bulk) είναι κορεσμένη (όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία βρασμού του), ή όταν είναι υπόψυκτο (όταν βρίσκεται δηλαδή κάτω από τη θερμοκρασία βρασμού του). Μία διαφορά που παρατηρείται αφορά στο τι συμβαίνει στις φυσαλίδες που αναπτύσσονται πάνω στην θερμαινόμενη επιφάνεια. Σ' ένα κορεσμένο υγρό, μία φυσαλίδα αναπτύσσεται και ύστερα, με τη βοήθεια της άνωσης, αποχωρεί από την επιφάνεια. Καθώς αναχωρεί, φρέσκο υγρό ρέει προς την επιφάνεια. Μία άλλη φυσαλίδα τότε αρχίζει ν' αναπτύσσεται στο ίδιο σημείο. Σ' ένα υπόψυκτο υγρό, η φυσαλίδα αναπτύσσεται και φθάνει έξω προς το σχετικά πιο ψυχρό υγρό: έτσι η φυσαλίδα αρχίζει να συμπυκνώνεται, με αποτέλεσμα ν' αυξάνεται ελάχιστα η θερμοκρασία του υγρού. Η φυσαλίδα μπορεί να συντριβεί ολοκληρωτικά και, για μία ακόμη φορά, νέο, ψυχρό υγρό ρέει προς την περιοχή κοντά στο τοίχωμα. Η διαδικασία της ανάπτυξης φυσαλίδων μπορεί να ξεκινήσει ξανά.

Η συντριβή των φυσαλίδων που παρατηρείται σε υπόψυκτο υγρό είναι υπεύθυνη για το χαρακτηριστικό ήχο που ακούγεται από ένα βραστήρα τσαγιού όταν σχετικά ψυχρό υγρό θερμαίνεται στο σημείο βρασμού του. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η φυσαλίδα βρίσκεται σε επαφή μόνο με μία πολύ μικρή περιοχή του θερμαινόμενου τοιχώματος. Συνήθως δεν υπάρχει κανένα μεγάλο ξερό τμήμα του τοιχώματος από κάτω από τη φυσαλίδα.

Η ανάπτυξη, τώρα, της φυσαλίδας ελέγχεται από δύο παράγοντες.

1. Την αδράνεια του υγρού. Αυτή αναφέρεται σε μικρούς χρόνους μετά το σχηματισμό της φυσαλίδας, και όταν η αδράνεια είναι ο ελέγχων μηχανισμός, η ακτίνα της φυσαλίδας είναι ανάλογη του χρόνου που έχει διανυθεί από το σχηματισμό της φυσαλίδας. Ο ρυθμός μεταβολής της ακτίνας της φυσαλίδας, όταν η ανάπτυξη της ελέγχεται από την αδράνεια του υγρού είναι, σύμφωνα με τους Mikic *et al.* [28]:

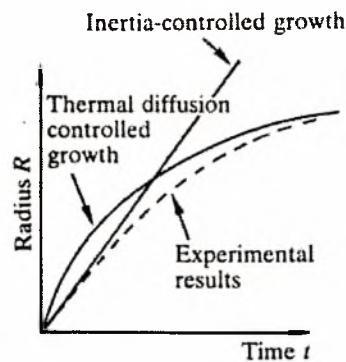
$$\frac{dR}{dt} = \left(\frac{2\rho_v h_{fg} (T_v - T_{sat})}{3\rho_l T_{sat}} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

2. Θερμική διάχυση διαμέσου ενός οριακού στρώματος γύρω από τη φυσαλίδα. Η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση πρέπει να δοθεί από το θερμό υγρό στρώμα

που βρίσκεται γύρω από την αναπτυσσόμενη φυσαλίδα. Όταν η θερμική διάχυση είναι ο ελέγχων μηχανισμός, η ακτίνα της φυσαλίδας είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου που έχει διανυθεί από το σχηματισμό της φυσαλίδας. Η θερμική διάχυση ασκεί την ελέγχουσα επιρροή στην ανάπτυξη της φυσαλίδας σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το ξεκίνημα της ανάπτυξης της. Ο ρυθμός μεταβολής της ακτίνας της φυσαλίδας, όταν η ανάπτυξη της ελέγχεται από τη διάχυση θερμότητας, είναι, σύμφωνα με τους Mikic *et al.* [28]:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{12\alpha_l}{\pi t} \right)^{1/2} \frac{\rho_l c_l (T_\infty - T_v)}{\rho_v h_{fg}} \quad (2.8)$$

Η ανάπτυξη της φυσαλίδας σαν συνάρτηση του χρόνου φαίνεται στο Σχ. 2.1.8. Σε μικρούς χρόνους η ακτίνα της φυσαλίδας είναι ανάλογη του t (ελεγχόμενη από την αδράνεια). Σε μεγάλους χρόνους η ακτίνα της φυσαλίδας είναι ανάλογη του $t^{1/2}$ (ελεγχόμενη από την θερμική διάχυση).



Σχήμα 2.1.8 Ανάπτυξη της φυσαλίδας σαν συνάρτηση του χρόνου [6].

Το παραπάνω σχήμα δίνει περισσότερο μία ποιοτική εικόνα των κυβερνώντων μηχανισμών στην ανάπτυξη της φυσαλίδας σε συνάρτηση με το χρόνο. Οι Lee & Merte [29], στην προσπάθεια τους να καθορίσουν πιο συγκεκριμένα τις περιοχές στις οποίες κυριαρχούν η αδράνεια του υγρού και η επίδραση της διάχυσης θερμότητας, απεικόνισαν στο διάγραμμα του Σχ. 2.1.9 την εξίσωση (2.7), ανάπτυξης της φυσαλίδας ελεγχόμενη από την αδράνεια, και την εξίσωση (2.8), ανάπτυξης της φυσαλίδας ελεγχόμενη από τη διάχυση θερμότητας, πάνω από τη λύση των Mikic *et al.* [28], εξίσωση (2.9) όπως φαίνεται στο σχήμα, μαζί με πειραματικά αποτελέσματα για διάφορα υγρά για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών. Η εξίσωση για τη μεταβολή της ακτίνας της φυσαλίδας των Mikic *et al.* [28] είναι η εξής:

$$R^+ = \frac{2}{3} \left[(t^+ + 1)^{3/2} - (t^+)^{3/2} - 1 \right] \quad (2.9)$$

όπου

$$R^+ = \frac{R}{B^2/A} \quad t^+ = \frac{t}{B^2/A^2}$$

$$A = \left(\frac{2\Delta T h_{fg} \rho_v}{3T_{sat} \rho_l} \right)^{1/2} \quad B = \left(\frac{12}{\pi} Ja^2 \alpha_l \right)^{1/2} \quad 1$$

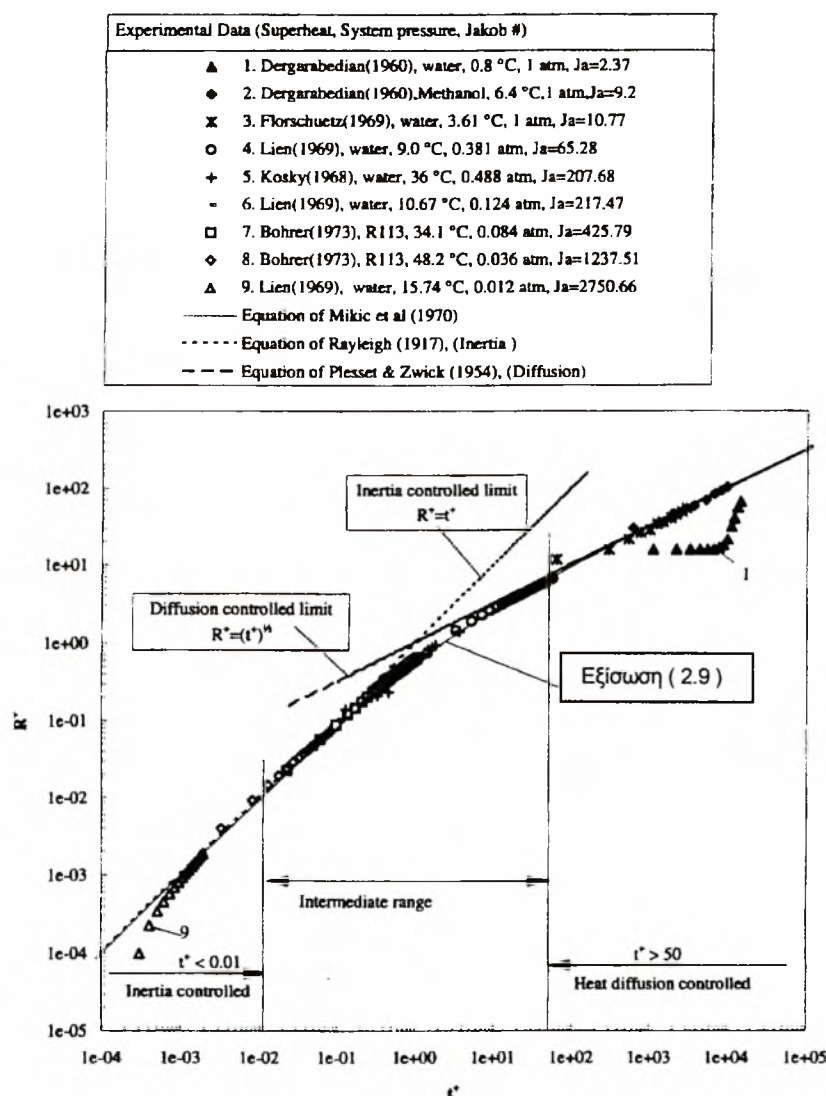
Για $t^+ \ll 1$ η σχέση (2.9) απλοποιείται στη λύση του Rayleigh [35] για ανάπτυξη φυσαλίδας ελεγχόμενη από τις δυνάμεις αδράνειας:

$$R^+ = t^+ \quad \dot{\eta} \quad R = Ct. \quad (2.10)$$

Για $t^+ \gg 1$ η σχέση (2.9) απλοποιείται στη λύση των Plesset & Zwick [11]:

$$R^+ = (t^+)^{1/2} \quad \dot{\eta} \quad R = Dt^{1/2}. \quad (2.11)$$

όπου C, D, σταθεροί συντελεστές.



Σχήμα 2.1.9 Συγκρίσεις διαφόρων μετρήσεων ανάπτυξης φυσαλίδας με την ανάλυση των Mikic et al. [28], και με οριακές περιπτώσεις αυτές της ανάπτυξης ελεγχόμενης από την αδράνεια και τη διάχυση θερμότητας [29].

¹ Ο αριθμός Ja είναι ο αριθμός Jakob, και είναι ίσος με $Ja = \rho_l c_l (T_\infty - T_{sat}) / \rho_v h_{fg}$.

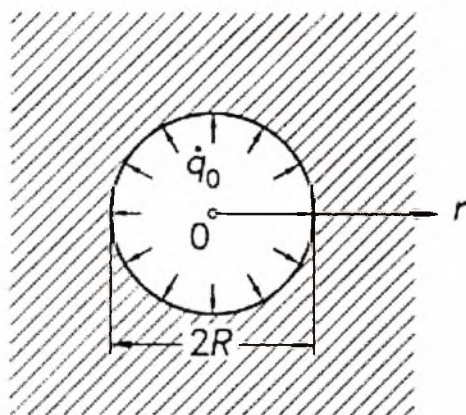
Τα ανώτερα και τα χαμηλότερα όρια ορίζονται σαν εκείνες οι τιμές του t^* όπου υπάρχει μία ασυμφωνία της τάξης του 10% μεταξύ των εξισώσεων (2.7) και (2.8) και της λύσης των *Mikić et al.* [28]. Τα πειράματα που καθορίζονται με τους αριθμούς 1-3 στο Σχ. 2.1.9 βρίσκονται στην περιοχή της διάχυσης θερμότητας, τα πειράματα 4-8 βρίσκονται στην περιοχή του ενδιάμεσου εύρους, ενώ το πείραμα 9 βρίσκεται στην περιοχή όπου η ανάπτυξη της φυσαλίδας ελέγχεται από τις δυνάμεις αδρανείας. Τα πειράματα 1 και 9 φαίνεται να αποκλίνουν από τη λύση των *Mikić et al.* [28], και αυτό οφείλεται στην με επίδραση της επιφανειακής τάσης και των δυνάμεων αδρανείας του υγρού, αντίστοιχα, η οποία είναι πολύ σημαντική κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης της φυσαλίδας.

2.2 Επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου

Το θερμοκρασιακό πεδίο, του οποίου τις εξισώσεις επίλυσης θέλουμε να καταστρώσουμε, προκαλείται από τη σημειακή θέρμανση, με σταθερή ροή θερμότητας, ποσότητας υγρού που περιέχεται σε ένα δοχείο. Η θέρμανση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός thermistor.

Για την ευκολότερη κατάστρωση των εξισώσεων επίλυσης του θερμοκρασιακού πεδίου, θεωρούμε το thermistor σημειακό, σφαιρικής γεωμετρίας και απειροστής μάζας. Ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού πεδίου που δημιουργείται όταν υπάρχει μία σημειακή πηγή θερμότητας παρουσιάζεται στη συνέχεια, σύμφωνα με τους *Baehr & Stephan* [7]. Θεωρούμε ότι έχουμε περίπτωση μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής σε σφαιρικές συντεταγμένες.

Θα κάνουμε αρχικά την παραδοχή ότι η φυσαλίδα αναπτύσσεται συμμετρικά γύρω από τον σημειακό θερμαντήρα μας, περιβάλλοντάς τον, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.2.1. Το υγρό που βρίσκεται γύρω από τη φυσαλίδα θεωρείται σαν ένα σώμα που εκτείνεται απείρως σε όλες τις κατευθύνσεις, και περιέχει τη φυσαλίδα ακτίνας R μέσα σ' αυτό, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.2.1.



Σχ. 2.2.1 Η θεωρούμενη γεωμετρία του προβλήματος, για την επίλυση του θερμοκρασιακού πεδίου [7].

Στην επιφάνεια της φυσαλίδας καθορίζεται η συνοριακή συνθήκη μίας περιφερειακής σταθερής ροής θερμότητας $\dot{q}_o = \dot{q}_o(t)$. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μέσα στη φυσαλίδα μία πηγή θερμότητας με θερμική ισχύ:

$$\dot{Q} = 4\pi R^2 \dot{q}_o \quad (2.12)$$

Το θερμοκρασιακό πεδίο έξω από τη φυσαλίδα, αν υποθέσουμε ότι η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται μόνο από διάχυση και ότι η φυσαλίδα μεγαλώνει με πολύ αργό ρυθμό, ικανοποιεί την διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.13)$$

με συνοριακές συνθήκες:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_o = \frac{\dot{Q}(t)}{4\pi R^2} \quad \text{για } r = R \quad (2.14)$$

και

$$T = 0 \quad \text{για } r \rightarrow \infty \quad (2.15)$$

αν υποθέσουμε ότι η αρχική θερμοκρασία είναι ίση με $T = 0$.

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό *Laplace*, οδηγούμαστε στη σχέση:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{du}{dr} - p^2 u = 0 \quad (2.16)$$

με $p^2 = s/\alpha$. Οι οριακές συνθήκες γίνονται:

$$\frac{du}{dr} = -\frac{1}{4\pi R^2 \lambda} L\{\dot{Q}(t)\} \quad \text{για } r = R \quad (2.17)$$

και

$$u \rightarrow 0 \quad \text{για } r \rightarrow \infty.$$

Μία λύση που ικανοποιεί την τελευταία συνθήκη είναι:

$$u = \frac{B}{r} e^{-pr} \quad (2.18)$$

Η σταθερά B υπολογίζεται με τη βοήθεια της Σχ. 2.17, έτσι ώστε η σχέση:

$$u = \frac{L\{\dot{Q}(t)\} e^{-p(r-R)}}{4\pi \lambda r (1 + pR)} \quad (2.19)$$

να είναι η επιθυμητή μετασχηματισμένη εξίσωση.

Θεωρώντας το $R \rightarrow 0$ μπορούμε να πάρουμε για τη σημειακή πηγή θερμότητας στο $r = 0$:

$$u = \frac{L\{\dot{Q}(t)\} e^{-pr}}{4\pi \lambda r} \quad (2.20)$$

Από τον πίνακα μετασχηματισμών Laplace (No. 4 στον Πίνακα I.1 του Παραρτήματος) παίρνουμε:

$$e^{-pr} = L\left\{\frac{r}{2\sqrt{\alpha\pi t^{3/2}}} e^{-r^2/4\alpha t}\right\} \quad (2.21)$$

έτσι ώστε το u να προκύπτει σαν το προϊόν δύο μετασχηματισμών Laplace, ως εξής:

$$u = \frac{1}{4\pi\lambda} L\{\dot{Q}(t)\} \cdot L\left\{\frac{e^{-r^2/4\alpha t}}{2\sqrt{\alpha\pi t^{3/2}}}\right\} \quad (2.22)$$

Η παραπάνω σχέση, σύμφωνα με το θεώρημα περιέλιξης (convolution theorem), (No. 6 στον Πίνακα I.2 του Παραρτήματος), είναι:

$$u = \frac{1}{4\pi\lambda} L\left\{\int_{\tau=0}^{\tau=t} \dot{Q}(\tau) \frac{\exp(-r^2/4\alpha(t-\tau))}{2\sqrt{\alpha\pi(t-\tau)^{3/2}}} d\tau\right\} \quad (2.23)$$

Επομένως, η κατανομή θερμοκρασίας γύρω από μία σημειακή πηγή θερμότητας η οποία βρίσκεται στο $r = 0$, η οποία τη χρονική στιγμή $t = 0$ τίθεται σε λειτουργία με μία θερμική ισχύ μεγέθους $\dot{Q}(t)$, προκύπτει να είναι:

$$T(r,t) = \frac{1}{(4\pi\alpha)^{3/2} c\rho_0} \int_0^t \dot{Q}(\tau) \exp\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-\tau)}\right) \frac{d\tau}{(t-\tau)^{3/2}} \quad (2.24)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη γενική λύση για κάθε χρονική συνάρτηση του $\dot{Q}(t)$. Το θερμοκρασιακό πεδίο για πηγή σταθερής θερμικής ισχύος $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0$, είναι ίσο με:

$$T(r,t) = \frac{\dot{Q}_0}{4\pi\lambda r} \operatorname{erfc} \frac{r}{\sqrt{4\alpha t}} \quad (2.25)$$

Για $t \rightarrow \infty$ παίρνουμε με $\operatorname{erfc}(0) = 1$, το θερμοκρασιακό πεδίο σε σταθερή κατάσταση γύρω από μία σημειακή πηγή θερμότητας, να είναι:

$$T(r) = \frac{\dot{Q}_0}{4\pi\lambda r} \quad (2.26)$$

2.3 Ανάπτυξη φυσαλίδων με μεταφορά μάζας

Η ανάπτυξη φυσαλίδων σε κορεσμένο διάλυμα υγρού-αερίου, προκαλείται, στην περίπτωση του εξεταζόμενου προβλήματος, με αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος. Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, δίνοντας μία ποσότητα θερμότητας με σταθερή ροή στο διάλυμα μέσω μίας σημειακής πηγής θερμότητας, προκαλούμε τη μεταβολή του θερμοκρασιακού πεδίου, με αποτέλεσμα τη μεταβολή και της συγκέντρωσης σε αέριο του διαλύματος. Η διαφορά αυτή της συγκέντρωσης αποτελεί και την ωθούσα δύναμη της διάχυσης του αερίου συστατικού και το σχηματισμό φυσαλίδων. Στη συνέχεια της ενότητας θ' αναφερθούμε στη βιβλιογραφική μελέτη που έγινε σχετικά με το εξεταζόμενο πρόβλημα, και θα κλείσουμε με τη λεπτομερή ανάλυση του προβλήματος και τη κατάστρωση των εξισώσεων διάχυσης, με τις κατάλληλες συνοριακές και αρχικές συνθήκες.

2.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Καταρχήν θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι δεν βρήκαμε στη βιβλιογραφία δημοσίευση στην οποία να έχει μελετηθεί η ανάπτυξη φυσαλίδων ελεγχόμενη από μεταφορά μάζας σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Το μειονέκτημα αυτού του γεγονότος είναι ότι δεν θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε τ' αποτελέσματα μας με αυτά κάποιας άλλης δημοσιευμένης εργασίας.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας είναι ότι σε όλες σχεδόν τις προηγούμενες δημοσιεύσεις το πρόβλημα της ανάπτυξης φυσαλίδων ελεγχόμενης από διάχυση θεωρείτο *ισοθερμοκρασιακό*, έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει πιο προσιτό στην επίλυση του.

Πιο συγκεκριμένα, στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι για να προβλέψουν την ανάπτυξη φυσαλίδων σε υγρά, αλλά μοντελοποιούν συγκεκριμένες περιπτώσεις. Οι κυβερνώσες σχέσεις που περιγράφουν τη σφαιρικά συμμετρική ανάπτυξη φάσης που ελέγχεται ταυτόχρονα από μεταφορά θερμότητας και μάζας παρουσιάστηκαν από τον *Scriven*, στη κλασική δημοσίευση του [8]. Ο *Scriven* παρουσίασε μία αναλυτική λύση για φυσαλίδα που αναπτύσσεται μέσα σε μία απείρων διαστάσεων δεξαμενή υγρού, χρησιμοποιώντας *λύση ομοιότητας*. Η λύση ομοιότητας ισχύει για μία φυσαλίδα που αναπτύσσεται από μηδενική αρχική ακτίνα. Εξαιτίας της παρουσίας μίας κλίμακας γεωμετρικού μήκους, (δηλαδή της αρχικής ακτίνας της φυσαλίδας) δεν μπορούν να βρεθούν λύσεις ομοιότητας στην εξίσωση της διάχυσης, για μία φυσαλίδα που αναπτύσσεται από μη-μηδενική ακτίνα. Στην ίδια δημοσίευση μελετήθηκε επίσης, η επίδραση της *ακτινικής συναγωγής*, η οποία οφείλεται στις ανόμοιες πυκνότητες των φάσεων.

Η λύση ομοιότητας που παρουσιάστηκε από τον *Scriven*, επεκτάθηκε από τους *Cable & Frade* [9] στις περιπτώσεις εκείνες που οι φυσαλίδες αποτελούνται από περισσότερα από ένα αέρια συστατικά, από τα οποία περισσότερα από ένα διαχέονται στη φυσαλίδα ταυτόχρονα. Παρατήρησαν ότι, οι φυσαλίδες που αναπτύσσονται από ένα πεπερασμένο αρχικό μέγεθος, πάντα πλησίαζαν μία ασυμπτωτική περιοχή κατά την οποία είχαν σταθερή σύσταση φυσαλίδας, και ότι, υπήρχε μία γραμμική σχέση μεταξύ της ακτίνας και της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, η οποία τους οδήγησε να καθορίσουν μία μεταβλητή ομοιότητας και να πάρουν μία αναλυτική λύση για την ασυμπτωτική περιοχή.

Ανάμεσα στις προσπάθειες που έγιναν για να επιτευχθούν προσεγγιστικές λύσεις για το πρόβλημα της ανάπτυξης μιας αέριας φυσαλίδας προκαλούμενη από διάχυση, οι *Barlow & Langlois* [10], σε μία πρωτοπόρο δημοσίευση, μελέτησαν την ανάπτυξη μιας αέριας φυσαλίδας προκαλούμενη από διάχυση σε ένα ιξώδες ρευστό. Έλαβαν υπ' όψιν τους τη μεταφορά τόσο της μάζας, όσο και της ορμής, και απλοποίησαν την εξίσωση της διάχυσης περιορίζοντας τη κλίση της συγκέντρωσης σε ένα λεπτό οριακό στρώμα που περιλαμβάνει τη φυσαλίδα. Έξω από το οριακό στρώμα, η συγκέντρωση του αερίου θεωρείτο να είναι αδιατάρακτη και ίση με την αρχική συγκέντρωση. Μία παρόμοια παραδοχή έγινε επίσης από τους *Plesset & Zwick* [11] στη μελέτη τους για τη θερμική διάχυση μέσα σε μία αέρια φυσαλίδα η οποία περιβάλλεται από έναν όγκο υπέρθερμου νερού. Η παραπάνω παραδοχή τους επέτρεψε ν' αποκομίσουν μία αναλυτική λύση για τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης, χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Laplace.

Οι *Rosner & Epstein* [12] χρησιμοποίησαν ολοκληρωτικό ισοζύγιο ορμής έτσι ώστε να προβλέψουν την ανάπτυξη μιας αέριας φυσαλίδας προκαλούμενη από διάχυση σε πολύ υπέρκορα διαλύματα. Για να επιλύσουν την εξίσωση της διάχυσης με τη μέθοδο της ολοκλήρωσης, οι *Rosner & Epstein*, υπέθεσαν ότι η κατανομή της συγκέντρωσης μέσα στο οριακό στρώμα που περιβάλλει τη φυσαλίδα περιγράφεται από ένα πολυώνυμο. Αυτή η μέθοδος της χρησιμοποίησης διαφορετικών τάξεων πολυωνυμικών κατανομών, υιοθετήθηκε από αρκετούς ερευνητές, στην προσπάθεια τους να προβλέψουν την προκαλούμενη από διάχυση ανάπτυξη ή κατάρρευση αέριων φυσαλίδων, τόσο σε ιξώδη Νευτωνικά, όσο και σε ιξωδοελαστικά ρευστά [13-15]. Ο *Payvar* [16] το 1987, χρησιμοποίησε μία πολυωνυμική κατανομή για τη συγκέντρωση του αερίου έτσι ώστε να προβλέψει την ελεγχόμενη από μεταφορά μάζας ανάπτυξη φυσαλίδων κατά τη διάρκεια της γρήγορης αποσυμπίεσης ενός υγρού. Βασικός στόχος της έρευνας του *Payvar* ήταν η αποφυγή των κλασμάτων κενού (void fractions), μεταξύ της εισαγωγής και της εξαγωγής πολλών διαφορετικά σχεδιασμένων στροβίλων ανάκτησης υδραυλικής ισχύος.

Η χρησιμοποίηση πολυωνυμικών κατανομών για τη συγκέντρωση του αερίου είναι ισοδύναμη με το να υποθέσουμε ότι η φυσαλίδα αναπτύσσεται σε μία απείρων διαστάσεων δεξαμενή υγρού, υπόθεση η οποία ισχύει για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ένας μεγάλος αριθμός φυσαλίδων πυρηνώνονται και αναπτύσσονται ταυτόχρονα σε στενή εγγύτητα η μία με την άλλη [17], το ποσό του υγρού που άμεσα περιβάλλει μία φυσαλίδα είναι πεπερασμένο, και το ίδιο πεπερασμένη είναι και η ποσότητα του διαλυμένου αερίου. Άρα, η υδροδυναμική της ανάπτυξης και της διεργασίας διάχυσης θα είναι διαφορετική από την περίπτωση κατά την οποία μία φυσαλίδα αναπτύσσεται σε ένα άπειρο μέσο. Η βασική υπόθεση για να περιγράψει κανείς τη συγκέντρωση του αερίου χρησιμοποιώντας μία πολυωνυμική κατανομή, είναι το γεγονός ότι σε μεγάλες αποστάσεις από τη διεπιφάνεια της φυσαλίδας η συγκέντρωση του αερίου παραμένει αμετάβλητη και ίση με την αρχική συγκέντρωση. Αυτή η υπόθεση δεν ισχύει για μία φυσαλίδα η οποία περιβάλλεται από μία πεπερασμένη ποσότητα υγρού με μία περιορισμένη συγκέντρωση διαλυμένου αερίου.

Οι *Arefmanesh, Advani & Michaelides* [18], χρησιμοποίησαν μία μαθηματική διατύπωση βασιζόμενη στη θεωρία δυναμικού ροής (potential theory) έτσι ώστε ν' αναπτύξουν μία αριθμητική τεχνική με την οποία να υπολογίζουν την ανάπτυξη φυσαλίδων προκαλούμενη από διάχυση μάζας σε ένα χαμηλού ιξώδους Νευτωνικό ρευστό, το οποίο περιέχει περιορισμένη ποσότητα διαλυμένου αερίου. Γίνεται επίσης η υπόθεση ότι η ανάπτυξη της φυσαλίδας γίνεται

κάτω από ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, διασφαλίζοντας ότι ο όγκος του υγρού που περιβάλλει τη φυσαλίδα σε ένα λεπτό κέλυφος είναι σταθερός.

Οι *Arefmanesh & Advani* [19], θέλησαν να περιγράψουν την ανάπτυξη πολλών φυσαλίδων οι οποίες διαχωρίζονται από λεπτούς υμένες υγρού κατά τη διάρκεια της διεργασίας molding πολυμερικού αφρού. Μελέτησαν, λοιπόν, την ανάπτυξη μιας σφαιρικής αέριας φυσαλίδας προκαλούμενη από διάχυση, η οποία περιβάλλεται από ένα λεπτό κέλυφος ιξωδοελαστικού ρευστού το οποίο περιέχει περιορισμένη ποσότητα διαλυμένου αερίου. Το υγρό που περιβάλλει τη φυσαλίδα είναι εξαιρετικά ιξώδες, και επομένως ο όρος που αφορά την αδράνεια στην εξίσωση της ορμής μπορεί να παραλειφθεί. Για την επίλυση των κυβερνουσών εξισώσεων, οι οποίες είναι μη-γραμμικές, γίνεται αδιαστατοποίηση των βασικών παραμέτρων, και στη συνέχεια το σύστημα λύνεται αριθμητικά με συνδυασμό Runge-Kutta 4^{ης} τάξης, με ένα σχήμα επαναληπτικών πεπερασμένων διαφορών. Στα διαγράμματα αδιάστατης ακτίνας της φυσαλίδας συναρτήσει του χρόνου, που προκύπτουν από τα αριθμητικά αποτελέσματα, παρατηρείται ένα 'πλατώ' όσον αφορά τη μέγιστη τιμή της ακτίνας της φυσαλίδας γιατί το ποσό του αερίου είναι πεπερασμένο μέσα στο κέλυφος του υγρού που την περιβάλλει. Η ακτίνα ισορροπίας της φυσαλίδας μπορεί να προβλεφθεί, σ' αυτήν την περίπτωση, εφαρμόζοντας ένα ολικό ισοζύγιο μάζας στο διαλυμένο αέριο. Σε μία προηγούμενη δημοσίευση τους [20], παρουσίασαν μία αριθμητική μέθοδο η οποία μελετά την ανάπτυξη φυσαλίδων και προβλέπει τη κατανομή του μεγέθους τους στους πολυμερικούς αφρούς. Η κατανομή του μεγέθους των φυσαλίδων που δημιουργούνται εξαιτίας της διαστολής του πολυμερικού αφρού παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων του κατασκευαστικού τμήματος του αφρού. Και σ' αυτή τη περίπτωση το πρόβλημα μελετάται σαν ισοθερμοκρασιακό.

Οι *Venerus, Yala & Bernstein* [21], το 1998, μελέτησαν και αυτοί μετά τους *Arefmanesh & Advani* [19], την ισοθερμοκρασιακή ανάπτυξη μίας σφαιρικής αέριας φυσαλίδας η οποία περιβάλλεται από ένα ιξωδοελαστικό υγρό άπειρης έκτασης, όπου η ανάπτυξη οφείλεται σε μία εσωτερικά προερχόμενη διαφορά συγκέντρωσης των διαχεόμενων συστατικών. Αντίθετα με τους *Arefmanesh & Advani* [19], οι *Venerus, Yala & Bernstein* [21] στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν το μοντέλο της ανάπτυξης φυσαλίδων οι οποίες περιβάλλονται από ένα υγρό απείρου έκτασης, στο οποίο εξαιτίας της απεριόριστης ποσότητας των διαχεόμενων συστατικών, η φυσαλίδα θα μεγαλώνει απεριόριστα.

Η δημοσίευση των *Lastochkin & Favelukis* [22], είναι η μοναδική περίπτωση που εντοπίσαμε στη βιβλιογραφία κατά την οποία μελετάται η ανάπτυξη φυσαλίδων, προκαλούμενη από διάχυση, σε ένα υγρό με μεταβαλλόμενο συντελεστή διάχυσης. Η συγκεκριμένη δημοσίευση αναφέρεται στη διεργασία της απεξάτμισης (devolatilization) τηγμάτων πολυμερών κατά την οποία, χαμηλής συγκέντρωσης πτητικά συστατικά (μη-αντιδρώντα μονομερή, διαλύτες, νερό) αφαιρούνται από το πολυμερικό τήγμα. Αυτή η διεργασία, η οποία διεξάγεται κάτω από υπέρθερμες συνθήκες για τα πτητικά συστατικά (υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές πιέσεις), έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό και την ανάπτυξη φυσαλίδων. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα μοντέλο για την ανάπτυξη σφαιρικών φυσαλίδων, όπου ο έλεγχων μηχανισμός είναι η μεταφορά μάζας, σε ένα ήρεμο υγρό. Ο συντελεστής διάχυσης του υγρού, όπως προείπαμε, μεταβάλλεται και εξαρτάται εκθετικά από τη συγκέντρωση του διαλύτη. Το διαφορικό δυαδικό ισοζύγιο μάζας μετασχηματίστηκε, μέσω ενός μετασχηματισμού ομοιότητας, και λύθηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που παρουσιάστηκε από τον *Scriven* [8] για σταθερό συντελεστή διάχυσης.

2.3.2 Διατύπωση εξίσωσης διάχυσης

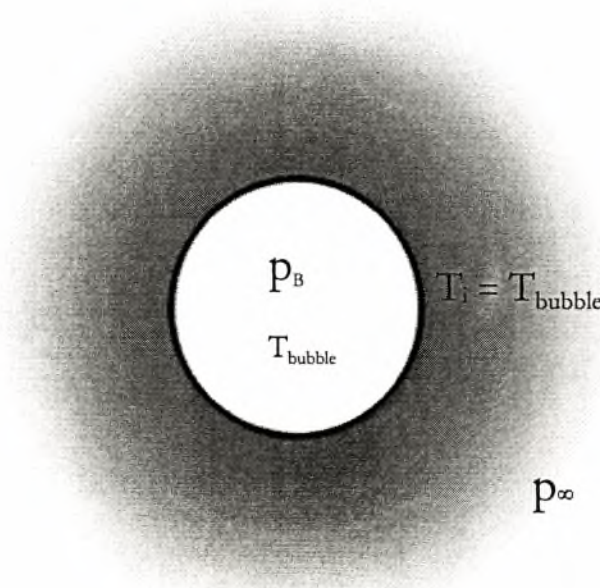
Θεωρούμε μία ποσότητα στάσιμου υγρού κορεσμένο σε διαλυμένο αέριο, η οποία περιέχεται σε ένα δοχείο. Η συγκέντρωση κορεσμού, C_{sat} , έχει επιτευχθεί σε θερμοκρασία T_{sat} και πίεση P_{sat} , οι οποίες είναι η θερμοκρασία και πίεση κορεσμού, αντίστοιχα. Κάποια αρχική χρονική στιγμή, t_0 , θερμαίνουμε το υγρό με τη βοήθεια μίας σημειακής πηγής θέρμανσης. Η ροή θερμότητας που δίνουμε στο υγρό είναι σταθερή. Η θερμοκρασία του υγρού, από T_0 που ήταν πριν την παροχή θερμότητας στο υγρό ($T_0 \leq T_{sat}$), αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου και της ακτινικής απόστασης από την πηγή θερμότητας, σύμφωνα με τη σχέση (2.25), όπως είδαμε στην ενότητα 2.2. Έτσι, αρχικά, θερμότερο υγρό βρίσκεται κοντά στην πηγή θερμότητας, και όσο η ακτινική απόσταση από την πηγή θερμότητας αυξάνεται, η θερμοκρασία του υγρού μειώνεται.

Η αύξηση, όμως, της θερμοκρασίας του υγρού που περιβάλλει τη πηγή θερμότητας, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης κορεσμού του υγρού σε αέριο, αφού όπως διαπιστώσαμε στην Εισαγωγή, αυτή μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ή όταν μειώνεται η πίεση. Θεωρώντας την πίεση που επιβάλλεται στο διάλυμα σταθερή, παρατηρούμε ότι, αμέσως μετά την έναρξη της θέρμανσης του υγρού, και το σχηματισμό ευσταθούς μεγέθους φυσαλίδας αερίου (μεγαλύτερη από τη θερμοδυναμικά κρίσιμη), η συγκέντρωση διαλυμένου αερίου στο υγρό στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου, πέφτει στη τιμή κορεσμού στην τοπική θερμοκρασία (τοπική θερμοδυναμική ισορροπία). Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι ότι η συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε αέριο κοντά στη θερμαινόμενη επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή σε μεγαλύτερη απόσταση απ' αυτήν. Η χωρική αυτή διαφορά στη συγκέντρωση διαλυμένου αερίου μεταξύ διεπιφάνειας αερίου-υγρού, και κύριας μάζας του υγρού, αποτελεί την *ωθούσα δύναμη της διάχυσης* του διαλυμένου αερίου από τη κύρια μάζα του υγρού (bulk), προς τη θερμαινόμενη επιφάνεια και την *ανάπτυξη της φυσαλίδας*.

Ας θεωρήσουμε μία φυσαλίδα που περιβάλλεται από υγρό, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3.1. Για τη κατάστρωση της εξίσωσης της διάχυσης θα γίνουν ορισμένες παραδοχές. Καταρχήν θεωρούμε ότι το σχήμα της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας είναι σφαιρικό. Το υγρό είναι στάσιμο και θεωρούμε ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου αερίου μακριά από τη φυσαλίδα είναι ίση με την αρχική συγκέντρωση, καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης, παραδοχή που υπονοεί ότι η ποσότητα του διαλυμένου αερίου που είναι διαθέσιμο για ανάπτυξη της φυσαλίδας είναι απεριόριστη. Το αέριο τώρα, μέσα στη φυσαλίδα θεωρούμε ότι συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο, και ότι η πίεση στο εσωτερικό της, p_B , είναι πάντα μεγαλύτερη από την εφαρμοζόμενη πίεση στο υγρό, p_∞ , (σχέση 2.1).

Καθώς η πυκνότητα του αερίου είναι πολύ πιο μικρή από αυτή του υγρού, ο όγκος και η πυκνότητα του υγρού μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες από τη συγκέντρωση του διαλυμένου αερίου. Ο συντελεστής διάχυσης, D , του αερίου στο υγρό δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, δηλ. είναι: $D = D(r, t)$, αλλά δεν επηρεάζεται από τη συγκέντρωση, αφού το διάλυμα μας είναι αρκετά αραιό. Στη μοντελοποίηση που θ' ακολουθήσει, θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου, εξαιτίας της χωρικά ομοιόμορφης ροής θερμότητας από τη πηγή θέρμανσης. Έτσι στις εξισώσεις μας δεν έχουμε λάβει υπ' όψιν το φαινόμενο της συναγωγής Marangoni.

$$C_{\infty} = C_{\text{sat}} (T_{\text{sat}})$$



Σχήμα 2.3.1 Φυσαλίδα περιβαλλόμενη από θερμαινόμενο υγρό.

Η θερμοκρασία του αερίου στο εσωτερικό της φυσαλίδας είναι ομοιόμορφη και ίση με T_{bubble} .

Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού είναι ίση με αυτή του εσωτερικού της φυσαλίδας, δηλ. είναι:

$$T_i = T_{\text{bubble}} \quad (2.27)$$

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά μάζας, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παραπάνω παραδοχές, και θεωρώντας ότι η διάχυση περιγράφεται από το Νόμο του Fick, είναι η εξής:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_r \frac{\partial C}{\partial r} = D \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} D \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial D}{\partial r} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (2.28)$$

όπου C είναι η μοριακή συγκέντρωση του αερίου, t είναι ο χρόνος και U_r είναι η ακτινική ταχύτητα του υγρού, η οποία δίνεται από τη σχέση (2.29):

$$U_r = \left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{dR}{dt} \quad (2.29)$$

όπου R είναι η ακτίνα της φυσαλίδας. Η εξίσωση (2.29) ισχύει όταν η πυκνότητα του υγρού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της φυσαλίδας.

Οι δύο τελευταίες εξισώσεις συνοδεύονται από τις παρακάτω συνοριακές και αρχική συνθήκες:

- I. Η συγκέντρωση του αερίου σε άπειρη απόσταση από την θερμαινόμενη επιφάνεια, C_∞ , είναι ίση με τη συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε αέριο για τη θερμοκρασία κορεσμού, δηλ. είναι:

$$C_\infty = C_{sat}(T_{sat}) \quad (2.30)$$

- II. Η συγκέντρωση του αερίου στη διεπιφάνεια είναι ίση, C_i , είναι ίση με τη συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε αέριο για τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια, η οποία όπως φαίνεται στη σχέση (2.27) είναι ίση με τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της φυσαλίδας:

$$C_i = C(r = R) = C_{sat}(T_i) \quad (2.31)$$

όπου $R = R(t)$.

- III. Η αρχική συνθήκη του προβλήματος της διάχυσης αναφέρεται στο γεγονός ότι η συγκέντρωση του υγρού σε αέριο τη χρονική στιγμή μηδέν είναι ίση με τη συγκέντρωση κορεσμού στη θερμοκρασία κορεσμού, δηλ. είναι:

$$C = C_{sat}(T_{sat}) \text{ για } t = 0 \quad (2.32)$$

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η πειραματική μας συσκευή, καθώς και οι σχεδιαστικές αποφάσεις που πάρθηκαν για την υλοποίηση της. Ο αρχικός σχεδιασμός της συσκευής έγινε από την ομάδα μας, σε συνεργασία με τους Ολλανδούς συναδέλφους μας, αλλά η κατασκευή της έγινε εξ ολοκλήρου στο Ινστιτούτο Van der Waals-Zeeman του Πανεπιστημίου του Amsterdam της Ολλανδίας, αφού εκεί υπήρχε τόσο η τεχνογνωσία, όσο και η συσσωρευμένη εμπειρία από τη κατασκευή παρόμοιων συσκευών στο παρελθόν. Θα πρέπει επίσης ν' αναφερθεί, ότι επειδή οι Ολλανδοί συνάδελφοί μας χρησιμοποιούσαν μέρος του εξοπλισμού της συσκευής και σε άλλα πειράματα, προσπάθησαν να την κατασκευάσουν με τέτοιο τρόπο που να εξυπηρετούν και τη διεξαγωγή των υπολοίπων πειραμάτων. Αυτή η φιλοσοφία έχει επηρεάσει το σχεδιασμό της πειραματικής μας συσκευής σε αρκετές περιπτώσεις.

3.1 Οι απαιτήσεις του πειράματος

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας χρησιμοποιήσαμε ένα διάλυμα υγρού κορεσμένο με αέριο. Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το νερό, το επτάνιο και ένα μείγμα 80-20% κ.β. γλυκερίνης-νερού. Σαν αέριο χρησιμοποιήθηκε το διοξείδιο του άνθρακα. Το χρησιμοποιούμενο κάθε φορά διάλυμα θα έπρεπε να τοποθετηθεί σε ένα δοχείο, το οποίο θα μπορούσε να διατηρηθεί σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Μέσα στο διάλυμα, τώρα, έπρεπε να τοποθετήσουμε μία πηγή θερμότητας κάποιου είδους. Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε τις φυσαλίδες, θα έπρεπε να τις οπτικοποιήσουμε σε κάποια μορφή video ή κινηματογραφικού συστήματος². Για να μπορέσουμε όμως να καταγράψουμε τις αναπτυσσόμενες φυσαλίδες, θα έπρεπε να τις φωτίσουμε με κάποια πηγή φωτισμού.

Το διάλυμα του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου υγρού με το διοξείδιο του άνθρακα πραγματοποιείται πριν από κάθε πτήση. Αν γεμίζαμε μόνο μία φορά το δοχείο με διάλυμα τότε αυτό θα εκκεωνόταν από διοξείδιο του άνθρακα μετά από μερικές παραβολές, γι' αυτό χρειαζόμασταν ένα τρόπο για ν' ανανεώνουμε το διάλυμα μέσα στο δοχείο. Αφού δεν μπορούσαμε να πάρουμε μαζί μας στο αεροπλάνο τον εξοπλισμό κορεσμού και πλήρωσης, έπρεπε να σχεδιάσουμε τη συσκευή μας έτσι ώστε ν' αντικαθιστούμε ολόκληρο το δοχείο με το διάλυμα. Περισσότερα γι' αυτή τη σχεδιαστική απαίτηση θ' αναφερθούν στη συνέχεια.

Για τη θερμοκρασιακή ρύθμιση του δοχείου που περιέχει το διάλυμα χρησιμοποιήθηκε θερμοστάτης τύπου CPF-2 ο οποίος ελεγχόταν από το θερμικό σύστημα ελέγχου (Thermal Control System - TCS). Αυτός ο θερμοστάτης είναι ένας ενεργά ρυθμιζόμενος θερμοστάτης, σχεδιασμένος έτσι ώστε να μειώνει τα θερμικά gradients στο εσωτερικό του δοχείου που περιέχει. Η ακρίβεια του συγκεκριμένου θερμοστάτη ήταν πολύ καλύτερη απ' αυτή που χρειαζόμασταν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας.

Όπως έχουμε αναφέρει και στην Εισαγωγή (ενότητα 1.1), κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας μελετήθηκαν οι δύο διαφορετικές φάσεις της ανάπτυξης φυσαλίδων: τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης, τα οποία ερευνήθηκαν με τη βοήθεια ενός μικρού σφαιρικού θερμαντήρα, και τα μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης, κατά τα οποία αναπτύσσονται πολλές φυσαλίδες ταυτόχρονα, για την μελέτη των οποίων χρησιμοποιήθηκε ένας μεγαλύτερος επίπεδος θερμαντήρας. Το μεν πρώτο πείραμα θα το αποκαλούμε: «*πείραμα σφαιρικού θερμαντήρα, ή μοναδικής φυσαλίδας*» (spherical heater or single bubble experiment), και το δεύτερο πείραμα θα το αποκαλούμε: «*πείραμα επίπεδου θερμαντήρα*» (plate heater experiment).

Θα διευκρινίσουμε για μία ακόμη φορά, ότι στα πλαίσια της παρούσης Μεταπτυχιακής Διατριβής θ' ασχοληθούμε αποκλειστικά με την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που έγιναν στο σφαιρικό θερμαντήρα. Για λόγους όμως συνοχής και καλύτερης κατανόησης της λειτουργίας της πειραματικής μας συσκευής, θ' αναφερθούν και οι σχεδιαστικές και κατασκευαστικές λεπτομέρειες που αφορούν στο πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα.

Για τη θέρμανση του διαλύματος, έτσι ώστε να σχηματιστούν φυσαλίδες, στο πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα, έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε το μικρότερο δυνατόν σφαιρικό

² Η μέτρηση του μεγέθους της φυσαλίδας με οπτικά μέσα, έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή του διαλύματος. Κάποιος θα μπορούσε να μετρήσει τη διάμετρο των φυσαλίδων με κάποια μέθοδο εντοπισμού με ήχο (echolocation), αλλά αυτό μπορεί να είχε σαν αποτέλεσμα τη διατάραξη της ανάπτυξης των φυσαλίδων.

θερμαντήρα. Το ιδανικό θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε μία σημειακή πηγή, αλλά η κατασκευή τους δεν είναι ακόμη τεχνολογικά εφικτή. Έτσι, στα πειράματά μας για θερμαντήρα χρησιμοποιήσαμε ένα thermistor, μία αντίσταση NTC, στον οποίο μπορεί να παραχθεί θερμότητα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Ο συγκεκριμένος thermistor είναι πολύ μικρής διαμέτρου, και μπορεί να θερμάνει με σχεδόν σταθερή ισχύ, γεγονός πολύ σημαντικό για το πείραμά μας.

Όσον αφορά το πείραμα του επιπέδου θερμαντήρα, χρησιμοποιήσαμε για θερμαντήρα μία επίπεδη πλατινένια αντίσταση. Με τη χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου θερμαντήρα, μπορούσαμε να θερμάνουμε με σχεδόν σταθερή ισχύ.

Για το σύστημα οπτικοποίησης χρησιμοποιήσαμε ένα σύστημα video. Ένα κινηματογραφικό σύστημα θα μπορούσε να προσφέρει καλύτερη ανάλυση, είναι πιο γρήγορο και πιθανόν έχει καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Παρόλα αυτά, είναι πιο εύκολο να μεταφέρεις τα δεδομένα από μία βιντεοκασέτα στον υπολογιστή. Το video μπορεί να προβληθεί σε πραγματικό χρόνο, ενώ από την άλλη μεριά, το φωτοευαίσθητο υλικό χρειάζεται συγκεκριμένη κατεργασία για να προβληθεί, επομένως, δεν μπορείς να ελέγξεις το πείραμά σου όταν αυτό διεξάγεται, άρα δεν μπορείς να παρέμβεις στην εξέλιξη του. Ακόμα, το φωτοευαίσθητο υλικό χρειάζεται μεγάλη προσοχή όταν το επεξεργάζεσαι, καθώς και πολλά cartridges για την καταγραφή των πειραμάτων. Κάτω από συνθήκες έλλειψης βαρύτητας, κάθε κασέτα θα αντιμετωπίζει προβλήματα καθώς θα παίζει, αφού αυτή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί κάτω από φυσιολογικές συνθήκες επιτάχυνσης της βαρύτητας. Γι' αυτούς τους λόγους δεν μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα συνηθισμένο βίντεο εγγραφής. Οι κάμερες με ενσωματωμένους εγγραφείς έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργούν ακόμα και αν κουνιούνται, και γι' αυτό το λόγο επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μία 'camcorder'.

3.1.1 Οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί των συστημάτων

Στους πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί για τα οπτικά και θερμικά συστήματα.

Το πείραμα της μοναδικής φυσαλίδας είχε σαν στόχο τη μελέτη των αρχικών σταδίων ανάπτυξης των φυσαλίδων. Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε με ακρίβεια το μέγεθος της φυσαλίδας συναρτήσει του χρόνου, χρειαζόμασταν ένα πολύ γρήγορο σύστημα καταγραφής της εικόνας. Οι φυσαλίδες είναι πολύ μικρές κατά τη διάρκεια αυτών των σταδίων, και για να μπορέσουμε να τις δούμε χρειαζόμασταν μία πολύ υψηλή χωρική ανάλυση. Ο λόγος για τον οποίο χρειαζόμασταν μεγάλο διάφραγμα φακού, εξηγείται στην ενότητα 3.5.1.

Εξαιτίας του περιορισμένου χώρου μέσα στο αεροπλάνο, έπρεπε οι διαστάσεις της πειραματικής μας συσκευής να είναι περιορισμένες, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να καταλαμβάνει τον προβλεπόμενο χώρο. Το μέγεθος της πειραματικής μας συσκευής ήταν: 0.9·0.7·0.5 μέτρα. Οι μικρές διαστάσεις της πειραματικής μας συσκευής αποτέλεσαν σημαντικό πρόβλημα για το σύστημα των οπτικών μας. Αυτό γιατί η κάμερα που χρησιμοποιήσαμε είχε το δικό της σύστημα αντικειμενικών φακών το οποίο δεν μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε.

<i>Απαίτηση</i>	<i>Επίπεδος Θερμαντήρας</i>	<i>Σφαιρικός Θερμαντήρας</i>
Ανάλυση (μm)	~ 30	~ 5
Συχνότητα δειγματοληψίας (Hz)	25	> 100
Γωνία ανοίγματος	Όσο μεγαλύτερη γίνεται	
Ολικό μήκος οπτικής διαδρομής	Να χωράει μέσα στο κουτί, $< 60\text{ cm}$	
Camera	Έχει το δικό της σύστημα αντικειμενικών φακών, το οποίο δεν μπορεί ν' αντικατασταθεί	

Πίνακας 3.1 Απαιτήσεις οπτικών συστημάτων.

Οι απαιτήσεις για το θερμικό σύστημα αποτελούνται από γενικές απαιτήσεις ευστάθειας, και απαιτήσεις για να μπορούμε να μετράμε τις φυσαλίδες.

<i>Απαίτηση</i>	<i>Τιμή</i>
Ευστάθεια	Καλύτερη από 100 mK/Hr
Κλίσεις θερμοκρασίας	Όσο μικρότερη γίνεται, αλλά να μπορεί να μετράται
Οπτικές επιφάνειες	Ελεύθερη πρόσβαση στα σημεία μέτρησης
Άλλα	Να μπορεί να αλλαχθεί το κελί

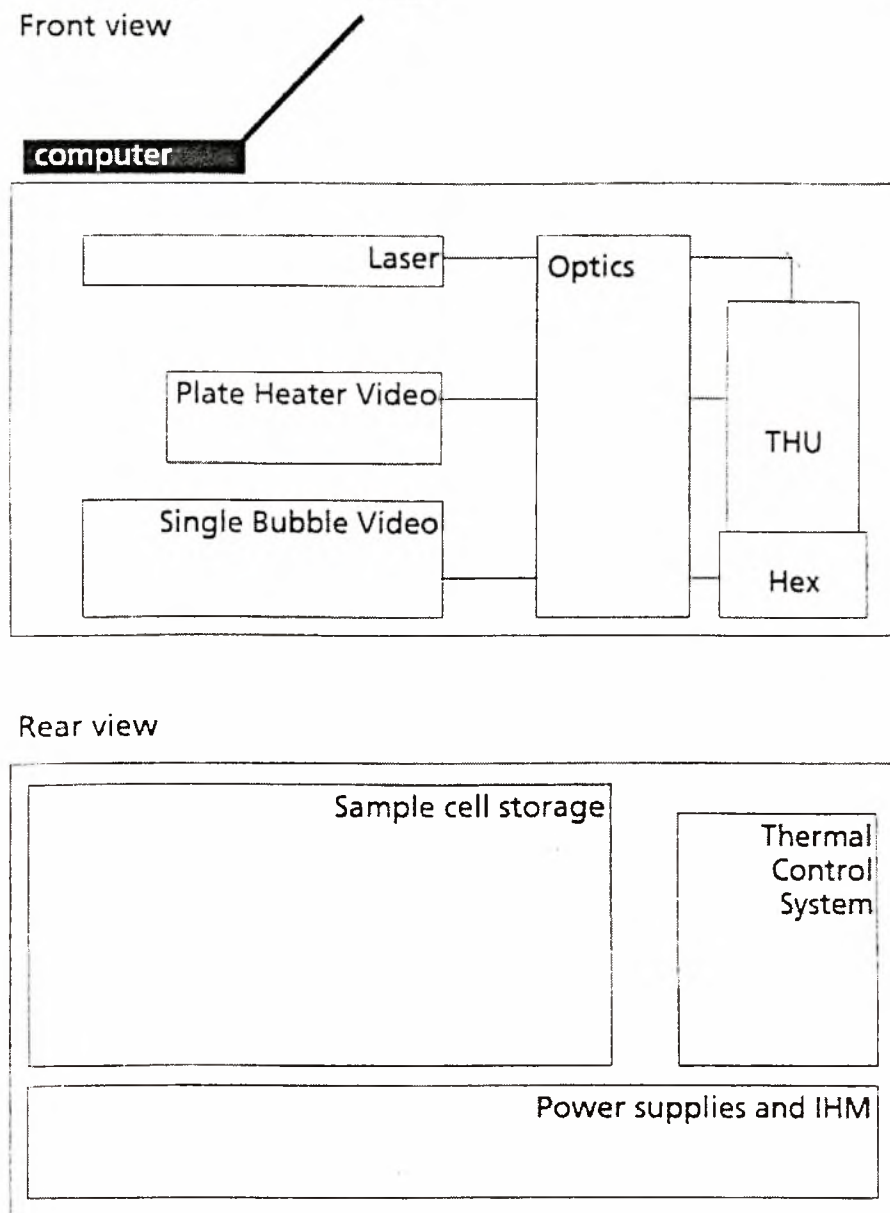
Πίνακας 3.2 Απαιτήσεις Θερμικού Συστήματος.

<i>Απαίτηση</i>	<i>Επίπεδος Θερμαντήρας</i>	<i>Σφαιρικός Θερμαντήρας</i>
Μέγεθος	$\sim 20\text{ mm}^2$	$\phi < 0.2\text{ mm}$
Ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας	$\sim 200\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$	$\sim 200\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$
Ολική ισχύς	$\sim 4\text{ W}$	$\sim 100\text{ mW}$
Απόσταση από τα τοιχώματα	$\sim 5\text{ mm}$	$\sim 5\text{ mm}$

Πίνακας 3.3 Απαιτήσεις θερμαντήρων.

3.1.2 Η πειραματική μας συσκευή

Όλα τα τμήματα της πειραματικής μας συσκευής είναι τοποθετημένα μέσα σε ένα μεταλλικό «κουτί», φτιαγμένο από ατσάλινους σωλήνες. Στο Σχ. 3.1 φαίνεται η πειραματική μας συσκευή, με τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται, και τη θέση την οποία κατέχουν μέσα στο κουτί. Στο Παράρτημα Α φαίνονται φωτογραφίες της πειραματικής μας συσκευής.



Σχήμα 3.1 Η πειραματικής μας συσκευή [23].

Τα τμήματα της πειραματικής μας συσκευής περιγράφονται με λεπτομέρεια στις ενότητες του κεφαλαίου που ακολουθούν, και είναι τα εξής:

- Θερμοστάτης (Thermostat Unit – THU) (Φωτογραφίες A2 & A3)
- Οπτικά συστήματα (Optics) (Φωτογραφίες A2 & A3)
- Μονάδα Laser (Φωτογραφία A2)
- Καταγραφή δεδομένων video (Plate heater & Single bubble experiment) (Φωτογραφία A3)
- Σύστημα Θερμικού Ελέγχου (Thermal Control System)
- Μονάδα Αποθήκευσης των κελιών (Sample cell storage) (Φωτογραφία A4)
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (Φωτογραφίες A2 & A4)
- Εναλλάκτης θερμότητας (Hex) (Φωτογραφία A3)
- Παροχή Ισχύος (Power Supply & IHM)

3.2 Τα θερμικά συστήματα

Τα θερμικά συστήματα διατηρούν το κελί που περιέχει το διάλυμα σε μία ορισμένη θερμοκρασία. Χρησιμοποιούνται επίσης, για την παροχή ισχύος στους θερμοαντήρες.

3.2.1 Ο θερμοστάτης και το σύστημα θερμικού ελέγχου

Ο θερμοστάτης που υπάρχει στην πειραματική μας συσκευή είναι μία τροποποιημένη έκδοση του θερμοστάτη τύπου CPF-2. Αυτός ο θερμοστάτης σχεδιάστηκε για πειράματα με SF₆, κοντά στο κρίσιμο σημείο του – τους 45.5 °C. Επειδή οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και οι κλίσεις της είναι πολύ σημαντικά κοντά στο κρίσιμο σημείο, για το SF₆, ο θερμοστάτης αυτός έχει την ικανότητα να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία σε βαθμό μεγαλύτερο από τις ανάγκες μας.

Ο θερμοστάτης ελέγχεται από ένα ανεξάρτητο σύστημα ελέγχου, το θερμικό σύστημα ελέγχου (thermal control system). Τα δεδομένα θερμοκρασίας διαβάζονται από έναν υπολογιστή, ο οποίος είναι τοποθετημένος στην πειραματική μας συσκευή, και συλλέγονται σ' αυτόν για μετέπειτα επεξεργασία. Το πρόγραμμα το οποίο αποθηκεύει τα δεδομένα θερμοκρασίας και ελέγχου της πειραματικής μας συσκευής, και με το οποίο ελέγχουμε το θερμικό σύστημα ελέγχου, είναι το "Snoopy". Οι εντολές με τις οποίες χειριζόμαστε το Snoopy θ' αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο, αλλά φαίνονται και στο Παράρτημα ΣΤ.

Η αρχή λειτουργίας του θερμοστάτη αναφέρεται με κάθε λεπτομέρεια στη βιβλ. αναφορά [24], και η διατομή του βρίσκεται στο Παράρτημα Δ, μαζί με άλλα μηχανικά τμήματα που σχεδιάστηκαν για το θερμικό σύστημα.

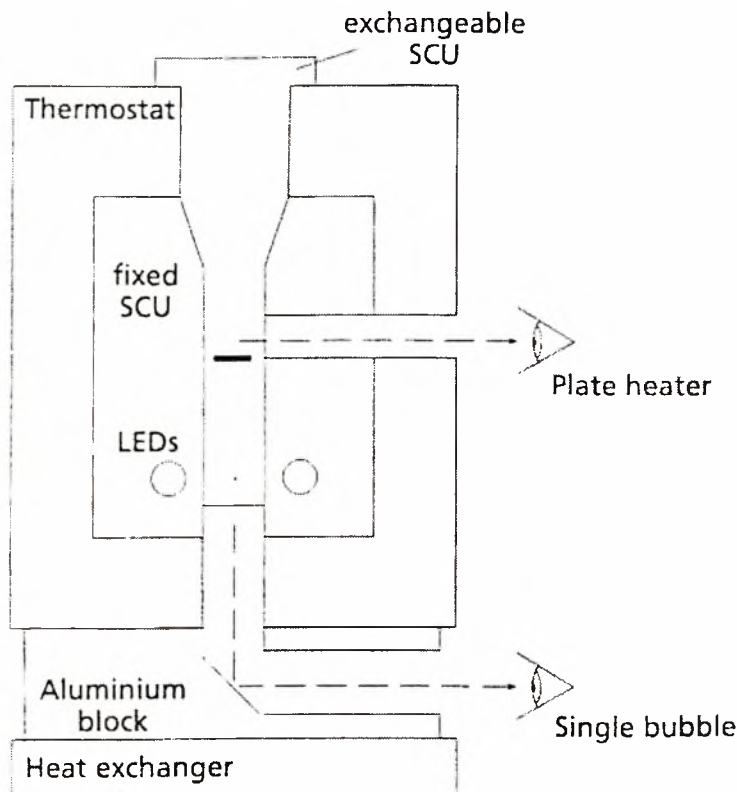
Ιδιότητα	Τιμή
Εύρος λειτουργίας	20 - 70 °C
Ακρίβεια	1 μK
Βήμα γρήγορης θερμοκρασίας	max. ±100μK, 20 μK/s
Temperature ramp	± 0.02-500μK/s
Επίπεδο θερμικού θορύβου	20 μK pp
Κλίση στο κελί-SCU	< 1 μK/mm
Mechanical accuracy over stacked parts from bottom	50 μm

Πίνακας 3.4 Απόδοση θερμοστάτη CPF-2.

Για να διεξαχθούν τα πειράματα μας έπρεπε να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στο θερμοστάτη τύπου CPF-2. Εξαιτίας αυτών των τροποποιήσεων, η απόδοση του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής, δεν έφτασε τα επίπεδα απόδοσης του θερμοστάτη CPF-2, όπως αυτή φαίνεται στον Πίνακα 3.4.

3.2.2 Η μονάδα του κελιού

Στο κέντρο του θερμοστάτη τύπου CPF-2 βρίσκεται η μονάδα του κελιού (Sample Cell Unit – SCU), στην οποία τοποθετείται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το κελί που περιέχει το διάλυμα. Εξαιτίας του γεγονότος ότι θέλαμε ν' ανανεώνουμε το περιεχόμενο του κελιού κατά τη διάρκεια της πτήσης, έπρεπε να ανακατασκευάσουμε το θερμοστάτη. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, αποφασίσαμε ν' αντικαθιστούμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ολόκληρο το κελί, αντί να το γεμίζουμε ξανά με διάλυμα κατά τη διάρκεια της πτήσης. Στο Σχ. 3.2 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής.



Σχήμα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής [23].

Έπρεπε να κατασκευάσουμε τη μονάδα του κελιού (SCU) με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε αυτή να είναι προσιτή από το εξωτερικό της πειραματικής μας συσκευής, και από την άλλη μεριά να διασφαλίσουμε ότι ο θερμοστάτης θα είναι όσο το δυνατόν καλύτερα κλεισμένος-μονωμένος. Αυτό το καταφέραμε εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι στο πάνω μέρος του θερμοστάτη, υπάρχει ένα άνοιγμα το οποίο χρησιμοποιείται για οπτική επαφή με το εσωτερικό του. Θυσιάσαμε αυτή λοιπόν την οπτική δίοδο, και κατασκευάσαμε ένα μικρό πέρασμα, κυλινδρικής γεωμετρίας, μέσα στο οποίο τοποθετούσαμε το κελί. Ο χώρος του θερμοστάτη μέσα στον οποίο τοποθετούσαμε το κελί, η μονάδα του κελιού δηλαδή, ήταν μεγαλύτερη από το κελί, πρώτον, για να στηρίζει το εσωτερικό, δεύτερο, για να υπάρχει σωστή θερμική κυκλοφορία στο θερμοστάτη, και τρίτον, για να τοποθετηθούν εκεί τα LED του στροβοσκοπικού φωτισμού. Όλα αυτά φαίνονται καλύτερα στο Σχ. 3.2.

Επειδή στη κορυφή και στη βάση του θερμοστάτη υπάρχουν στοιχεία Peltier³, η διάμετρος του ανοίγματος της μονάδας κελιού έπρεπε να περιοριστεί στα 20 mm. Λεπτομερή σχέδια της μονάδας κελιού και των κελιών υπάρχουν στο Παράρτημα Δ.

3.2.2.1 Αποθήκευση των κελιών στην πειραματική μας συσκευή

Τα εναλλάξιμα κελιά πρέπει να διατηρούνται σε ένα περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας τα σε ένα κιβώτιο ελεγχόμενης θερμοκρασίας από πολυμερικό αφρό, το οποίο έχει ειδικές υποδοχές για να τοποθετούνται τα κελιά. Για τη θέρμανση των κελιών είναι υπεύθυνος ένας ηλεκτρικός θερμαντήρας - μερικές υψηλής ισχύος αντιστάσεις – ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κάτω μέρος του κιβωτίου, μαζί με ένα μεταλλικό σκελετό για τη πιο αποτελεσματική διάχυση της θερμότητας. Ένας θερμοστάτης μετρά τη θερμοκρασία και ελέγχει το θερμαντήρα. Πρέπει να τονίσουμε ότι τα κελιά διατηρούνται σε θερμοκρασία χαμηλότερη, κατά 0.5 με 1.0 °C, από τη θερμοκρασία στην οποία έχει γίνει ο κορεσμός των χρησιμοποιούμενων υγρών με το διοξείδιο του άνθρακα⁴, έτσι ώστε να μην υπάρχει ανεπιθύμητη ανάπτυξη φυσαλίδων.

3.2.3 Ο εναλλάκτης θερμότητας

Εκτός από το άνοιγμα που δημιουργήσαμε στο πάνω μέρος του θερμοστάτη, για να μπορούμε να τοποθετούμε σ' αυτόν τα εναλλάξιμα κελιά, έπρεπε να γίνει και μία ειδική τροποποίηση στον εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2, βρίσκεται από κάτω από το θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής.

Για να μπορέσει κάποιος να έχει οπτική πρόσβαση στα πειράματα που διεξάγονται στο εσωτερικό του θερμοστάτη, υπάρχουν τέσσερις διαθέσιμοι οπτικοί δίοδοι: μία στο πάνω μέρος, μία σε κάθε πλευρά στα 66 mm, και μία στα 60 mm πάνω απ' αυτές τις δύο. Στην περίπτωση μας, η πάνω κάθετη δίοδος χρησιμοποιείται για να τοποθετούμε τα εναλλάξιμα κελιά. Η πάνω οριζόντια δίοδος χρησιμοποιείται για να έχουμε οπτική επαφή με το πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα. Εν τούτοις, τα πλευρικά τοιχώματα του θερμοστάτη είναι κυλινδρικά, με αποτέλεσμα μία μικρή αλλοίωση της ποιότητας της εικόνας που παίρνουμε στο πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα. Αν κάποιος προσπαθούσε να καταγράψει το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα από τις πλευρικές οπτικές δόδους, θα έπαιρνε πολύ φτωχά αποτελέσματα αφού η ποιότητα της εικόνας που θα έβλεπε θα ήταν προφανώς αρκετά παραμορφωμένη.

Από τα παραπάνω, μπορεί να συμπεραίνει κανείς, ότι η μοναδική οπτική δίοδος που μας έμεινε για να μπορέσουμε να καταγράψουμε το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα είναι αυτή στο κάτω μέρος του θερμοστάτη. Όμως, για σωστή λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες - κάτω από 30 °C - και ακριβέστερη ρύθμιση στις υψηλότερες θερμοκρασίες, ο θερμοστάτης είναι τοποθετημένος πάνω σε μία πλάκα ελεγχόμενης θερμοκρασίας, η οποία ονομάζεται *ψυχρή πλάκα* ή *εναλλάκτης θερμότητας*. Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε, λοιπόν, το κάτω

³ Τα στοιχεία Peltier χρησιμοποιούν το αντίστροφο αποτέλεσμα του θερμοστοιχείου. Στέλνοντας μία μεγάλη ένταση ρεύματος διαμέσου του θερμοστοιχείου, δημιουργείται ένα θερμοκρασιακό gradient.

⁴ Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, ο κορεσμός των χρησιμοποιούμενων υγρών με διοξείδιο του άνθρακα, γίνεται πριν τη πτήση και τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Στη συνέχεια τα κελιά γεμίζονται με το κορεσμένο διάλυμα και τοποθετούνται στο κιβώτιο φύλαξης τους, σε ελεγχόμενη θερμοκρασία.

μέρος του θερμοστάτη για οπτική δίοδο στο πείραμα μας, έπρεπε με κάποιο τρόπο να παρακάμψουμε τον εναλλάκτη θερμότητας.

Ο εναλλάκτης θερμότητας περιέχει στοιχεία Peltier έτσι ώστε να μεταφέρει θερμότητα από και προς το θερμοστάτη με έναν ελεγχόμενο ρυθμό. Το να «περάσει» κανείς την οπτική δίοδο διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας δεν είναι και ότι καλύτερο και πρακτικό, αφού για να το πετύχεις αυτό χρειάζονται πολλοί ανασχεδιασμοί του εναλλάκτη και του θερμοστάτη. Γι' αυτό το λόγο επιλέξαμε να τοποθετήσουμε ανάμεσα στο θερμοστάτη και τον εναλλάκτη θερμότητας μία πλάκα από αλουμίνιο, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2. Αυτή η πλάκα παρέχει τη θερμική επαφή αλλά και το χώρο για τη τοποθέτηση του καθρέφτη, ανάμεσα στο θερμοστάτη και τον εναλλάκτη θερμότητας. Ένα μειονέκτημα αυτού του ανασχεδιασμού είναι ότι η πλάκα αλουμινίου έχει μία θερμική χωρητικότητα, η οποία θα επιβραδύνει την λειτουργία του θερμοστάτη. Το γεγονός αυτό όμως δεν έχει καμία δυσμενή συνέπεια για τα πειράματά μας αφού αυτά θα γίνουν σε μία σχεδόν σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη.

Το μόνο σημαντικό πλεονέκτημα του παραπάνω ανασχεδιασμού του συστήματος θερμοστάτη-εναλλάκτη θερμότητας είναι το γεγονός του περιορισμένου χώρου για τη τοποθέτηση των φακών που χρειάζονται για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα, εξαιτίας της τοποθέτησης των στοιχείων Peltier στο κάτω μέρος του θερμοστάτη. Φυσικά, είναι προφανές ότι δεν μπορούσαμε να τοποθετήσουμε φακούς κάτω ακριβώς από το θερμοστάτη, αφού σ' αυτό το σημείο είναι τοποθετημένος ο καθρέφτης.

3.3 Το σύστημα καταγραφής της εικόνας

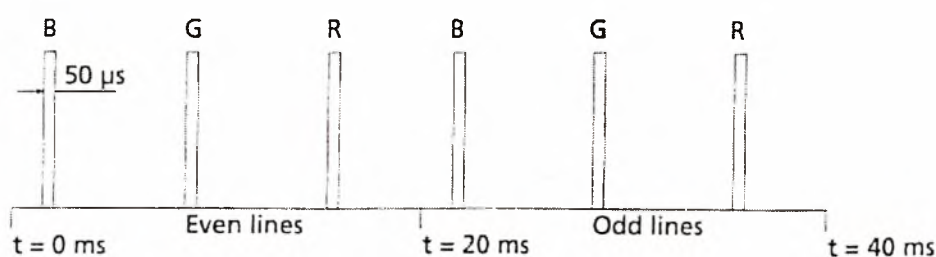
Η ταχύτητα καταγραφής της εικόνας χρησιμοποιώντας μία κοινή βιντεοκάμερα του εμπορίου είναι 25 frames/δευτερόλεπτο⁵. Για το πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα, τα 25 Hz είναι ικανοποιητικά. Για το πείραμα όμως του σφαιρικού θερμαντήρα, δεν είναι ικανοποιητικά, αφού τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης φυσαλίδων, τα οποία μελετούνται σ' αυτό το πείραμα, είναι ένα πολύ γρήγορο στην εξέλιξη του φαινόμενο. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα μίας υψηλής ταχύτητας κάμερα, με φιλμ ή βίντεο. Όμως αυτός ο εξοπλισμός είναι αφενός πολύ ακριβός, και αφετέρου, αρκετά ογκώδης, βαρύς και δύσκολος στο χειρισμό μέσα σε ένα αεροπλάνο.

Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα στροβοσκόπιο για να φθάσουμε σε υψηλότερες ταχύτητες καταγραφής της εικόνας, αφού ενδιαφερόμαστε μόνο για το περίγραμμα των φυσαλίδων. Αρχικά είχαμε σκεφτεί να χρησιμοποιήσουμε μία greyscale κάμερα, και να τοποθετούμε τέσσερις ή περισσότερες εικόνες την μία πάνω στην άλλη. Με αυτή τη διάταξη θα μπορούσαμε να πιάσουμε την επιθυμητή ταχύτητα, αλλά θα ήταν πολύ δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς τις εικόνες. Φυσικά, όταν κάποιος χρησιμοποιεί ένα στροβοσκόπιο για να εκθέσει πολλαπλές εικόνες την μία πάνω στην άλλη, εξυπακούεται ότι γνωρίζει την κατεύθυνση της κίνησης. Γεγονός που ισχύει στην περίπτωση μας.

⁵ Ένα σύστημα video καταγράφει στα 50 Hz, πεπλεγμένο (interlaced). Αυτό σημαίνει εναλλαγή μονών και ζυγών γραμμών. Στην Ευρώπη, τα 50 Hz του ηλεκτρικού συστήματος χρησιμοποιούνται τόσο από το PAL, όσο και από το SECAM. Στις Η.Π.Α. και την Ιαπωνία, χρησιμοποιείται το σύστημα NTSC που έχει 60 Hz.

Έγιναν κάποιες δοκιμές με ένα στροβοσκόπιο έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν οι ανάγκες μας θα μπορούσαν να ικανοποιηθούν με μία greyscale κάμερα, αλλά τα αποτελέσματα ήταν απογοητευτικά.

Μία έγχρωμη βιντεοκάμερα καταγράφει τρία χρώματα: πράσινο (~546 nm), μπλε (~435 nm) και κόκκινο (~650 nm). Χρησιμοποιώντας τρία συγχρονισμένα στροβοσκόπια σε αυτά τα τρία χρώματα, μπορούμε να καταγράψουμε τρεις διαφορετικές εικόνες σε ένα μοναδικό frame ($3 \times 25 = 75$ Hz). Συνδυάζοντας και το πεπλεγμένο, μπορούμε να φτάσουμε σε ταχύτητα καταγραφής των $2 \times 75 = 150$ frames/δευτερόλεπτο. Εξαιτίας των διαφορετικών χρωμάτων, μπορεί να αυτοματοποιηθεί ο διαχωρισμός των διαφορετικών εικόνων. Στο Σχ. 3.3 απεικονίζεται ο χρονοσμός του συστήματος καταγραφής – ο χρονοσμός των flashes. Η σειρά των flashes - “B” για το μπλε, “G” για το πράσινο, και “R” για το κόκκινο - επιλέχθηκε έτσι ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία της ταξινόμησης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Με αυτό τον τρόπο, οι διαφορετικές εικόνες είναι σε αλφαβητική σειρά.



Σχ. 3.3 Ο χρονοσμός του συστήματος καταγραφής fast video [23].

Το μόνο μειονέκτημα του παραπάνω συστήματος καταγραφής της εικόνας είναι ότι οι συνηθισμένες βιντεοκάμερες χρησιμοποιούν ένα μοναδικό CCD (Charged-Coupled Devices) για να καταγράψουν τις εικόνες τους. Για να δουν διαφορετικά χρώματα, χρησιμοποιούν μια χρονικά βασιζόμενη τεχνολογία. Για την περίπτωση μας, αυτό θα ήταν καταστροφικό. Πιο ακριβές κάμερες χρησιμοποιούν ένα ξεχωριστό CCD για καθένα από τα τρία χρώματα. Το γεγονός αυτό μας δίνει ένα καλύτερο διαχωρισμό των χρωμάτων, και η απουσία εξάρτησης από το χρόνο του συστήματος καταγραφής των χρωμάτων είναι εξαιρετικά εύχρηστη σε μας.

Για την καταγραφή του πειράματος του σφαιρικού θερμαντήρα χρησιμοποιήθηκε μία εμπορική ψηφιακή βιντεοκάμερα με τρία CCD (SONY DCR-VX1000E), η οποία χρησιμοποιώντας τη τεχνική καταγραφής που περιγράφηκε παραπάνω μπορούσε να μας δώσει θεωρητική⁶ ταχύτητα καταγραφής της εικόνας ίση με 150 frames/sec. Για την καταγραφή του πειράματος του επίπεδου θερμαντήρα χρησιμοποιήθηκε μία εμπορική βιντεοκάμερα (GRUNDIG Camcorder LC 635 E), η οποία μας έδωσε ταχύτητα καταγραφής της εικόνας ίση με 25 frames/sec.

Το άλλο πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί ήταν αυτό του επαρκή φωτισμού στην άκρη του thermistor. Ο φωτισμός, όπως είναι προφανές, είναι καθοριστικός για την ποιότητα της καταγραφόμενης εικόνας. Αρχικές επιλογές λήφθηκαν υπ' όψιν: ένας περιστρεφόμενος δίσκος με χρωματισμένες γυάλινες οπές, λυχνίες φωτός με εκκένωση αερίου και LEDs (light emitting

⁶ Στην ανάλυση των δεδομένων εικόνας από το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα, όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο, κατορθώσαμε να πάρουμε μόνο τα 25 frames/sec.

diodes) κοντά στο πείραμα. Ο περιστρεφόμενος δίσκος απορρίφθηκε, εξαιτίας προβλημάτων συγχρονισμού και πυκνότητας φωτισμού. Το δεύτερο σύστημα, που χρησιμοποιούσε λυχνίες φωτός με εκκένωση αερίου, φαινόταν πιο ελκυστικό για την περίπτωση μας, γιατί αυτές μπορούν να ενεργοποιηθούν με μεγάλη ακρίβεια, και γιατί παράγουν μεγάλες ποσότητες φωτός. Το πρόβλημα αυτής της λύσης βρίσκεται όχι στην παραγωγή του φωτός, αλλά στο να το διοχετεύσει κανείς στην άκρη του thermistor. Οι οπτικές ίνες δεν θα μπορούσαν να βοηθήσουν, γιατί απορροφούν τη μπλε περιοχή, ούτε ακόμη και οι δέσμες ινών (fibre bundles) γιατί έχουν υψηλή παραγωγή ισχύος.

Η τελευταία λύση που σκεφτήκαμε ήταν να παράγουμε το φως κοντά στην άκρη του thermistor. Ο thermistor βρίσκεται μέσα στο θερμοστάτη. Υπάρχει αρκετός χώρος γύρω από το κελί, που τοποθετείται στο εσωτερικό του θερμοστάτη, στην μονάδα κελιού του θερμοστάτη, για να τοποθετηθούν μικρές πηγές φωτός. Για να πάρουμε σωστά τα χρώματα, χρησιμοποιήσαμε LEDs γιατί παράγουν φως ικανοποιητικά στενά διαβαθμισμένο και μπορούν να αποκτηθούν στα σωστά χρώματα⁷.

Ένα ερώτημα που προκύπτει για τα LEDs είναι αν αυτά παράγουν αρκετό φωτισμό για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα. Αν τα LEDs χρησιμοποιούνται για να παράγουν συνεχώς φως, η ισχύς τους είναι περιορισμένη. Όμως, στην περίπτωση μας, χρειαζόμαστε μικρούς στροβοσκοπικούς φωτισμούς, και τα LEDs μπορούν να παράγουν αρκετό φωτισμό, αν η διάρκεια της λάμψης τους είναι μικρή. Ευτυχώς, θέλουμε να είμαστε σε ελαφρά υποέκθεση. Τα χρώματα που είναι πιο φωτεινά από ένα πλήρως κορεσμένο κόκκινο, πράσινο ή μπλε, για παράδειγμα ένα πολύ ελαφρύ μπλε, καταγράφονται και σε άλλα κανάλια, ακόμα και αν το φως είναι μονοχρωματικό, 430 nm. Αν βρισκόμαστε σε υποέκθεση αυτός ο κίνδυνος εξαλείφεται.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς μας, ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης της φυσαλίδας στο πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα θα είναι μικρότερος από 0.1 m/sec. Συγκρίνοντας αυτό το ρυθμό ανάπτυξης με την ανάλυση των 5 μm που θέλουμε να έχουμε, βρήκαμε ότι οι λάμπεις των LEDs θα πρέπει να έχουν μία χρονική διάρκεια περίπου των 50 msec.

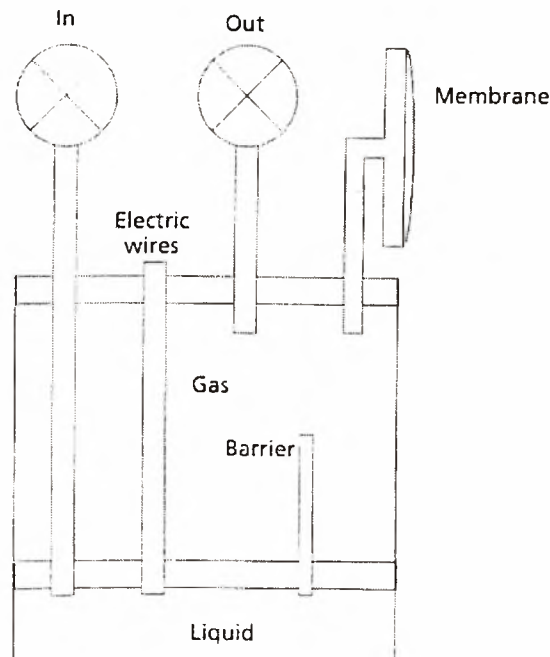
3.4 Το εναλλάξιμο κελί

Ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν όταν κανείς ερευνά τη συμπεριφορά διαλυμάτων αερίου-υγρού σε συνθήκες μικροβαρύτητας είναι ότι η διαφορά πυκνότητας δεν ξεχωρίζει την υγρή από την αέρια φάση, αλλά αυτές αναμιγνύονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι φυσαλίδες να επιπλέουν ελεύθερα σε όλη την έκταση του διαλύματος, και να καταγράφονται από την κάμερα. Το γεγονός αυτό θα ήταν καταστροφικό για τον ακριβή υπολογισμό της διαμέτρου της φυσαλίδας, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Είναι αδύνατον να γεμίσουμε το κελί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην υπάρχει άλλο αέριο, εξάλλου μελετάμε το σχηματισμό φυσαλίδων! Αυτό που χρειαζόμαστε είναι ένας τρόπος διαχωρισμού του αερίου από το υγρό όταν το διάλυμα βρίσκεται σε συνθήκες μικροβαρύτητας, και να διασφαλίσουμε ότι αυτά μένουν διαχωρισμένα κατά τη διάρκεια της παραβολής.

⁷ Εκτός από το μπλε, στο οποίο έπρεπε να τοποθετήσουμε ένα επιπλέον φίλτρο για να αποφύγουμε τη διασταύρωση με το πράσινο κανάλι.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4, καταφέραμε να ικανοποιήσουμε τις παραπάνω απαιτήσεις κατασκευάζοντας το κελί με δύο διαχωριστικά στο πάνω μέρος του. Το υγρό πληρώνει το κελί μέχρι το εσωτερικό διαχωριστικό. Ένας μακρύς και στενός σωλήνας θα προσδώσει αρκετή αντίσταση για το ελάχιστο χρησιμοποιούμενο υγρό, αλλά το αέριο θα μπορέσει να περάσει ανεμπόδιο. Ο όγκος που πληρώνεται με το αέριο στη κορυφή του κελιού, μπορεί να εκκενωθεί κατά τη διάρκεια της πλήρωσης. Άλλος ένας σωλήνας χρησιμοποιείται για να οδηγήσει το διάλυμα του υγρού-αερίου κατά τη διάρκεια της πλήρωσης, διαμέσου του αερίου όγκου, στον υγρό όγκο του κελιού. Μία ασφάλεια πίεσης συνδέεται με τον αέριο όγκο έτσι ώστε να εξουδετερώσει τις διακυμάνσεις της πίεσης στο εσωτερικό του κελιού.



Σχ. 3.4 Διαχωρισμός των φάσεων [23].

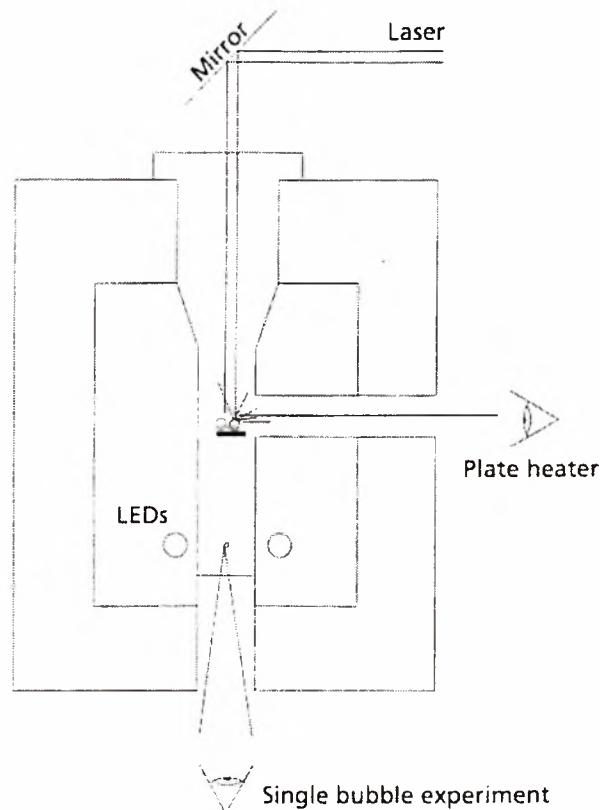
Οι δύο σωλήνες που επικοινωνούν με το εξωτερικό περιβάλλον κλείνουν με δύο βάνες ενυδρείου. Αυτός ήταν ο πιο οικονομικός τρόπος για το άνοιγμα και το κλείσιμο των σωλήνων, αφού η πίεση και στις δύο πλευρές είναι η ίδια.

3.5 Τα οπτικά συστήματα

Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται με τη τοπική θέρμανση του διαλύματος αερίου-υγρού καταγράφονται με τη βοήθεια μιας βιντεοκάμερας και αποθηκεύονται για να αναλυθούν στη συνέχεια. Μία συνήθης βιντεοκάμερα του εμπορίου δεν είναι ικανή να ικανοποιήσει τις οπτικές απαιτήσεις οι οποίες αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Για να μπορέσουμε να ικανοποιήσουμε τις επιθυμητές απαιτήσεις, έπρεπε να σχεδιάσουμε μερικά επιπρόσθετα οπτικά.

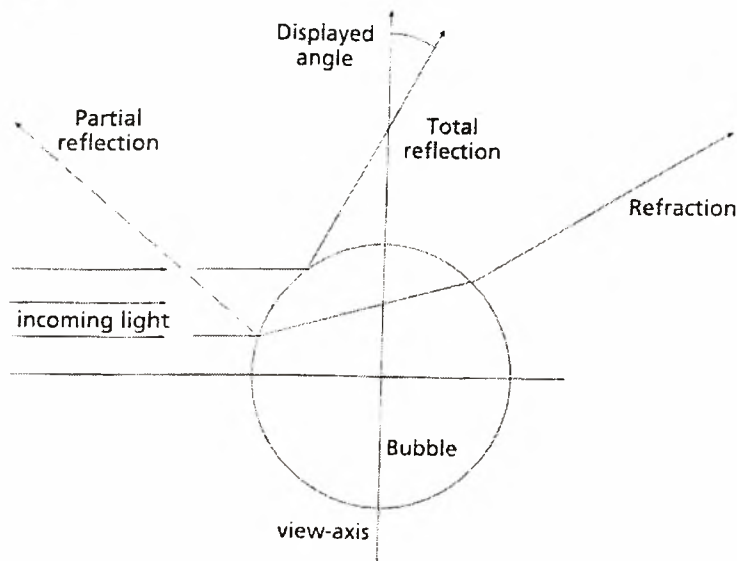
3.5.1 Απόψεις φωτισμού της φυσαλίδας

Το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα χρησιμοποιεί έναν thermistor για να θερμάνει το διάλυμα. Αυτός ο thermistor φωτίζεται πλευρικά, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Πρέπει να διασφαλίσουμε ότι το φως φθάνει στην κάμερα, γιατί διαφορετικά δεν θα μπορούμε να δούμε, άρα και να καταγράψουμε, τις φυσαλίδες.



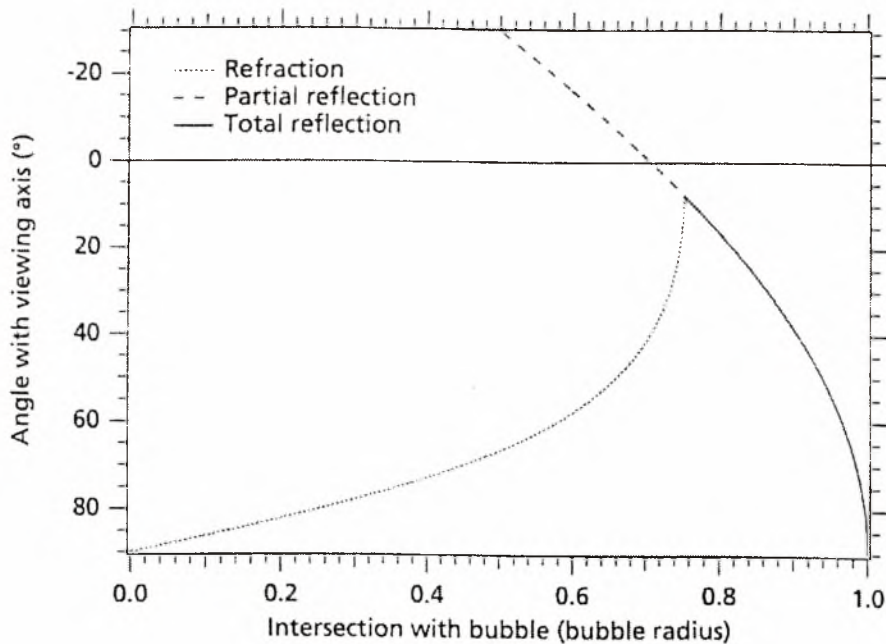
Σχήμα 3.5 Τα πειράματα και τα οπτικά [23].

Και στα δύο πειράματα, ο θερμαντήρας φωτίζεται από μια κατεύθυνση κάθετη στον οπτικό άξονα. Υπολογίστηκε η γωνία με τον οπτικό άξονα, αν το φως εισέρχεται σε διαφορετικά ύψη από τη κάθετη κατεύθυνση στον οπτικό άξονα. Υπήρχαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις: αντανάκλαση και διάθλαση (με μερική αντανάκλαση επίσης). Στο Σχ. 3.6 δίνονται μία γραφική αναπαράσταση των γωνιών και οι δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 3.6 Προσδιορισμός των γωνιών και των αξόνων [23].

Από τα αποτελέσματα, που δίνονται στο Σχ. 3.7, συμπεραίνουμε ότι η έντονη αντανάκλαση υπεισέρχεται σε μία γωνία περίπου ίση με 10 μοίρες. Αυτή είναι και η επιθυμητή γωνία του διαφράγματος, γιατί έτσι συλλαμβάνει ένα μέρος της ολικής αντανάκλασης. Οι γωνίες διάθλασης υπολογίστηκαν από τους Ολλανδούς συναδέλφους μας με τη βοήθεια του προγράμματος Igor, και ο κώδικας του προγράμματος μπορεί να βρεθεί στο Παράρτημα D της βιβλ. αναφοράς [23].



Σχήμα 3.7 Γωνία διάθλασης του φωτός σε μία φυσαλίδα [23].

3.5.1.1 Ο φωτισμός του πειράματος επίπεδου θερμαντήρα

Ο επίπεδος θερμαντήρας είναι μία απλή αντίσταση από πλατίνα. Για να μπορέσουμε να δούμε τις φυσαλίδες που σχηματίζονται στην επιφάνεια του θερμαντήρα, έτσι ώστε να τις καταγράψουμε, χρειαζόμαστε το κατάλληλο φωτισμό. Για να μπορέσουμε να φωτίσουμε το πείραμα επίπεδου θερμαντήρα χρησιμοποιήσαμε μία πηγή laser. Η δέσμη του laser εισέρχεται στο εσωτερικό του κελιού με τη βοήθεια ενός καθρέφτη ο οποίος είναι τοποθετημένος στο πάνω μέρος του κελιού. Ο καθρέφτης αυτός αντανακλά τη δέσμη προς τα κάτω, διαμέσου δύο πολύ μικρών παραθύρων που υπάρχουν στη κορυφή του κελιού, πάνω στην επιφάνεια του θερμαντήρα. Αυτά τα δύο παράθυρα βοηθούν στο να δημιουργηθεί μία λεπτή «κουρτίνα» φωτός. Με αυτό το τρόπο θα μπορούμε να δούμε μόνο τις φυσαλίδες οι οποίες είναι εστιασμένες, γιατί οι υπόλοιπες θα είναι στο σκοτάδι, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5.

Η γωνία ανοίγματος του συστήματος είναι αρκετά σημαντική, αλλά είναι λιγότερο σημαντική απ' αυτή του πειράματος του σφαιρικού θερμαντήρα. Η ποσότητα του φωτός που μπορούμε να στείλουμε μέσα στο κελί για να φωτίσουμε το πείραμα είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη αντίθεση μεταξύ φωτεινού και σκούρου χρώματος στην εικόνα που μπορούμε να πάρουμε (αύξηση του contrast).

3.5.2 Περιορισμοί απόδοσης

Γνωρίζουμε ότι οι υπολογισμοί των βασικών ιδιοτήτων του οπτικού συστήματος, που έγιναν με τη βοήθεια της παραξονικής θεωρίας (paraxial theory), είναι προσεγγιστικοί. Η απόδοση των συστημάτων φακών περιορίζεται από πολλούς παράγοντες. Ο πιο σημαντικός είναι συνήθως η διάθλαση. Αν εφαρμόσουμε το κριτήριο του Rayleigh⁸, βρίσκουμε:

$$w = \frac{0.61 \cdot \lambda}{(N.A.)} = 1.22 \cdot \lambda \cdot (f/\#) \quad (3.1)$$

Στη σχέση (3.1), έχουμε το αριθμητικό διάφραγμα να είναι ίσο με: $(N.A.) = n \cdot \sin \theta = (n \cdot \varphi) / (2 \cdot s)$. Ο αριθμός-f είναι ίσος με: $(f/\#) = f' / \varphi$. Αυτό ισχύει για ένα είδωλο στο άπειρο.

Αν θέλουμε να διακρίνουμε σημεία που απέχουν 5 μm μεταξύ τους - όπως στην περίπτωση του πειράματος του σφαιρικού θερμαντήρα - πρέπει να επιλέξουμε την ενεργή διάμετρο και την εστιακή απόσταση έτσι ώστε το w να είναι μικρότερο από 5 μm.

Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση στα συστήματα φακών, από τους οποίους πιο σημαντικές είναι οι αποκλίσεις (aberrations). Οι αποκλίσεις είναι παρεκκλίσεις από την παραξονική θεωρία, οι οποίες προκύπτουν εξαιτίας του γεγονότος ότι η προσέγγιση πρώτης τάξης του νόμου του Snell ισχύει μόνο για μικρές γωνίες. Ο Seidel υπολόγισε τις αποκλίσεις από την παραξονική θεωρία λαμβάνοντας υπ' όψιν τον όρο $\theta^3/3!$. Οι διαφορετικές εκτροπές

⁸ Το κριτήριο του Rayleigh δηλώνει ότι δύο σημειακές πηγές μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους όταν το κέντρο της μορφής διάθλασης της μίας πηγής μόλις πλησιάζει την άκρη του κεντρικού σημείου της άλλης.

που θα συζητηθούν στη συνέχεια προκύπτουν από τον ίδιο όρο του νόμου του Snell, αλλά για ευκολία ονομάζονται διαφορετικά.

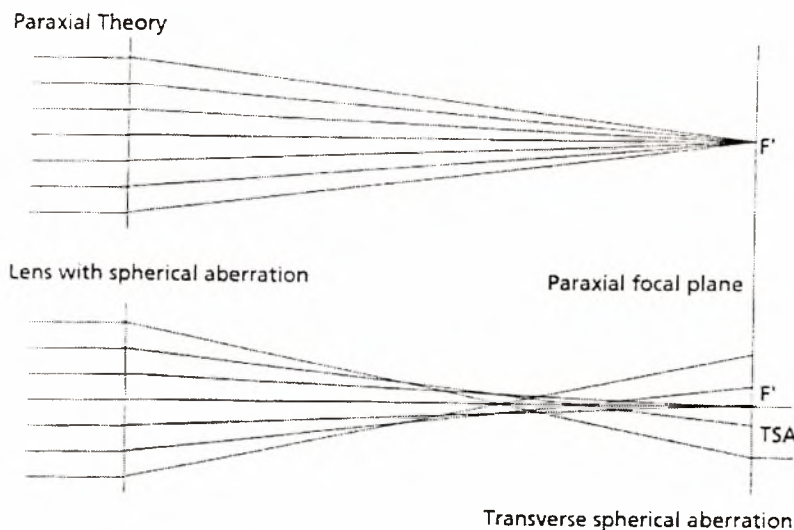
3.5.2.1 Σφαιρική απόκλιση

Σύμφωνα με την παραξονική θεωρία, μία παράλληλη δέσμη μπορεί να εστιαστεί σε ένα μοναδικό σημείο με τη βοήθεια ενός θετικού φακού. Στην πραγματικότητα, οι ακτίνες εστιάζονται μετά το φακό σε μία απόσταση αρκετά μικρότερη απ' αυτή που προβλέπει η παραξονική θεωρία. Τα παραπάνω γίνονται πιο εύκολα κατανοητά με τη βοήθεια του Σχ. 3.8.

Το μέγεθος του σημείου εστίασης που προκύπτει εξαιτίας της σφαιρικής απόκλισης εξαρτάται από τη διάμετρο του φακού που χρησιμοποιείται και από την εστιακή απόσταση:

$$\text{Μέγεθος του σημείου εστίασης εξαιτίας της σφαιρικής απόκλισης} = \frac{0.067 f'}{(f/\#)^3} \quad (3.2)$$

για ένα είδωλο στο άπειρο.



Σχήμα 3.8 Σφαιρική απόκλιση [23].

Αν και είναι δυνατόν, είναι πολύ δύσκολο για κάποιον να δημιουργήσει φακούς που διορθώνουν τη σφαιρική απόκλιση. Ευτυχώς, είναι δυνατόν να συνδυάσεις αρκετούς φακούς έτσι ώστε να εξαλείψεις την σφαιρική απόκλιση τους ενός με του άλλου, και έτσι να παράγεις μία καλύτερη εικόνα. Αυτό όμως δεν είναι εφικτό για όλες τις περιπτώσεις. Εξάλλου, υπάρχουν και άλλες ενοχλητικές επιδράσεις, εκτός από τη σφαιρική απόκλιση, όπως υψηλότερης τάξης διαταράξεις, coma, κτλ.

3.5.2.2 Μείωση της σφαιρικής απόκλισης

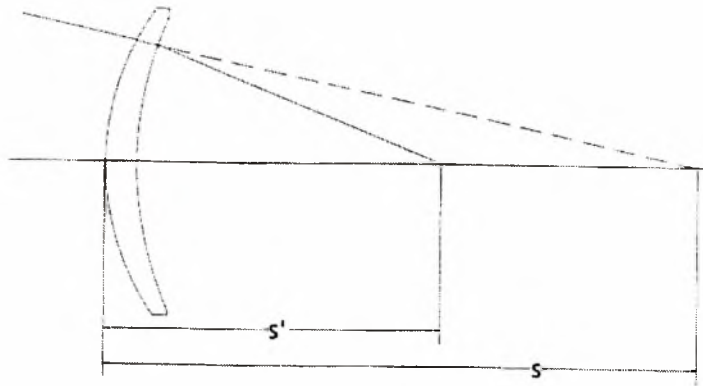
Ένας από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί κανείς να μειώσει τη σφαιρική απόκλιση είναι η χρησιμοποίηση κυρτών-κοίλων φακών. Αυτοί οι φακοί φτιάχνονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην προσθέτουν σφαιρική απόκλιση σε ένα σύστημα. Το σχήμα αυτού του φακού - το οποίο ονομάζεται aplanatic - έχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα όταν η μεγέθυνση είναι ίση με $1/n_1$. Αυτός ο περιορισμός δεν είναι πολύ πρακτικός. Οι κυρτοί-κοίλοι φακοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες μεγεθύνσεις. Μπορεί να δειχθεί ότι:

$$TSA = TSA_0 \left(\frac{s'}{s} \right) + TSA_m \quad (3.3)$$

Όπου TSA_0 είναι η εγκάρσια σφαιρική απόκλιση του αρχικού συστήματος, TSA_m είναι η απόκλιση του κυρτού-κοίλου φακού και TSA είναι η ολική απόκλιση του συστήματος. Τα μεγέθη s και s' φαίνονται στο Σχ. 3.9.

Το TSA_0 μειώνεται κατά ένα παράγοντα ίσο με τη μεγέθυνση του κυρτού-κοίλου φακού. Αφού η εστιακή απόσταση μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα, η γωνιακή σφαιρική απόκλιση παραμένει η ίδια. Με την προϋπόθεση ότι η TSA_m είναι μικρή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε θετικούς κυρτούς-κοίλους φακούς για να επιτύχουμε μικρές εστιακές αποστάσεις και χαμηλούς αριθμούς- f , χωρίς να αυξάνεται τόσο πολύ η ολική απόκλιση του συστήματος, TSA .

Οι συνήθεις επιπεδόκυρτοι φακοί (plano-convex lenses) έχουν μία μεγάλη γωνία εισόδου σε μεγάλα διαφράγματα. Αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλα διαφράγματα φακού, οι επιπεδόκυρτοι φακοί έχουν μεγάλες αποκλίσεις. Αλλά χρησιμοποιώντας κυρτούς-κοίλους φακούς, η επιφάνεια του φακού κυρτώνεται στα σημεία όπου συμβαίνουν υψηλής γωνίας συμβάντα. Έτσι η παραξονική προσέγγιση δεν παραβιάζεται τόσο πολύ, και με αυτό τον τρόπο μπορούμε να πάρουμε μία καλύτερη εικόνα.



Σχήμα 3.9 Ο θετικός κυρτός-κοίλος φακός [23].

Για να κάνει κανείς καλή χρήση των κυρτών-κοίλων φακών, πρέπει πάντα να διαβάζει τις οδηγίες του κατασκευαστή. Απ' αυτές παίρνουμε, για την περίπτωση μας:

$$f'_m = \frac{4}{3} f'_l \text{ και } f'_c = \frac{4}{7} f'_l \quad (3.4)$$

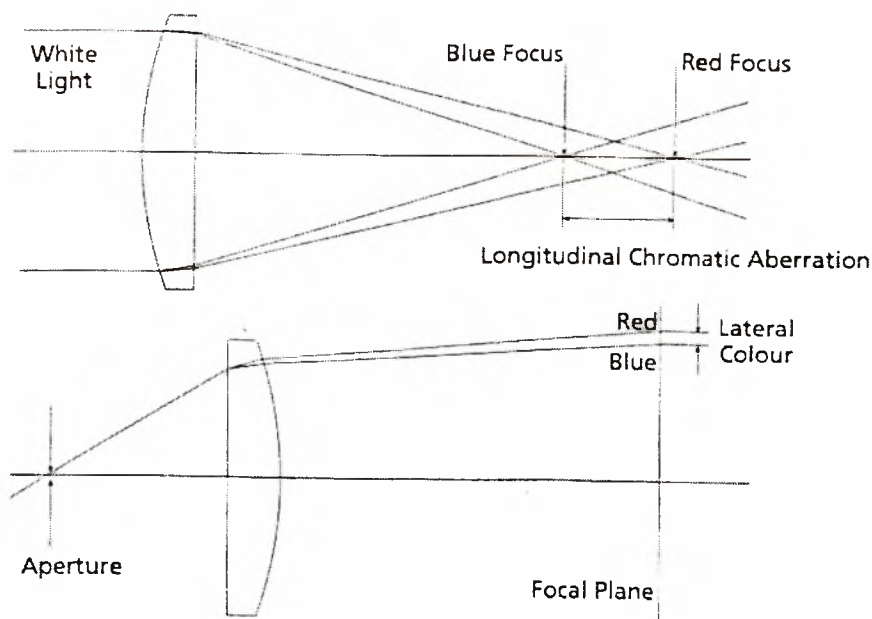
Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι υπάρχουν καθορισμένες αποστάσεις ανάμεσα στους φακούς, και ότι για τέλεια αποτελέσματα, θα πρέπει η απόσταση μεταξύ του κυρτού-κοίλου φακού και του επιπεδόκυρτου να είναι ίση με μηδέν.

3.5.2.3 Coma, αστιγματισμός, κύρτωση πεδίου και στρέβλωση

Άλλοι περιορισμοί στην απόδοση προκύπτουν από την επίδραση του coma, του αστιγματισμού, της κύρτωσης του πεδίου και της στρέβλωσης. Αυτοί οι παράγοντες είναι, γενικά αλλά και στην περίπτωση των πειραμάτων μας, λιγότερο σημαντικοί από τη σφαιρική απόκλιση. Περισσότερα για την επίδραση αυτών των παραγόντων μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Ε της βιβλ. αναφοράς [23].

3.5.2.4 Χρωματική απόκλιση

Ο δείκτης διάθλασης είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Επομένως, η εστιακή απόσταση ενός μονού φακού είναι συνάρτηση του χρώματος του φωτός. Το γεγονός αυτό μπορεί να έχει δύο διαφορετικές επιδράσεις, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10.



Σχήμα 3.10 Χρωματικές αποκλίσεις [23].

Η μία επίδραση έχει να κάνει με τη μεταβολή της εστιακής απόστασης του φακού, ενώ η άλλη μεταβάλλει τη μεγέθυνση συναρτήσει του χρώματος. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για μας, γιατί στα πειράματά μας χρησιμοποιούμε διαφορετικά χρώματα έτσι ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες καταγραφής της εικόνας.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους γυαλιού, είναι εφικτό να κατασκευάσει κανείς συνδυασμούς φακών που να έχουν την ίδια εστιακή απόσταση σε δύο διαφορετικά χρώματα. Αυτές οι σύνθετες κατασκευές φακών έχουν χαμηλές σφαιρικές αποκλίσεις, και σε κρίσιμες εφαρμογές αποδίδουν πολύ καλύτερα από τους απλούς φακούς.

3.5.3 Καθορίζοντας την οπτική διαδρομή

Οι εξισώσεις που δίνονται στο Παράρτημα Ε της βιβλ. αναφοράς [23], ενότητα Ε.1, είναι όλες όσες χρειάζονται για να λυθεί το πρόβλημα του σχηματισμού της εικόνας βάσει της παραξονικής προσέγγισης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετοί βαθμοί ελευθερίας στο σχεδιασμό του οπτικού συστήματος. Θα αναφερθούμε πρώτα στο σχεδιασμό των οπτικών για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα.

Στο πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα, θέλουμε να καταγράψουμε την εικόνα ενός μικρού *thermistor*, πάνω στον οποίο σχηματίζεται η φυσαλίδα. Αφού για την καταγραφή της εικόνας χρησιμοποιούμε μία κάμερα με το δικό της σύστημα φακών, πρέπει να δημιουργήσουμε μία εικόνα μπροστά από την κάμερα, και να εστιάσουμε την κάμερα σε αυτή την εικόνα.

Η ελάχιστη απόσταση στην οποία μπορούμε να εστιάσουμε την κάμερα είναι περίπου 1 cm από την άκρη του φακού της. Το μέγεθος που μπορεί να «δει» η κάμερα σε αυτή την απόσταση είναι 5 cm. Η κάμερα καταγράφει περίπου 500 pixels στην οριζόντια κατεύθυνση. Αν θέλουμε 5 μm ανάλυση, χρειαζόμαστε μία μεγέθυνση της τάξης των 20 φορές, περίπου. Για να καταφέρουμε να πάρουμε μια τέτοια μεγέθυνση, χωρίς να παραβιάσουμε τους περιορισμούς της απόδοσης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, χρειαζόμαστε μία πολύ μεγάλη απόσταση από το αντικείμενο για να το καταγράψουμε. Συν τοις άλλοις, το να μεγεθύνει κανείς μία εικόνα, και στη συνέχεια να τη συρρικνώνει, δεν είναι πολύ αποτελεσματικό.

Έτσι αποφασίσαμε, αφού η κάμερα έχει το δικό της οπτικό σύστημα, να το χρησιμοποιήσουμε. Βλέποντας, λοιπόν, την κάμερα, σαν ένα πραγματικό μάτι, μπορέσαμε να χρησιμοποιήσουμε το οπτικό μας σύστημα σαν ένα είδος μεγεθυντικού φακού.

Το να χρησιμοποιήσει κανείς ένα φακό σαν μεγεθυντικό φακό, σημαίνει ότι τοποθετούμε το αντικείμενο κοντύτερα στο φακό από F . Χρησιμοποιώντας το συνήθη τύπο για τους φακούς – βλέπε Παράρτημα Ε, στη βιβλ. αναφορά [23] – βρίσκουμε ότι $s' < 0$, η εικόνα σχηματίζεται στην πλευρά του αντικειμένου του φακού, και είναι μεγαλύτερη από το αντικείμενο - $M > 1$. Είναι πιθανόν να δημιουργήσουμε μία εικονική εικόνα και να εστιάσουμε την κάμερα πάνω σ' αυτήν. Με αυτό το τρόπο, η απόσταση μεταξύ αντικειμένου και κάμερας είναι πολύ πιο μικρή.

Στην πραγματικότητα όμως, δεν μπορούσαμε να πλησιάσουμε αρκετά κοντά στο πείραμα έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε ένα μονό φακό. Γι' αυτό, δημιουργήσαμε μία πραγματική εικόνα, με ένα συντελεστή μεγέθυνσης περίπου ίσο με τρία. Η εικόνα αυτή στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε σαν το αντικείμενο για τη τεχνική της εικονικής εικόνας που περιγράψαμε παραπάνω.

Για το πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα, χρησιμοποιήσαμε την ίδια περίπου τεχνική, αλλά οι υπολογισμοί μας έδειξαν δεν θα μπορούσαμε να τα καταφέρουμε χρησιμοποιώντας έναν ή δυο θετικούς φακούς. Όταν συμπεριλάβαμε και αρνητικούς φακούς στους υπολογισμούς μας,

ανακαλύψαμε ότι η λύση του προβλήματος ήταν εφικτή, χρησιμοποιώντας ένα θετικό και έναν αρνητικό φακό.

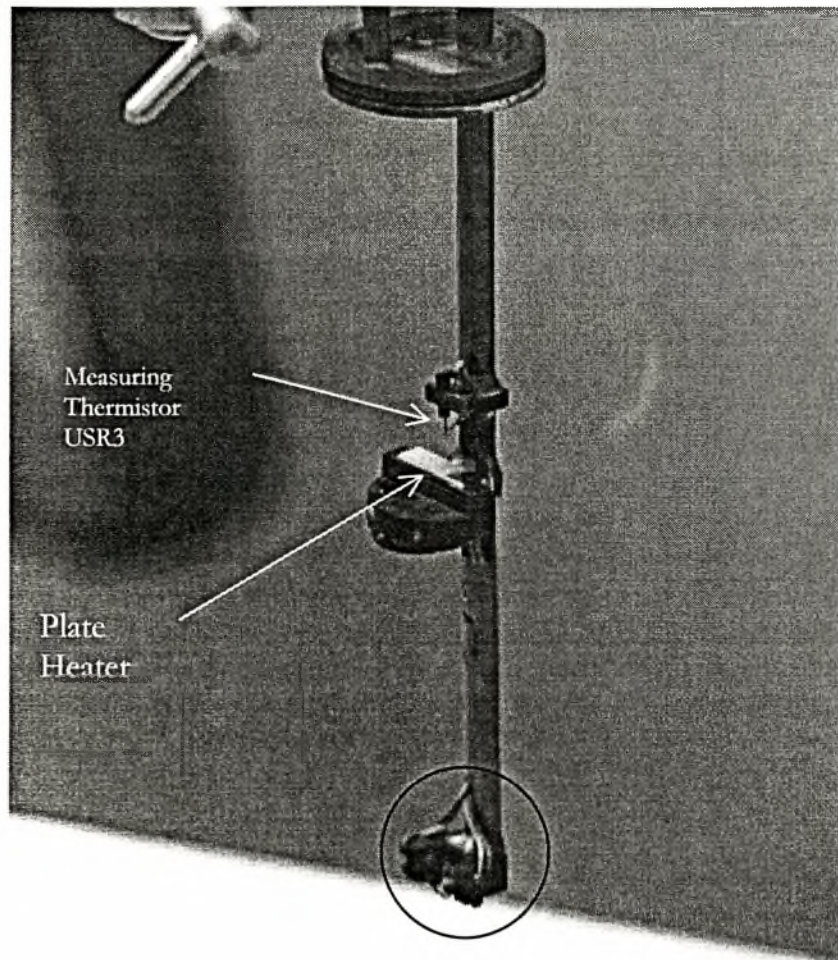
Όλες οι λεπτομέρειες για τα οπτικά της πειραματικής μας συσκευής μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Ε της βιβλ. αναφοράς [23].

3.6 Οι θερμοαντήρες

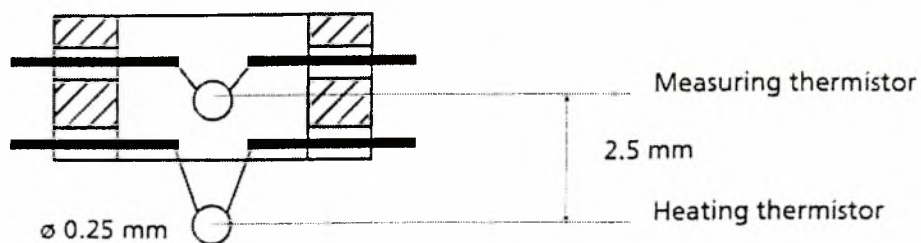
Σε κάθε εναλλάξιμο κελί υπάρχουν δύο θερμοαντήρες - ο σφαιρικός και ο επίπεδος θερμοαντήρας - και δύο ακόμη thermistors που χρησιμοποιούνται σαν μετρητικά της θερμοκρασίας. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν τρία thermistors και ο επίπεδος θερμοαντήρας, αφού όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες, ο σφαιρικός θερμοαντήρας είναι και αυτός ένα thermistor. Η διάταξη των τριών thermistors και του επίπεδου θερμοαντήρα στο βραχίονα ενός εναλλάξιμου κελιού φαίνονται στα Σχήματα 3.11.α και 3.11.β. Στο σημείο αυτό θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι τα τρία thermistors που βρίσκονται στο βραχίονα κάθε εναλλάξιμου κελιού ονομάζονται ως εξής:

- **USR1:** ο σφαιρικός θερμοαντήρας ή το thermistor θέρμανσης.
- **USR2:** το thermistor μέτρησης της θερμοκρασίας που βρίσκεται πάνω από το σφαιρικό θερμοαντήρα.
- **USR3:** το thermistor μέτρησης της θερμοκρασίας που βρίσκεται πάνω από τον επίπεδο θερμοαντήρα.

Λεπτομέρειες για τους θερμοαντήρες μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Ε, ενώ οι κατασκευαστικές τους λεπτομέρειες φαίνονται στο Παράρτημα Δ.



Σχήμα 3.11.α Η διάταξη των thermistors και του επίπεδου θερμαντήρα στο βραχίονα του εναλλάξιμου κελιού. Ο σφαιρικός θερμαντήρας φαίνεται σε λεπτομέρεια στο Σχ. 3.11.β.

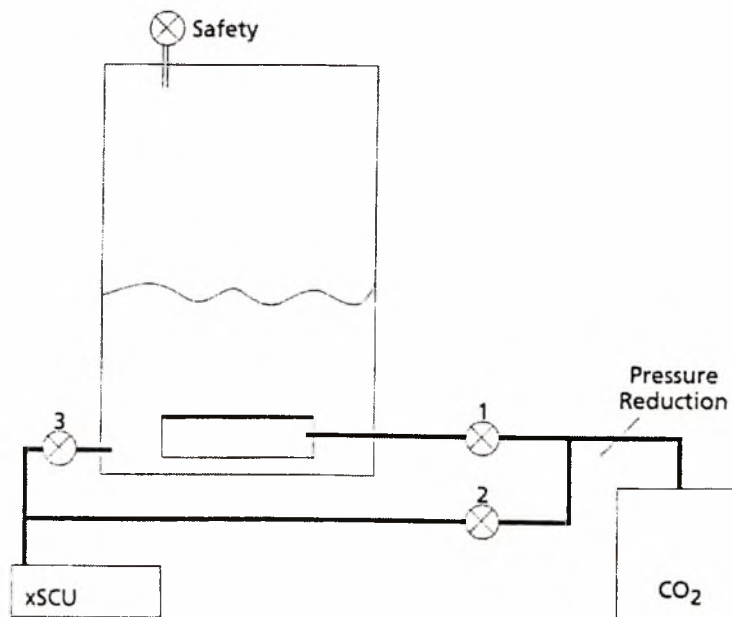


Σχήμα 3.11.β Σχεδιαστική λεπτομέρεια του Σχ. 3.10.α. Κάτω φαίνεται ο σφαιρικός θερμαντήρας (Heating thermistor - USR1) και από πάνω του βρίσκεται το thermistor μέτρησης της θερμοκρασίας (Measuring thermistor - USR2) [23].

3.7 Η συσκευή κορεσμού και πλήρωσης των κελιών

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων, πρέπει να παρασκευάσουμε το διάλυμα υγρού-αερίου. Η συσκευή στην οποία παρασκευάζουμε το διάλυμα λειτουργεί και σαν συσκευή πλήρωσης των εναλλάξιμων κελιών. Για να γίνει καλύτερα κατανοητό πως λειτουργεί η συσκευή πλήρωσης των κελιών, θα προσπαθήσουμε πρώτα να περιγράψουμε τον εξοπλισμό πλήρωσης και κορεσμού, όπως αυτός φαίνεται στο Σχ. 3.12.

Ένα διάλυμα υγρού με διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να παρασκευαστεί «φυσώντας» το αέριο διαμέσου ενός διαχυτήρα μέσα στο υγρό. Ο διαχυτήρας είναι ένα κομμάτι από πορώδες υλικό, για παράδειγμα ένα κεραμικό ή μια συμπυκνωμένη μάζα μετάλλου χωρίς να έχει λιωθεί (sintered metal). Επειδή το διάλυμα μας είναι ελαφρώς όξινο, διαλέξαμε για υλικό κατασκευής του διαχυτήρα το κεραμικό έτσι ώστε ν' αποφύγουμε τη διάβρωση του. Οι οπές στο εσωτερικό του διαχυτήρα είναι μεταξύ 40 και 100 μm .



Σχήμα 3.12 Εξοπλισμός πλήρωσης και κορεσμού [23].

Η διαδικασία του κορεσμού και της πλήρωσης των εναλλάξιμων κελιών περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η προετοιμασία των πειραμάτων, η πειραματική διαδικασία και όλες οι διαδικασίες που χρειάστηκαν να γίνουν πριν και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στο δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η ανάλυση των αποτελεσμάτων, και πιο συγκεκριμένα, των δεδομένων εικόνας, μετρούμενης θερμοκρασίας και διαφοράς δυναμικού, αλλά και της ποιότητας της βαρύτητας.

4.1 Πειραματική διαδικασία

4.1.1 Κορεσμός και πλήρωση των κελιών

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως έχουμε αναφέρει, πρέπει να παρασκευάσουμε το κορεσμένο διάλυμα υγρού-αερίου. Τα υγρά των οποίων τη συμπεριφορά μελετήσαμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας, ήταν το νερό, το επτάνιο και ένα μείγμα 80-20% κ.β. γλυκερίνης-νερού. Το αέριο ήταν το διοξείδιο του άνθρακα. Η διαδικασία του κορεσμού παίρνει μέρος στη συσκευή κορεσμού και πλήρωσης των κελιών (Σχ. 3.12). Πρώτα γίνεται ο κορεσμός και στη συνέχεια γίνεται η πλήρωση των κελιών με το κορεσμένο διάλυμα υγρού-αερίου. Φωτογραφίες της συσκευής κορεσμού και πλήρωσης των κελιών και της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, φαίνονται στο Παράρτημα Α (Φωτογραφίες Α5, Α6 & Α7).

Ο κορεσμός γίνεται σε μία σταθερή θερμοκρασία, την οποία ονομάζουμε θερμοκρασία κορεσμού, T_{sat} , και η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτό γιατί δεν θέλουμε να δημιουργηθούν φυσαλίδες στο διάλυμα πριν την έναρξη των πειραμάτων μας. Η θερμοκρασία στην οποία έγινε ο κορεσμός, T_{sat} , πριν την έναρξη των πειραμάτων μας, ήταν:

$$T_{sat} = 33.0^{\circ}\text{C}$$

Για να μπορέσουμε να διατηρήσουμε σε σταθερή θερμοκρασία, ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού, τη συσκευή κορεσμού μας, χρησιμοποιήσαμε ένα θερμαντικό ισοθερμοκρασιακού λουτρού (Techne TE-8A). Επειδή οι διαστάσεις της συσκευής κορεσμού δεν μας επέτρεπαν να τη τοποθετήσουμε μέσα στο θερμαντικό, αποφασίσαμε να τοποθετήσουμε τη συσκευή κορεσμού σε ένα πλαστικό δοχείο, και να συνδέσουμε το δοχείο αυτό με την έξοδο της αντλίας του θερμαντικού. Επειδή το θερμαντικό είχε μία μόνο αντλία, έπρεπε να τοποθετήσουμε το δοχείο με τη συσκευή κορεσμού σε κατάλληλο υψομετρικό επίπεδο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας βρόγχος κυκλοφορίας του νερού από και προς το θερμαντικό, και με τη βοήθεια μίας βάνας που υπήρχε στο κάτω μέρος του δοχείου, να ελέγχουμε τη στάθμη του νερού μέσα στο δοχείο, έτσι ώστε αυτή να είναι σταθερή. Η θερμοκρασία του νερού που περιέβρεχε τη συσκευή κορεσμού μετριόταν με τη βοήθεια ενός ψηφιακού θερμομέτρου της Cole-Parmer, χρησιμοποιώντας ένα θερμοστοιχείο τύπου J διαμέτρου 1 mm⁹. Η ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας κορεσμού, που επιτυγχάναμε με τη χρήση της παραπάνω διάταξης, είναι ίση με 0.1-0.4 °C.

Έχοντας υπ' όψιν το Σχ. 3.12 του προηγούμενου κεφαλαίου, θα εξηγήσουμε τώρα πως γίνεται ο κορεσμός, και μετέπειτα η πλήρωση των κελιών. Καταρχήν γεμίζουμε τη συσκευή κορεσμού με το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο υγρό. Αυτό γίνεται μέσω της οπής που υπάρχει στο πάνω μέρος της συσκευής. Οι βάνες 1, 2 και 3 είναι κλειστές. Για να ξεκινήσουμε τη διεργασία του κορεσμού, ανοίγουμε προσεκτικά την παροχή του διοξειδίου του άνθρακα και ταυτόχρονα ανοίγουμε τη βάνα 1. Η ταχύτητα ροής του αερίου πρέπει να είναι αρκετά αργή, γιατί διαφορετικά οι φυσαλίδες που θα δημιουργούνται στο εκάστοτε υγρό θα είναι πολύ μεγάλες. Αυτό που χρειαζόμαστε είναι πολλές μικρές φυσαλίδες, γιατί αυτές δίνουν τη μεγαλύτερη

⁹ Η βαθμονόμηση του συγκεκριμένου θερμοστοιχείου έγινε με τη βοήθεια υδραργυρικού θερμομέτρου 0-100 °C και ευκρίνειας 0.1°C.

επιφάνεια επαφής μεταξύ του υγρού και του διοξειδίου του άνθρακα¹⁰. Για να καταφέρουμε να έχουμε αρκετά αργή ταχύτητα ροής του αερίου, παρεμβάλουμε μεταξύ της φιάλης υψηλής πίεσης, που περιέχει το διοξείδιο του άνθρακα, και της συσκευής κορεσμού, δύο μανοεκτονωτές.

Μετά από υπολογισμούς μας και εξέταση στον αέριο χρωματογράφο, βρήκαμε ότι μία χρονική διάρκεια 40 λεπτών είναι παραπάνω από ικανοποιητική για να κορεστεί το χρησιμοποιούμενο υγρό με αέριο.

Μετά το κορεσμό του χρησιμοποιούμενου υγρού με διοξείδιο του άνθρακα, είμαστε έτοιμοι για να προχωρήσουμε στη διαδικασία πλήρωσης των κελιών. Πρώτα όμως, για να εκκενώσουμε το εναλλάξιμο κελί από τον αέρα που περιέχει, ανοίγουμε τη βάνα 2, έτσι ώστε το διοξείδιο του άνθρακα να εισέλθει μέσα στο κελί¹¹. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε ότι το διάλυμα που θα υπάρχει μέσα στο κελί μας, αφού το πληρώσουμε στη συνέχεια, θα είναι όσο το δυνατό πιο καθαρό.

Η πλήρωση του εκάστοτε κελιού γίνεται αφού κλείσουμε τη βάνα 2 και ανοίξουμε τη βαλβίδα ασφαλείας που βρίσκεται στο πάνω μέρος της συσκευής πλήρωσης. Στη συνέχεια, ανοίγοντας τη βάνα 3, και χρησιμοποιώντας μία υψομετρική διαφορά, έτσι ώστε το διάλυμα να ρεύσει προς το κελί, γίνεται η πλήρωση του εκάστοτε κελιού. Η πλήρωση του κελιού γίνεται από τη βάνα εισόδου που βρίσκεται στο πάνω μέρος του, έχοντας ανοιχτή τη βάνα εξόδου του αερίου (διοξείδιο του άνθρακα), Σχ. 3.4. Η βαλβίδα ασφαλείας της συσκευής πλήρωσης πρέπει να είναι ανοιχτή, έτσι ώστε να αποφύγουμε τη δημιουργία υποπίεσης στο εσωτερικό της συσκευής. Αφού γεμίσουμε όλα τα κελιά με το κορεσμένο διάλυμα, τα τοποθετούμε στο κιβώτιο ισοθερμοκρασιακής τους φύλαξης για να είναι έτοιμα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων στη συνέχεια. Τα κελιά διατηρούνται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στην οποία έχει γίνει ο κορεσμός, έτσι ώστε να μην υπάρχει ανεπιθύμητη ανάπτυξη φυσαλίδων¹².

4.1.2 Προετοιμασία των πειραμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της εισαγωγής, τα πειράματά μας διεξήχθησαν σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Αυτό έγινε εφικτό, κατά τη διάρκεια της 26^{ης} Καμπάνιας Παραβολικών Πτήσεων (26th Parabolic Flight Campaign), της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency), η οποία έγινε στις 1-3 Ιουνίου του 1999 στο αεροδρόμιο Bordeaux-Mérignac της Γαλλίας. Την ευθύνη για τη διεξαγωγή των παραβολικών πτήσεων είχε η Γαλλική εταιρεία NOVESPACE.

Η συγκεκριμένη καμπάνια παραβολικών πτήσεων αποτελείτο από τρεις μέρες. Κάθε μέρα διεξήχθη μία πτήση. Κατά τη διάρκεια κάθε πτήσης διεξήχθησαν 30 παραβολές. Οι παραβολές γίνονται σε ομάδες των τριών, με ένα λεπτό διάστημα ανάμεσα τους. Μετά από κάθε ομάδα,

¹⁰ Ένας άλλος λόγος που θέλουμε η ταχύτητα ροής του αερίου να είναι αργή, είναι ότι επειδή αυτό έχει υποστεί μία αποσυμπίεση, είναι αρκετά ψυχρό. Γι' αυτό, θέλουμε μικρές ποσότητες αερίου να εισέρχονται στο υγρό, έτσι ώστε το υγρό να μην ψύχεται ραγδαία, και η θερμοκρασία κορεσμού να διατηρείται σχεδόν σταθερή.

¹¹ Η βάνα 1 είναι κλειστή.

¹² Περίπου 2-2.5 βαθμούς Κελσίου χαμηλότερα από τη θερμοκρασία κορεσμού. Το κιβώτιο φύλαξης των κελιών έχει ξεχωριστή παροχή ηλ. ρεύματος και μπορεί έτσι ο θερμοστάτης του να τεθεί σε λειτουργία ακόμα και αν η πειραματική μας συσκευή δεν έχει τεθεί ακόμα σε λειτουργία (Power=OFF).

υπάρχει ένα διάστημα τεσσάρων λεπτών, και μετά από κάθε 10 παραβολές υπάρχει μία μεγαλύτερη παύση κατά την οποία αλλάζουν οι πιλότοι της πτήσης. Αυτός ο χρόνος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή των παραμέτρων του πειράματος. Ο σχεδιασμός της διεξαγωγής των πειραμάτων έγινε λαμβάνοντας υπ' όψιν αυτό το χρονοδιάγραμμα.

Πιο συγκεκριμένα, πριν από κάθε παραβολική πτήση, σχεδιάζαμε το σενάριο της διεξαγωγής των πειραμάτων κατά τη διάρκεια της πτήσης. Στο σενάριο αναφέραμε με κάθε λεπτομέρεια, αρχικά, τη διαδικασία έναρξης της λειτουργίας της συσκευής, που θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα, και στη συνέχεια, καθορίζαμε: τη σειρά με την οποία θα γίνουν τα πειράματα, το υγρό που θα χρησιμοποιούσαμε σε κάθε πείραμα, το μέγεθος του θερμικού παλμού που θα δίναμε καθώς και τη χρονική του διάρκεια, τη χρονική στιγμή που θα γινόταν η μετάβαση από το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα στο πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα¹³. Επίσης, καθορίζαμε τη χρονική στιγμή που θα γινόταν η αλλαγή των κελιών – μετά από κάθε ομάδα τριών παραβολών που μεσολαβούσε ένα χρονικό διάστημα 4 λεπτών. Είχαν καθοριστεί επίσης στο σενάριο και εναλλακτικές επιλογές μεγέθους θερμικού παλμού και χρονικής του διάρκειας, στην περίπτωση κατά την οποία κατά τη διάρκεια του προηγούμενου πειράματος δεν είχε σχηματιστεί φυσαλίδα.

Πριν την πτήση τώρα, πρέπει να ελεγχθεί όλος ο εξοπλισμός. Υπάρχουν αρκετά τμήματα της πειραματικής μας συσκευής που πρέπει να ελεγχθούν ξεχωριστά: ο θερμοστάτης και τα οπτικά συστήματα, οι κάμερες, ο θερμοστάτης του κιβωτίου φύλαξης των κελιών, τα κελιά, ο υπολογιστής που ελέγχει τη λειτουργία της συσκευής, καθώς και το καταγραφικό μετρούμενης τάσης, στον οποίο θ' αναφερθούμε στην επόμενη ενότητα.

Επειδή τώρα κατά τη διάρκεια της πτήσης δεν υπάρχει πλεόνασμα χρόνου για την εκτέλεση των διαδικασιών που χρειάζονται για να γίνουν τα πειράματα, όλες οι διαδικασίες πρέπει να εξασκηθούν από τα μέλη της ομάδας που θα πετάξουν και θα είναι υπεύθυνα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, έτσι ώστε να είναι ικανοί να τις κάνουν με μεγάλη ευκολία και ακρίβεια. Γι' αυτό πριν από κάθε πτήση γίνεται μία γενική αναπαράσταση της διεξαγωγής των πειραμάτων σύμφωνα με το σενάριο της κάθε πτήσης. Σε αυτή ο κάθε ερευνητής γνωρίζει το ρόλο του στη διεξαγωγή του πειράματος, γεγονός που καθορίζεται από το σενάριο, και προσπαθεί ν' αποκτήσει την απαιτούμενη ευχέρεια στο χειρισμό του τμήματος της συσκευής που του έχει ανατεθεί. Με αυτό τον τρόπο δίνεται και η ευκαιρία να ελεγχθεί πλήρως η λειτουργία της συσκευής.

Μετά το τέλος της προετοιμασίας των πειραμάτων, όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω, είμαστε έτοιμοι για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κατά τη διάρκεια της παραβολικής πτήσης, στην οποία θ' αναφερθούμε στη συνέχεια.

4.1.3 Τα πειράματα

Η διεξαγωγή των πειραμάτων γίνεται, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, σύμφωνα με το σενάριο διεξαγωγής των πειραμάτων της εκάστοτε πτήσης. Τα πειράματα έγιναν από τρεις ερευνητές. Ο πρώτος ήταν επιφορτισμένος με τον έλεγχο της συσκευής μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή που βρίσκεται σ' αυτήν - έδινε τις εντολές στο πρόγραμμα *Snopy* για την έναρξη

¹³ Όπως έχουμε αναφέρει, κατά τη διάρκεια των τριών ημερών διεξήχθησαν πειράματα τόσο στο σφαιρικό, όσο και στον επίπεδο θερμαντήρα.

των θερμικών παλμών και το καθορισμό του μεγέθους τους και της χρονικής τους διάρκειας - ο δεύτερος έλεγξε τις κάμερες και άλλαξε τα κελιά που τοποθετούσαμε στο θερμοστάτη, και ο τρίτος συγχρόνιζε το πείραμα μεταφέροντας τις οδηγίες του σεναρίου και παρακολουθούσε σε μία μικρή οθόνη που υπήρχε στο πάνω μέρος της συσκευής την εξέλιξη του πειράματος.

Πιο συγκεκριμένα, οι συσκευές οι οποίες έπρεπε να ελέγχονται από τους ερευνητές κατά τη διάρκεια της πτήσης, ήταν:

- Ο θερμοστάτης και τα ηλεκτρικά συστήματα παροχής ισχύος της συσκευής, τα οποία ελέγχονταν μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή που υπήρχε στη συσκευή, με τη βοήθεια του προγράμματος *Snoopy*. Ο θερμοστάτης ήταν υπεύθυνος για την ισοθερμοκρασιακή διατήρηση του κελιού, ενώ με τη βοήθεια των ηλ. συστημάτων παροχής ισχύος δίναμε θερμικούς παλμούς στο διάλυμα υγρού-αερίου.
- Οι κάμερες, τις οποίες χρησιμοποιήσαμε για τη καταγραφή της εικόνας, έτσι ώστε στη συνέχεια να προσδιορίσουμε το ρυθμό ανάπτυξης του μεγέθους της φυσαλίδας συναρτήσει του χρόνου.
- Η συσκευή καταγραφής διαφοράς δυναμικού - *Data Logger*. Πρόκειται για καταγραφικό διαφοράς δυναμικού μέσω της οποίας μπορούμε να υπολογίσουμε τη τιμή της τάσης που εφαρμοζόταν στα άκρα του thermistor, και επομένως να υπολογίσουμε την θερμική ισχύ, P_{therm} , που καταναλώνεται στο thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, αλλά και τη θερμοκρασία, T_{therm} , στην επιφάνεια του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο υπολογισμού των δύο παραπάνω μεγεθών θα δοθούν στην ενότητα 4.2.

Στη συνέχεια θα δοθεί με κάθε λεπτομέρεια η διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων και οι εντολές του *Snoopy*¹⁴ για την πραγματοποίησή αυτών:

1. Τοποθέτηση στο θερμοστάτη του πρώτου κελιού.
2. Έναρξη της λειτουργίας της συσκευής.
 - Ανοίγουμε το κεντρικό διακόπτη παροχής ρεύματος της συσκευής. Θέτουμε σε λειτουργία τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Απ' ευθείας ξεκινά το πρόγραμμα *Snoopy*.
 - Θέτουμε το είδος λειτουργίας (*Mode*) στο *TCS*.
 - Για να αποθηκευτούν τα καταγραφόμενα μεγέθη από το *Snoopy* σε ένα αρχείο κατάληξης .log έτσι ώστε να μπορέσουμε στη συνέχεια να τα επεξεργαστούμε, πρέπει να επιλέξουμε στο μενού *Logfile* την εντολή *Log data*. Στη συνέχεια, επιλέγω την εντολή *Pick* και θέτω το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτούν τα δεδομένα μου, καθώς και τη θέση του στο δίσκο του υπολογιστή.
 - Στη συνέχεια επιλέγουμε *Plot*.
 - Πατάμε τα πλήκτρα: `[s][u][5][Enter][u][6][Enter]`
 - Για να ξεκινήσει να λειτουργεί ο θερμοστάτης πρέπει να θέσουμε την απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του σε βαθμούς Κελσίου (°C). Αυτό γίνεται πατώντας τα πλήκτρα: `[t][32][Enter]`. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας η απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη, T_{set} , ήταν οι 32 °C.
3. Έναρξη λειτουργίας του Data Logger. Καθορισμός συχνότητας δειγματοληψίας του.

¹⁴ Στο Παράρτημα ΣΤ, παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι οδηγίες χρήσης του προγράμματος *Snoopy*.

4. Έναρξη λειτουργίας των καμερών και τοποθέτηση σε αυτές των κασετών εγγραφής.
5. Ενεργοποίηση των thermistors.
 - USR1: [Shift]+[~]→[14]→[0]
 - USR2: [Shift]+[~]→[15]→[0]
 - USR3: [Shift]+[~]→[16]→[0]
6. Επιλογή μεταξύ του πειράματος του σφαιρικού θερμαντήρα (**VSS** = Voltage Source System) και του πειράματος του επίπεδου θερμαντήρα (**CSS** = Current Source System), και του μεγέθους του θερμικού παλμού. Το μέγεθος του θερμικού παλμού¹⁵ για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα δίνεται σαν πολλαπλάσιο του 1 mV, και για το πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα σαν πολλαπλάσιο των 20 μΑ.
 - **VSS**: [Shift]+[8]→[1]→[36000]
 - **CSS**: [Shift]+[8]→[2]→[30000]
7. Επιλογή χρονικής διάρκειας θερμικού παλμού. Η χρονική διάρκεια του θερμικού παλμού δίνεται σαν πολλαπλάσιο των 50 msec. Για παράδειγμα, στο πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα, η τιμή της χρονικής διάρκειας για την παράμετρο 400, που φαίνεται παρακάτω, είναι τα 20 sec.
 - **VSS**: [Shift]+[~]→[12]→[400]→[3]
 - **CSS**: [Shift]+[~]→[11]→[90]→[3]

Ο θερμικός παλμός δίνεται 5 δευτερόλεπτα μετά το τερματισμό της περιόδου υπερβαρύτητας, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2.6. Αυτό γίνεται για να είμαστε σίγουροι ότι κατά την έναρξη του πειράματος βρισκόμαστε σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Πρέπει δηλαδή, η έναρξη του πειράματος να γίνει όταν θα έχουμε περάσει την περίοδο μετάβασης που μεσολαβεί ανάμεσα στην υπερβαρύτητα και στη μικροβαρύτητα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2.6. Άρα, όταν ο κυβερνήτης του αεροσκάφους φωνάζει “ignition” μετράμε 5 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια δίνουμε το θερμικό παλμό. Η μέγιστη χρονική διάρκεια του θερμικού παλμού που δόθηκε σε κάποιο πείραμα ήταν τα 30 δευτερόλεπτα, 10 περίπου δευτερόλεπτα παραπάνω από τη χρονική διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας που είναι τα 20 δευτερόλεπτα περίπου.

¹⁵ Θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι η τιμή της τάσης που δίνουμε μέσω του προγράμματος Spoozy δεν είναι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του thermistor, αλλά η ολική τάση που εφαρμόζεται στην αντίσταση του thermistor και στην αντίσταση που βρίσκεται συνδεδεμένη μαζί του σε σειρά (βλέπε ενότητα 4.2 και Παράρτημα Ε.1).

4.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Στο δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου, που ακολουθεί στη συνέχεια, περιγράφεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίον αναλύθηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας. Τα αποτελέσματα αποτελούνταν από τα δεδομένα που καταγράψαμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας. Τα δεδομένα αυτά ήταν τα εξής:

- I. Δεδομένα εικόνας (ενότητα 4.2.1).
- II. Δεδομένα από το πρόγραμμα *Snopy* (ενότητα 4.2.2).
- III. Δεδομένα διαφοράς δυναμικού από το Data Logger (ενότητα 4.2.3).
- IV. Δεδομένα ποιότητας της βαρύτητας κατά τη διάρκεια των παραβολικών πτήσεων (ενότητα 4.2.4).

4.2.1 Δεδομένα εικόνας

Σκοπός της ανάλυσης των δεδομένων εικόνας ήταν να υπολογίσουμε τον ρυθμό ανάπτυξης του μεγέθους της φουσαλίδας συναρτήσει του χρόνου. Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το ρυθμό ανάπτυξης της φουσαλίδας, έπρεπε να υπολογίσουμε το μέγεθος της σε κάθε καταγραφόμενη εικόνα του βίντεο. Αυτό έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος MatLab. Το μέγεθος της φουσαλίδας αρχικά υπολογιζόταν σε pixels, και στη συνέχεια, μέσω του υπολογισμού μίας απόστασης της οποίας ξέραμε το μήκος και η οποία είχε καταγραφεί στην εικόνα, υπολογίζαμε το μέγεθος της φουσαλίδας σε μm . Ας δούμε όμως τη διαδικασία πιο αναλυτικά.

Αρχικά τα δεδομένα εικόνας, που είχαν καταγραφεί σε format ψηφιακού βίντεο (Digital Video - DV) έπρεπε να περάσουν στον υπολογιστή. Το μεγάλο πλεονέκτημα του ψηφιακού βίντεο είναι ότι δεν υπάρχει απώλεια της ποιότητας των δεδομένων κατά τη μεταφορά τους από το μέσο αποθήκευσης στον υπολογιστή, αφού τα δεδομένα είναι ήδη αποθηκευμένα σε ψηφιακή μορφή. Για κάθε δευτερόλεπτο βίντεο χρειαζόμαστε 3.54 MB χώρου στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή, για σύλληψη πλήρους ποιότητας (full quality capture). Το ψηφιακό βίντεο είναι βέβαια συμπιεσμένο, και ο λόγος συμπίεσης είναι 5:1.

Η σύλληψη του ψηφιακού βίντεο έγινε με τη βοήθεια της κάρτας Studio DV της Pinnacle Systems, χρησιμοποιώντας σαν player την ψηφιακή κάμερα που υπήρχε στην πειραματική μας συσκευή. Η συγκεκριμένη κάρτα υποστηρίζει το πρότυπο IEEE-1394, γνωστό και σαν "FireWire" και "i.LINK", που επιτρέπει ταχύτερη μεταφορά των δεδομένων από το DV player στον υπολογιστή.

Κατά τη διάρκεια της πτήσης οι κάμερες καταγράφουν την εικόνα από τα πειράματα όχι μόνο όταν διεξάγονται αυτά, αλλά και κατά τον ενδιάμεσο χρόνο μεταξύ των πειραμάτων¹⁶. Άρα, οι

¹⁶ Αυτό γίνεται βέβαια για να μειωθεί η πιθανότητα κάποιο από τα πειράματα να μην καταγραφεί, αλλά και να μειωθούν οι ενέργειες που πρέπει να γίνονται από τους ερευνητές κατά τη διάρκεια της πτήσης, αφού αν δεν είχαμε συνεχή καταγραφή της εικόνας θα έπρεπε κάποιος να ήταν επιφορτισμένος με την έναρξη και την παύση της λειτουργίας των καμερών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

κασέτες με τα καταγεγραμμένα δεδομένα εικόνας από τα πειράματα περιέχουν εκτός από τα δεδομένα που εμείς χρειαζόμαστε, και ακριβά που δεν μας είναι χρήσιμα, τουλάχιστον για την εξαγωγή του ρυθμού ανάπτυξης της φυσαλίδας. Γι' αυτό και όταν περνάμε τα δεδομένα εικόνας που έχουμε καταγράψει κατά τη διάρκεια της πτήσης στον υπολογιστή, επιλέγουμε εκείνα τα τμήματα στα οποία υπάρχει πείραμα.

Στη συνέχεια, αφού περάσαμε τα δεδομένα της εικόνας για όλα τα πειράματα και των τριών ημερών στον υπολογιστή έπρεπε να «κόψουμε» το βίντεο που έχουμε περάσει στον υπολογιστή μας για κάθε πείραμα-παραβολή, ακριβώς στη χρονική διάρκεια του πειράματος που μας ενδιαφέρει (video editing). Η έναρξη του πειράματος καθορίζεται με την έναρξη του θερμικού παλμού, και το τέλος του με το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής, όπου ο κυβερνήτης του αεροσκάφους φωνάζει “pull up”. Με τη βοήθεια του προγράμματος non-linear video editing, Adobe Premiere 5.5, καταφέραμε και «κόψαμε» το κάθε βίντεο (το οποίο είχε «συλληφθεί» σε μορφή αρχείου .avi, RGB, 25 frames/sec, 720×576) ακριβώς στην χρονική διάρκεια του πειράματος που μας ενδιέφερε.

Ακολούθως, για να μπορέσουμε να επεξεργαστούμε τη κάθε εικόνα του καταγραφόμενου βίντεο ξεχωριστά και να μετρήσουμε το μέγεθος της φυσαλίδας για κάθε frame, έπρεπε να «κόψουμε» το βίντεο σε frames. Αυτό έγινε με τη βοήθεια του Adobe Premiere 5.5. Τα frames που πήραμε ήταν RGB, 720×576, 24-bit) και για να μπορέσουμε να τα επεξεργαστούμε με το MatLab έπρεπε πρώτα να τα μετατρέψουμε σε ασπρόμαυρα (grayscale, 8-bit, indexed. Η μετατροπή αυτή έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Corel Photoshop 9. Επειδή η μετατροπή αυτή έπρεπε να γίνει για όλα τα frames του βίντεο, και εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των frames κάθε βίντεο, γράφτηκε ένα script για το Corel Photoshop, το οποίο φαίνεται στο Παράρτημα Β.1, έτσι ώστε να γίνεται αυτή η διαδικασία αυτόματα για όλα τα frames κάθε βίντεο.

Αφού τελειώσουμε τις παραπάνω διαδικασίες, είμαστε έτοιμοι να υπολογίσουμε το μέγεθος της φυσαλίδας σε κάθε frame. Αυτό επιτεύχθηκε με το πρόγραμμα MatLab. Το MatLab αντιλαμβάνεται τη κάθε εικόνα σαν ένα πίνακα διαστάσεων $m \times n$, όπου m είναι ο αριθμός των pixels της εικόνας στην οριζόντια κατεύθυνση, και n είναι ο αριθμός των pixels της εικόνας στην κάθετη κατεύθυνση. Με αυτό τον τρόπο σε κάθε pixel της εικόνας αντιστοιχείται ένα στοιχείο του πίνακα. Στο στοιχείο αυτό του πίνακα αναγράφεται η τιμή της κλίμακας του γκρι που αντιστοιχεί στο αντίστοιχο pixel της εικόνας. Η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ του 0, που είναι το απόλυτο μαύρο χρώμα, και του 255, που είναι το απόλυτο λευκό. Γι' αυτό και οι εικόνες που επεξεργαζόμαστε με το MatLab, ονομάζονται όπως αναφέρθηκε παραπάνω, grayscale, indexed.

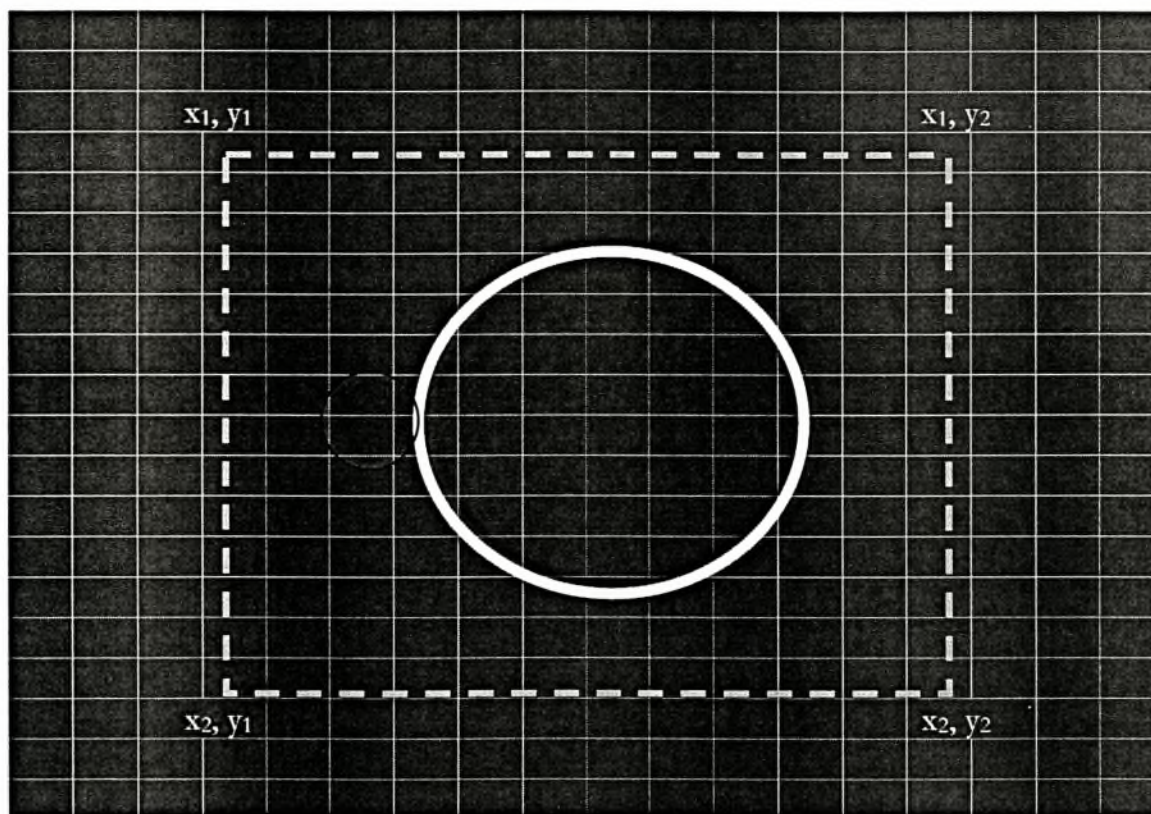
Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τη φιλοσοφία του κώδικα που αναπτύξαμε στο MatLab για τον υπολογισμό του μεγέθους της φυσαλίδας. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται ιδεατά μία φυσαλίδα η οποία βρίσκεται πάνω στον σφαιρικό θερμαντήρα. Το σχήμα αυτό προσομοιάζει την εικόνα του πειράματος που καταγράφεται στην ψηφιακή κάμερα. Ο ημιδιαφανής κύκλος με το λευκό περίγραμμα προσομοιάζει τη φυσαλίδα, ενώ ο μικρότερος κύκλος αντιστοιχεί στο σφαιρικό θερμαντήρα. Το πλέγμα που φαίνεται στο σχήμα με κίτρινο χρώμα μας βοηθάει να κατανοήσουμε πιο εύκολα πως αντιλαμβάνεται το MatLab την εικόνα σαν πίνακα.

Ο κώδικας ξεκινάει καθορίζοντας το σταθερό πρόθεμα του ονόματος κάθε αρχείου προς επεξεργασία. Αυτό δίνεται με τη βοήθεια ενός αρχείου εισόδου (input.txt) στο οποίο

καθορίζεται το πρόθεμα. Για παράδειγμα, αν η πρώτη εικόνα έχει όνομα 010699_20_1 και το τελευταίο 010699_20_1563, στο αρχείο εισόδου αναγράφουμε το πρόθεμα 010699_20_. Στη συνέχεια δίνουμε τον συνολικό αριθμό των εικόνων προς επεξεργασία από το πρόγραμμα.

Για να μειώσουμε τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας της εικόνας από το πρόγραμμα, αλλά και για να μειώσουμε την πιθανότητα λάθους αποτελέσματος όταν επεξεργαζόμαστε όλο το εμβαδόν της εικόνας, εξαιτίας του θορύβου που υπάρχει στην εικόνα¹⁷, επιλέγουμε ένα τμήμα όλης της εικόνας για επεξεργασία με το πρόγραμμα. Το τμήμα αυτό φαίνεται στο Σχ. 4.1 με διακεκομμένη θαλασσί χρώματος. Οι συντεταγμένες του δευτερεύοντος αυτού πίνακα (x_1 , x_2 , y_1 , y_2) δίνονται στο πρόγραμμα για όλη τη σειρά των εικόνων, και υπολογίζονται με τη βοήθεια του προγράμματος Image Tool.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα διαβάζει την πρώτη εικόνα της σειράς των εικόνων προς επεξεργασία, και αποθηκεύει τον πίνακα με τις τιμές του. Αυτό γίνεται γιατί στην πρώτη εικόνα κάθε σειράς απεικονίζεται μόνο ο σφαιρικός θερμαντήρας, τον οποίο στη συνέχεια, όπως θα δούμε, θα τον αφαιρέσουμε από κάθε εικόνα της σειράς.



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση του σφαιρικού θερμαντήρα και της φυσαλίδας σε μία εικόνα.

Στη συνέχεια, ξεκινά η επαναληπτική διαδικασία (βρόγχος) επεξεργασίας κάθε εικόνας - πίνακα όπως τον αντιλαμβάνεται το MatLab – έτσι ώστε να υπολογιστεί η διάμετρος της φυσαλίδας για

¹⁷ Υπάρχουν pixels στο εμβαδόν της εικόνας όπου η τιμή της φωτεινότητας τους είναι αρκετά υψηλή, και τα οποία αποτελούν θόρυβο. Όσο πιο μεγάλο είναι το εμβαδόν της εικόνας προς επεξεργασία, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα για λάθος μέτρησης της διαμέτρου της φυσαλίδας.

κάθε εικόνα. Αρχικά το MatLab διαβάζει την εικόνα, και στη συνέχεια αφαιρεί απ' αυτήν την πρώτη εικόνα που εικονίζεται ο σφαιρικός θερμαντήρας. Η αφαίρεση αυτή δεν γίνεται για όλο το εμβαδόν της εικόνας αλλά για τα όρια του δευτερεύοντος πίνακα (x_1, x_2, y_1, y_2) που έχουν δοθεί προηγουμένως. Τον πίνακα που προκύπτει από την παραπάνω αφαίρεση θα τον ονομάζουμε *πίνακα επεξεργασίας*.

Η αφαίρεση αυτή γίνεται γιατί αφαιρώντας κάθε φορά το σφαιρικό θερμαντήρα από την προς επεξεργασία εικόνα, μένει μόνο η φυσαλίδα της οποίας τη διάμετρο θέλουμε να μετρήσουμε, άρα παίρνουμε καλύτερα αποτελέσματα. Αν δεν το κάναμε αυτό, θα έπρεπε για να αποφύγουμε να συμπεριλαμβανούμε μέσα στη διάμετρο της φυσαλίδας και τη διάμετρο του θερμαντήρα, να αυξήσουμε το όριο φωτεινότητας πάνω από την φωτεινότητα του θερμαντήρα, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα συστηματικό λάθος στη μέτρηση της διαμέτρου της φυσαλίδας (θα τη μετράγαμε πάντα μικρότερη). Τα παραπάνω θα γίνουν καλύτερα κατανοητά στη συνέχεια που θα αναφερθούμε στο όριο (threshold) φωτεινότητας που δίνουμε στο πρόγραμμα.

Η διάμετρος της φυσαλίδας υπολογίζεται ως εξής: σαρώνοντας ως προς την οριζόντια κατεύθυνση τον πίνακα επεξεργασίας, από y_1 έως y_2 , υπολογίζουμε τη μέγιστη τιμή κάθε στήλης του πίνακα, δηλαδή βρίσκουμε το μέγιστο κάθε στήλης. Αν το μέγιστο που υπολογίζουμε είναι μεγαλύτερο από ένα όριο φωτεινότητας (threshold), το οποίο έχουμε επιλέξει, καταχωρείται ο δείκτης θέσης (index) της στήλης σε έναν πίνακα διάνυσμα. Τα pixels που απεικονίζουν το περίγραμμα της φυσαλίδας, αλλά και το εσωτερικό της, είναι πολύ πιο φωτεινά από τα υπόλοιπα της εικόνας, και επομένως οι στήλες οι οποίες εμπεριέχουν έστω και ένα pixel από τη φυσαλίδα καταχωρούνται στον πίνακα διάνυσμα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται για όλες τις στήλες του πίνακα επεξεργασίας, και όταν τελειώσει, η διάμετρος της φυσαλίδας είναι ίση με τη διαφορά του μικρότερου αριθμού του δείκτη θέσης της στήλης που έχει καταχωρηθεί στον πίνακα διάνυσμα, από το μεγαλύτερο αριθμό του δείκτη θέσης της στήλης που υπάρχει σ' αυτόν, συν ένα pixel.

Θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι το όριο φωτεινότητας το θέτουμε έτσι ώστε να εξουδετερώσουμε την επίδραση του θορύβου που υπάρχει σε κάθε εικόνα. Το όριο αυτό υπολογίζεται με τη βοήθεια του προγράμματος Image Tool, με το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη τιμή του θορύβου στο εμβαδόν της εικόνας εκτός της φυσαλίδας και του θερμαντήρα. Αυτή τη τιμή του θορύβου, αυξημένη κατά μερικές μονάδες φωτεινότητας, δίνουμε σαν threshold στο πρόγραμμα.

Με τη βοήθεια του προγράμματος που περιγράψαμε παραπάνω, ο κώδικας του οποίου φαίνεται στο Παράρτημα Β.2.1, μπορούμε να υπολογίσουμε την οριζόντια διάμετρο της φυσαλίδας. Σε συνθήκες μικροβαρύτητας το σχήμα της φυσαλίδας είναι σφαιρικό, και επομένως η οριζόντια διάμετρος της είναι ίση με την κάθετη. Σε συνθήκες επίδρασης της γήινης βαρύτητας ή υπερβαρύτητας κατά τη διάρκεια των παραβολικών πτήσεων (βλέπε Σχ. 1.2.6), το σχήμα της φυσαλίδας που δημιουργείται δεν είναι σφαιρικό αλλά ελλειπτικό, και επομένως η οριζόντια με την κάθετη διάμετρο της φυσαλίδας είναι αρκετά διαφορετικές. Για την περίπτωση αυτή έπρεπε να υπολογίσουμε και την κάθετη διάμετρο της φυσαλίδας. Αυτό έγινε με τη τροποποίηση του προγράμματος που παρουσιάσαμε παραπάνω. Απλούστατα, αντί να υπολογίζουμε τη μέγιστη τιμή κάθε στήλης του πίνακα επεξεργασίας σαρώνοντας ως προς την οριζόντια κατεύθυνση, υπολογίζουμε τη μέγιστη τιμή κάθε γραμμής του πίνακα επεξεργασίας σαρώνοντας ως προς την κάθετη κατεύθυνση, δηλαδή από x_1 έως x_2 . Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε και την κάθετη διάμετρο της φυσαλίδας, μαζί με την οριζόντια, και έτσι αποκτούμε περισσότερη πληροφορία

για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Ο κώδικας υπολογισμού της κάθετης διαμέτρου της φυσαλίδας φαίνεται στο Παράρτημα Β.2.2.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι αν και προσπαθήσαμε να υπολογίσουμε και τη κάθετη διάμετρο της φυσαλίδας για να μπορέσουμε να τη συγκρίνουμε με την οριζόντια, αυτό δεν κατέστη δυνατόν εξαιτίας του φτωχού φωτισμού του πειράματος στο πάνω και κάτω μέρος της φυσαλίδας. Το περίγραμμα δηλαδή της φυσαλίδας που παίρναμε από τις ασπρόμαυρες εικόνες δεν ήταν ποτέ πλήρως κυκλικό, παίρναμε δηλαδή μόνο τα πλευρικά τμήματα της φυσαλίδας. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας, αφού αυτά έγιναν σε συνθήκες μικροβαρύτητας, και επομένως η φυσαλίδα μας είχε κυκλικό περίγραμμα, αλλά ήταν καθοριστικό όταν σε μερικά πειράματα μελετήσαμε την επίδραση της βαρύτητας και της υπερβαρύτητας κατά τη διάρκεια μιας παραβολής σε μία εναπομείναντα φυσαλίδα πάνω στο θερμαντήριο.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή αυτής της ενότητας, για να υπολογίσουμε το ακριβές μήκος της διαμέτρου της φυσαλίδας σε μm , έπρεπε να υπολογίσουμε το λόγο αντιστοιχίας καθενός pixel της εικόνας σε μm . Για να γίνει αυτό όμως έπρεπε να υπάρχει στην ίδια την εικόνα ένα αντικείμενο το μέγεθος του οποίου το γνωρίζαμε για να υπολογίσουμε το λόγο αντιστοιχίας καθενός pixel της εικόνας σε μm . Το αντικείμενο αυτό ήταν ο σφαιρικός θερμαντήρας. Οι διαστάσεις του σφαιρικού θερμαντήρα μετρήθηκαν για όλα τα κελιά. Τα δεδομένα αυτά φαίνονται στο Παράρτημα Ε.1. Η διάσταση του θερμαντήρα που μας ενδιαφέρει είναι αυτή που βλέπει κανείς από το κάτω μέρος του κελιού, η οποία είναι και αυτή που καταγράφεται από την κάμερα. Ξέροντας τη διάσταση αυτή του θερμαντήρα και υπολογίζοντας τα pixels που αντιστοιχούσε αυτή στην εικόνα μέσω του προγράμματος Image Tool, μπορούσαμε εύκολα να υπολογίσουμε τα μm που αντιστοιχούσαν σε κάθε pixel της εικόνας, και άρα τη διάμετρο της σε μm .

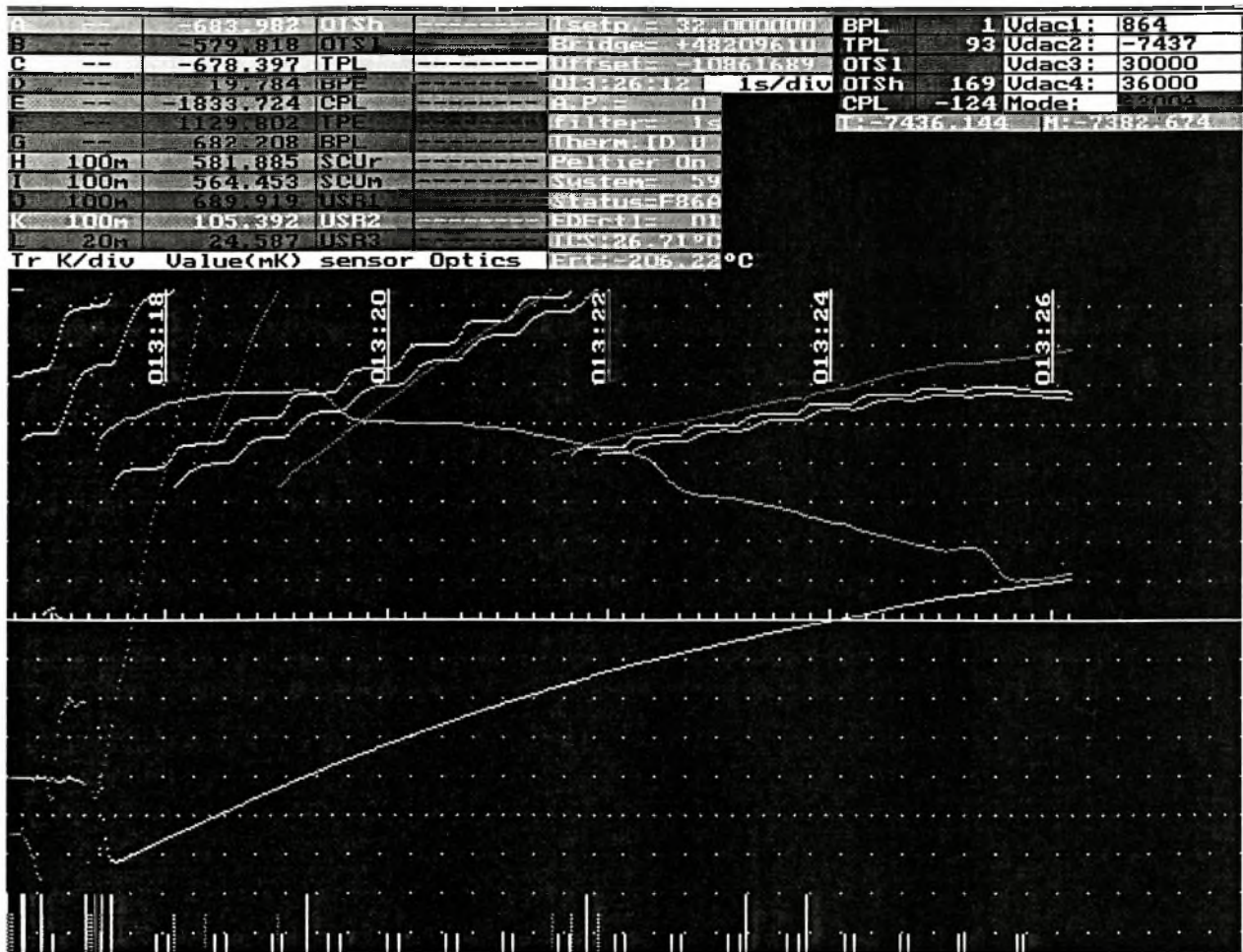
Κλείνοντας την ενότητα αυτή του κεφαλαίου, θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι κατά την ανάλυση των δεδομένων εικόνας δεν καταφέραμε να διαχωρίσουμε το πεπλεγμένο σήμα του βίντεο, αλλά ούτε να πάρουμε και τις τρεις διαφορετικές χρωματικές αποχρώσεις της εικόνας που καταγράψαμε, αφού για να γίνει κάτι τέτοιο χρειαζόταν ειδικευμένο λογισμικό για image processing που δεν υπήρχε στο εργαστήριο μας. Το γεγονός αυτό δεν είναι σημαντικό για την ανάλυση των πειραμάτων μας σε νερό και μείγμα γλυκερίνης-νερού, όπου η ταχύτητα ανάπτυξης της φυσαλίδας είναι μικρή και αρκετά μικρή αντίστοιχα, αλλά είναι καθοριστικό για τη μελέτη των αρχικών σταδίων ανάπτυξης της φυσαλίδας στο επτάνιο όπου η ταχύτητα ανάπτυξης της φυσαλίδας είναι πολύ μεγάλη.

4.2.2 Δεδομένα προγράμματος Snoopry

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1.3, το πρόγραμμα *Snoopry* είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία του θερμοστάτη και των ηλεκτρικών συστημάτων παροχής ισχύος της συσκευής μας, με τη βοήθεια των οποίων δίνουμε τους θερμικούς παλμούς στο διάλυμα υγρού-αερίου που βρίσκεται στο κελί. Το πρόγραμμα *Snoopry* καταγράφει, εκτός από τις θερμοκρασίες, *USR1*, *USR2*, *USR3*, των τριών *thermistors* σε κάθε εναλλάξιμο κελί, που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.6, και άλλες θερμοκρασίες και μεταβλητές ελέγχου της λειτουργίας του θερμοστάτη και των ηλεκτρικών συστημάτων της συσκευής. Οι κυριότερες απ' αυτές είναι οι εξής [25]:

- **Tsetp**: η απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη [°C].
- **SCUr**: θερμοκρασία ελέγχου λειτουργίας του θερμοστάτη, η οποία μετράται στη μονάδα κελιού (SCU).
- **BPL**: θερμοκρασία ελέγχου λειτουργίας του θερμοστάτη, η οποία μετράται στη κάτω πλάκα του θερμοστάτη (BPL=Bottom Plate).
- **TPL**: θερμοκρασία ελέγχου λειτουργίας του θερμοστάτη, η οποία μετράται στη άνω πλάκα του θερμοστάτη (TPL=Top Plate).
- **OTSh**: θερμοκρασία ελέγχου λειτουργίας του θερμοστάτη, η οποία μετράται στο πάνω μέρος της εξωτερικής θερμικής ασπίδας (Outer Thermal Shield=OTS).
- **OTSI**: θερμοκρασία ελέγχου λειτουργίας του θερμοστάτη, η οποία μετράται στο κάτω μέρος της εξωτερικής θερμικής ασπίδας.
- **SCUm**: θερμοκρασία παρακολούθησης της λειτουργίας της μονάδας κελιού (SCU).
- **TPE**: μέτρηση αξονικών κλίσεων της θερμοκρασίας στα άνω Peltier elements.
- **BPE**: μέτρηση αξονικών κλίσεων της θερμοκρασίας στα κάτω Peltier elements.
- **Time**: ο χρόνος.
- **Vdac3**: το μέγεθος του θερμικού παλμού για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα [1 mV].
- **Vdac4**: το μέγεθος του θερμικού παλμού για το πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα [20 μ A].
- **Mode**: το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής. Υπάρχουν δύο είδη:
 - a. **Mode \$2004**: Coarse Mode, χρησιμοποιείται για γρήγορη θέρμανση και ψύξη του θερμοστάτη. Κατά τη διάρκεια αυτού του είδους λειτουργίας του θερμοστάτη, το thermistor BPL είναι ο κύριος sensor ελέγχου της λειτουργίας του θερμοστάτη, και τα thermistors TPE & BPE χρησιμοποιούνται για να παρακολουθούν τις διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της μονάδας κελιού (SCU) και των TPL & BPL και για να εντείνουν τη μείωση αυτών των θερμοκρασιακών διαφορών.
 - b. **Mode \$2005**: Fine Mode, χρησιμοποιείται σε σταθερή λειτουργία του θερμοστάτη για ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας της μονάδας κελιού και των κλίσεων της. Το thermistor SCUr είναι ο κύριος sensor ελέγχου της λειτουργίας του θερμοστάτη.

Η οθόνη λειτουργίας του προγράμματος Spooru φαίνεται στο Σχ. 4.2. Θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι όλες οι θερμοκρασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως μετρούνται σαν διαφορά από την απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη, **Tsetp**, η οποία, όπως είδαμε στην ενότητα 4.1, δίνεται από εμάς κατά την έναρξη λειτουργίας του θερμοστάτη. Στο Σχ. 4.2, η απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη, **Tsetp**, απεικονίζεται από τη λευκή γραμμή στο κέντρο της οθόνης, και οι υπόλοιπες θερμοκρασίες απεικονίζονται γραφικά πάνω ή κάτω από τη **Tsetp**, ανάλογα αν είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' αυτήν, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2 Η οθόνη λειτουργίας του προγράμματος Snoop.

Το πρόγραμμα Snoop αποθηκεύει τις μεταβλητές που καταγράφει σε ένα αρχείο κατάληξης .log, ανά ένα χρονικό διάστημα ίσο με $3600/3450 = 1.043$ sec. Το αρχείο αυτό όμως περιέχει τις τιμές των μεταβλητών σε δυαδική μορφή (binary), η οποία δεν μπορεί να διαβαστεί από ένα πρόγραμμα π.χ. σαν το Microsoft Excel. Γι' αυτό το λόγο χρειάστηκε ν' αναπτύξουμε ένα κώδικα που θα μετέτρεπε το binary αρχείο σε κάποιο άλλο format (Windows ANSI) το οποίο θα μπορούσε να διαβαστεί από το Excel. Το πρόγραμμα μετατροπής γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python, και ο κώδικας φαίνεται στο Παράρτημα Β.3. Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από το πρόγραμμα Snoop, από τη δεύτερη μέρα των πτήσεων, αφού πρώτα έχουν μετατραπεί με τη βοήθεια του κώδικα που αναπτύξαμε σε γλώσσα Python. Θα πρέπει ν' αναφέρουμε ότι ο χρόνος, **Time**, αποθηκεύεται στο αρχείο εξόδου του προγράμματος Snoop με τη μορφή του αριθμού των δευτερολέπτων που έχουν περάσει από τα μεσάνυχτα.

4.2.3 Δεδομένα διαφοράς δυναμικού

Η συσκευή καταγραφής διαφοράς δυναμικού - *Data Logger* χρησιμοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια του πειράματος του σφαιρικού θερμαντήρα. Πρόκειται για καταγραφικό διαφοράς δυναμικού μέσω της οποίας μπορούμε να υπολογίσουμε τη τιμή της τάσης που εφαρμοζόταν

στα άκρα του σφαιρικού θερμαντήρα, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού και επομένως να υπολογίσουμε τη θερμική ισχύ, P_{therm} , που καταναλώνεται στο thermistor και τη θερμοκρασία, T_{therm} , στην επιφάνεια του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Η διαδικασία την οποία ακολουθούμε για να υπολογίσουμε τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο thermistor είναι μία αντίσταση τύπου NTC, η αντίσταση του μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα, όταν χρησιμοποιεί κανείς μία συνήθη πηγή τάσης, τη μείωση της αντίστασης και την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό θα είχε σαν συνέπεια την αστοχία του thermistor μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Για ν' αποφύγουμε την αστοχία του thermistor, είναι συνδεδεμένες σε σειρά με το thermistor άλλες δύο αντιστάσεις. Έτσι, αν η θερμοκρασία του thermistor αυξηθεί, η αντίσταση του μειώνεται, αυξάνεται η ένταση του ηλ. ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις, και επομένως η τάση στα άκρα του thermistor μειώνεται, αφού αυξάνονται αντίστοιχα η τιμή των τάσεων που εφαρμόζονται στα άκρα των δύο άλλων αντιστάσεων. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγουμε την αστοχία του thermistor, και διατηρούμε την ισχύ που δίδεται σ' αυτόν σχετικά σταθερή.

Η ολική διαφορά δυναμικού, V_o , που εφαρμόζεται στα άκρα των τριών αντιστάσεων, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, δεν είναι ίση με την ονομαστική τιμή της τάσης που επιλέγουμε μέσω του προγράμματος *Snopy*, και η οποία εμφανίζεται στην οθόνη του προγράμματος με τη μεταβλητή V_{dac3} . Η τιμή της ολικής τάσης μπορεί να μετρηθεί, και οι τιμές της για τα διάφορα επίπεδα ισχύος φαίνεται στο Παράρτημα Z, μαζί με τη διαδικασία μέτρησης της. Η ολική τάση, V_o , είναι ίση με:

$$V_o = V_s + V_{DL} + V_{therm} \quad (4.1)$$

όπου: V_{therm} , η διαφορά δυναμικού στα άκρα του thermistor,

V_{DL} , η διαφορά δυναμικού που μετράμε με το data logger, και

V_s , η διαφορά δυναμικού της δεύτερης αντίστασης που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με το thermistor.

Από την ένδειξη του Data Logger κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, V_{DL} , μπορούμε να υπολογίσουμε τη τιμή της έντασης, I , ως εξής:

$$I = \frac{V_{DL}}{R_L} \quad (4.2)$$

Οι τιμές των αντιστάσεων οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε σειρά με το thermistor είναι γνωστές (φαίνονται στο Παράρτημα Z), επομένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τη τιμή της διαφοράς δυναμικού V_s , αφού ξέρουμε τη τιμή του ηλ. ρεύματος που τις διαρρέει:

$$V_s = I \cdot R_s \quad (4.3)$$

Η τιμή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του thermistor, V_{therm} , είναι ίση με:

$$V_{therm} = V_s - V_s - V_{DL} \quad (4.4)$$

Άρα, η ισχύς, P_{therm} , που θα καταναλώνεται στο thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού θα είναι:

$$P_{therm} = V_{therm} \cdot I \quad (4.5)$$

Γνωρίζοντας τώρα τη τιμή της V_{therm} από τη σχέση (4.4), μπορούμε να υπολογίσουμε τη τιμή της αντίστασης του thermistor, R_{therm} , η οποία είναι ίση με:

$$R_{therm} = \frac{V_{therm}}{I} \quad (4.6)$$

Από δεδομένα θερμοκρασίας - αντίστασης που έχουμε από το κατασκευαστή των thermistors, και τα οποία φαίνονται στο Παράρτημα Z, μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία, T_{therm} , στην οποία βρίσκεται ο thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Η θερμοκρασία αυτή είναι πολύ σημαντική για τη θεωρητική ανάλυση του φαινομένου που μελετάμε, καθώς η θερμοκρασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οριακή συνθήκη του προβλήματος.

Για να χρησιμοποιήσουμε, τώρα, τα δεδομένα θερμοκρασίας - αντίστασης που δίνονται από το κατασκευαστή, πρέπει να γνωρίζουμε τη τιμή της αντίστασης των thermistors όλων των κελιών στους 25°C, αφού βάση αυτής της τιμής υπολογίζονται ονομαστικά οι αντιστάσεις για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες. Η μέτρηση της τιμής της αντίστασης των thermistors στους 25°C, έγινε στο εργαστήριο μας, και οι τιμές για όλα τα κελιά φαίνονται στο Παράρτημα Z. Από τις τιμές αυτές, και τα στοιχεία που μας δίνει ο κατασκευαστής των θερμοστοιχείων, μπορούμε να υπολογίσουμε τη καμπύλη της εξάρτησης της αντίστασης του κάθε thermistor από τη θερμοκρασία, και απ' αυτή να εξάγουμε με προσαρμογή την εξίσωση $R_{therm} = R_{therm}(T_{therm})$. Γνωρίζοντας τώρα τη τιμή της R_{therm} από τη σχέση 4.6, μπορούμε να υπολογίσουμε τη T_{therm} .

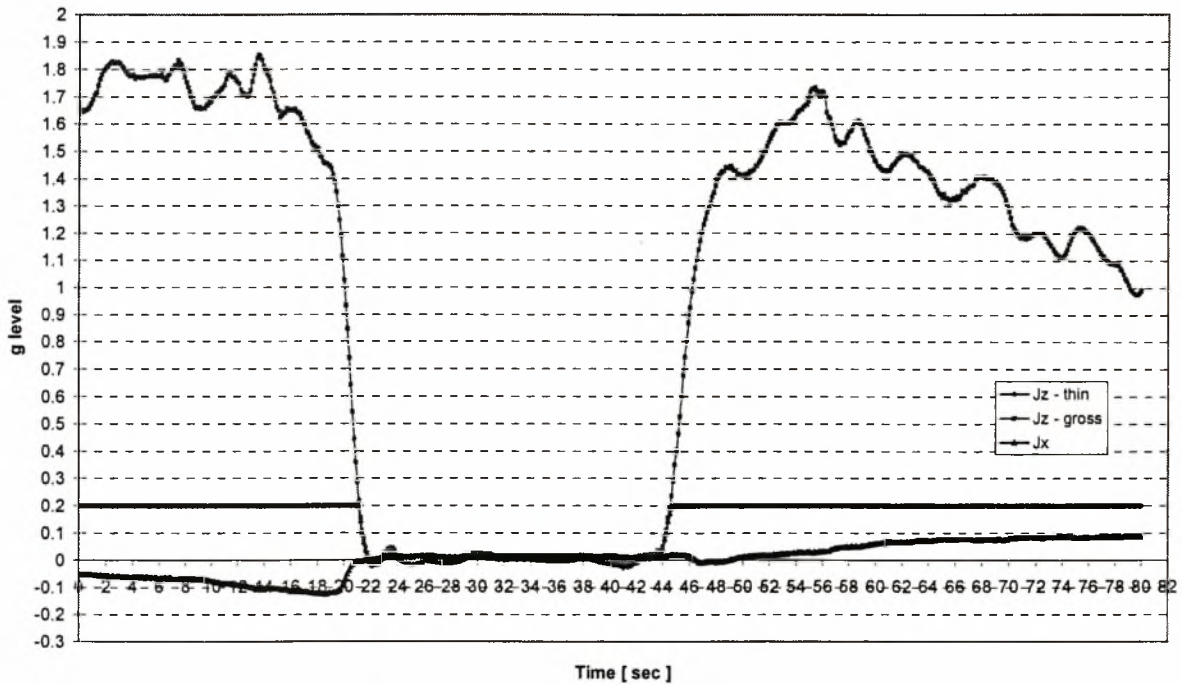
4.2.4 Δεδομένα ποιότητας της βαρύτητας

Τα δεδομένα ποιότητας της βαρύτητας δίνονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency - ESA) για όλες τις παραβολές που γίνονται κατά τη διάρκεια μιας καμπάνιας παραβολικών πτήσεων. Κατά τη διάρκεια της 26^{ης} Καμπάνιας Παραβολικών Πτήσεων της ESA, στην οποία έγιναν τα πειράματά μας, δεν έγινε εφικτή η μέτρηση της γ συνιστώσας της επιτάχυνσης της βαρύτητας, J_y , εξαιτίας κάποιας βλάβης στο όργανο μέτρησης.

Το θετικό είναι ότι η μη-καταγραφή της συνιστώσας αυτής της επιτάχυνσης της βαρύτητας δεν παίζει ρόλο στο ερώτημα αν η ποιότητα της βαρύτητας ήταν αυτή που θέλαμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας, αφού αυτή η συνιστώσα δεν είναι σημαντική.

Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας των παραβολικών πτήσεων. Η συνιστώσα $J_z - gross$ είναι η κύρια συνιστώσα ως προς τη z-κατεύθυνση, η οποία είναι και η κάθετη κατεύθυνση, η οποία μας

ενδιαφέρει περισσότερο. Η συνιστώσα J_z -thin αρχίζει να καταγράφεται όταν η τιμή της J_z -gross πέσει κάτω από 0.2. Η J_x είναι η συνιστώσα της επιτάχυνσης της βαρύτητας ως προς τη x-κατεύθυνση.



Σχήμα 4.3 Η ποιότητα της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της 13ης παραβολής της τρίτης μέρας των παραβολικών πτήσεων.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στις ενότητες 5.2.1, 5.2.2 και 5.2.3, του κεφαλαίου που ακολουθεί στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας για τα τρία χρησιμοποιούμενα υγρά - νερό, επτάνιο, και γλυκερίνη-νερό 80-20% κ.β. - αφού προηγουμένως στην ενότητα 5.1 έχουν παρουσιαστεί οι φυσικές ιδιότητες των τριών χρησιμοποιούμενων υγρών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η προσπάθεια προσαρμογής των αποτελεσμάτων, και κλείνοντας το κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διερεύνηση της εξάρτησης των συντελεστών των εξισώσεων προσαρμογής, από το χρησιμοποιούμενο υγρό, τη θερμική ισχύ και τη θερμοκρασία του *thermistor* κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού.

Στο σημείο αυτό είναι πολύ σημαντικό ν' αναφέρουμε ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της πρώτης μέρας, εξαιτίας παραλείψεως, δεν επιλέχθηκε να σωθεί το αρχείο εξόδου του προγράμματος *Snoopy*, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν για τα πειράματα αυτά δεδομένα των μεταβλητών που καταγράφονται από το πρόγραμμα *Snoopy*. Επίσης, δεν υπάρχουν δεδομένα του *data logger* για όλα τα πειράματα κάθε μέρας των πτήσεων, αφού αυτός μπορούσε να καταγράφει μόνο για την πρώτη ώρα περίπου των πειραμάτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιλογή υψηλής συχνότητας δειγματοληψίας της καταγραφόμενης διαφοράς δυναμικού - χιλιοστό του mV - η οποία είχε σαν αποτέλεσμα να γεμίζει η μνήμη του *data logger* πολύ γρήγορα.

Θα πρέπει να διευκρινίσουμε επίσης ότι τα αποτελέσματα που θα δοθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου αντιστοιχούν περίπου στο ένα τρίτο των συνολικών πειραμάτων που έγιναν κατά τη διάρκεια των τριών ημερών των παραβολικών πτήσεων. Για τα πειράματα που έγιναν κατά τη διάρκεια των υπολοίπων παραβολών δεν μπορέσαμε να εξάγουμε σημαντική πληροφορία είτε γιατί δεν αναπτύχθηκε φυσαλίδα, είτε γιατί υπήρχαν στην εικόνα παραμένουσες φυσαλίδες και δεν μπορούσαμε να μετρήσουμε με ακρίβεια το μέγεθος της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας (γλυκερίνη), είτε γιατί αναπτύσσονταν ταυτόχρονα πολλές φυσαλίδες (επτάνιο). Τα περισσότερα αξιοποιήσιμα δεδομένα προέκυψαν για το νερό και το επτάνιο, ενώ για τη γλυκερίνη αυτά ήταν λιγοστά, αφού στα περισσότερα πειράματα που έγιναν υπήρχαν παραμένουσες φυσαλίδες.

5.1 Φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υγρών

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των υγρών που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας: νερό, μίγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β., και κανονικό επτάνιο. Όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο της εισαγωγής, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτά τα υγρά στα πειράματά μας για να μελετήσουμε την επίδραση του ιξώδους του χρησιμοποιούμενου υγρού στην ανάπτυξη των φυσαλίδων - συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας για το νερό και το μίγμα νερού-γλυκερίνης - και την επίδραση της επιφανειακής τάσης - συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μας για το νερό και το επτάνιο.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι εξής ιδιότητες:

- Μοριακό Βάρος, $M.B.$
- Πυκνότητα, ρ , στους 25°C [kg/m^3]
- Ιξώδες, μ , στους 25°C [cP]
- Επιφανειακή Τάση, σ , στους 25°C [mN/m]
- Διαλυτότητα του CO_2 , S , στο χρησιμοποιούμενο υγρό, στους 25 °C [1000 x mole fraction of CO_2 in liquid phase]
- Σημείο Βρασμού, T_B , [°C]
- Συντελεστής Διάχυσης, D , του CO_2 στο χρησιμοποιούμενο υγρό, στους 25°C [cm^2/s].

Υγρό	Μοριακό ς Τύπος	$M.B.$	ρ [kg/m^3]	μ [cP]	σ [mN/m]	S [$10^3 \times \text{mole}$ fraction]	D [cm^2/s]	T_B [°C]
Νερό (Water)	H_2O	18.016	997.045	0.911	71.99	0.614	1.92E-05	100
καν. Επτάνιο (n-Heptane)	C_7H_{16}	100.204	677.99	0.39	19.65	12.1	6.33E-05	98.4
Γλυκερίνη (Glycerol)	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	92.09	1158.02	749.338	95.16	-	-	290
Γλυκερίνη-Νερό 80-20% κ.β.	-	-	1205.45	-	-	-	-	-

Πίνακας 5.1 Οι φυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων στα πειράματά μας υγρών [2, 3, 26, 27].

Δυστυχώς, όσο και αν ψάξαμε στη βιβλιογραφία, δεν καταφέραμε να εντοπίσουμε τις τιμές των παραπάνω ιδιοτήτων για το δυαδικό μείγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β. - με εξαίρεση τη τιμή της πυκνότητας. Επίσης, δεν καταφέραμε να εντοπίσουμε τιμές της διαλυτότητας και του συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στη γλυκερίνη.

Αν συγκρίνουμε τις τιμές των ιδιοτήτων που φαίνονται στον Πίνακα 5.1 για το νερό και το επτάνιο, συμπεραίνουμε ότι το νερό έχει πάνω από 3.5 φορές μεγαλύτερη επιφανειακή τάση από το επτάνιο, γεγονός για το οποίο επιλέχθηκε να χρησιμοποιήσουμε στα πειράματά μας το

επτάνιο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Μεγάλη σημασία όμως έχει το γεγονός, ότι το επτάνιο έχει σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερη διαλυτότητα, και πάνω από 3 φορές μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης, του διοξειδίου του άνθρακα, από το νερό. Αυτό σημαίνει ότι στο κορεσμένο διάλυμα επτανίου-διοξειδίου του άνθρακα, θα υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, από αυτή που θα υπάρχει στο κορεσμένο διάλυμα νερού-διοξειδίου του άνθρακα. Ενώ από τη τιμή του συντελεστή διάχυσης για τα δύο υγρά, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάχυση διοξειδίου του άνθρακα θα είναι πολύ πιο γρήγορη στην περίπτωση του επτανίου απ' ό,τι στο νερό.

Όσον αφορά το ιξώδες, η διαφορά της τιμής του νερού και του επτανίου με αυτή της καθαρής γλυκερίνης είναι τεράστια, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας καθαρή γλυκερίνη, αλλά τη διαλυμένη με νερό.

Η εκτίμηση μας για τη διαλυτότητα και το συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στο μίγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β., το οποίο χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας, είναι ότι οι τιμές τους είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες απ' αυτές του νερού και ειδικά του επτανίου, και αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας για το μίγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β. που θα φανούν στην ενότητα 5.2.3.

Ο τρόπος με τον οποίο προέκυψαν οι τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 5.1 για το συντελεστή διάχυσης, D , και η εξάρτηση του από τη θερμοκρασία, καθώς και η εξάρτηση της επιφανειακής τάσης, σ , από τη θερμοκρασία, για το νερό, το επτάνιο και τη γλυκερίνη, φαίνονται στο Παράρτημα Η.

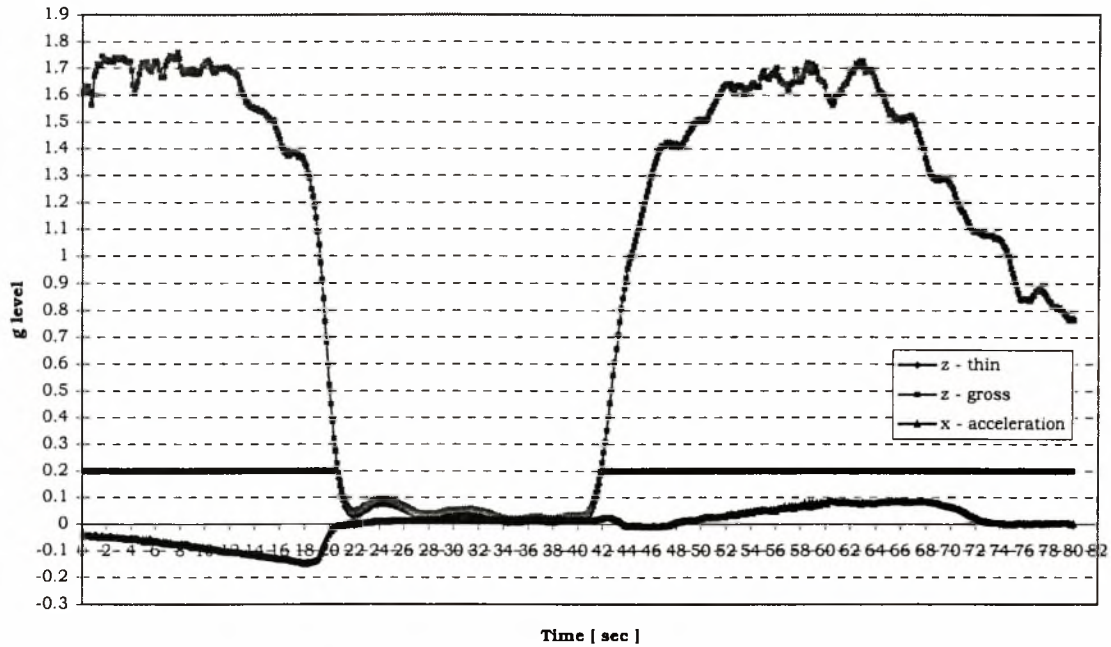
5.2 Αποτελέσματα

5.2.1 Νερό

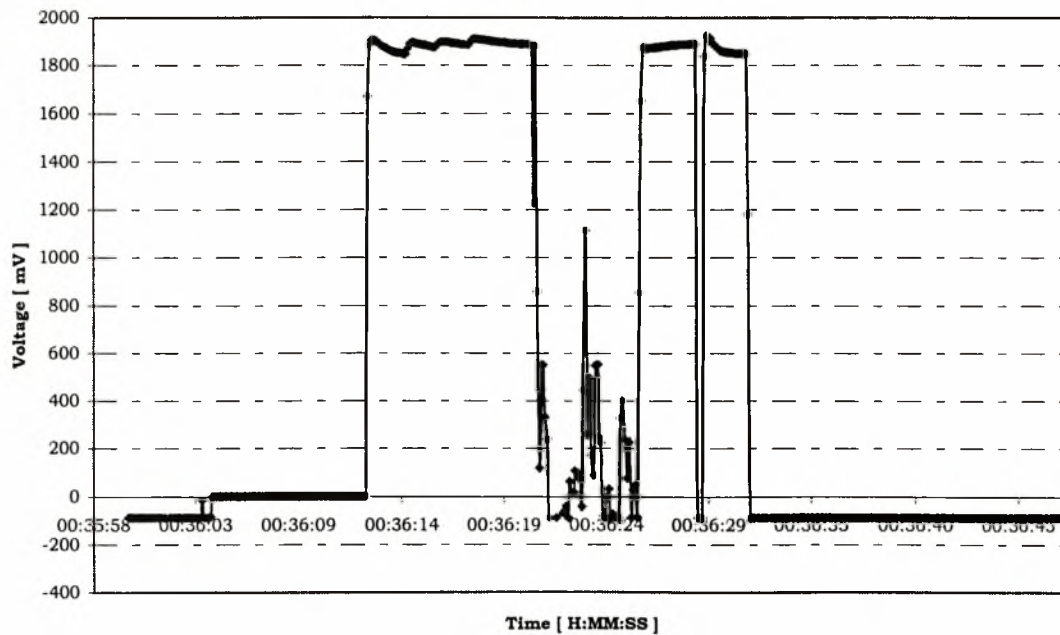
Στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας για το νερό. Αυτά δίνονται με τη χρονική σειρά που έγιναν, και προέρχονται και από τις τρεις μέρες των πειραμάτων. Για κάθε πείραμα - παραβολή, αρχικά δίνονται τα χαρακτηριστικά της στοιχεία (ημερομηνία, αύξων αριθμός παραβολής, και αριθμός κελιού) και στη συνέχεια αναφέρονται το μέγεθος της ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, η χρονική του διάρκεια, η μετρούμενη διαφορά δυναμικού από το data logger, η θερμοκρασία του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, και το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στην πρώτη μέρα των πτήσεων, το πρώτο πείραμα με νερό στο οποίο αναπτύχθηκε φυσαλίδα και μπορέσαμε να εξάγουμε σημαντική πληροφορία, είναι αυτό που έγινε κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής. Στο Σχ. 5.2.1.1 παρουσιάζονται οι τιμές των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής, και στο Σχ. 5.2.1.2, φαίνεται η μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , από το data logger κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Τα χαρακτηριστικά του πειράματος φαίνονται στον πίνακα πριν από το Σχ. 5.2.1.1. Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.1, η ποιότητα της βαρύτητας για τα πρώτα 4 δευτερόλεπτα της παραβολής δεν είναι τόσο καλή, γεγονός όμως που δεν φαίνεται να επηρεάζει το πείραμά μας, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.2.1.3.

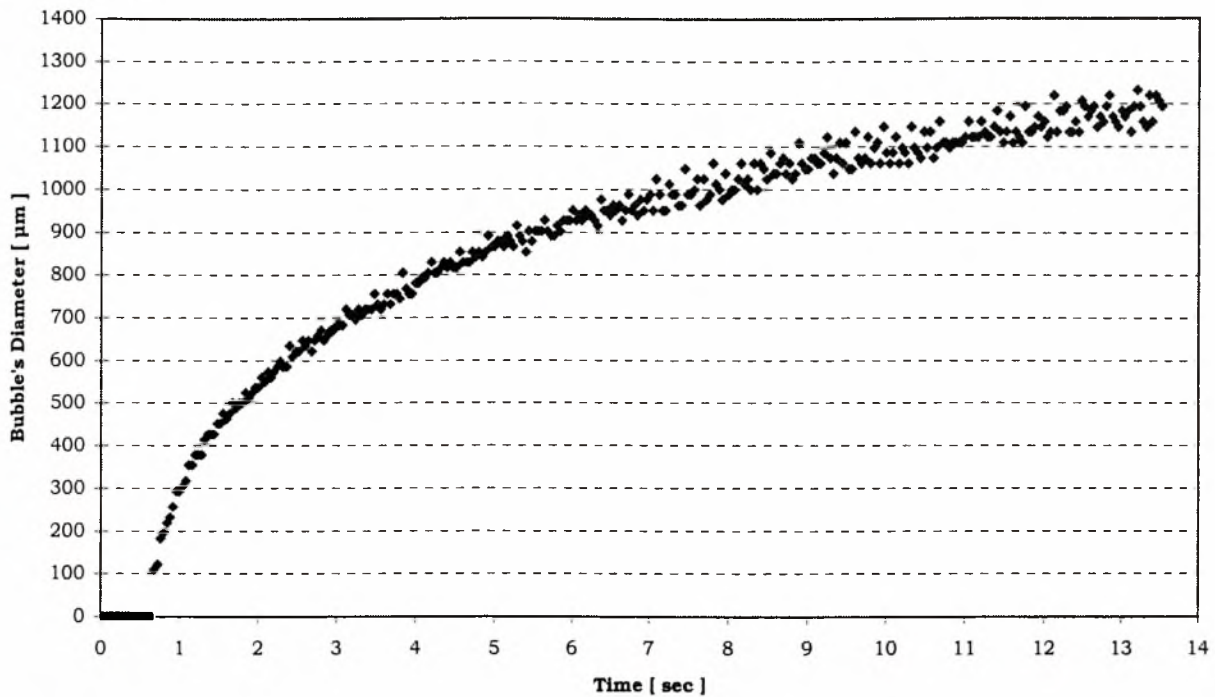
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
01/06/99	6	4	75.5	30	1890	84.8	-



Σχήμα 5.2.1.1 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της πρώτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.2 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , που μετράται από το data logger, κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της πρώτης μέρας.

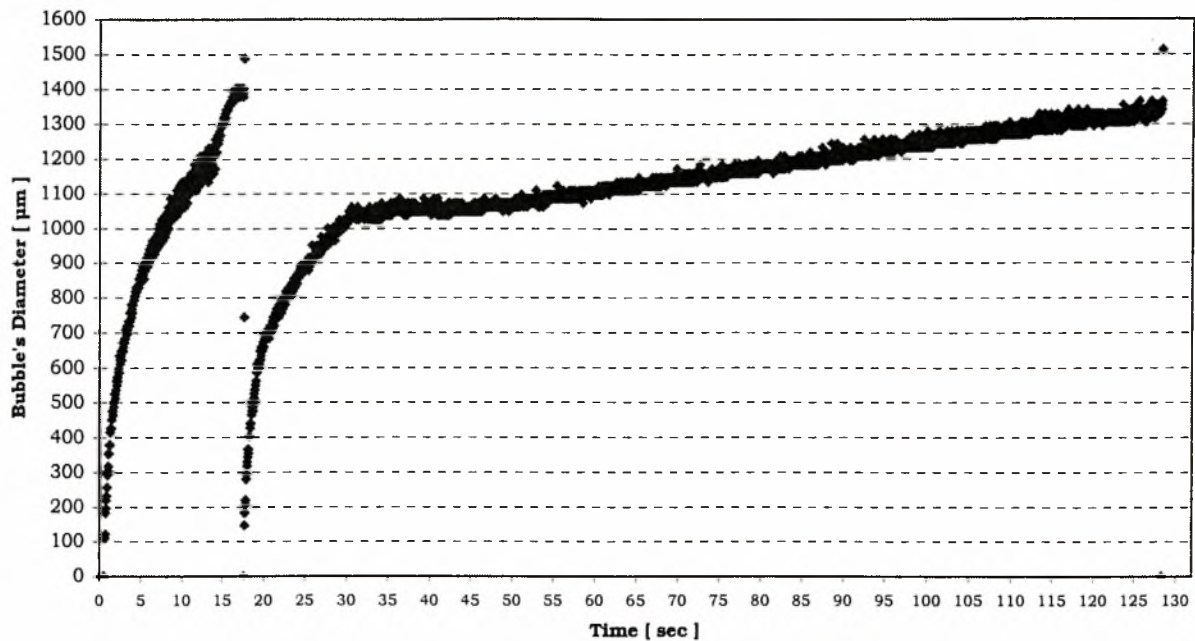


Σχήμα 5.2.1.3 Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας, σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας, κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της πρώτης μέρας.

Στο Σχ. 5.2.1.3 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας, από τη στιγμή που δώσαμε το θερμικό παλμό, μέχρι το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας (στα 13.5 sec περίπου). Το πείραμα αυτό είναι το πρώτο που έγινε στο 4^ο κελί, γι' αυτό παρατηρούμε στο Σχ. 5.2.1.3 ότι υπάρχει μία μικρή χρονική υστέρηση στην ανάπτυξη της φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, η οποία οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι αρχικά - πριν την έναρξη του θερμικού παλμού - η θερμοκρασία του διαλύματος είναι αρκετά μικρότερη από τη θερμοκρασία που έχει γίνει ο κορεσμός. Αυτό όμως δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί γιατί, όπως αναφέραμε, για τα πειράματα που έγιναν την πρώτη μέρα δεν έχουμε δεδομένα από το πρόγραμμα Spooru.

Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.3, είναι αρχικά παραβολική και στη συνέχεια σχεδόν γραμμική με το χρόνο. Το μέγεθος της φυσαλίδας στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας φθάνει στα 1200 μm περίπου.

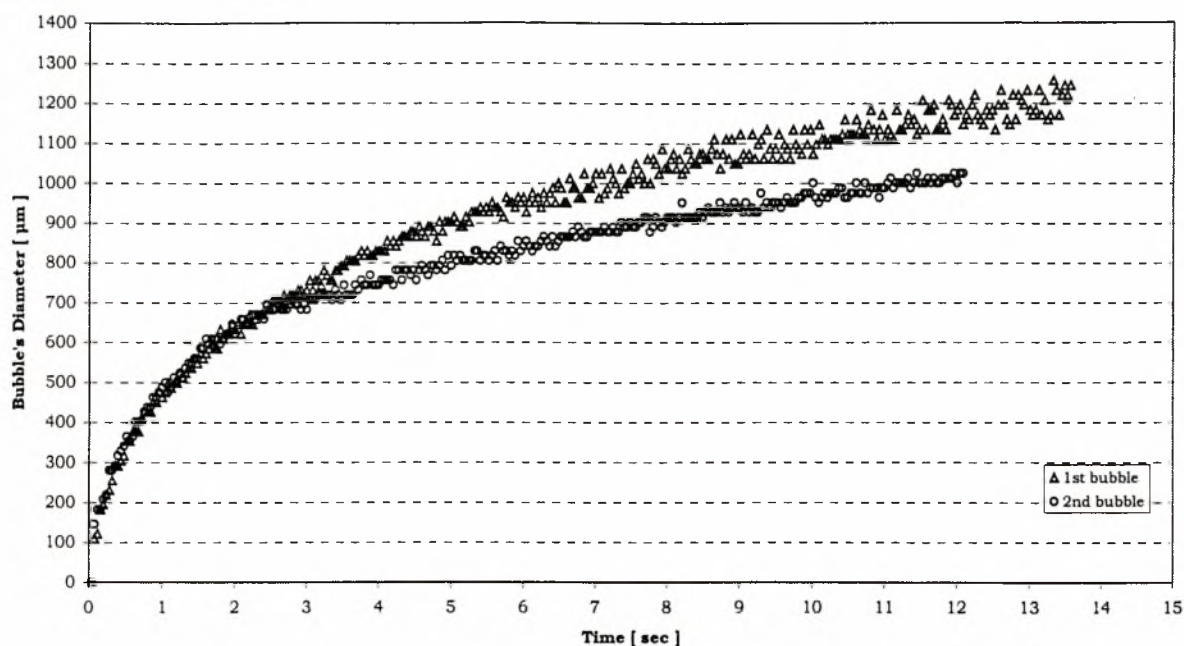
Στο Σχ. 5.2.1.4 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας για το πείραμα της 6ης παραβολής, το οποίο ξεκινά με την έναρξη του θερμικού παλμού, αλλά συνεχίζεται και μετά τις συνθήκες μικροβαρύτητας. Πιο συγκεκριμένα, από την αρχή του θερμικού παλμού ($t = 0$ sec) μέχρι τα 13.5 sec έχουμε συνθήκες μικροβαρύτητας, και η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας του Σχ. 5.2.1.4, μέχρι τη χρονική αυτή στιγμή είναι η ίδια με αυτή του Σχ. 5.2.1.3. Μετά τα 13.5 sec εισερχόμαστε σταδιακά στη περιοχή της υπερβαρύτητας, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.2.1.1 όπου η συνιστώσα z-gross της επιτάχυνσης της βαρύτητας φθάνει σταδιακά τα 1.7g, και η φυσαλίδα που είχε αναπτυχθεί αποκολλάται από το thermistor εξαιτίας της άνωσης.



Σχήμα 5.2.1.4 Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 6^η παραβολή, αλλά και μετά το πέρας των συνθηκών μικροβαρύτητας.

Εξαιτίας του γεγονότος όμως, ότι η διάρκεια του θερμικού παλμού κατά τη διάρκεια του πειράματος μας είναι 30 sec, αναπτύσσεται και δεύτερη φυσαλίδα, η οποία αυξάνεται πολύ γρήγορα μέχρι τα 30 sec, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.4. Η δεύτερη φυσαλίδα παραμένει πάνω στο thermistor για άλλα 100 sec περίπου, στο τέλος των οποίων αποκολλάται εξαιτίας της επίδρασης της άνωσης. Η δεύτερη φυσαλίδα, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.4, αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο μετά το τέλος του θερμικού παλμού, και η διάμετρος της φθάνει από τα 1050 μm που ήταν στο τέλος του θερμικού παλμού, στα 1350 μm, η οποία είναι και η μέγιστη τιμή της διαμέτρου της πριν την αποχώρηση της από το thermistor. Η γραμμική αυτή ανάπτυξη του μεγέθους της φυσαλίδας, φανερώνει το γεγονός της συνέχισης της διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα από τη κυρίως μάζα του υγρού προς το εσωτερικό της φυσαλίδας, ακόμα και μετά το πέρας του θερμικού παλμού.

Στο Σχ. 5.2.1.5 τώρα, γίνεται σύγκριση της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πρώτης φυσαλίδας, η οποία αναπτύχθηκε σε συνθήκες μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής, και της δεύτερης φυσαλίδας που αναπτύχθηκε σε συνθήκες υπερβαρύτητας. Παρατηρούμε ότι ενώ για τα πρώτα 3 sec περίπου οι δύο καμπύλες ταυτίζονται, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της διαμέτρου των δύο φυσαλίδων είναι ο ίδιος, στη συνέχεια η διάμετρος της φυσαλίδας που έχει αναπτυχθεί σε συνθήκες μικροβαρύτητας παίρνει μεγαλύτερες τιμές απ' αυτή που αναπτύσσεται σε συνθήκες υπερβαρύτητας. Αυτό είναι ένα ενδιαφέρον, και κάπως αναπάντεχο αποτέλεσμα, καθώς τα ανωστικά ρεύματα που αναπτύσσονται σε συνθήκες βαρύτητας αυξάνουν το συντελεστή μεταφοράς μάζας, σε σχέση με την απλή διάχυση. Μία πιθανή ερμηνεία αυτού του φαινομένου, η οποία αξίζει να διερευνηθεί συστηματικά, είναι ότι, λόγω των ίδιων ανωστικών ρευμάτων (συναγωγή), μειώνεται η υπερθέρμανση της φυσαλίδας. Αυτό έχει ως συνέπεια την τοπική αύξηση της διαλυτότητας διοξειδίου του άνθρακα, και άρα την μείωση της ωθούσας δύναμης ανάπτυξης της φυσαλίδας.

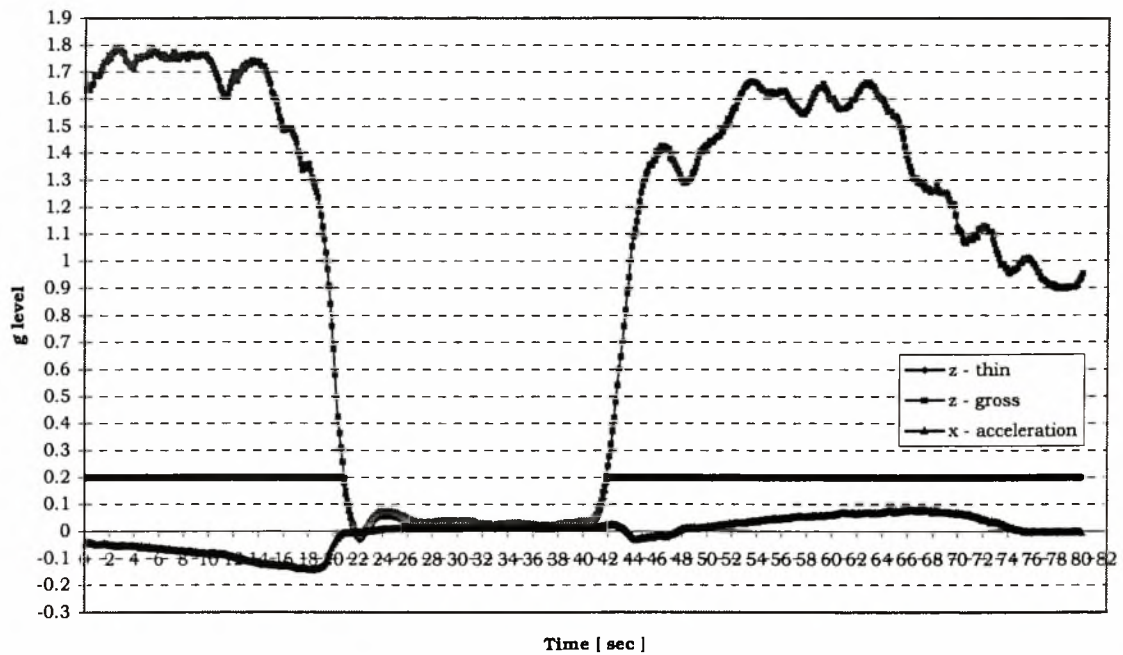


Σχήμα 5.2.1.5 Σύγκριση της μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας, κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της πρώτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας (1st bubble) και σε συνθήκες υπερβαρύτητας (2nd bubble).

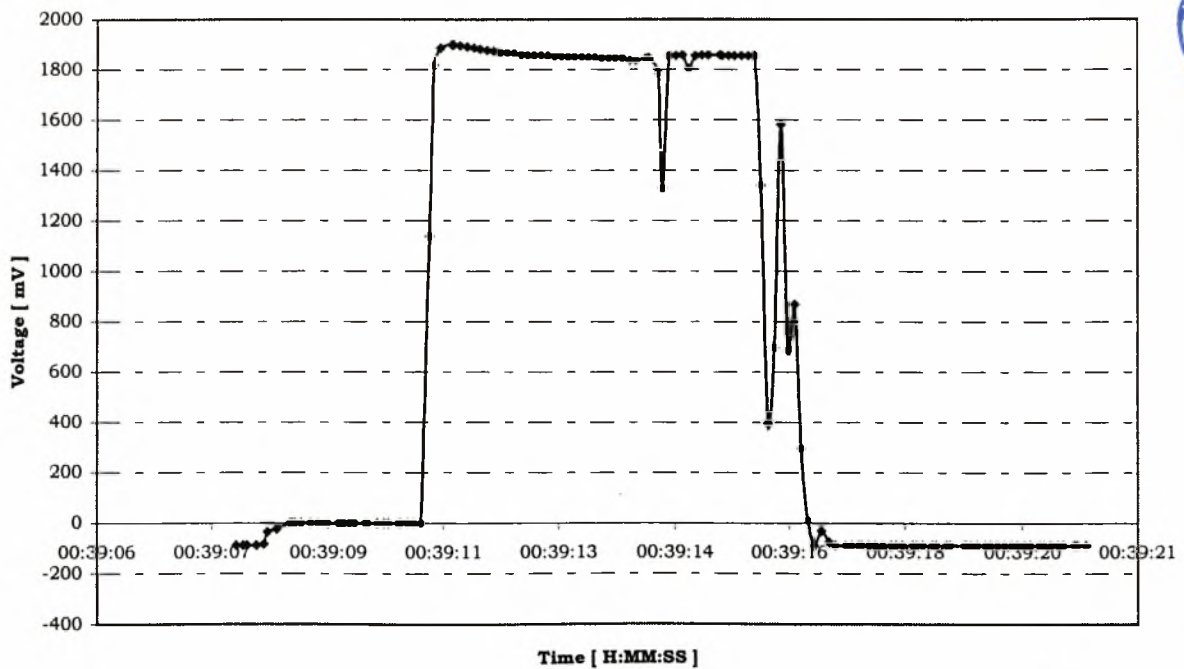
Κατά τη διάρκεια της 7ης παραβολής της πρώτης μέρας το μέγεθος του θερμικού παλμού που δόθηκε ήταν το ίδιο με αυτό κατά τη διάρκεια της 6ης, αλλά η χρονική του διάρκεια ήταν μικρότερη και ίση με 10 sec. Στο Σχ. 5.2.1.6 παρουσιάζονται οι τιμές των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής, και στο Σχ. 5.2.1.7, φαίνεται η μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , από το data logger κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ποιότητα της βαρύτητας είναι καλύτερη απ' ό τι στην προηγούμενη παραβολή, αλλά και πάλι για τα πρώτα 4 δευτερόλεπτα των συνθηκών μικροβαρύτητας παρατηρούνται κάποιες διακυμάνσεις των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Στο Σχ. 5.2.1.8 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας για το πείραμα της παραβολής 7, το οποίο ξεκινά με την έναρξη του θερμικού παλμού, αλλά συνεχίζεται και μετά τις συνθήκες μικροβαρύτητας, όπως την περίπτωση του Σχ. 5.2.1.4 για την 6η παραβολή. Αντίθετα με ότι συνέβη στην προηγούμενη παραβολή, στην 7η παραβολή η ανάπτυξη της φυσαλίδας ξεκινά σχεδόν ταυτόχρονα με την έναρξη του θερμικού παλμού. Η φυσαλίδα αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς, και η καμπύλη που περιγράφει τη μεταβολή της διαμέτρου της είναι αρχικά παραβολική, και στη συνέχεια γίνεται γραμμική, από τα 6 μέχρι τα 10 sec, όπου και σταματά ο θερμικός παλμός. Στο σημείο αυτό η διάμετρος της είναι ίση με 1100 µm περίπου. Στη συνέχεια η διάμετρος της φυσαλίδας, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.2.1.8, παραμένει σταθερή μέχρι το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας, στα 16 sec περίπου. Μετά τα 16 sec, η φυσαλίδα, όπως φαίνεται και στη καμπύλη του Σχ. 5.2.1.8, μεγαλώνει πολύ αργά συναρτήσει του χρόνου, αλλά από την παρατήρηση του βίντεο του πειράματος συμπεραίνουμε ότι αυτή η αύξηση οφείλεται αφενός στη διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα από το κυρίως σώμα του υγρού στο εσωτερικό της φυσαλίδας, αλλά και στη παραμόρφωση της φυσαλίδας από τις δυνάμεις της άνωσης που ασκούνται σ' αυτήν μεταβάλλοντας το σχήμα της.

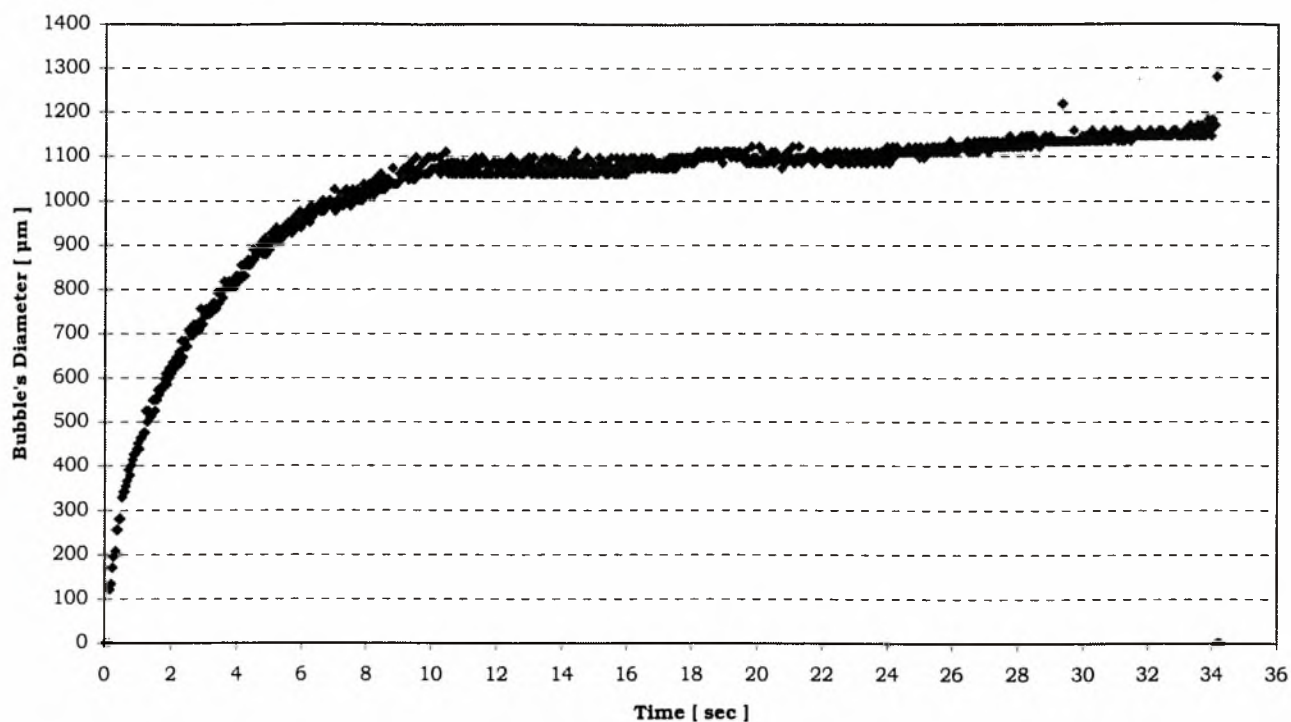
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
01/06/99	7	4	75.7	10	1856	83.5	-



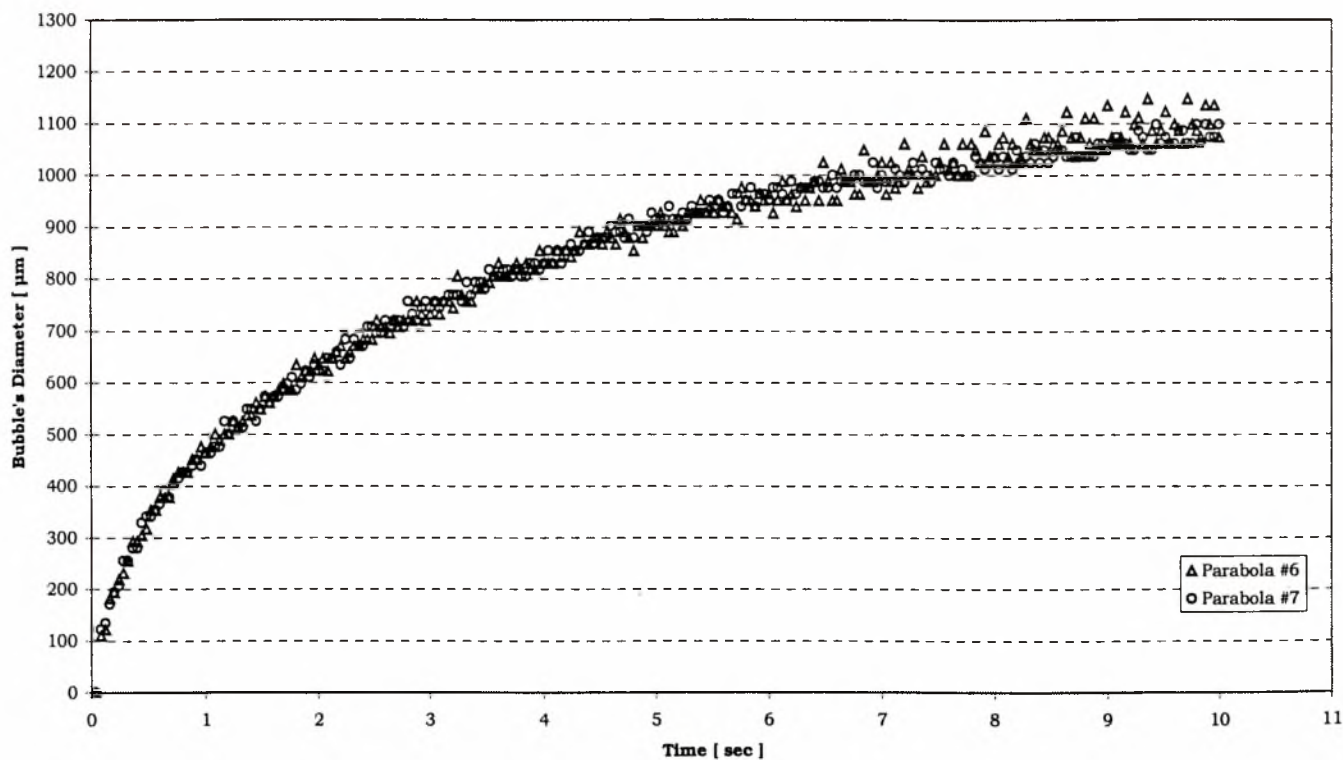
Σχήμα 5.2.1.6 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 7ης παραβολής της πρώτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.7 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , που μετράται από το data logger, κατά τη διάρκεια της 7ης παραβολής της πρώτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.8 Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 6^η παραβολή, αλλά και μετά το πέρας των συνθηκών μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.1.9 Σύγκρισή μεταξύ της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια της 6^{ης} και 7^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας.

Στο Σχ. 5.2.1.9 εξετάζουμε την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των πειραμάτων μας για τις παραβολές 6 και 7, όπου δίνεται η ίδια τιμή θερμικής ισχύος, για τα πρώτα 10 sec ανάπτυξης της φυσαλίδας, αφού για την 7^η παραβολή αυτή είναι και η διάρκεια του θερμικού παλμού. Τα αποτελέσματα είναι άκρως ικανοποιητικά, και υπάρχει σχεδόν ταύτιση των δύο καμπύλων.

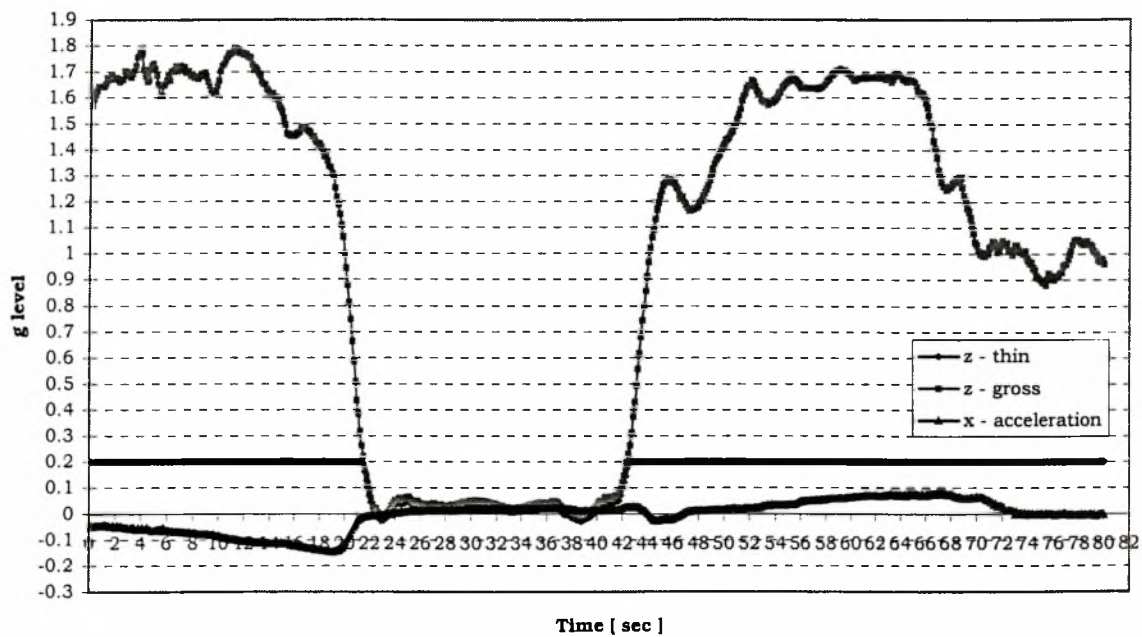
Για την 8^η παραβολή, το μέγεθος της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού ήταν 51.3 mW, και η χρονική του διάρκεια ήταν 30 sec. Και αυτό το πείραμα έγινε στο 4^ο κελί, όπως και τα δύο προηγούμενα. Στο Σχ. 5.2.1.10 παρουσιάζονται οι τιμές των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής, και στο Σχ. 5.2.1.11, φαίνεται η μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στο Σχ. 5.2.1.12.α απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος. Όπως και στην περίπτωση του πειράματος που έγινε κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής, με την έναρξη του θερμικού παλμού αναπτύσσεται μία φυσαλίδα η οποία παραμένει στο thermistor και μετά το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας (15 sec). Στη συνέχεια, εξαιτίας της άνωσης, η φυσαλίδα αποκολλάται από το thermistor (23 sec), αλλά επειδή ο θερμικός παλμός δεν έχει τελειώσει αναπτύσσεται και δεύτερη φυσαλίδα, η οποία μεγαλώνει αρκετά γρήγορα και η διάμετρος της φθάνει στα 900 μm περίπου στο τέλος του θερμικού παλμού (30 sec). Από το τέλος του θερμικού παλμού και μετά, μέχρι τα 63 sec περίπου που μελετήσαμε την ανάπτυξη της φυσαλίδας, παρατηρούμε ότι το μέγεθος της φυσαλίδας αυξάνεται πολύ αργά με το χρόνο και φθάνει τα 1000 μm στα 63 sec. Η αύξηση αυτή του μεγέθους της φυσαλίδας, και μετά το πέρας του θερμικού παλμού, οφείλεται στη συνέχιση της διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα από τη κυρίως μάζα του υγρού προς το εσωτερικό της φυσαλίδας.

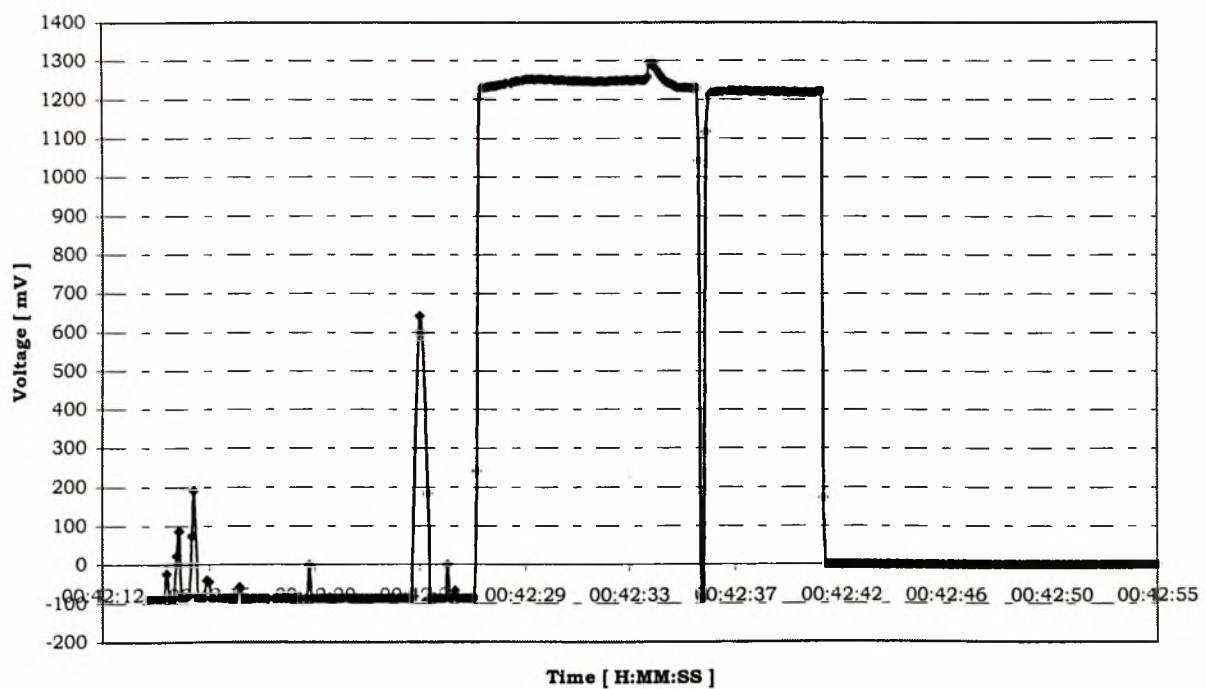
Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.12.α, για τη χρονική περίοδο που υπάρχουν συνθήκες μικροβαρύτητας (0-15 sec), είναι αρχικά παραβολική (0-8 sec) και στη συνέχεια σχεδόν γραμμική με το χρόνο (9-15 sec). Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και για τη δεύτερη φυσαλίδα που αναπτύσσεται σε συνθήκες υπερβαρύτητας.

Στο Σχ. 5.2.1.12.β τώρα, γίνεται σύγκριση της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πρώτης φυσαλίδας, η οποία αναπτύχθηκε σε συνθήκες μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής, και της δεύτερης φυσαλίδας που αναπτύχθηκε σε συνθήκες υπερβαρύτητας, όπως ακριβώς έγινε και με το πείραμα της 6^{ης} παραβολής. Και για τις δύο φυσαλίδες, εξετάζεται η μεταβολή της διαμέτρου τους κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Παρατηρούμε, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την 6^η παραβολή, ότι ενώ για το πρώτο sec περίπου οι δύο καμπύλες ταυτίζονται, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της διαμέτρου των δύο φυσαλίδων είναι ο ίδιος, στη συνέχεια η διάμετρος της φυσαλίδας που έχει αναπτυχθεί σε συνθήκες υπερβαρύτητας παίρνει μεγαλύτερες τιμές απ' αυτή που αναπτύσσεται σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Η μοναδική παράμετρος που είναι διαφορετική για τα δύο πειράματα είναι το μέγεθος της θερμικής ισχύος: για το μεν πείραμα της 6^{ης} παραβολής ήταν 75.5 mW, ενώ γι' αυτό της 8^{ης}, ήταν 51.3 mW.

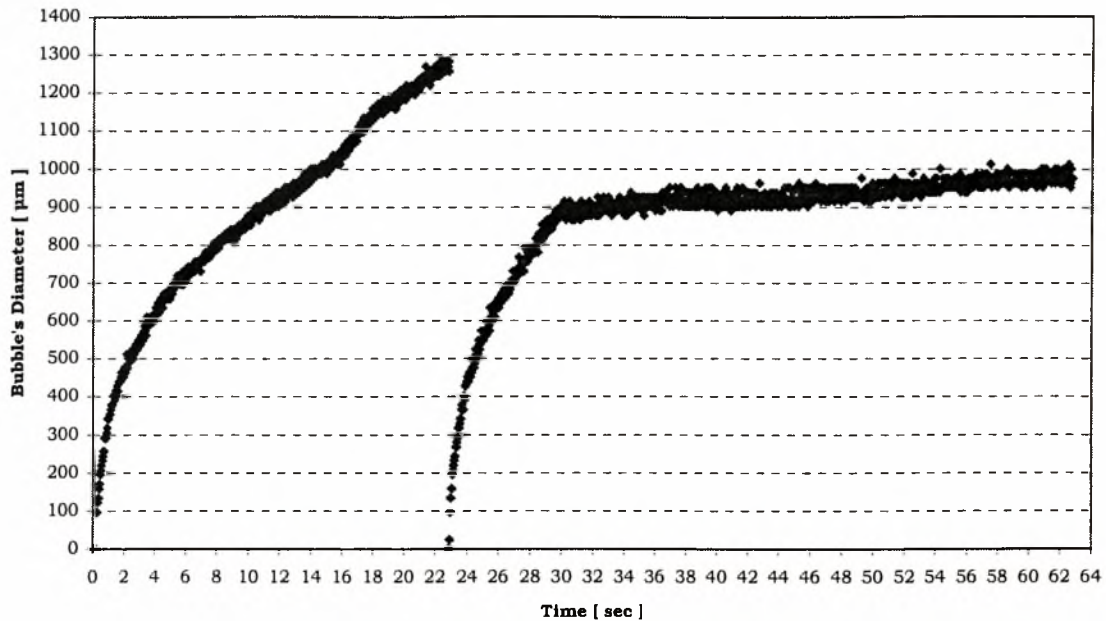
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
01/06/99	8	4	51.3	30	1248	70.0	-



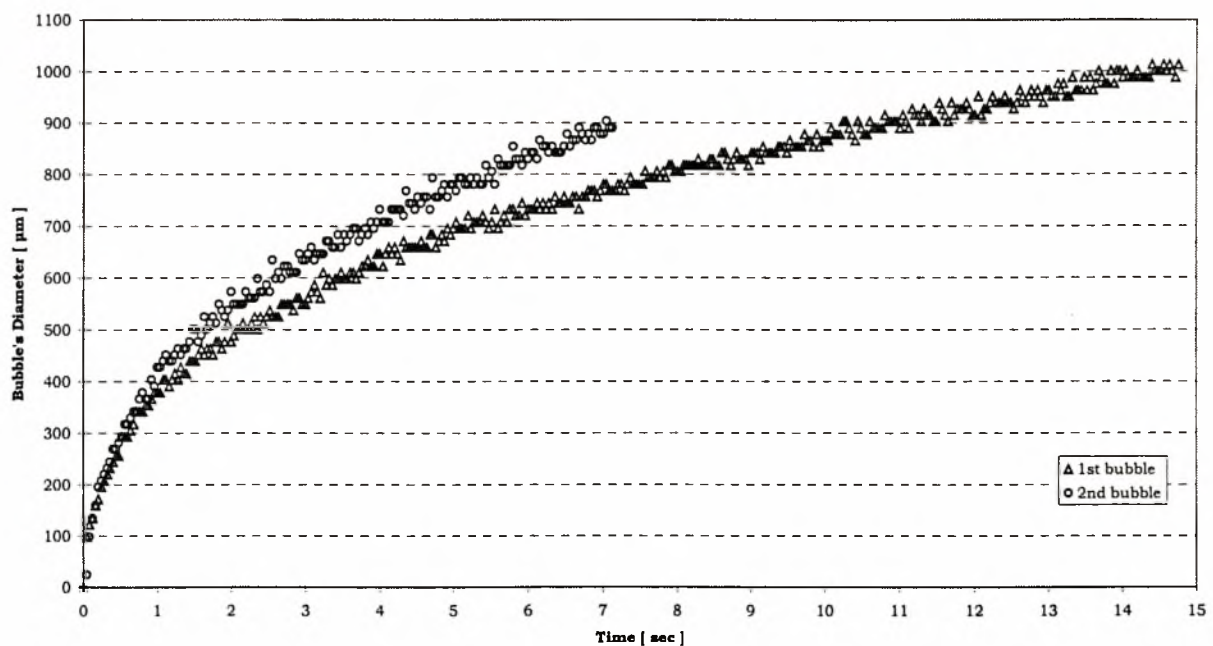
Σχήμα 5.2.1.10 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της πρώτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.11 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της πρώτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.12.α Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 8^η παραβολή της πρώτης μέρας, αλλά και μετά το πέρας των συνθηκών μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.1.12.β Σύγκριση των καμπυλών μεταβολής της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων, κατά τη διάρκεια της 8^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας (1st bubble) και σε συνθήκες υπερβαρύτητας (2nd bubble).

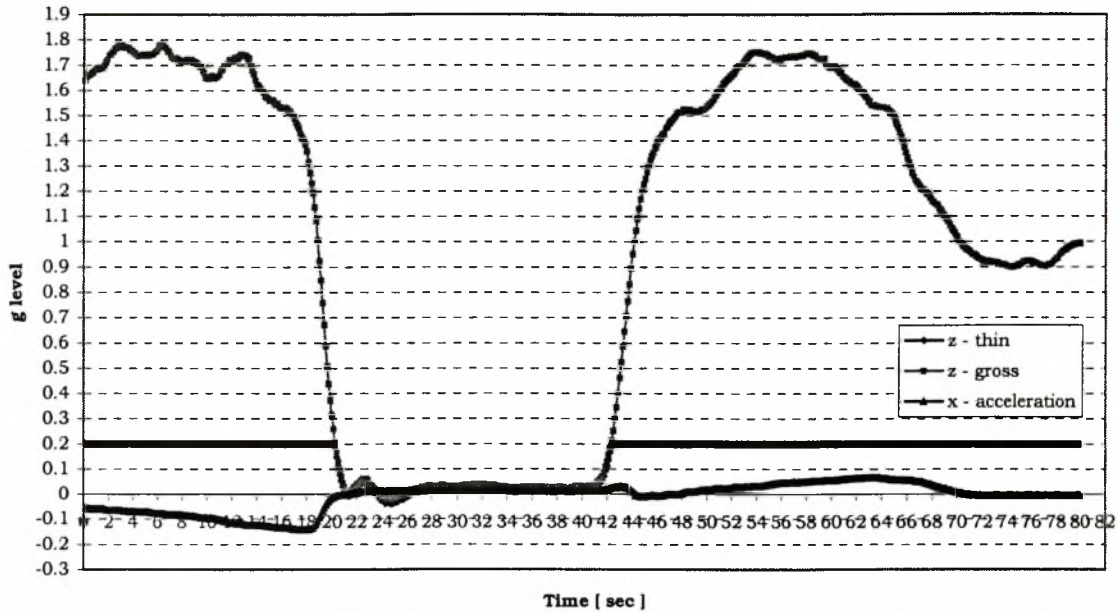
Τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να ικανοποιούν τη θεωρία ότι τα ανωστικά ρεύματα που αναπτύσσονται σε συνθήκες βαρύτητας αυξάνουν το συντελεστή μεταφοράς μάζας, σε σχέση με την απλή διάχυση, και γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε μεγαλύτερα μεγέθη φυσαλίδας σε συνθήκες υπερβαρύτητας. Η επίδραση της συναγωγής φαίνεται να μην είναι τόσο ισχυρή, όπως υποθέσαμε για το πείραμα της 6^{ης} παραβολής. Γεγονός είναι πάντως, ότι δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, αφού τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων είναι αντικρουόμενα. Η πιο εμπειριστατωμένη έρευνα του φαινομένου, σίγουρα θα βοηθήσει προς την κατεύθυνση της εξαγωγής αξιόπιστων αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια περνάμε στα αποτελέσματα των πειραμάτων για νερό που έγιναν κατά τη διάρκεια της δεύτερης μέρας των πτήσεων, με πρώτο αυτό της 2^{ης} παραβολής. Το πείραμα διεξήχθη στο 3^ο κελί, και το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής ήταν \$2004, δηλαδή coarse mode. Στο Σχ. 5.2.1.13 παρουσιάζονται οι τιμές των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής, και στο Σχ. 5.2.1.14, φαίνεται η μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ποιότητα της βαρύτητας είναι αρκετά καλή κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ παρατηρούμε ότι η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού V_{DL} , από το data logger δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, αλλά υπάρχουν δύο πλατό στη τιμή της τάσης που μετράμε, ένα στα 2345 mV περίπου, κατά την έναρξη του θερμικού παλμού, και το δεύτερο στα 2021 mV περίπου, στο τέλος του θερμικού παλμού. Οι ενδιάμεσες τιμές που παίρνει η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο πλατό, είναι θόρυβος και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν.

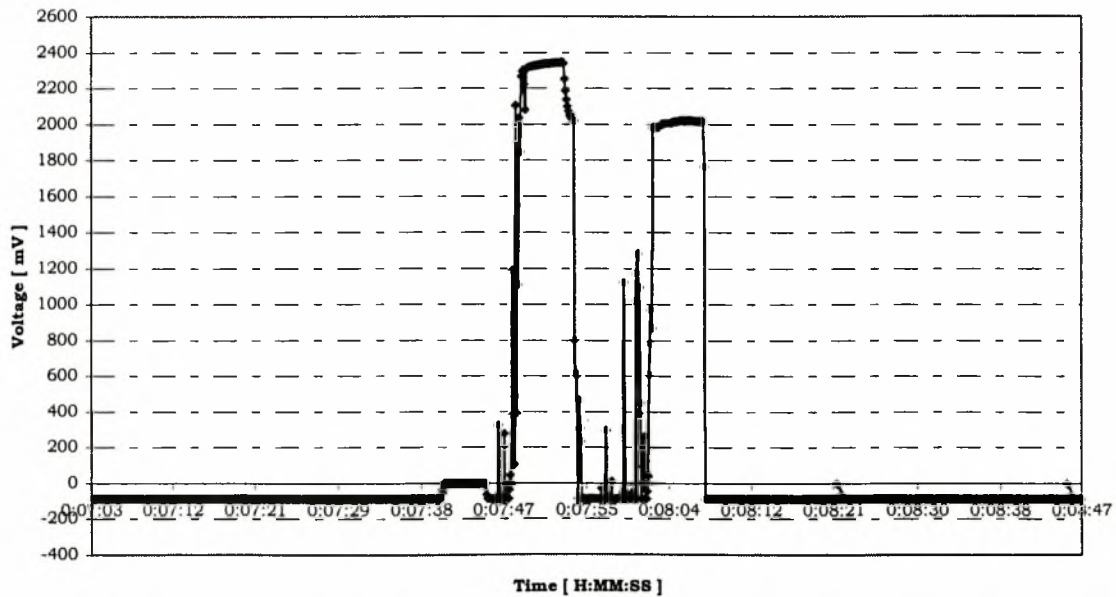
Οι τιμές της θερμικής ισχύος που υπολογίσαμε για τα δύο παραπάνω επίπεδα καταγραφόμενης τάσης από το data logger, είναι 67.9 mW για τα 2345 mV, και 74.4 mW για τα 2021 mV. Όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία του πειράματος φαίνονται στον πίνακα πριν από το Σχ. 5.2.1.13.

Στο Σχ. 5.2.1.15, απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας της 2^{ης} παραβολής, της δεύτερης μέρας των πτήσεων. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία χρονική υστέρηση στο σχηματισμό της φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, ίση με 7.12 sec. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του διαλύματος νερού-διοξειδίου του άνθρακα είναι αρκετά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στην οποία έχει γίνει ο κορεσμός του διαλύματος (33.0°C), με αποτέλεσμα να χρειαστούν μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να φθάσει η θερμοκρασία του διαλύματος τη θερμοκρασία κορεσμού, και να σχηματιστεί η φυσαλίδα.

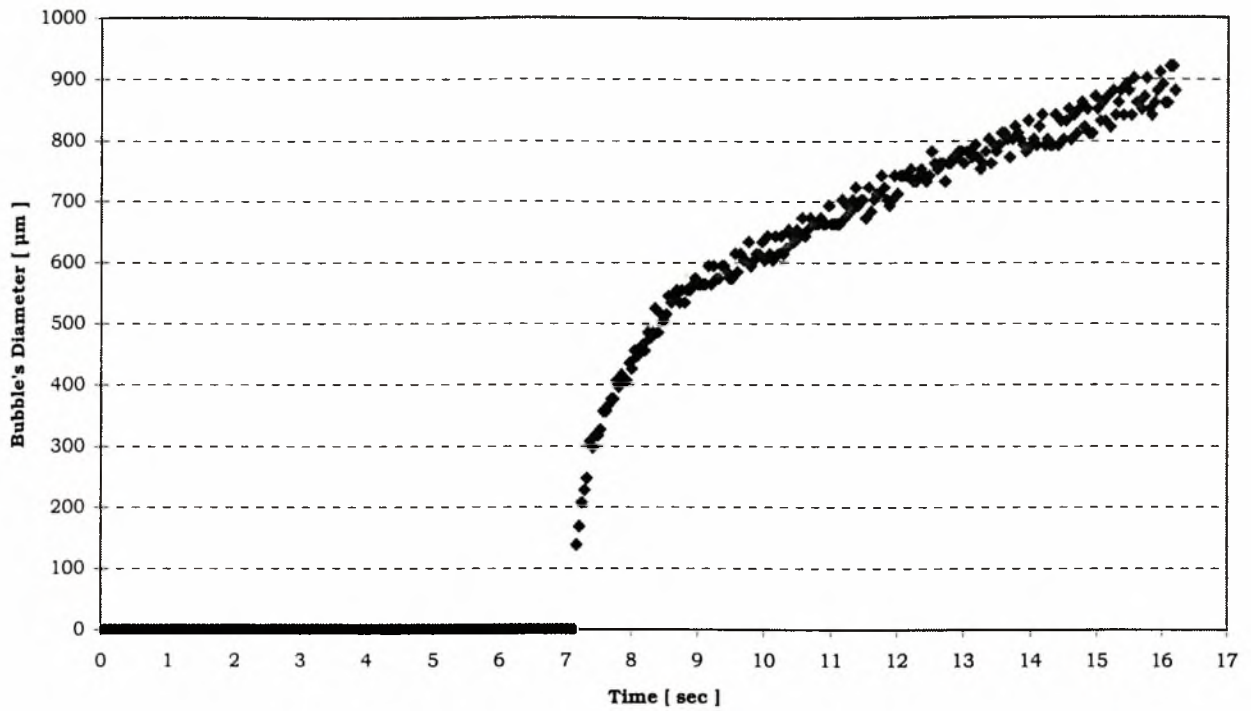
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
02/06/99	2	3	67.9~74.4	30	2345 ~ 2021	104.7 ~ 90	\$2004



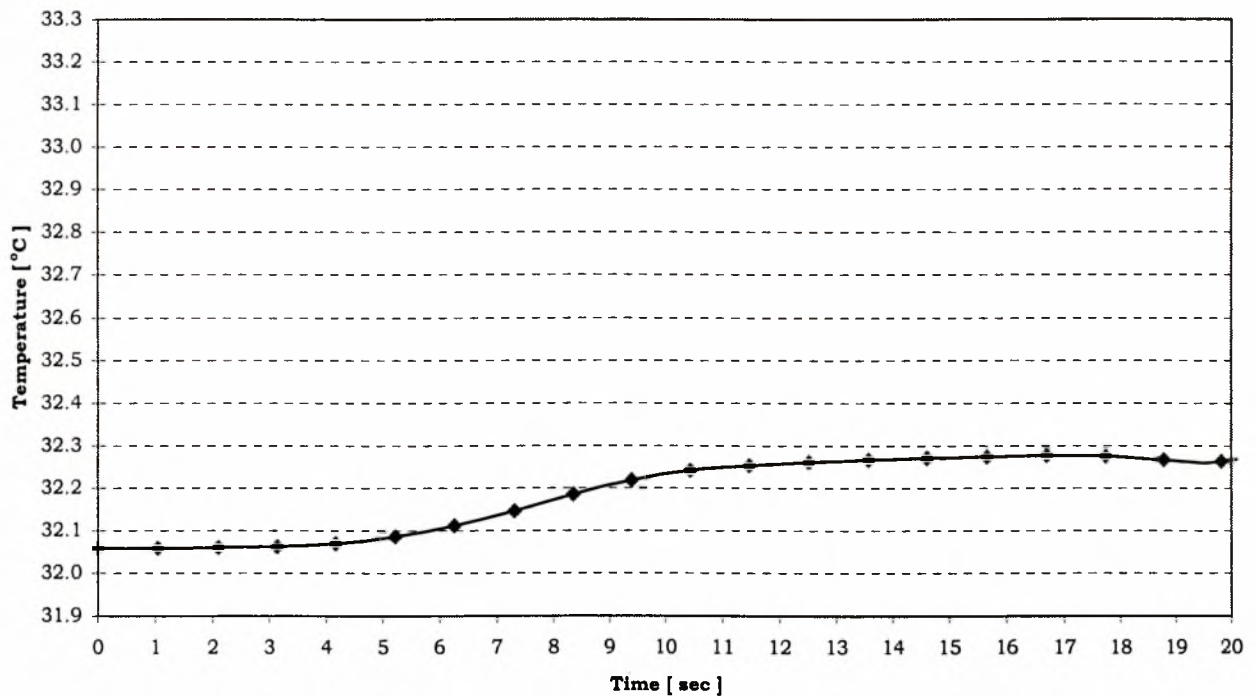
Σχήμα 5.2.1.13 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 2^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.14 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια της 2^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.15 Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας σε συνθήκες μικροβαρύτητας, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.16 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας, για την 2^η παραβολή της δεύτερης μέρας.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος του νερού με το διοξείδιο του άνθρακα, μετά τα 7 sec, φαίνεται και στο Σχ. 5.2.1.16, όπου απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας, στο thermistor μέτρησης USR2, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 2.5 mm περίπου απέναντι από το σφαιρικό θερμαντήρα (Σχ. 3.11.β). Η μετρούμενη μεταβολή της θερμοκρασίας δεν είναι μεγαλύτερη από 0.2 °C, αλλά αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ του σφαιρικού θερμαντήρα και του thermistor μέτρησης είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να μετράμε τις μεταβολές της θερμοκρασίας του διαλύματος πολύ κοντά στην περιοχή ανάπτυξης της φυσαλίδας. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που θα φανεί και στα υπόλοιπα αποτελέσματα μας, όπου βέβαια έχουμε δεδομένα από το πρόγραμμα SnoopY.

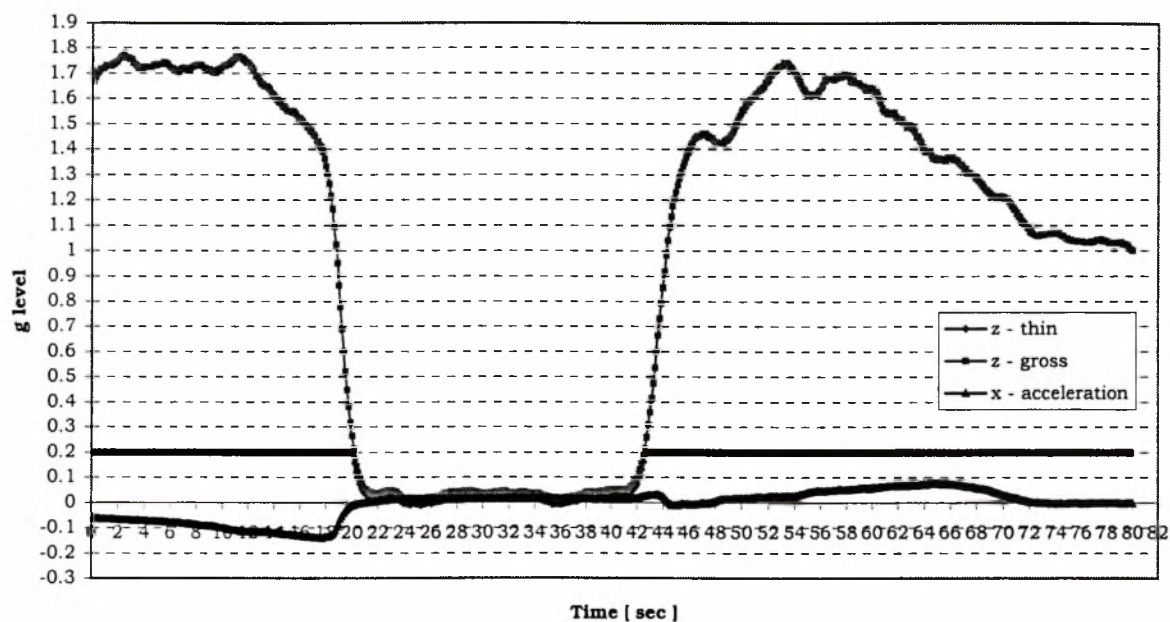
Στο Σχ. 5.2.1.15, παρατηρούμε ότι η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας είναι, όπως είδαμε και στα αποτελέσματα των πειραμάτων που προηγήθηκαν, στην αρχή παραβολική (από 7.12 – 8.84 sec) όπου και φθάνει στα 550 μm περίπου, και στη συνέχεια μέχρι το τέλος της είναι γραμμική, και φθάνει τα 900 μm περίπου.

Το επόμενο πείραμα για νερό κατά τη διάρκεια της δεύτερης μέρας των πτήσεων έγινε στη 3^η παραβολή. Το κελί στο οποίο διεξήχθη ήταν το 3^ο, και το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής ήταν \$2004, δηλαδή coarse mode. Στο Σχ. 5.2.1.17 παρουσιάζονται οι τιμές των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής, και στο Σχ. 5.2.1.18, φαίνεται η μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ποιότητα της βαρύτητας ήταν πολύ καλή κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ παρατηρούμε ότι η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού V_{DL} , από το data logger δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, αλλά φθάνει σε ένα μέγιστο στα 2246.6 mV, και στη συνέχεια μεταβάλλεται συνεχώς παίρνοντας πολύ μικρότερες τιμές.

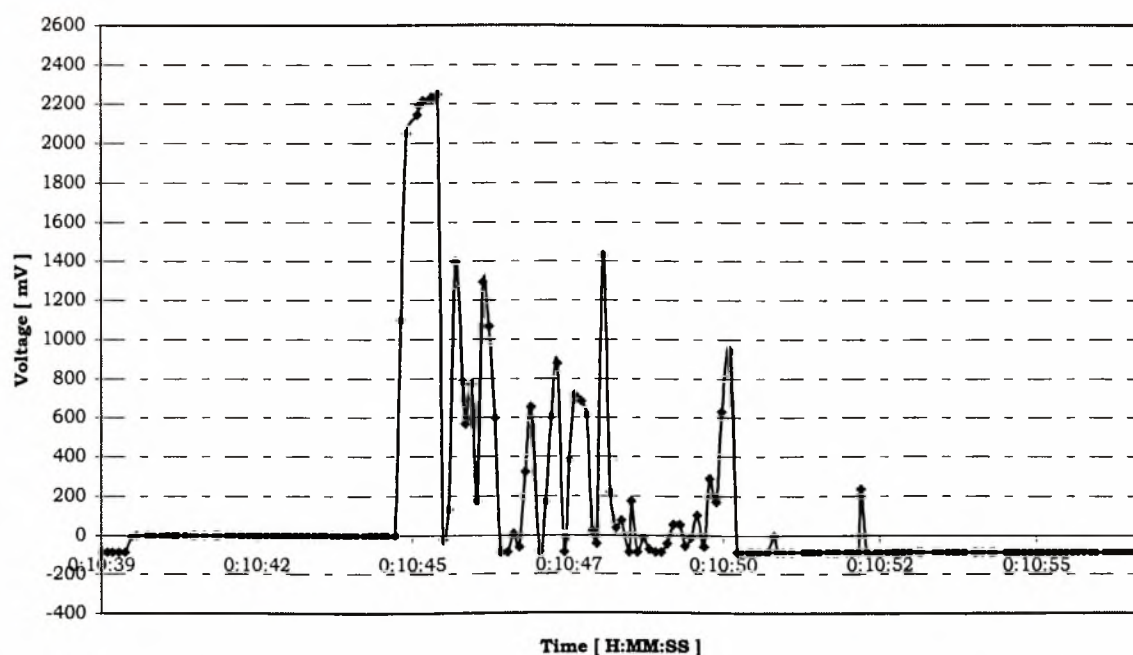
Δυστυχώς είναι πολύ δύσκολο να συμπεράνει κανείς ποια ήταν η ακριβής μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , από το data logger κατά τη διάρκεια του πειράματος, παίρνοντας υπ' όψιν του μόνο τη μεταβολή της όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 5.2.1.18. Ευτυχώς, στο βίντεο του πειράματος, στο οποίο καταγράφονται και οι φωνές των ερευνητών, αναφέρεται ότι η τάση V_{DL} , η οποία μετριόταν και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων από ένα βολτόμετρο έτσι ώστε οι ερευνητές να γνωρίζουν τη τιμή της, κυμαίνεται περίπου στα 1.7 Volts. Ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού έγινε για τη τιμή των 1.7 Volts, και η τιμή που υπολογίστηκε για την ισχύ ήταν 75.7 mW, και για τη θερμοκρασία του thermistor ήταν περίπου 77.0°C. Όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία του πειράματος φαίνονται στον πίνακα πριν από το Σχ. 5.2.1.17.

Στο Σχ. 5.2.1.19, απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας της 3^{ης} παραβολής. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία χρονική υστέρηση στο σχηματισμό της φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, ίση με 0.5 sec περίπου, η οποία είναι πολύ μικρότερη απ' αυτή που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της προηγούμενης παραβολής.

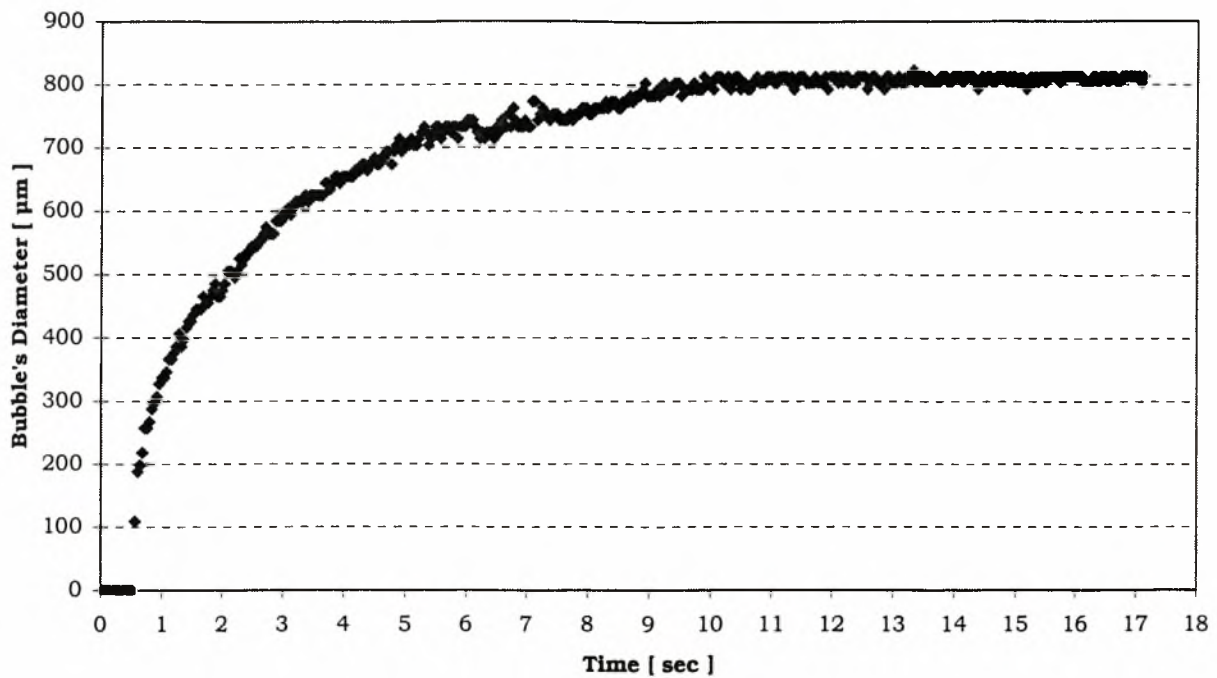
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
02/06/99	3	3	75.7	10	1700	77.0	\$2004



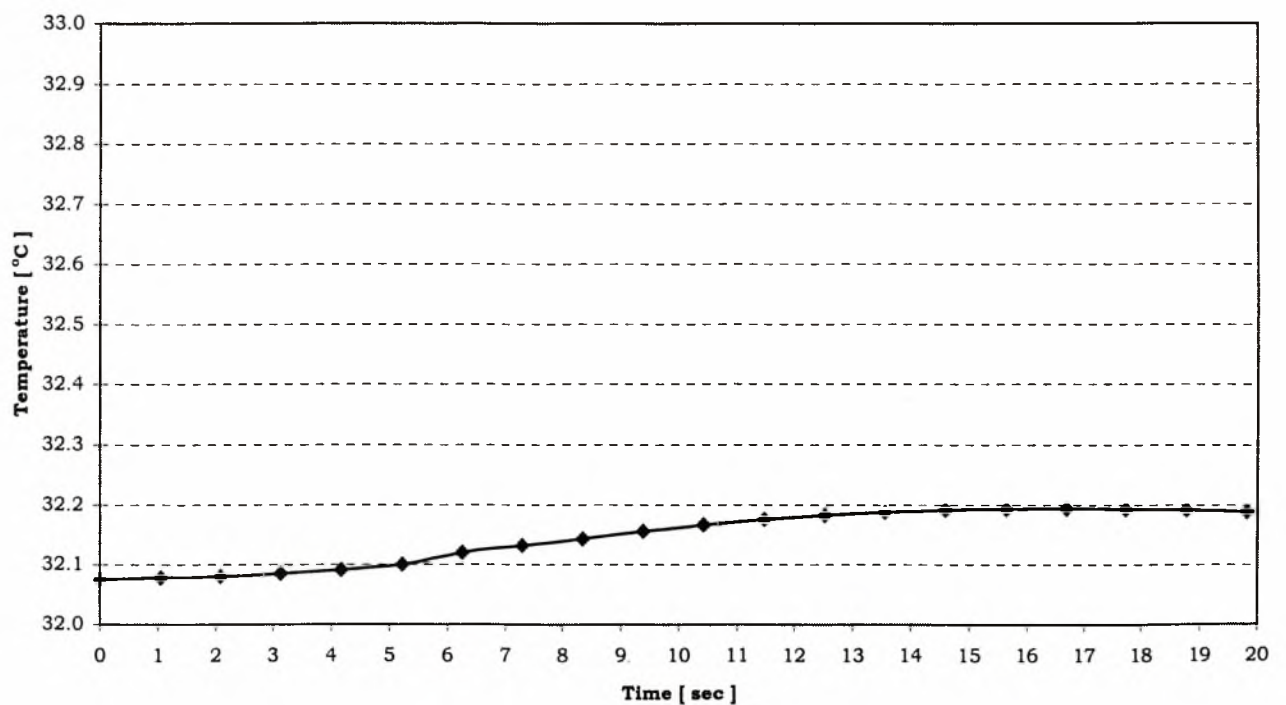
Σχήμα 5.2.1.17 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 3ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.18 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , που μετράται από το data logger, κατά τη διάρκεια της 3ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.19 Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας σε συνθήκες μικροβαρύτητας, κατά τη διάρκεια της 3ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.20 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 3η παραβολή της δεύτερης μέρας.

Κατά την εξαγωγή της καμπύλης του Σχ. 5.2.1.19 από την ανάλυση των δεδομένων εικόνας,

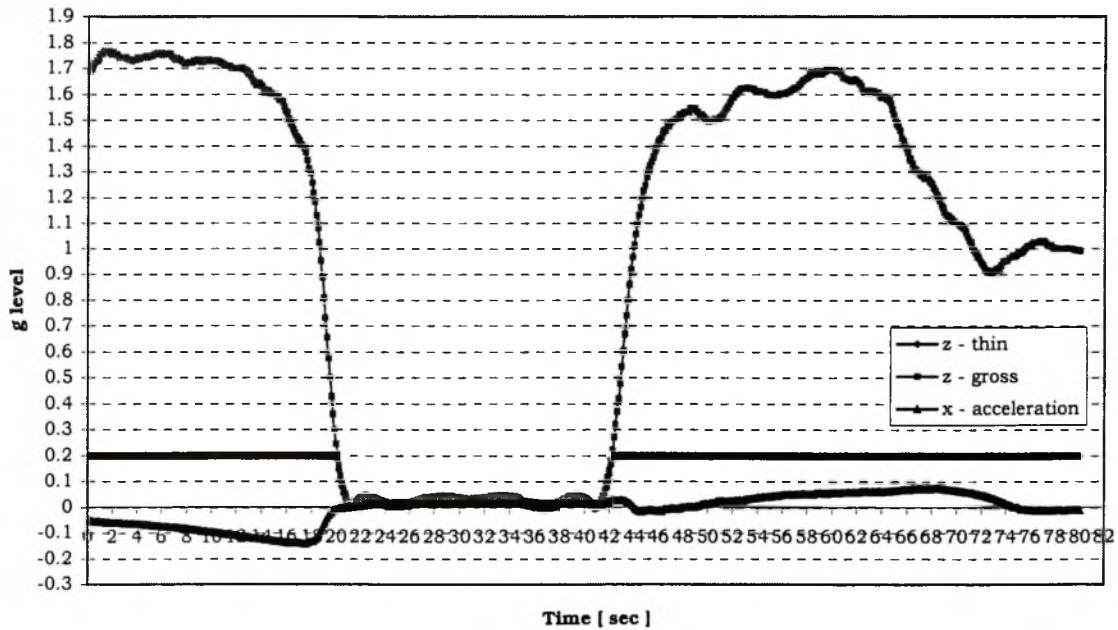
αντιμετωπίσαμε έντονα προβλήματα εξαιτίας του θορύβου που δημιουργούσε μία παραμένουσα φυσαλίδα, η οποία βρισκόταν προσκολλημένη στην πίσω πλευρά του thermistor. Η παραμένουσα φυσαλίδα ήταν η φυσαλίδα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος της 2^{ης} παραβολής που έγινε προηγουμένως. Αυτή δεν αποκολλήθηκε από το thermistor κατά τη διάρκεια των συνθηκών υπερβαρύτητας, αλλά έμεινε προσκολλημένη στο thermistor αλλάζοντας όμως τη θέση της στο χώρο. Κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού αναπτυσσόταν μαζί με την νέα φυσαλίδα και η παραμένουσα φυσαλίδα, και το γεγονός αυτό προκαλούσε προβλήματα θορύβου στο κώδικα υπολογισμού της διαμέτρου της φυσαλίδας, με αποτέλεσμα την απαίτηση για αύξηση του threshold, έτσι ώστε να πάρουμε καλύτερα αποτελέσματα. Ο θόρυβος αυτός περιορίστηκε στο μέγιστο μετρώντας για αρκετά frames του βίντεο τη διάμετρο της φυσαλίδας με το πρόγραμμα Image Tool. Πάντως οι τιμές της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας, που φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.19, από $t = 6 \text{ sec}$ μέχρι $t = 9 \text{ sec}$, είναι στη πραγματικότητα μεγαλύτερες απ' αυτές που φαίνονται στο διάγραμμα κατά 20-35 μm .

Η ύπαρξη της παραμένουσας φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος μας, έχει επίσης σαν αποτέλεσμα, τη μείωση του τελικού μεγέθους της φυσαλίδας, αφού η διάμετρος της δεν υπερβαίνει τα 820 μm , στο τέλος του θερμικού παλμού στα 10 sec. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διάχυση μέρους του διοξειδίου του άνθρακα στην παραμένουσα φυσαλίδα, παράλληλα με τη διάχυση του στη νέα φυσαλίδα που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

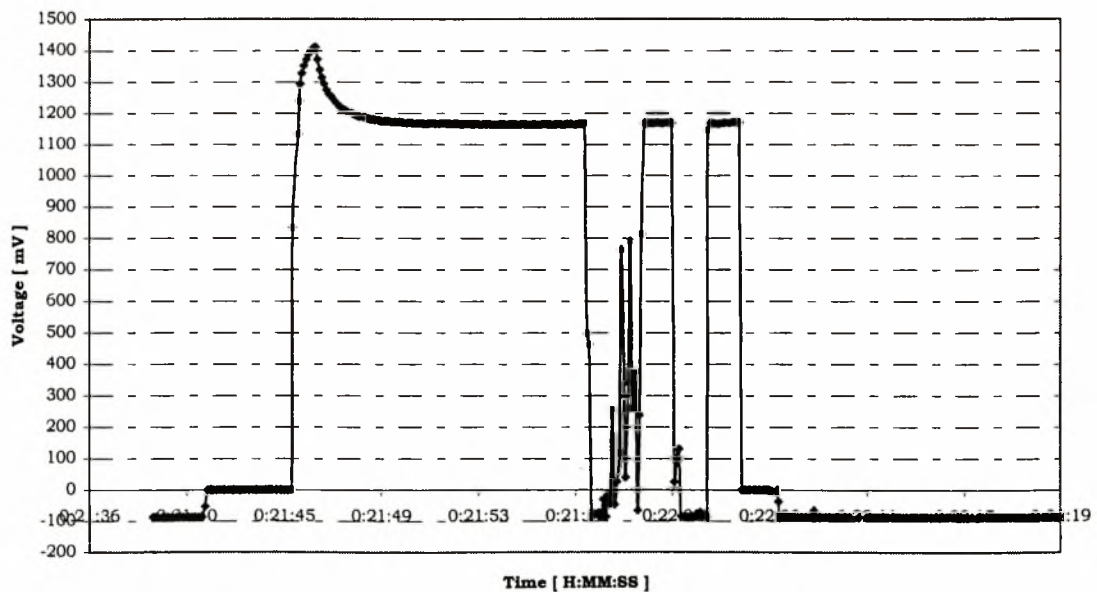
Το πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας των πτήσεων, είναι το πρώτο που έγινε στο 4^ο κελί για τη δεύτερη μέρα. Το είδος της λειτουργίας του θερμοστάτη ήταν \$2005, δηλαδή *fine mode*, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη ήταν σταθερή, και έγινε ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας της μονάδας κελιού και των κλίσεων της. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε στην έναρξη του πειράματος ήταν 25,000, και η χρονική του διάρκεια ήταν 20 sec. Η ποιότητα της βαρύτητας κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας της παραβολής ήταν πολύ καλή, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.21. Η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού, V_{DL} , όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.22, παρουσιάζει αρχικά ένα μέγιστο στα 1411 mV, και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά και σταθεροποιείται στα 1165 mV μέχρι το τέλος του θερμικού παλμού. Για τη μέγιστη τιμή της καταγραφόμενης τάσης V_{DL} , η τιμή της θερμικής ισχύος που δίνουμε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού υπολογίζεται σε 52.5 mW, ενώ για τη τιμή των 1165 mV, αυτή υπολογίζεται σε 50.3 mW. Οι τιμές της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται ο σφαιρικός θερμοαντήρας κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, για τις παραπάνω τιμές της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , είναι 78.0 και 65.5 $^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι η μείωση της τιμής της V_{DL} κατά 17.5%, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής ισχύος κατά 4.2%, αλλά και μείωση της θερμοκρασίας του thermistor κατά 16%, η οποία είναι πολύ σημαντική. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, είναι πολύ σημαντική, αφού μεταβάλλει τη τιμή της διδόμενης θερμικής ισχύος, και επομένως, της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Αυτό γιατί τόσο η τιμή της θερμικής ισχύος, όσο και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν οριακές συνθήκες του προβλήματος στην προσπάθεια αναλυτικής επίλυσης ή υπολογιστικής προσομοίωσης του.

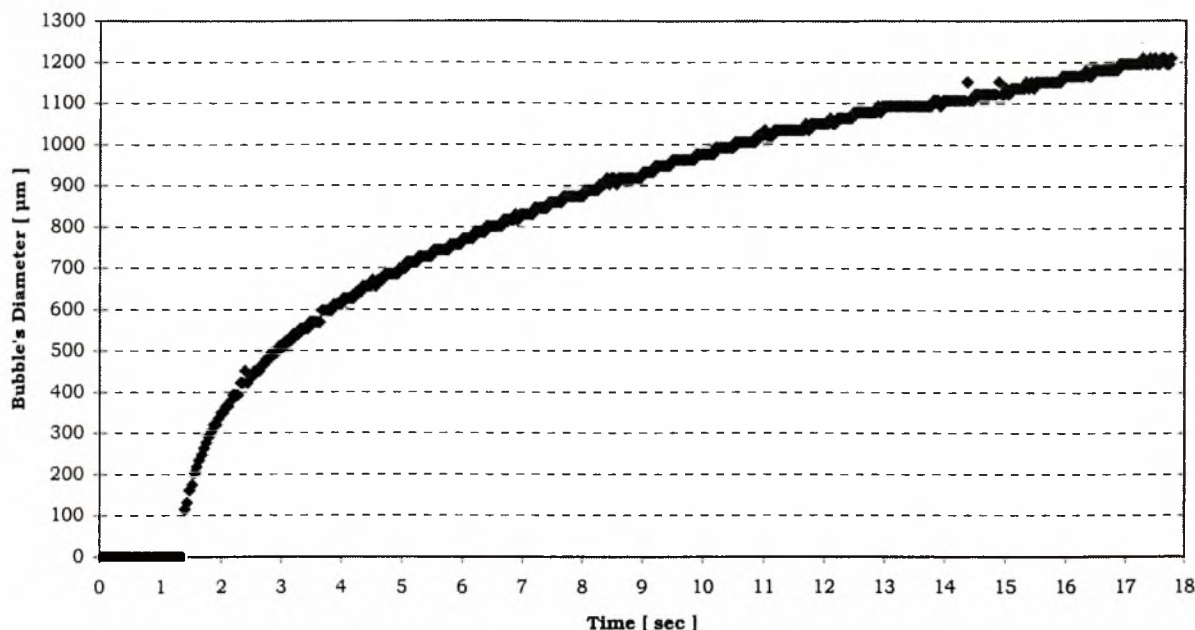
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
02/06/99	6	4	52.5~50.3	20	1411~1165	78.0~65.5	\$2005



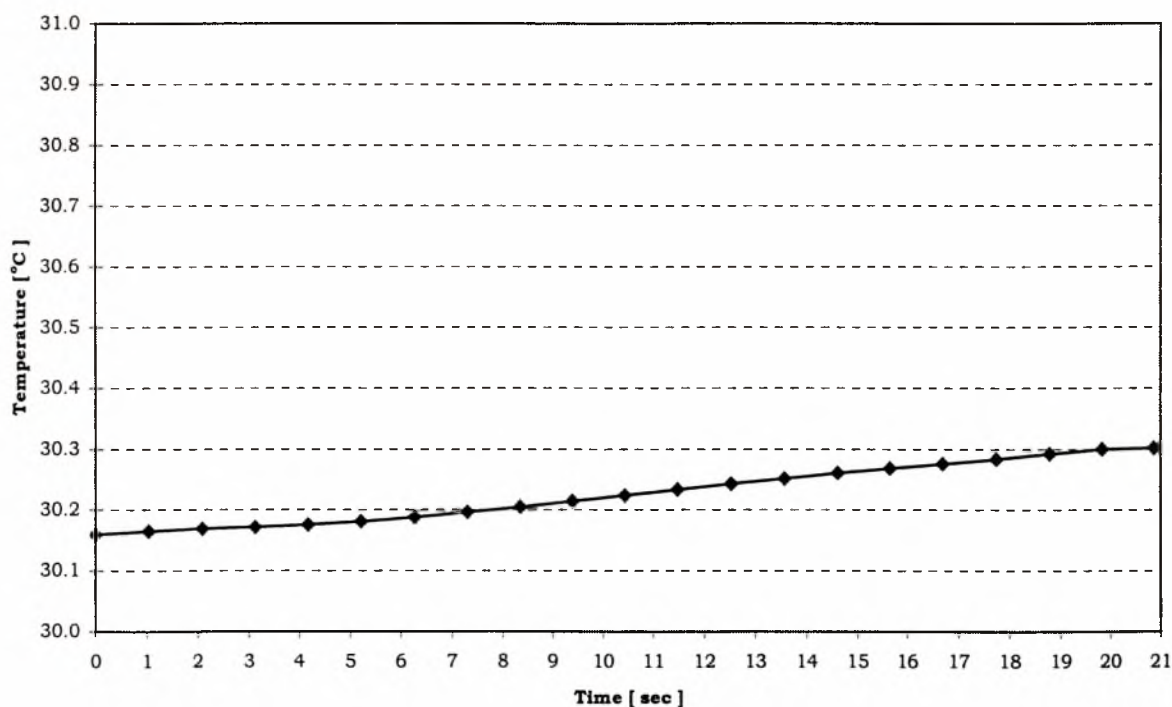
Σχήμα 5.2.1.21 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.22 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.23 Μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας σε συνθήκες μικροβαρύτητας, κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.24 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 6^η παραβολή της δεύτερης μέρας.

Στο Σχ. 5.2.1.23, απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας της 6^{ης} παραβολής. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία χρονική υστέρηση στο σχηματισμό της φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, ίση με 1.36 sec περίπου, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία

του διαλύματος είναι πιο χαμηλή από τη θερμοκρασία κορεσμού, και χρειάζεται να μεσολαβήσει κάποιο χρονικό διάστημα για να αυξηθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πείραμα που έγινε κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής είναι το πρώτο που γίνεται στο 4^ο κελί για τη δεύτερη μέρα. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από το διάγραμμα του Σχ. 5.2.1.24, όπου απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας, USR2, απέναντι από το σφαιρικό θερμαντήρα.

Η συμπεριφορά της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας είναι η ίδια που παρατηρήσαμε και για τα προηγούμενα πειράματα: παραβολική για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης της φυσαλίδας και στη συνέχεια γραμμική. Το μέγεθος της διαμέτρου της φυσαλίδας στο τέλος του πειράματος, στα 17.76 sec, είναι 1200 μm περίπου.

Πριν την έναρξη του πειράματος που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 7^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας των πτήσεων, υπήρχε στην επιφάνεια του σφαιρικού θερμαντήρα προσκολλημένη μία παραμένουσα φυσαλίδα. Αυτή προφανώς αναπτύχθηκε μετά την αναχώρηση από το θερμαντήρα της φυσαλίδας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής. Η φυσαλίδα αυτή παραμένει στην επιφάνεια του θερμαντήρα και κατά τη διάρκεια της 7^{ης} παραβολής, και το μέγεθος της αυξάνεται με την έναρξη του θερμικού παλμού, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.27. Όμως, μετά από 4.8 sec περίπου από την έναρξη του θερμικού παλμού αναπτύσσεται και δεύτερη φυσαλίδα, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.27. Όπως φαίνεται και στο βίντεο του πειράματος, στην αριστερή πλευρά του thermistor υπάρχει η παραμένουσα φυσαλίδα, της οποίας το μέγεθος αυξάνεται με την έναρξη του θερμικού παλμού, και στη δεξιά πλευρά του thermistor αναπτύσσεται μία νέα φυσαλίδα.

Η μορφή της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της νέας φυσαλίδας είναι η ίδια με αυτή που έχουμε παρατηρήσει και στα αποτελέσματα των προηγούμενων πειραμάτων - παραβολική στα αρχικά στάδια σχηματισμού της, και στη συνέχεια γραμμική - ενώ αυτή της παραμένουσας φυσαλίδας, είναι γραμμική, μόνο που αλλάζει σε κάποια χρονική στιγμή ($t = 8 \text{ sec}$) η κλίση της. Η διάμετρος της παραμένουσας φυσαλίδας είναι κατά την έναρξη του θερμικού παλμού ίση με 840 μm περίπου, και φθάνει στα 1500 μm με το πέρας των συνθηκών μικροβαρύτητας. Αντίστοιχα, η διάμετρος της φυσαλίδας που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του πειράματος φθάνει στα 1150 μm περίπου.

Η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού, V_{DL} , η μεταβολή της οποίας φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.26, παρουσιάζει μέγιστο στα 1774.5 mV, για την οποία έχουν υπολογιστεί η τιμή της θερμικής ισχύος που δόθηκε, όσο και η θερμοκρασία του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία του πειράματος φαίνονται στον πίνακα που προηγείται του Σχήματος 5.2.1.1.25, το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν πολύ καλή.

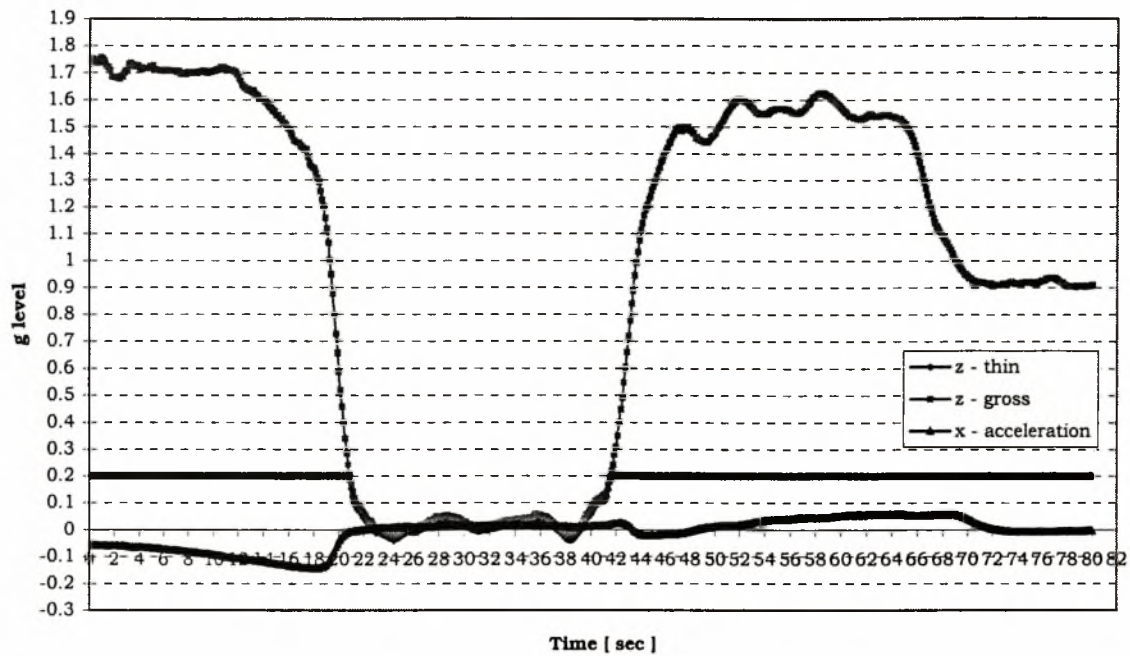
Η μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, κατά τη διάρκεια του πειράματος, η οποία απεικονίζεται στο Σχ. 5.2.1.28, είναι αυξητική με συνολική μεταβολή ίση με 0.28°C περίπου.

Παραμένουσα φυσαλίδα είχαμε και στο πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της δεύτερης μέρας. Στην περίπτωση όμως αυτή δεν αναπτύχθηκε, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, νέα φυσαλίδα. Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της παραμένουσας φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος, η οποία φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.31, είναι γραμμική, από την έναρξη του θερμικού παλμού μέχρι το τέλος του στα 10.5 sec, ενώ στη συνέχεια η διάμετρος της φυσαλίδας παραμένει σχεδόν σταθερή. Η διάμετρος της φυσαλίδας είναι κατά την έναρξη του θερμικού παλμού ίση με 1170 μm περίπου, και φθάνει στα 1540 μm με το πέρας του θερμικού παλμού, και στη συνέχεια παραμένει σταθερή μέχρι το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας.

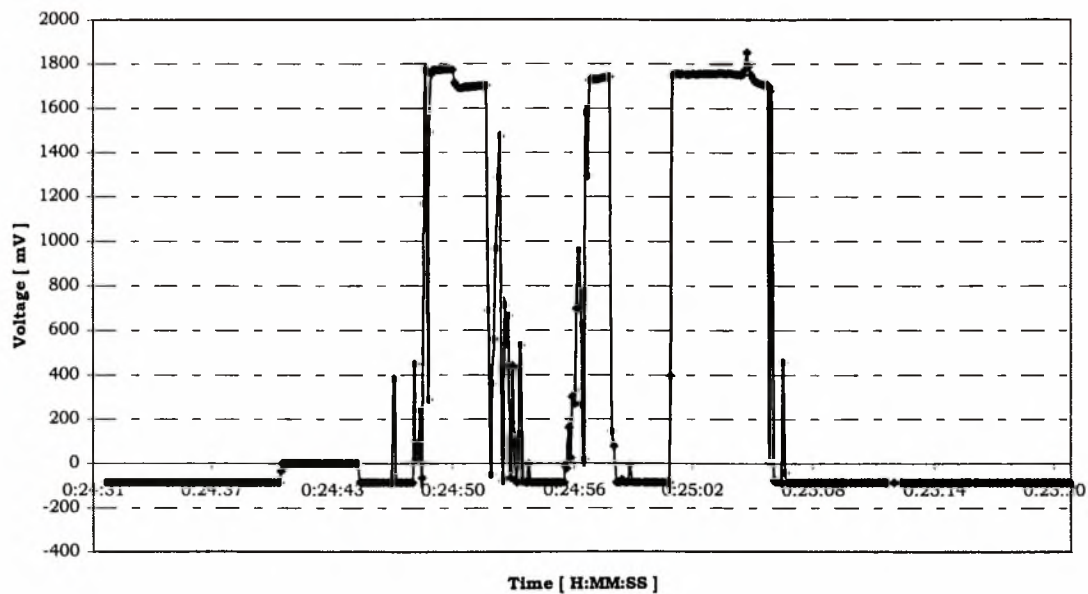
Η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού, V_{DL} , η μεταβολή της οποίας φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.30, είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού στη τιμή των 1771.6 mV, γεγονός που δεν έχουμε συναντήσει στα αποτελέσματα των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η συμπεριφορά αυτή της καταγραφόμενης τάσης V_{DL} παρατηρήθηκε και σε άλλα πειράματα στα οποία υπήρχε παραμένουσα φυσαλίδα, και τα οποία δεν παρουσιάζονται στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Η συμπεριφορά που παρατηρήθηκε ήταν ότι όταν το μέγεθος της παραμένουσας φυσαλίδας πριν το θερμικό παλμό ήταν αρκετά μεγάλο, η τιμή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού V_{DL} ήταν σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όπως στην περίπτωση του πειράματος της 8ης παραβολής της δεύτερης μέρας. Όταν το μέγεθος της παραμένουσας φυσαλίδας ήταν πιο μικρό – περίπου 200 μm για πειράματα με νερό – παρατηρούσαμε μία μικρή σταδιακή μείωση της μετρούμενης V_{DL} .

Η τιμή της θερμικής ισχύος που δόθηκε, όσο και η θερμοκρασία του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, είναι οι ίδιες με αυτές του πειράματος της προηγούμενης παραβολής. Όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία του πειράματος φαίνονται στον πίνακα που προηγείται του Σχήματος 5.2.1.29, το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν πολύ καλή.

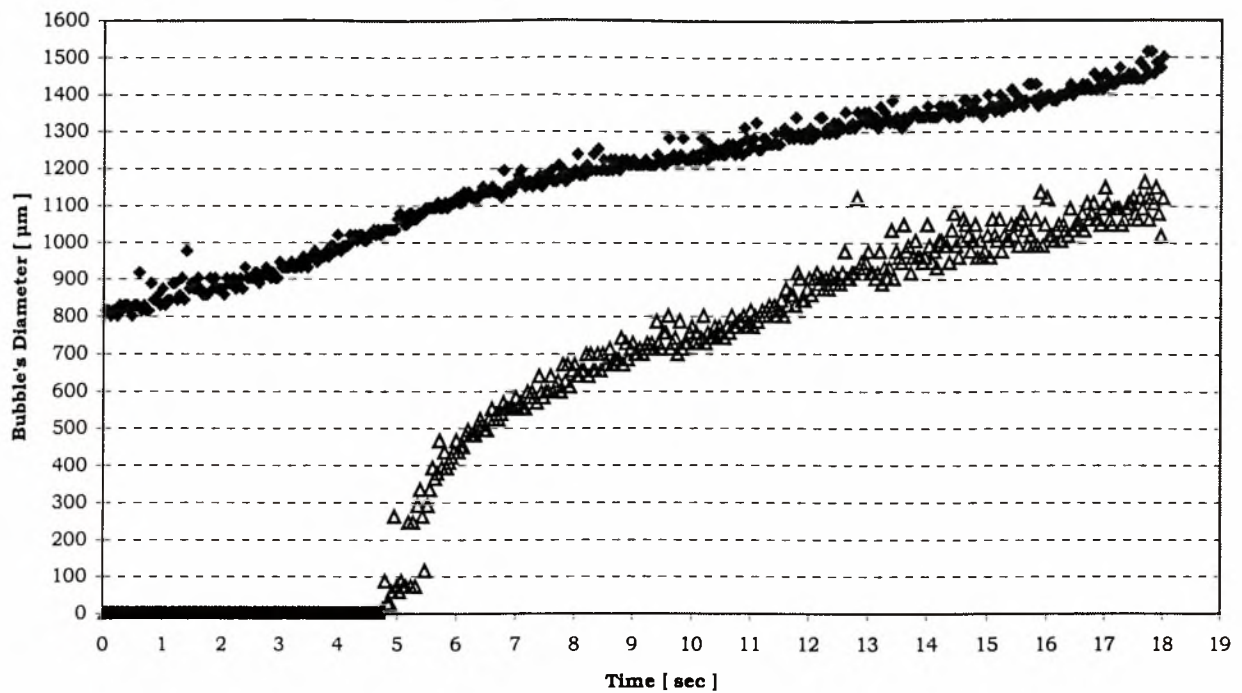
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
02/06/99	7	4	75.9	30	1774.5	80.0	\$2005



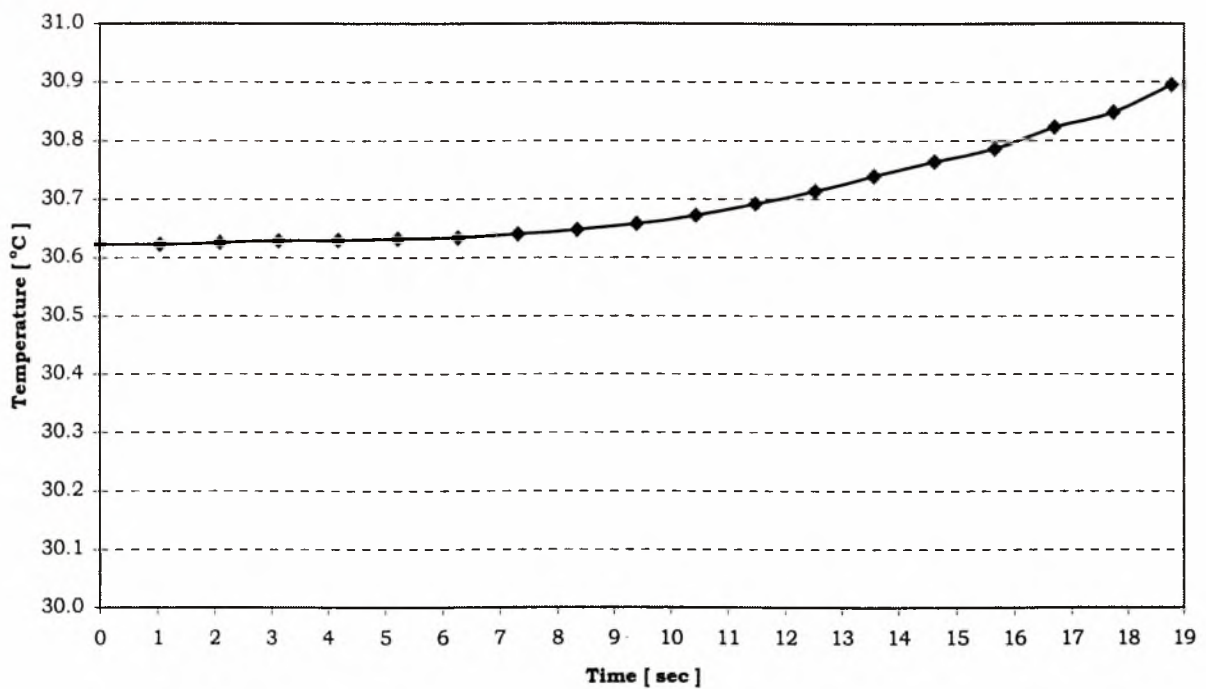
Σχήμα 5.2.1.25 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 7ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.26 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια της 7ης παραβολής της δεύτερης μέρας.

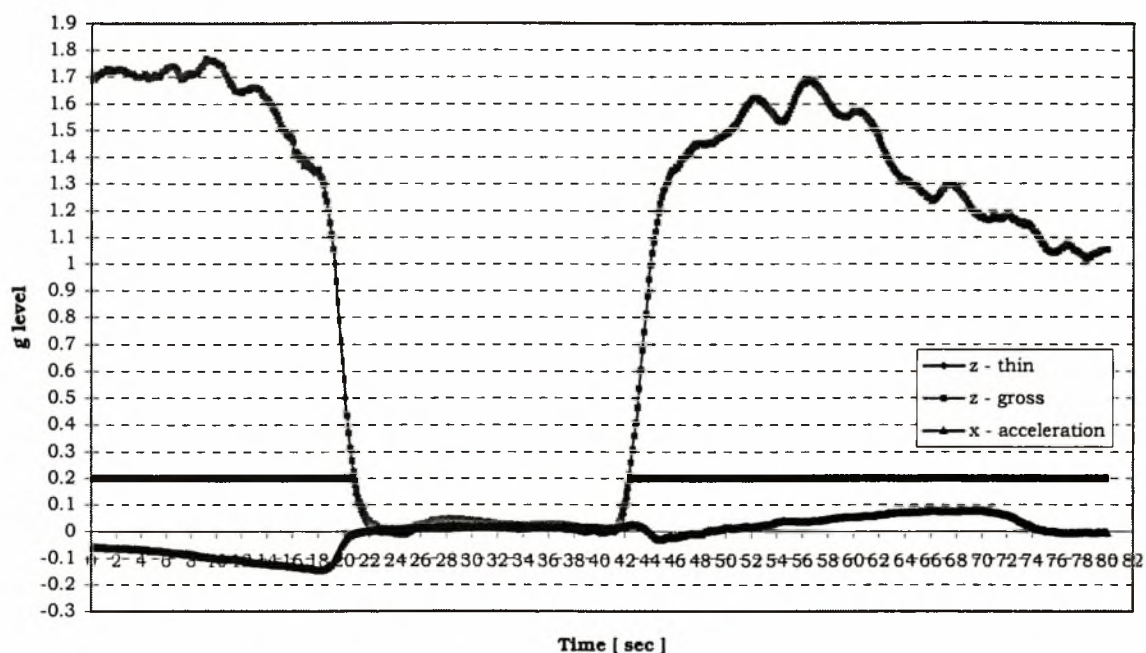


Σχήμα 5.2.1.27 Μεταβολή της διαμέτρου της παραμένουσας φυσαλίδας και της φυσαλίδας που αναπτύχθηκε, κατά τη διάρκεια της 7ης παραβολής της δεύτερης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

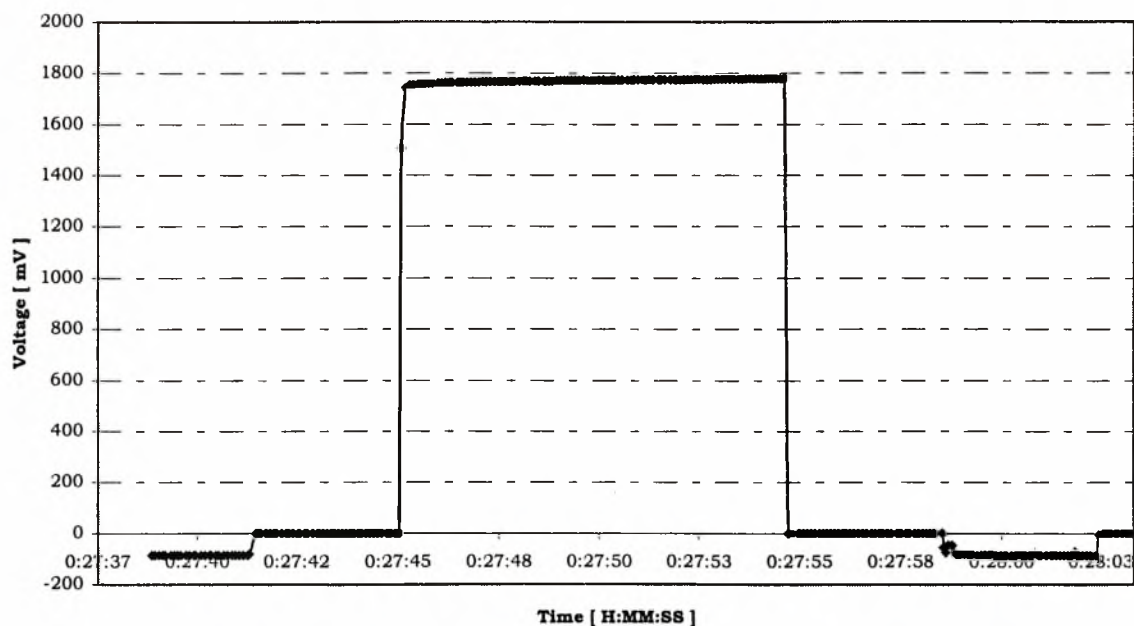


Σχήμα 5.2.1.28 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 7η παραβολή της δεύτερης μέρας.

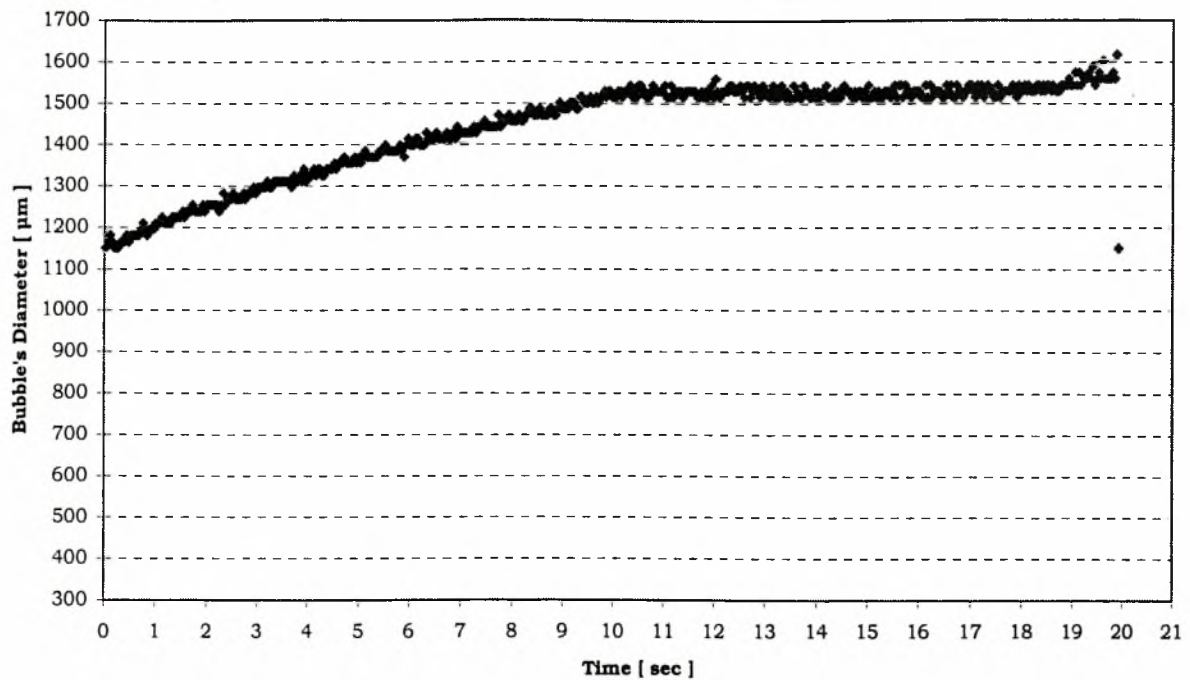
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
02/06/99	8	4	75.9	10	1771.6	80.0	\$2005



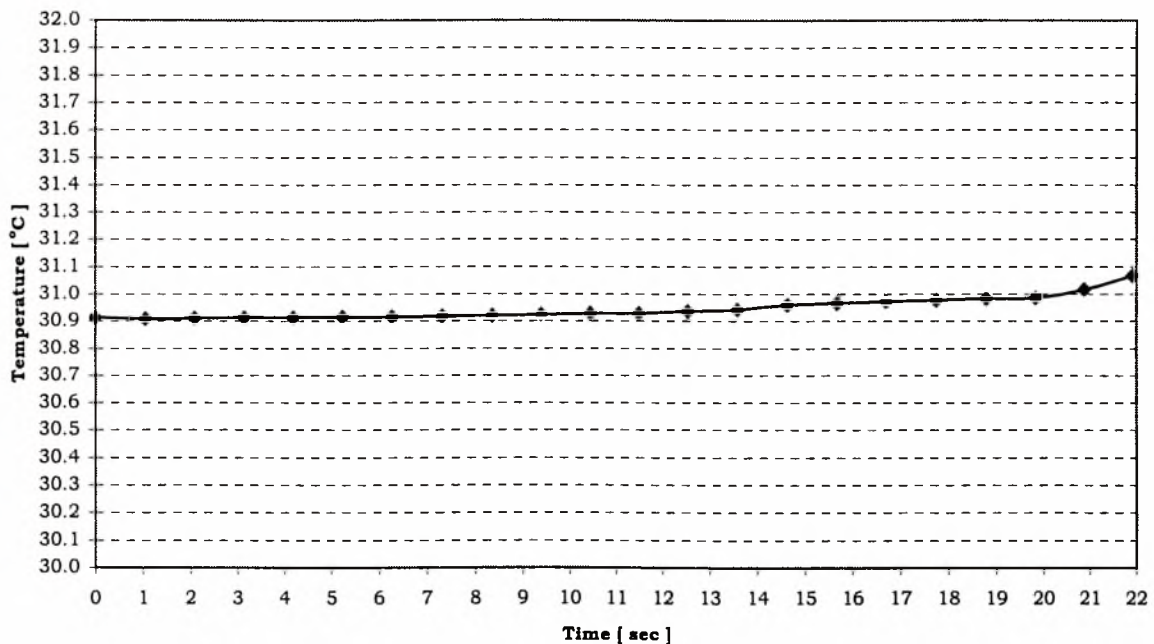
Σχήμα 5.2.1.29 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.30 Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της δεύτερης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.31 Μεταβολή της διαμέτρου της παραμένουσας φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της δεύτερης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.1.32 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 8η παραβολή της δεύτερης μέρας.

Τα τελευταία πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό, για τα οποία καταφέραμε να εξάγουμε αξιοποιήσιμη πληροφορία, διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας των παραβολικών πτήσεων, και πιο συγκεκριμένα στο τέλος της. Τα κελιά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών, ήταν το 3^ο και το 4^ο. Επειδή τα πειράματα αυτά έγιναν προς το τέλος της τρίτης μέρας των πειραμάτων, δεν έχουμε δεδομένα της μετρούμενης

διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , από το data logger, αφού η χωρητικότητα του είχε ήδη εξαντληθεί από τις τιμές που είχε καταγράψει κατά τη διάρκεια των προηγούμενων πειραμάτων. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε χάρις στην προνοητικότητα των ερευνητών, οι οποίοι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διάβαζαν φωναχτά τις τιμές που έπαιρνε η τάση, και η οποία μετρούταν από το βολτόμετρο που υπήρχε τοποθετημένο στην πειραματική μας συσκευή¹⁸. Η φωνή των ερευνητών καταγραφόταν από τη βιντεοκάμερα, και έτσι από τα βίντεο των πειραμάτων μπορέσαμε να μάθουμε ποια ήταν η μεταβολή της διαφορά δυναμικού V_{DL} , κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

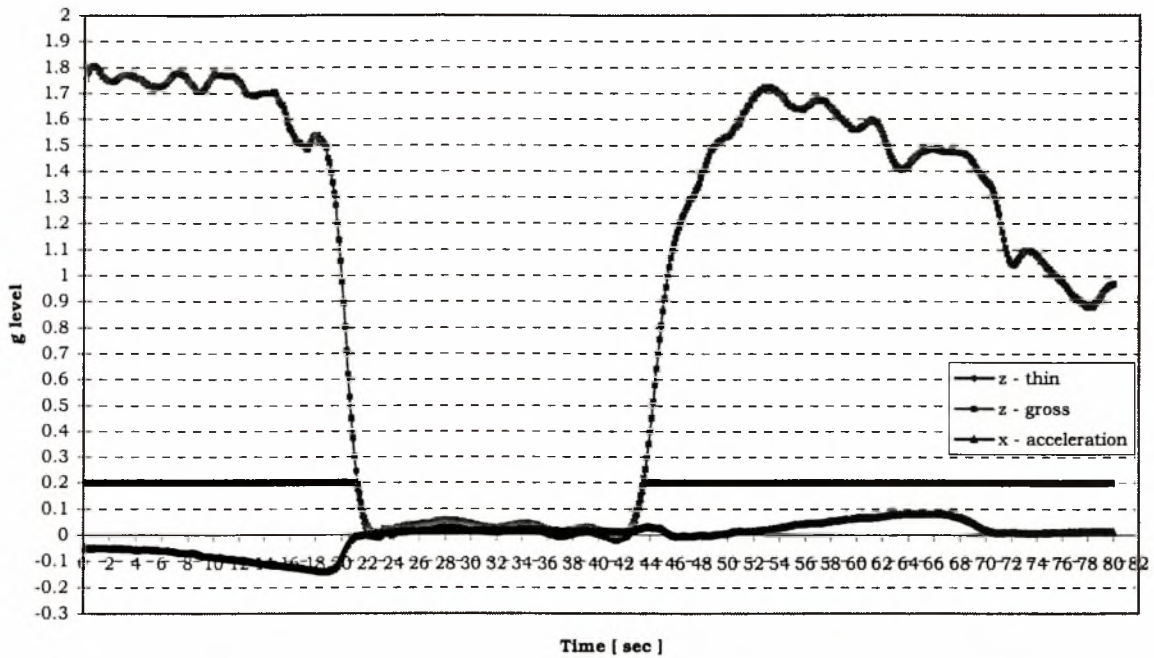
Το πρώτο πείραμα της τρίτης μέρας των πτήσεων έγινε κατά τη διάρκεια της 21^{ης} παραβολής, και ήταν το πρώτο που έγινε στο 3^ο κελί. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 22,000 - και η χρονική του διάρκεια ήταν ίση με 20 sec. Το είδος της λειτουργίας του θερμοστάτη ήταν \$2005, δηλαδή *fine mode*, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη ήταν σταθερή, και έγινε ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας της μονάδας κελιού και των κλίσεων της. Στο Σχ. 5.2.1.33 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν πολύ καλή, αφού οι τιμές των συνιστωσών z-thin, z-gross, και x της επιτάχυνσης της βαρύτητας παραμένουν σταθερές στη τιμή μηδέν για 23 sec περίπου.

Από το βίντεο που έχει καταγραφεί το πείραμα, προκύπτει η μεταβολή της τιμής της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, να είναι η εξής: [1.03 ~ 1.19 ~ 1.22 ~ 1.21 ~ 1.22 ~ 1.23 ~ 1.12 ~ 1.02 ~ 1.00 ~ 0.99 ~ 0.98 ~ 0.97 ~ 0.96] Volts. Η μέση τιμή των παραπάνω τιμών είναι τα 1.088 Volts ή 1088 mV, και γι' αυτή τη τιμή θα γίνει ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όσο και της θερμοκρασίας του thermistor. Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, υπολογίζονται σε 40.3 mW και 70.5°C, αντίστοιχα.

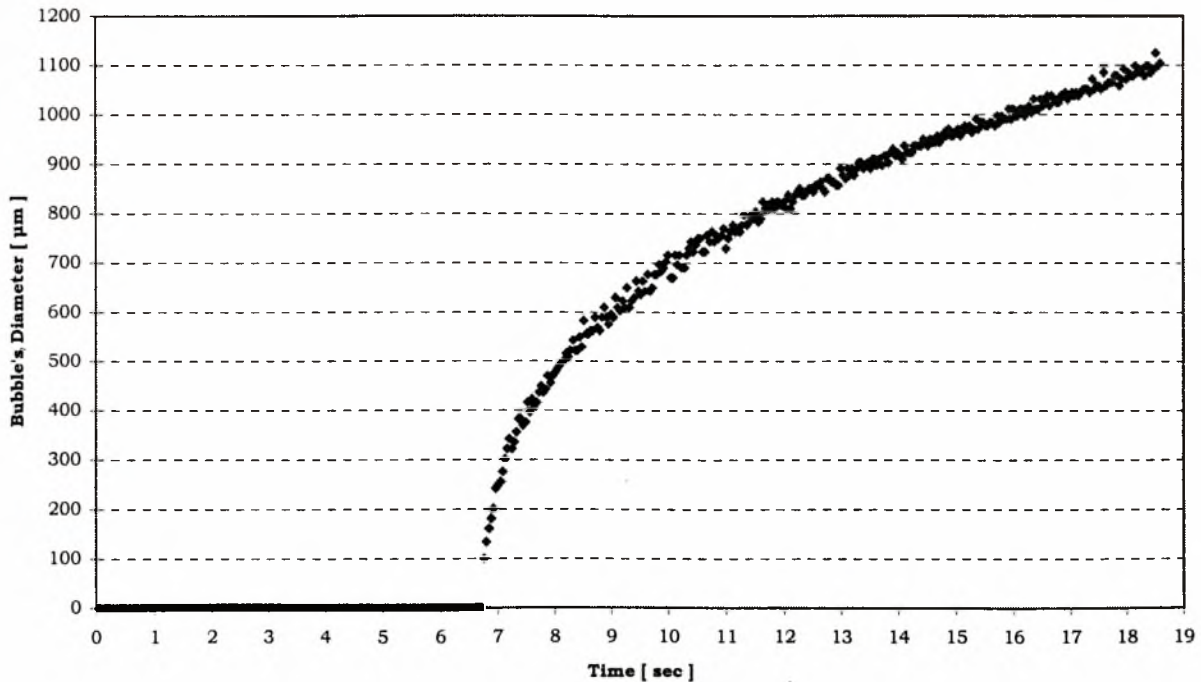
Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος, σε συνθήκες μικροβαρύτητας, που φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.34, έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με αυτή που παρατηρήσαμε για τις αναπτυσσόμενες φυσαλίδες στα προηγούμενα πειράματα: παραβολική στα αρχικά στάδια ανάπτυξης της, και γραμμική στη συνέχεια. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία αρκετά μεγάλη χρονική υστέρηση στην ανάπτυξη της φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, ίση με 6.8 sec περίπου, η οποία οφείλεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία του διαλύματος από τη θερμοκρασία κορεσμού του, όπως έχουμε εξηγήσει και σε προηγούμενες παρόμοιες περιπτώσεις. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από το Σχ. 5.2.1.35, όπου απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας USR2, και παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του διαλύματος πριν την έναρξη του θερμικού παλμού είναι στους 31.33°C, αρκετά μικρότερη από τους 33.0°C όπου έχει γίνει ο κορεσμός. Η διάμετρος

¹⁸ Το βολτόμετρο χρησιμοποιείται για να βλέπουν οι ερευνητές τις τιμές που έπαιρνε, κατά τη διάρκεια του πειράματος, η διαφορά δυναμικού που καταγραφόταν από το data logger.

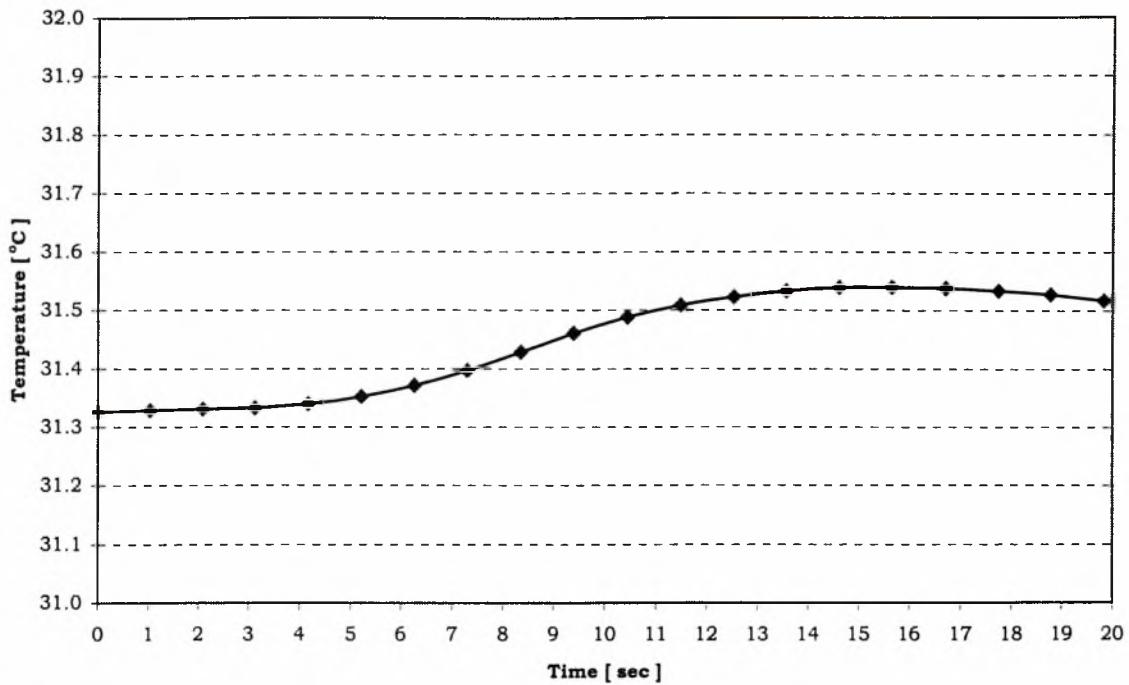
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	21	3	40.3	20	1088	70.5	\$2005



Σχήμα 5.2.1.33 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 21ης παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.34 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 21ης παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



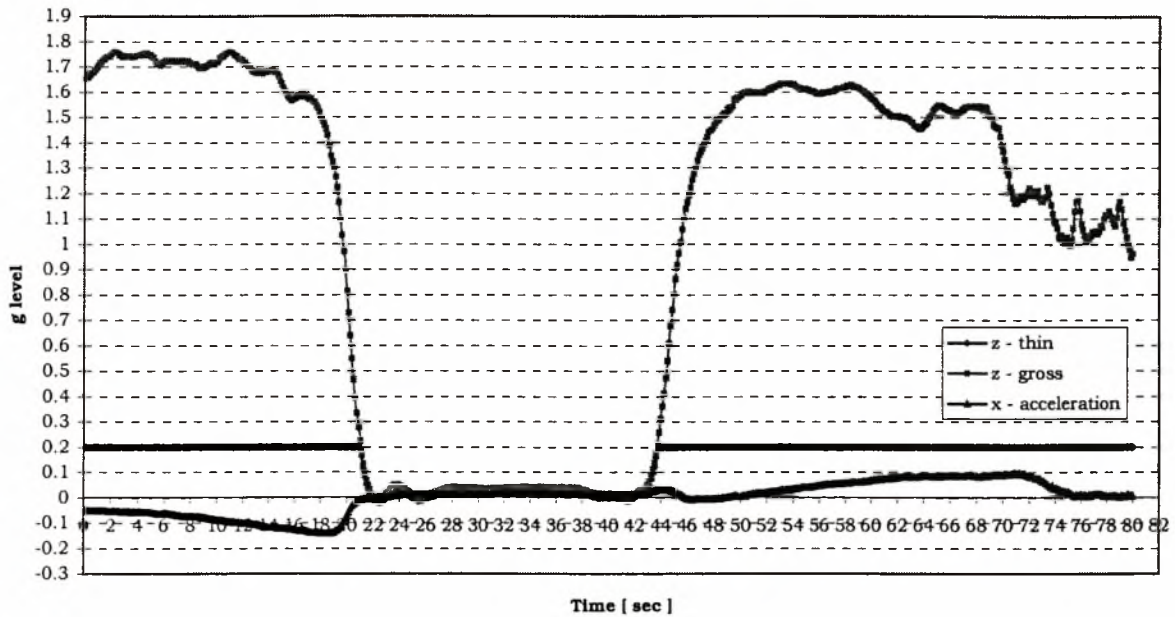
Σχήμα 5.2.1.35 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 21^η παραβολή της τρίτης μέρας.

της φυσαλίδας στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας, στα 18.6 sec, φθάνει τα 1100 μm.

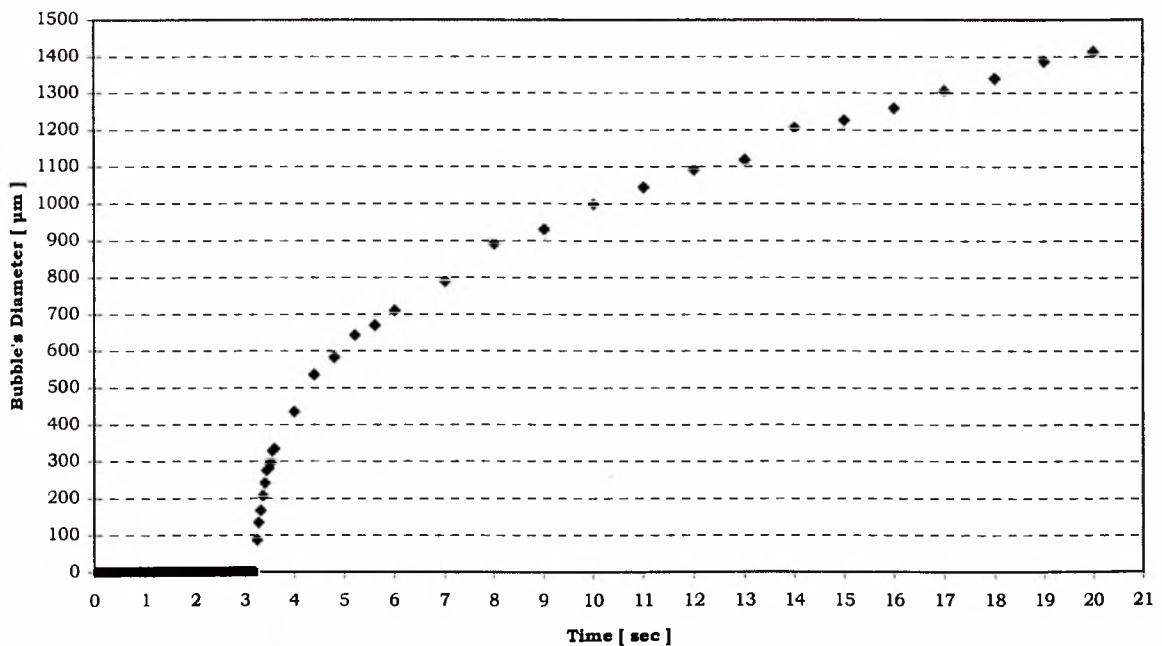
Η φυσαλίδα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος της 21^{ης} παραβολής δεν αποχώρησε από το σφαιρικό θερμαντήρα μετά το πέρας των συνθηκών μικροβαρύτητας, με αποτέλεσμα να υπάρχει στο πίσω μέρος του θερμαντήρα, όπως αυτός φαίνεται στο βίντεο, σαν παραμένουσα φυσαλίδα στο πείραμα της 22^{ης} παραβολής. Η ύπαρξη της παραμένουσας αυτής φυσαλίδας στο καταγραφόμενο βίντεο του πειράματος της 22^{ης} παραβολής έκανε αδύνατη τη χρησιμοποίηση του κώδικα υπολογισμού της διαμέτρου της φυσαλίδας, αφού η διάμετρος της παραμένουσας φυσαλίδας αυξανόταν κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Ο μόνος τρόπος για να μετρήσουμε τη μεταβολή της διαμέτρου της φυσαλίδας ήταν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Image Tool. Μετρήσαμε τη διάμετρο της φυσαλίδας για τα πρώτα 10 frames, στη συνέχεια ανά 10 frames και αργότερα ανά 25. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 5.2.1.37.

Παρατηρούμε ότι και σε αυτό το πείραμα, όπως και στο προηγούμενο, υπάρχει μία χρονική υστέρηση στο σχηματισμό της νέας φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, ίση με 3.2 sec περίπου, η οποία είναι αρκετά μεγάλη λαμβάνοντας υπ' όψιν μας ότι το πείραμα αυτό είναι το δεύτερο που γίνεται στο 3^ο κελί. Το γεγονός αυτό εξηγείται από την ύπαρξη της παραμένουσας φυσαλίδας και την παράλληλη αύξηση του μεγέθους της, με την ανάπτυξη της νέας φυσαλίδας. Παρόμοια συμπεριφορά έχουμε παρατηρήσει και στο πείραμα της 7^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας, όπου και εκεί είχαμε παραμένουσα φυσαλίδα, όμως για εκείνη την περίπτωση καταφέραμε να μετρήσουμε τη μεταβολή της διαμέτρου της παραμένουσας φυσαλίδας γιατί αυτή βρισκόταν στο μπροστινό μέρος του thermistor όπου ήταν εστιασμένη η κάμερα μας.

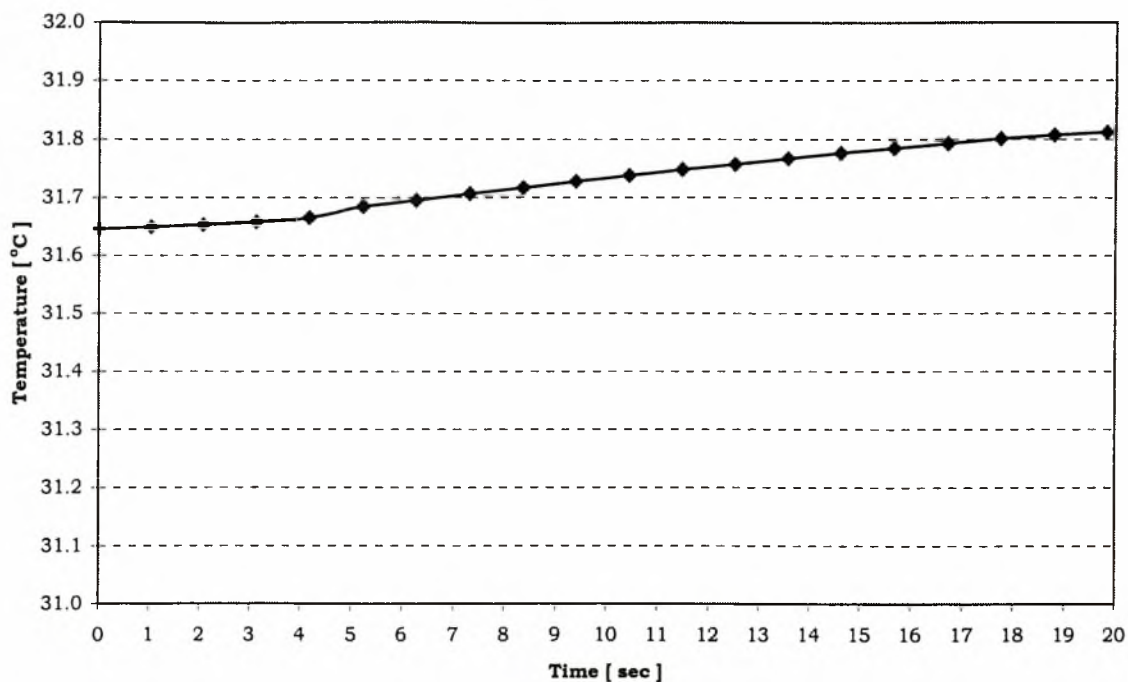
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	22	3	40.2	20	1074	70.0	\$2005



Σχήμα 5.2.1.36 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 22^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.37 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 22^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.1.38 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USSR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 22^η παραβολή της τρίτης μέρας.

Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 22,000 - και η χρονική του διάρκεια ήταν ίση με 20 sec. Το είδος της λειτουργίας του θερμοστάτη ήταν \$2005, δηλαδή *fine mode*. Στο Σχ. 5.2.1.36 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν αρκετά καλή, αφού οι τιμές των συνιστωσών z-thin, z-gross, και x της επιτάχυνσης της βαρύτητας παραμένουν σταθερές στη τιμή μηδέν για 21 sec περίπου, εκτός από ένα μικρό peak που κάνει η z-thin και η z-gross στο $t = 24$ sec, το οποίο δεν έχει καμία ουσιαστική επίδραση στα αποτελέσματα του πειράματος μας.

Από το βίντεο που έχει καταγραφεί το πείραμα, προκύπτει η μεταβολή της τιμής της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, να είναι η εξής: [1.04 ~ 1.15 ~ 1.18 ~ 1.22 ~ 1.18 ~ 1.03 ~ 1.00 ~ 0.99 ~ 0.98 ~ 0.97] Volts. Η μέση τιμή των παραπάνω τιμών είναι τα 1.074 Volts ή 1074 mV, και γι' αυτή τη τιμή θα γίνει ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όσο και η θερμοκρασία του thermistor. Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, υπολογίζονται σε 40.2 mW και 70.0°C, αντίστοιχα.

Παρατηρώντας το Σχ. 5.2.1.37, όπου απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας, παρατηρούμε ότι το τελικό μέγεθος της φυσαλίδας, στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας, φθάνει στα 1400 μm .

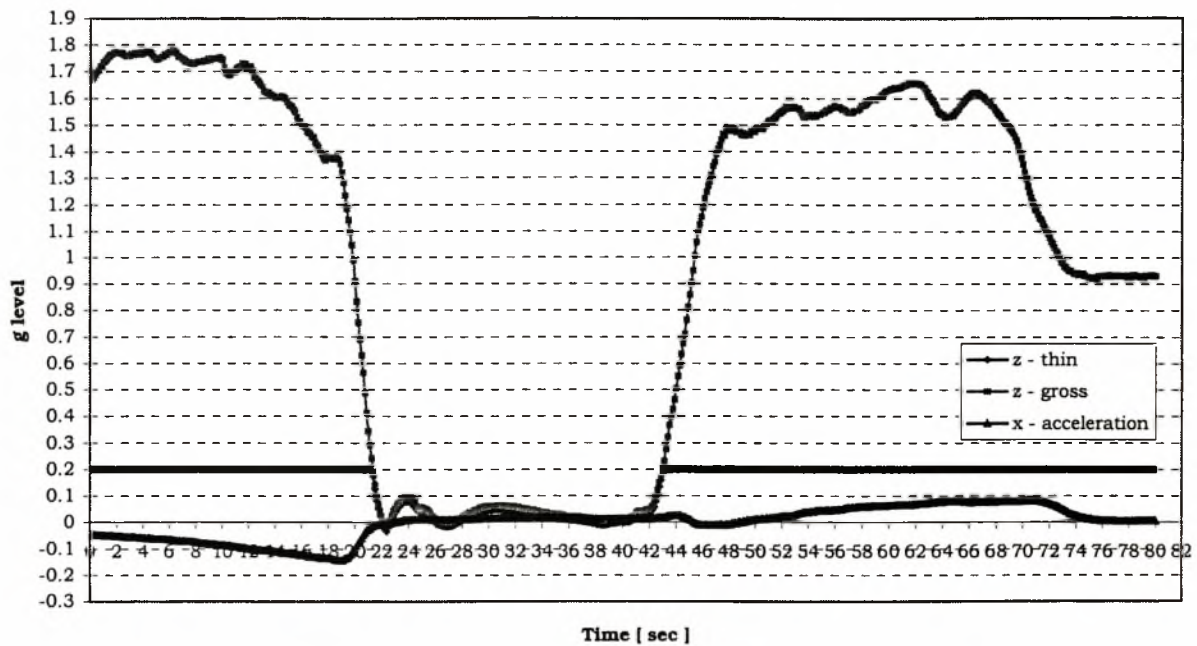
Το πείραμα που έγινε κατά τη διάρκεια της 26^{ης} παραβολής ήταν το τρίτο με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό για τη τρίτη μέρα των πτήσεων, και το πρώτο που έγινε στο 4^ο κελί. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 28,000 - και η χρονική του διάρκεια ήταν ίση με 20 sec. Το είδος της λειτουργίας του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν \$2004, δηλαδή *coarse mode*, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη δεν ήταν σταθερή, αφού αυτός προσπαθούσε να αυξήσει τη θερμοκρασία της μονάδας κελιού και να τη φθάσει στους 32.0°C. Πράγματι, παρατηρώντας το Σχ. 5.2.1.41, όπου απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας, συμπεραίνουμε ότι αυτή πριν την έναρξη του θερμικού παλμού έχει τη τιμή 28.993°C, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη που είναι οι 32.0°C. Το γεγονός αυτό έχει και σαν επιπλέον αποτέλεσμα μία χρονική υστέρηση 3.12 sec μεταξύ της έναρξης του θερμικού παλμού και του σχηματισμού της φυσαλίδας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.40, όπου απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

Στο Σχ. 5.2.1.39 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν ήταν αρκετά καλή, αφού παρατηρούμε ότι οι τιμές των συνιστωσών z-thin και z-gross της επιτάχυνσης της βαρύτητας μεταβάλλονται αρκετά για τα πρώτα 10 sec των συνθηκών μικροβαρύτητας. Το γεγονός αυτό όμως, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.2.1.40, δεν επηρεάζει την ανάπτυξη της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος.

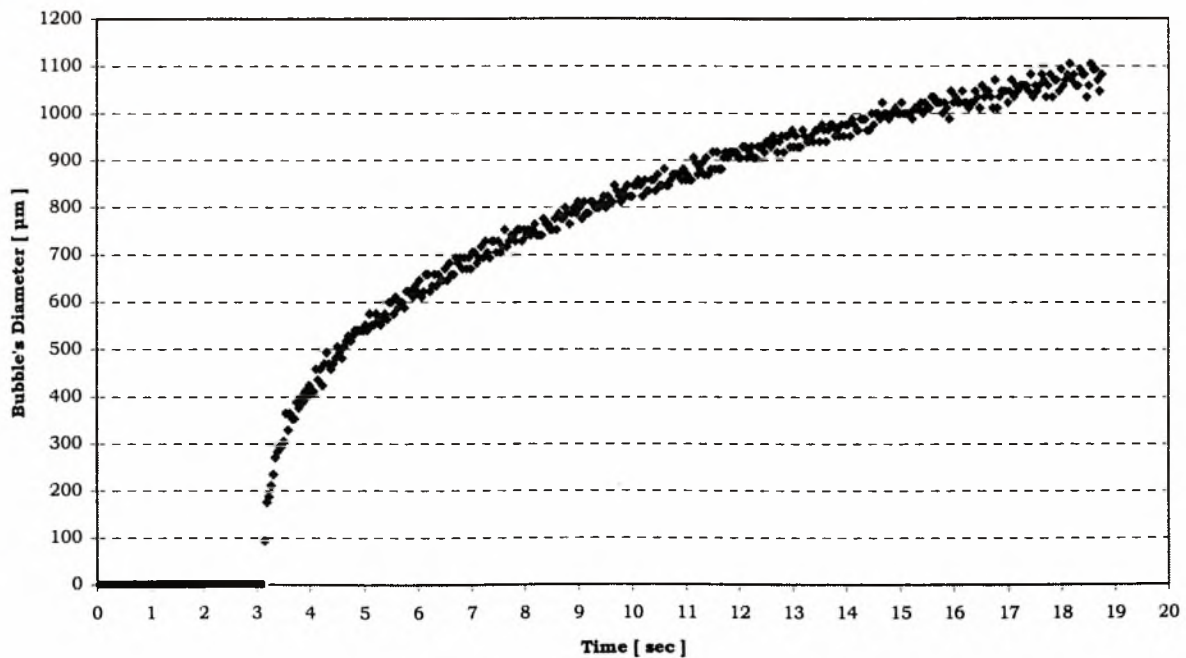
Από το βίντεο που έχει καταγραφεί το πείραμα, προκύπτει η μεταβολή της τιμής της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, να είναι η εξής: [1.8 ~ 1.8 ~ 1.9 ~ 1.6 ~ 1.5 ~ 1.5 ~ 1.5 ~ 1.5] Volts. Η μέση τιμή των παραπάνω τιμών είναι τα 1.6375 Volts ή 1637.5 mV, και γι' αυτή τη τιμή θα γίνει ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όσο και της θερμοκρασίας του thermistor. Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, υπολογίζονται σε 66.4 mW και 81.0°C, αντίστοιχα.

Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος, σε συνθήκες μικροβαρύτητας, που φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.40, έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με αυτή που παρατηρήσαμε για τις αναπτυσσόμενες φυσαλίδες στα προηγούμενα πειράματα: παραβολική στα αρχικά στάδια ανάπτυξης της, από 3.12 έως τα 5 sec περίπου, και γραμμική στη συνέχεια, από τα 8 sec μέχρι το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας. Ενδιάμεσα στο παραβολικό και στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης, μεσολαβεί ένα ενδιάμεσο τμήμα της, από τα 5 έως στα 8 sec, το οποίο είναι το μεταβατικό στάδιο από τη μία συμπεριφορά στην άλλη. Η τελική τιμή της διαμέτρου της φυσαλίδας στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας είναι τα 1100 μm .

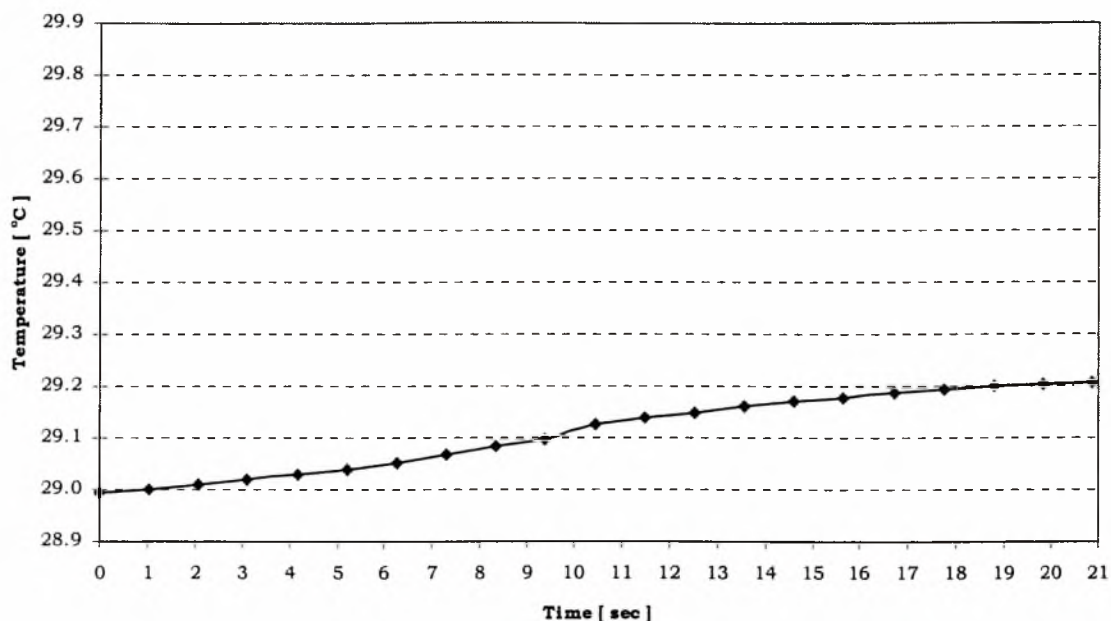
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	26	4	66.4	20	1637.5	81.0	\$2004



Σχήμα 5.2.1.39 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 26^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.40 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 26^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



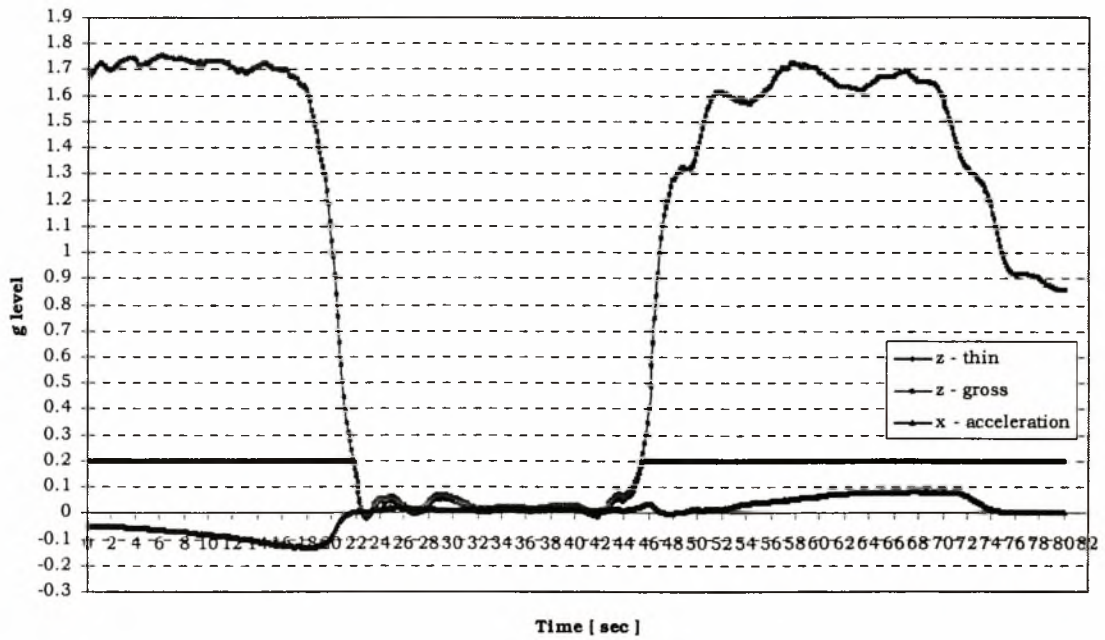
Σχήμα 5.2.1.41 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας, για την 26^η παραβολή της τρίτης μέρας.

Στο Σχ. 5.2.1.42 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 27^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας ήταν καλύτερη απ' αυτή της προηγούμενης παραβολής, αλλά και κατά τη διάρκεια αυτής της παραβολής παρατηρούμε μια μικρή διακύμανση των τιμών των συνιστωσών z-gross και z-thin για τα πρώτα 7 sec των συνθηκών μικροβαρύτητας.

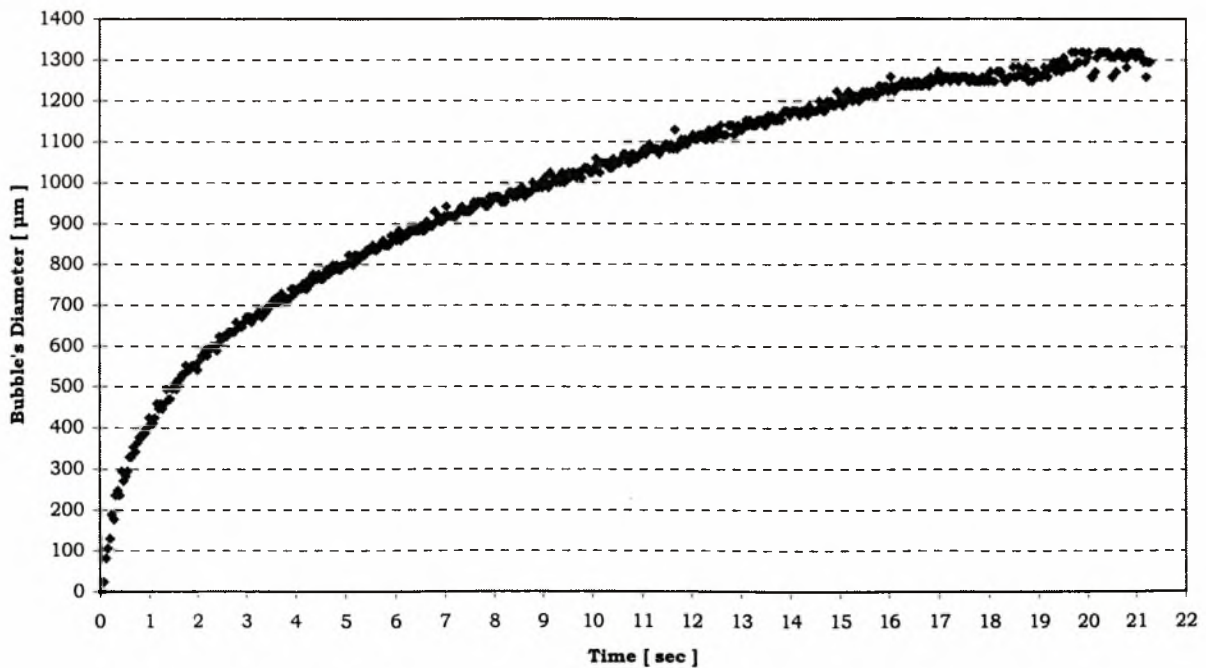
Η μεταβολή της τιμής της διαφοράς δυναμικού, V_{DI} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όπως προκύπτει από το βίντεο του πειράματος, είναι η εξής: [2.08 ~ 2.06 ~ 2.05 ~ 2.05 ~ 2.06 ~ 2.04 ~ 2.04 ~ 2.04 ~ 2.04 ~ 2.04] Volts. Η μέση τιμή των παραπάνω τιμών είναι τα 2.05 Volts ή 2050 mV, και γι' αυτή τη τιμή θα γίνει ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όσο και της θερμοκρασίας του thermistor. Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, υπολογίζονται σε 85.6 mW και 91.0°C, αντίστοιχα.

Το πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 27^{ης} παραβολής είναι το δεύτερο κατά σειρά που γίνεται στο 4^ο κελί. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 32,000 - και η χρονική του διάρκεια ήταν ίση με 20 sec. Το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής ήταν \$2005, δηλαδή fine mode, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν σταθερή, και έγινε ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας της μονάδας κελιού και των κλίσεων της.

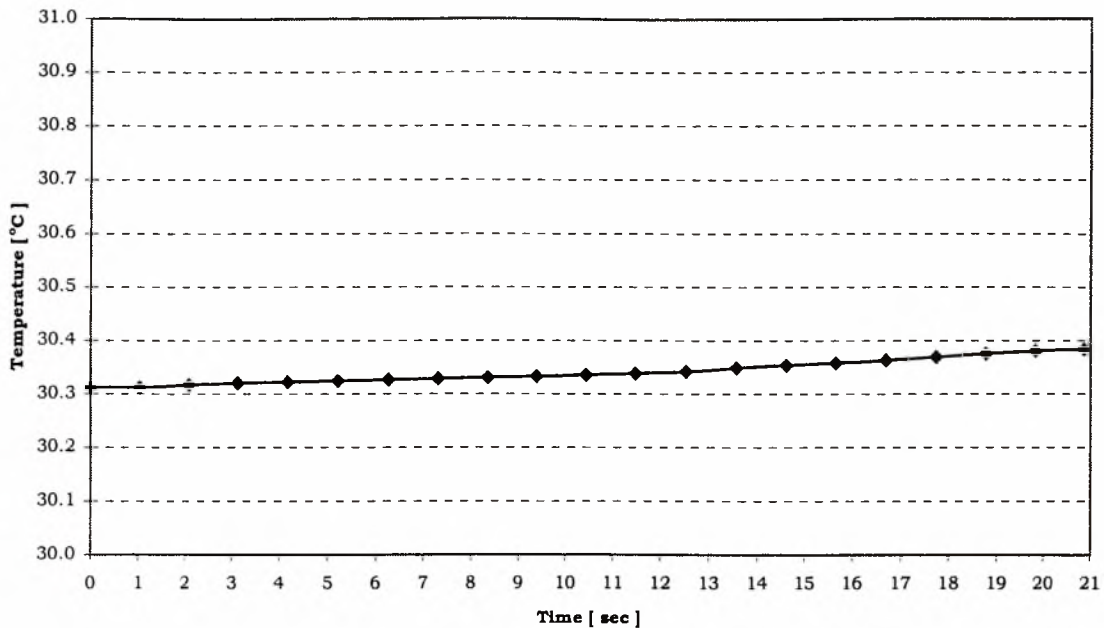
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	27	4	85.6	20	2050	91.0	\$2005



Σχήμα 5.2.1.42 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 27ης παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.43 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 27ης παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.1.44 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 27^η παραβολή της τρίτης μέρας.

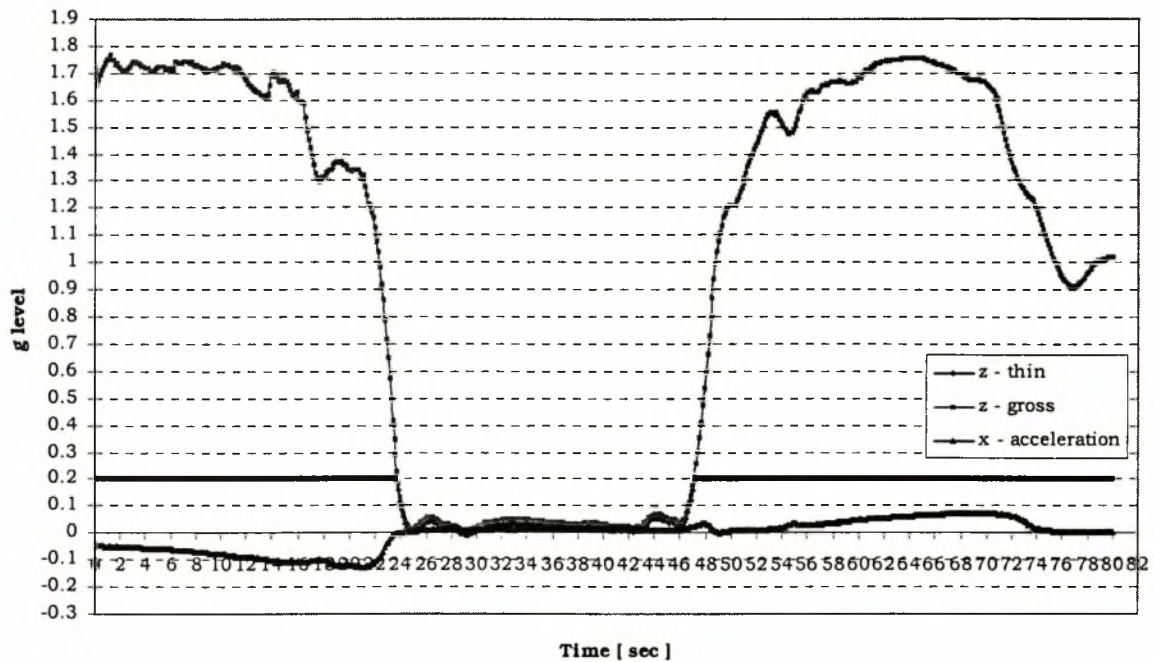
Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας σε συνθήκες μικροβαρύτητας φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.43. Αυτή τη φορά δεν έχουμε χρονική υστέρηση μεταξύ της έναρξης του θερμικού παλμού και της ανάπτυξης της φυσαλίδας. Η συμπεριφορά της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας είναι ίδια με αυτή που παρατηρήσαμε στα προηγούμενα πειράματα. Η τελική τιμή της διαμέτρου στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας φθάνει τα 1300 μm .

Η θερμοκρασία του διαλύματος, όπως αυτή καταγράφεται από τη θερμοκρασία που μετράμε με τη βοήθεια του thermistor USR2, έχει τώρα αυξηθεί, σε σχέση με τη θερμοκρασία που είχε κατά την έναρξη του θερμικού παλμού της προηγούμενης παραβολής (28.993°C), και βρίσκεται στους 30.313°C. Η τιμή της θερμοκρασίας USR2 κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού αυξάνεται μόλις κατά 0.068°C και φθάνει τους 30.381°C.

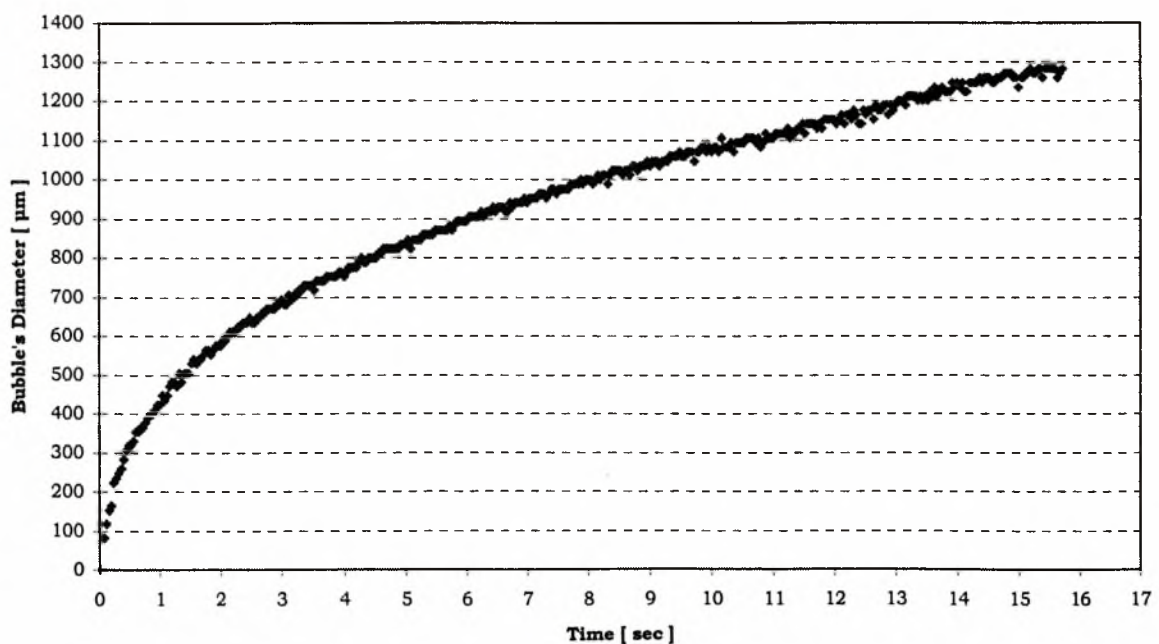
Η 28^η παραβολή είναι η τελευταία παραβολή των τριών ημερών των παραβολικών πτήσεων, κατά τη διάρκεια της οποίας διεξήχθη πείραμα με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού ήταν το υψηλότερο δυνατό - 36,000 - και η χρονική του διάρκεια ήταν ίση με 20 sec. Το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής ήταν \$2005, δηλαδή fine mode. Το πείραμα ήταν το τρίτο σε σειρά πείραμα που διεξήχθη στο 4^ο κελί.

Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν πολύ καλύτερη απ' αυτή που είχαμε κατά τη διάρκεια των δύο προηγούμενων πειραμάτων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.2.1.45, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

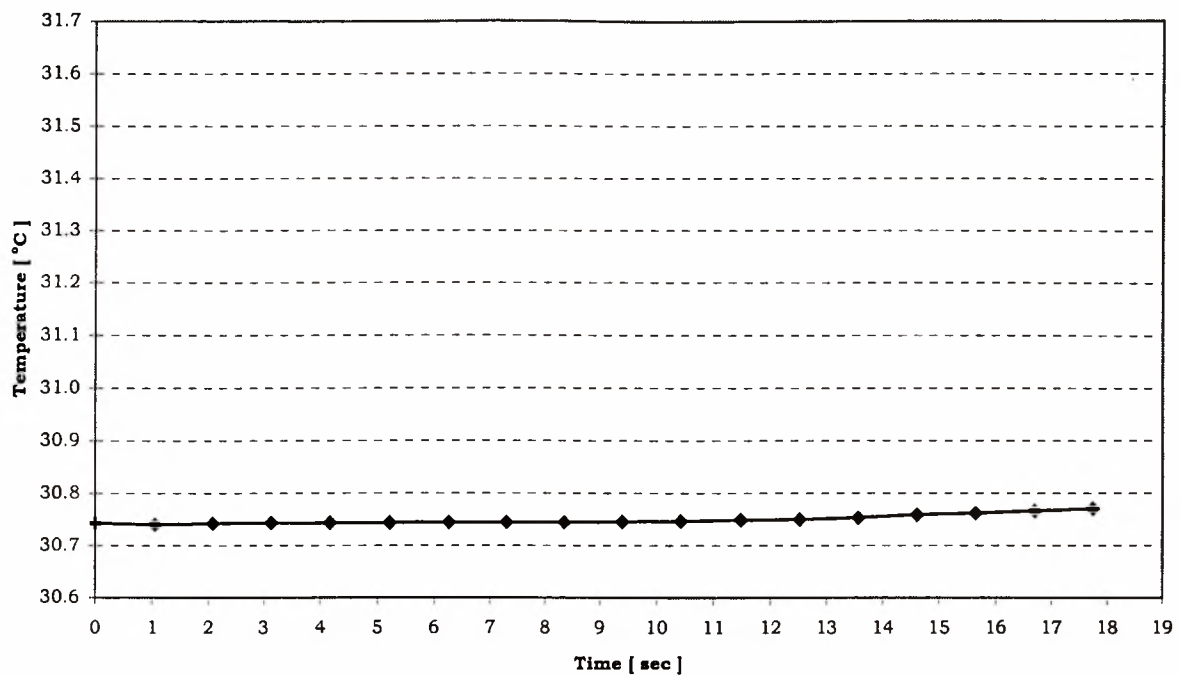
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	28	4	102.3	20	2596	100.0	\$2005



Σχήμα 5.2.1.45 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 28ης παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.1.46 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 28ης παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



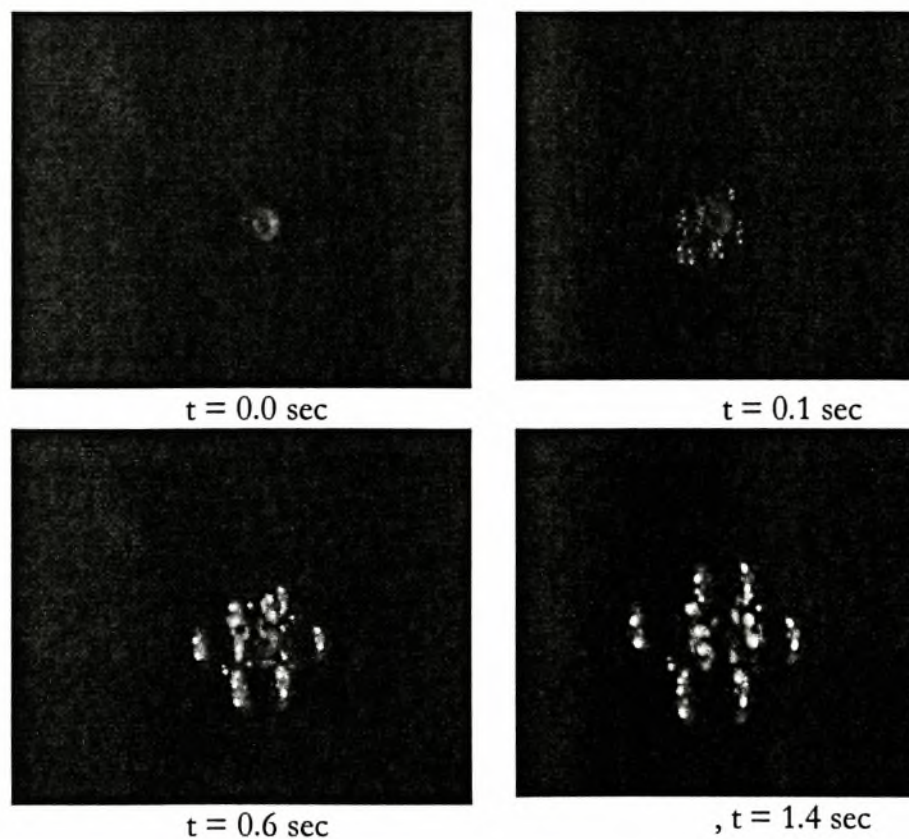
Σχήμα 5.2.1.47 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 28^η παραβολή της τρίτης μέρας.

Η μεταβολή της τιμής της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όπως προκύπτει από το βίντεο του πειράματος, είναι η εξής: [2.6 ~ 2.6 ~ 2.6 ~ 2.59 ~ 2.59 ~ 2.59 ~ 2.6] Volts. Η μέση τιμή των παραπάνω τιμών είναι τα 2.596 Volts ή 2596 mV, και γι' αυτή τη τιμή θα γίνει ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όσο και η θερμοκρασία του thermistor. Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, υπολογίζονται σε 102.3 mW και 100.0°C, αντίστοιχα.

Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας σε συνθήκες μικροβαρύτητας φαίνεται στο Σχ. 5.2.1.46. Όπως παρατηρήσαμε και στο πείραμα της προηγούμενης παραβολής, και σε αυτή την παραβολή δεν έχουμε χρονική υστέρηση μεταξύ της έναρξης του θερμικού παλμού και της ανάπτυξης της φυσαλίδας, αφού είναι το τρίτο σε σειρά πείραμα που γίνεται στο 4^ο κελί. Η συμπεριφορά της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας είναι ίδια με αυτή που παρατηρήσαμε στα προηγούμενα πειράματα. Η τελική τιμή της διαμέτρου στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας φθάνει τα 1280 μm.

5.2.1 Επτάνιο

Τα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό στο διάλυμα μας το κανονικό επτάνιο έγιναν κατά τη διάρκεια της τρίτης μέρας των παραβολικών πτήσεων. Συνολικά διεξήχθησαν 11 συνολικά πειράματα για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα. Από αυτά, στα δύο πρώτα δεν αναπτύχθηκε καμία φυσαλίδα γιατί πρώτον, το μέγεθος του θερμικού παλμού ήταν μικρό (10,000 & 15,000), και δεύτερον, γιατί ήταν τα πρώτα πειράματα που έγιναν στο 5° κελί. Από τα υπόλοιπα εννέα πειράματα, καταφέραμε να πάρουμε αξιοποιήσιμη πληροφορία μόνο από τα πέντε. Αυτό συνέβη γιατί με την έναρξη του θερμικού παλμού αναπτύσσονταν πολλές φυσαλίδες, οι οποίες μεγάλωναν πολύ γρήγορα, και είτε συγχωνεύονταν μεταξύ τους δημιουργώντας μεγαλύτερες φυσαλίδες, είτε αποχωρούσαν από το θερμαντήρα. Η συμπεριφορά αυτή των φυσαλίδων έκανε αδύνατη την ανάλυση των δεδομένων εικόνας σε αυτές τις περιπτώσεις. Τα παραπάνω γίνονται καλύτερα κατανοητά με τη βοήθεια του Σχ. 5.2.2.1, όπου απεικονίζονται τέσσερα frames από την αρχικά στάδια ανάπτυξης φυσαλίδων για πείραμα με επτάνιο κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας των πτήσεων. Το επίπεδο ισχύος για το πείραμα αυτό είναι 28,000. Παρατηρούμε ότι μέσα σε 0.1 sec από την έναρξη του θερμικού παλμού, αναπτύσσονται πολλές περισσότερες από μία φυσαλίδα, οι οποίες μεγαλώνουν πολύ γρήγορα, κάνοντας αδύνατη κάθε προσπάθεια για ανάλυση των δεδομένων εικόνας και μέτρησης της διαμέτρου των φυσαλίδων.



Σχήμα 5.2.2.1 Τέσσερις διαδοχικές εικόνες από το πείραμα με επτάνιο που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας. Στο πρώτο frame, για $t=0$ sec, απεικονίζεται ο θερμαντήρας, πριν την έναρξη του θερμικού παλμού.

Το πρώτο από τα πειράματα, με χρησιμοποιούμενο υγρό το επτάνιο, για το οποίο καταφέραμε να πάρουμε σημαντική πληροφορία, ήταν αυτό που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας των πτήσεων. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού ήταν 20,000 και η χρονική του διάρκεια 20 sec. Το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν \$2004, δηλαδή coarse mode, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη δεν ήταν σταθερή. Η λειτουργία του θερμοστάτη σε coarse mode, οφείλεται προφανώς στο γεγονός ότι το πείραμα που έγινε κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής ήταν το πρώτο που διεξήχθη στο 7^ο κελί, και δεν είχε μεσολαβήσει αρκετό χρονικό διάστημα μεταξύ της εισόδου του κελιού στη μονάδα κελιού της πειραματικής μας συσκευής και της έναρξης του θερμικού παλμού. Πάντως αποκλείεται η λειτουργία του θερμοστάτη σε coarse mode να οφείλεται σε χαμηλή θερμοκρασία του διαλύματος, γιατί αυτή όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.5, είναι αρκετά υψηλότερη (33.150°C) από τη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη (32.0°C).

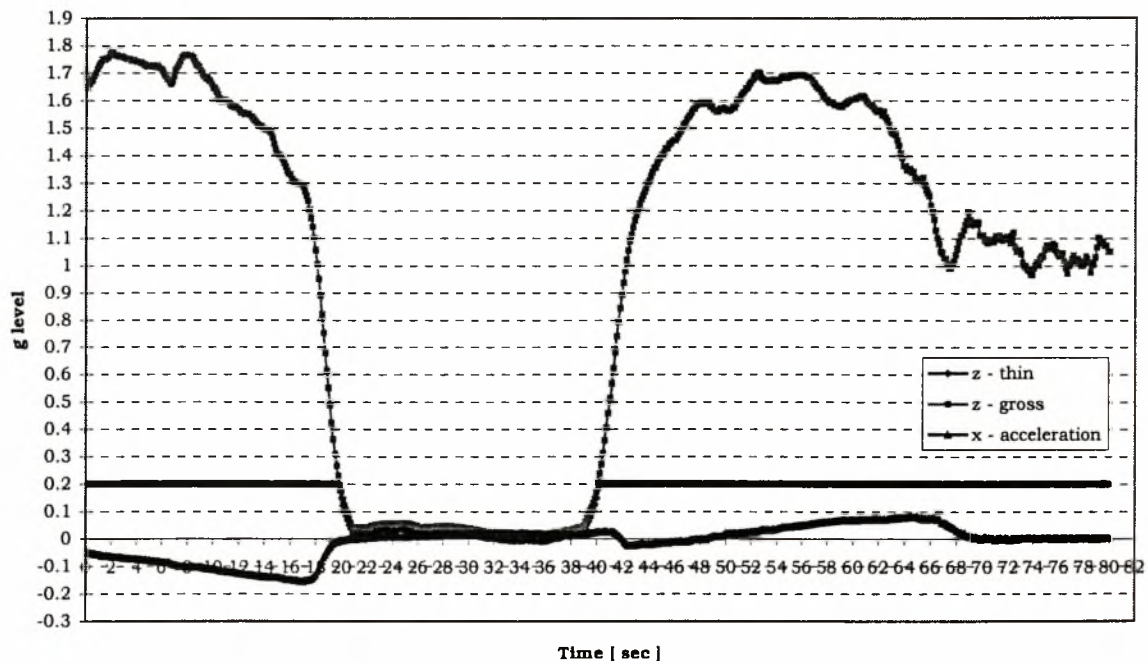
Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής είναι πολύ καλή, όπως φαίνεται και από το Σχ. 5.2.2.2, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η καμπύλη μεταβολής της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , η οποία μετράται από το data logger φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.3. Η τιμή της, εξαιτίας της ύπαρξης του voltage divider στη συνδεσμολογία των αντιστάσεων κατά τη διάρκεια της τρίτης μέρας των πειραμάτων, είναι η μισή από την πραγματική, γι' αυτό για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού και της θερμοκρασίας του thermistor, χρησιμοποιούμε τη διπλάσια τιμή απ' αυτή που φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.3. Αυτό ισχύει για όλα τα πειράματα που έγιναν κατά τη διάρκεια της τρίτης μέρας των πτήσεων.

Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού $V_{DL}/2$, τώρα, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.3, αρχικά παίρνει τη μέγιστη τιμή της κοντά στα 450 mV, και στη συνέχεια κυμαίνεται μεταξύ 275 και 340 mV. Ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, έγινε με τη τιμή των $640 = 2 \times 320$ mV, και υπολογίστηκαν σε 27.4 mW και 52.0°C, αντίστοιχα.

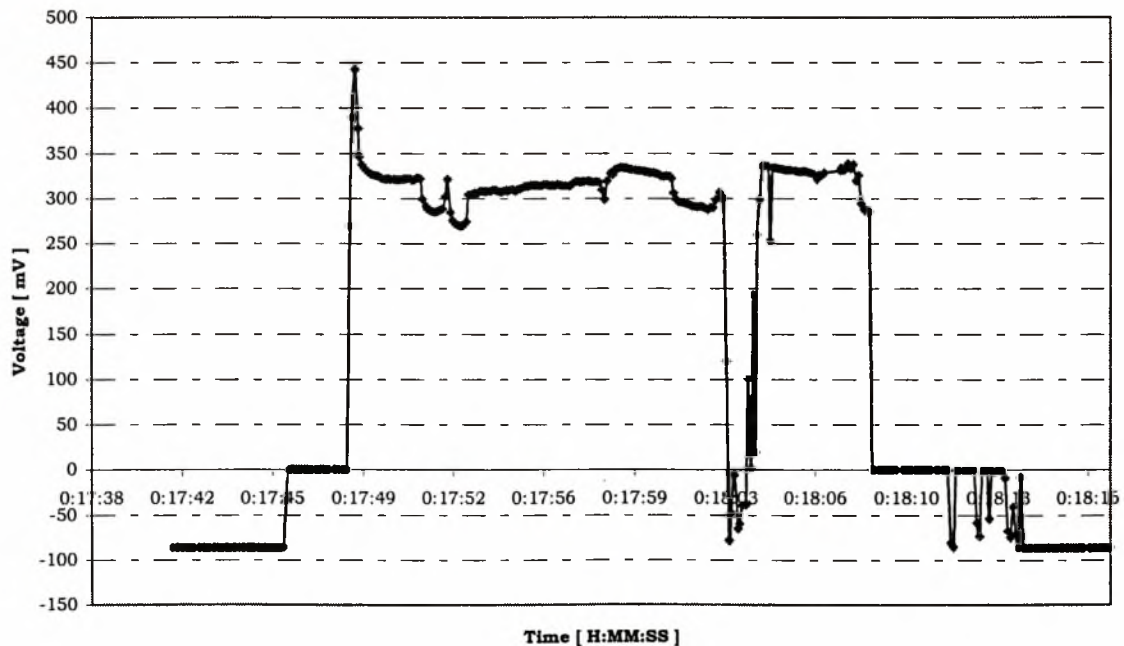
Στο Σχ. 5.2.2.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του κώδικα υπολογισμού της διαμέτρου της φυσαλίδας για το πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής. Αν παρατηρήσει κανείς το σχήμα αυτό, θα μπορούσε να συμπεράνει ότι κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού αναπτύχθηκαν πέντε φυσαλίδες, αφού τόσες είναι οι καμπύλες του σχήματος, και ότι κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης τους δεν αναπτύσσονταν άλλες φυσαλίδες. Στην πραγματικότητα όμως, κατά τη διάρκεια του πειράματος αναπτύσσονται παραπάνω από μία φυσαλίδες για τις οποίες είναι αδύνατον να μετρήσουμε τη διάμετρο τους ταυτόχρονα.

Πιο συγκεκριμένα, με την έναρξη του θερμικού παλμού αναπτύσσεται μία φυσαλίδα η οποία μετά από μερικά δευτερόλεπτα περνά στο πίσω μέρος του θερμαντήρα. Ενώ η πρώτη φυσαλίδα συνεχίζει την ανάπτυξη της, αναπτύσσεται και μία δεύτερη νέα φυσαλίδα στο μπροστινό μέρος του θερμαντήρα. Οι δύο φυσαλίδες στη συνέχεια συγχωνεύονται (coalescence) σε μία πολύ μεγαλύτερη φυσαλίδα, η οποία ενώ αναπτύσσεται, αναπτύσσονται και νέες πολύ μικρότερες φυσαλίδες στην επιφάνεια του θερμαντήρα, οι οποίες αναχωρούν πολύ γρήγορα. Η μεγάλη φυσαλίδα, στα 10 sec από την έναρξη του θερμικού παλμού, φθάνοντας σε κάποιο κρίσιμο μέγεθος αποκολλάται από το θερμαντήρα, και αμέσως αναπτύσσεται μία νέα φυσαλίδα. Η συμπεριφορά αυτή της ανάπτυξης των φυσαλίδων επαναλαμβάνεται περίπου με τον ίδιο τρόπο και στη συνέχεια του πειράματος.

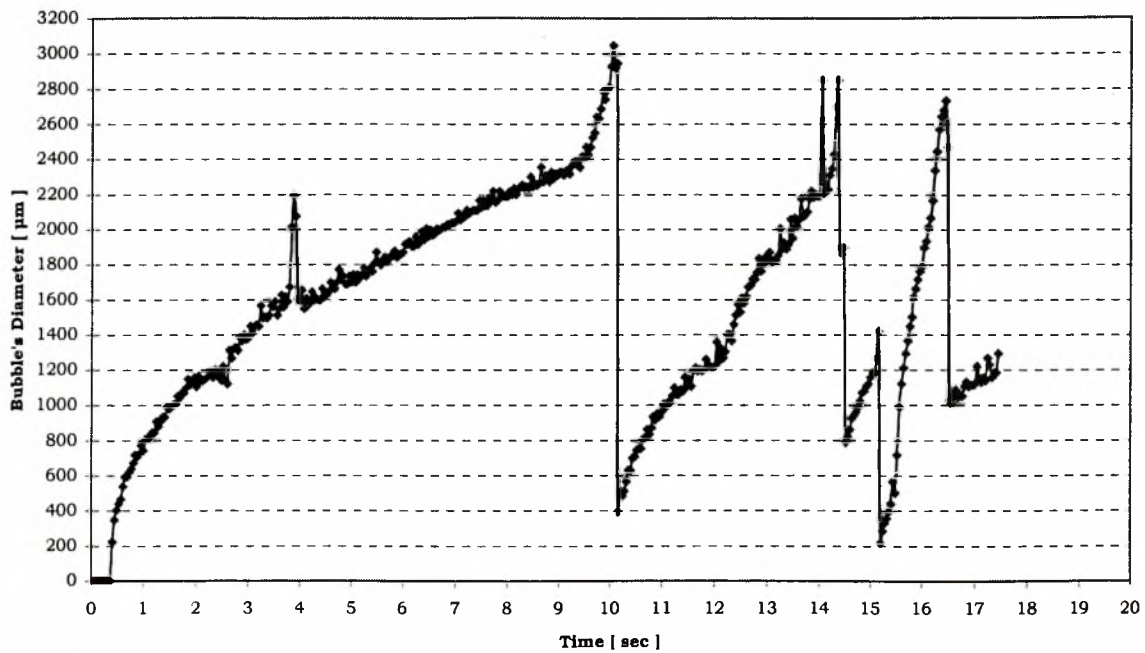
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	$V_{DL}/2$ [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	6	7	27.4	20	320	52.0	\$2004



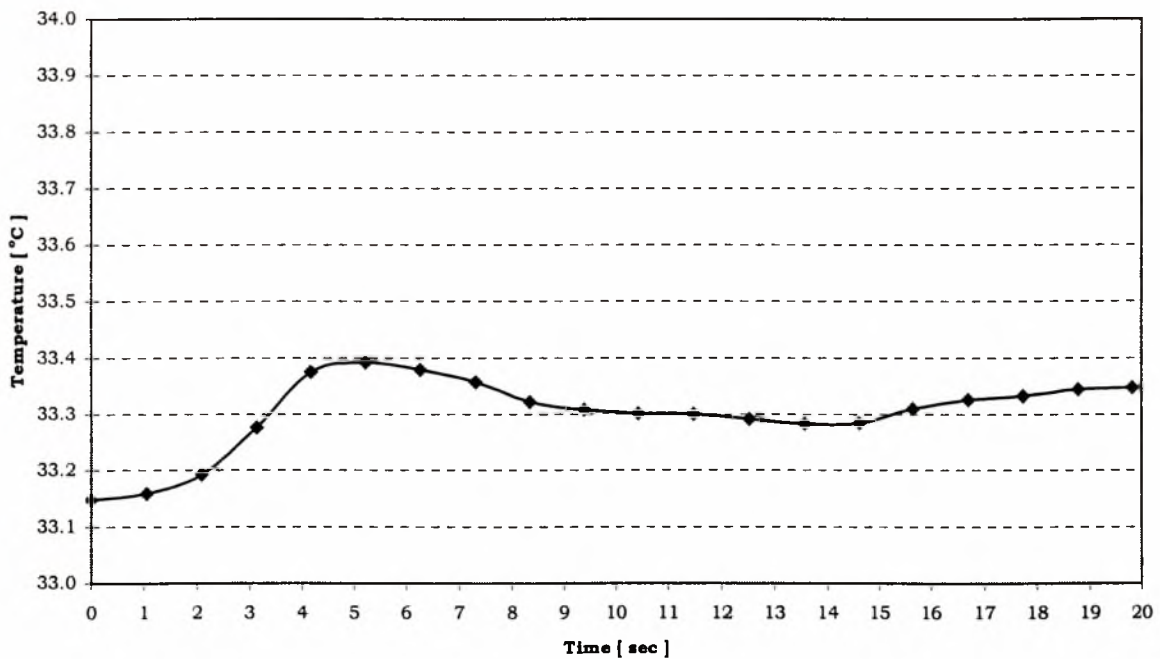
Σχήμα 5.2.2.2 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.3 Μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, από το data logger, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού της 6ης παραβολής της τρίτης μέρας.



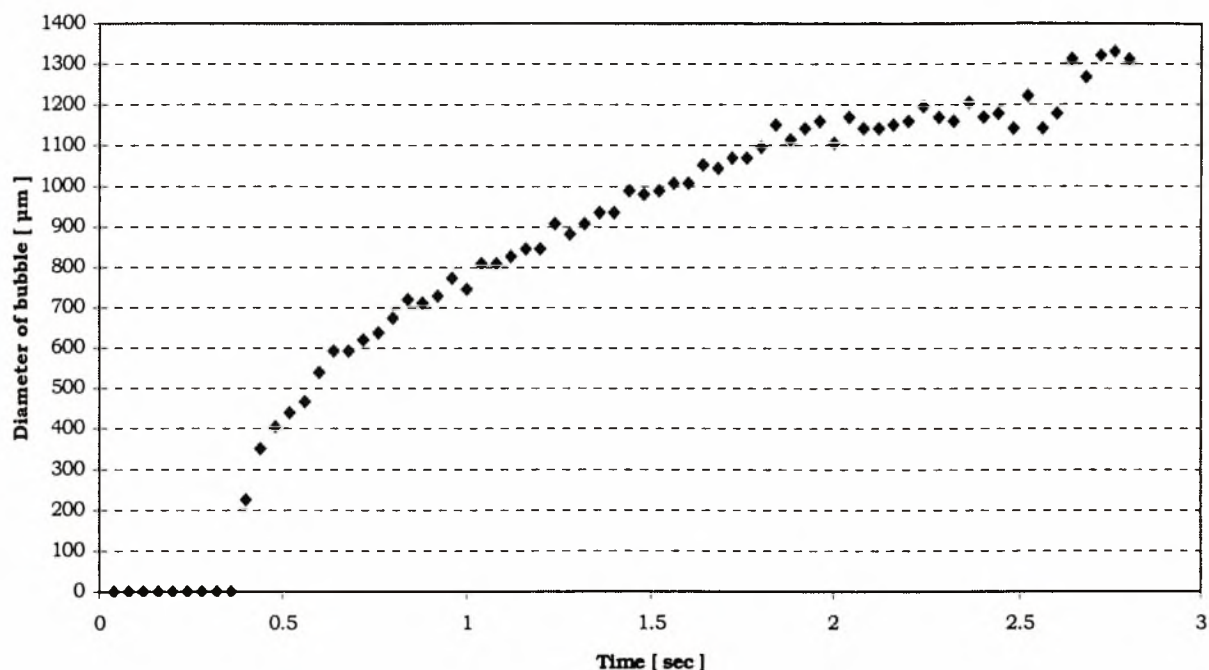
Σχήμα 5.2.2.4 Μεταβολή της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 6^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.2.5 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 6^η παραβολή της τρίτης μέρας των πειραμάτων.

Από τα αποτελέσματα του κώδικα υπολογισμού της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας για το πείραμα της 6^{ης} παραβολής, η μόνη αξιόπιστη πληροφορία που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι το τμήμα της καμπύλης του Σχ. 5.2.2.4 για τα 2.8 πρώτα sec του θερμικού παλμού, για τα οποία είμαστε σίγουροι ότι έχει αναπτυχθεί μία μόνο φυσαλίδα της οποίας τη διάμετρο μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια. Το τμήμα αυτό της καμπύλης

φαίνεται απομονωμένο στο Σχ. 5.2.2.6. Παρατηρούμε επίσης, ότι μέσα σε 2.8 δευτερόλεπτα η διάμετρος της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας έχει φθάσει στα 1300 μm , άρα μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της φυσαλίδας είναι πολύ μεγάλος. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι μέσα σε 0.04 sec (το πρώτο σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στο πρώτο frame του βίντεο του πειράματος) το μέγεθος της φυσαλίδας έχει φθάσει στα 225 μm . Θα πρέπει επίσης ν' αναφέρουμε ότι οι τιμές της καμπύλης του Σχ. 5.2.2.6 για το χρονικό διάστημα από $t = 2 - 2.64$, είναι μικρότερες από τις πραγματικές τιμές που παίρνει η διάμετρος της φυσαλίδας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνο το χρονικό διάστημα η φυσαλίδα βρίσκεται πίσω από θερμαντήρα, και εξαιτίας του κακού φωτισμού το μέγεθος της φαίνεται μικρότερο.



Σχήμα 5.2.2.6 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας για τα πρώτα 2.8 sec του πειράματος της 6^{ης} παραβολής.

Στο Σχ. 5.2.2.5 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Η θερμοκρασία USR2 αρχικά αυξάνεται και φθάνει τους 33.4°C περίπου, και στη συνέχεια μειώνεται στους 33.3°C, όπου και παραμένει σχεδόν αμετάβλητη μέχρι το τέλος του πειράματος. Οι αυξομειώσεις αυτές πάντως, είναι πολύ μικρές για να μας δώσουν κάποια αξιοποιήσιμη πληροφορία.

Με τον ίδιο τρόπο που αναπτύσσονταν οι φυσαλίδες κατά τη διάρκεια του πειράματος της 6^{ης} παραβολής, αναπτύσσονται και οι φυσαλίδες κατά τη διάρκεια του πειράματος της 7^{ης} παραβολής, μόνο που τώρα δεν έχουμε τόσο έντονο το φαινόμενο της ταυτόχρονης ανάπτυξης πολλών μικρότερων φυσαλίδων, κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της κύριας μεγαλύτερης φυσαλίδας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος της 7^{ης} παραβολής το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού είναι μικρότερο από το προηγούμενο πείραμα, και ίσο με 15,000. Η χρονική διάρκεια του θερμικού παλμού είναι ίση με 20 sec.

Οι φυσαλίδες αναπτύσσονται η μία μετά την άλλη, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.9. Ο έντονος θόρυβος που φαίνεται στη καμπύλη του Σχ. 5.2.2.9, μετά τα 13 sec από την έναρξη του θερμικού παλμού, οφείλεται στο γεγονός ότι μία φυσαλίδα που αναχώρησε από το θερμοαντήρα μπήκε πολύ κοντά στην οπτική δίοδο της κάμερας και οι αντανακλάσεις της δημιούργησαν μεγάλο πρόβλημα θορύβου στο κώδικα υπολογισμού της διαμέτρου των φυσαλίδων.

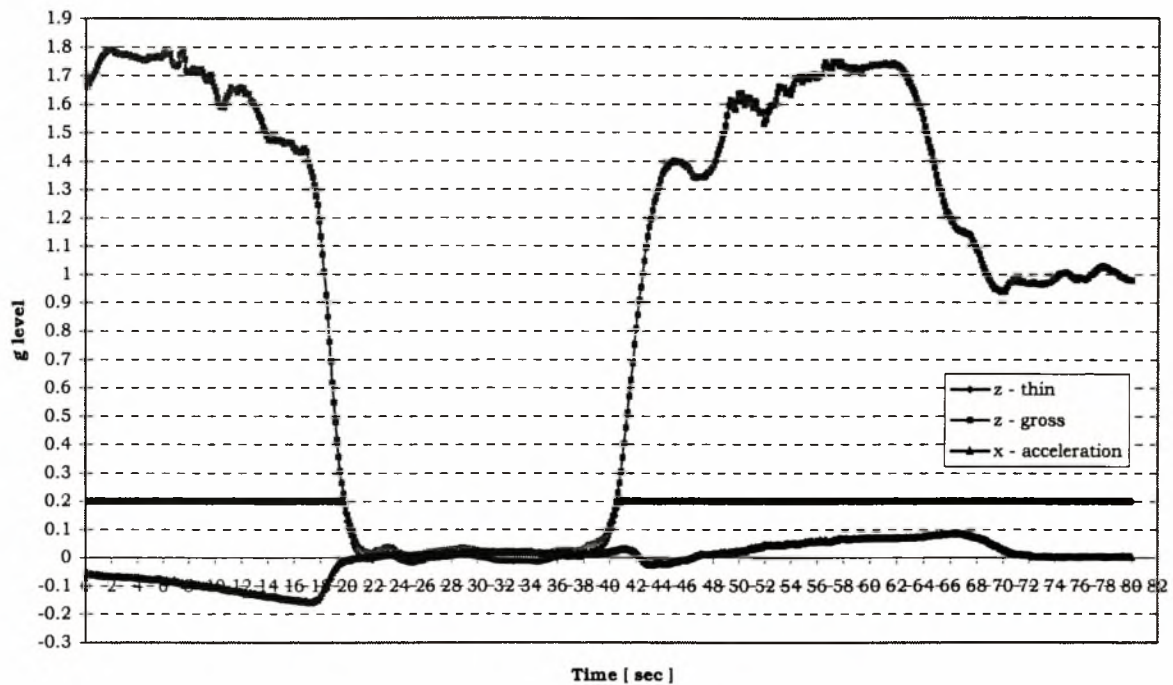
Από τη καμπύλη του Σχ. 5.2.2.9, η μόνη αξιόπιστη πληροφορία που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι το τμήμα της καμπύλης για τα πρώτα 3.12 sec του θερμικού παλμού, για τα οποία είμαστε σίγουροι ότι έχει αναπτυχθεί μία μόνο φυσαλίδα, της οποίας τη διάμετρο μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια. Το τμήμα αυτό της καμπύλης φαίνεται απομονωμένο στο Σχ. 5.2.2.10. Η διάμετρος της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας έχει φθάσει στο τέλος των 3.12 δευτερολέπτων στα 1200 μm , άρα μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της φυσαλίδας είναι πολύ μεγάλος.

Το πείραμα αυτό είναι το δεύτερο σε σειρά που γίνεται στο 7^ο κελί, και θα περιμέναμε το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια του πειράματος να ήταν \$2005, αλλά αυτό κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν coarse mode. Αποκλείεται η λειτουργία του θερμοστάτη σε coarse mode να οφείλεται σε χαμηλή θερμοκρασία του διαλύματος, γιατί αυτή όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.11, είναι αρκετά υψηλότερη (33.744°C) από τη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμοστάτη (32.0°C). Κατά πάσα περίπτωση η λειτουργία του θερμοστάτη σε coarse mode οφείλεται στο γεγονός ότι κάποια άλλη από τις θερμοκρασίες ρύθμισης της λειτουργίας του είναι πιο χαμηλή από τους 32.0°C. Από τα δεδομένα των θερμοκρασιών που έχουμε από το πρόγραμμα Snoop, βλέπουμε ότι η θερμοκρασία USR1 είναι αρκετά χαμηλότερη από τους 32.0°C πριν την έναρξη του θερμικού παλμού, και συγκεκριμένα ίση με 29.17°C, άρα τα παραπάνω επιβεβαιώνονται.

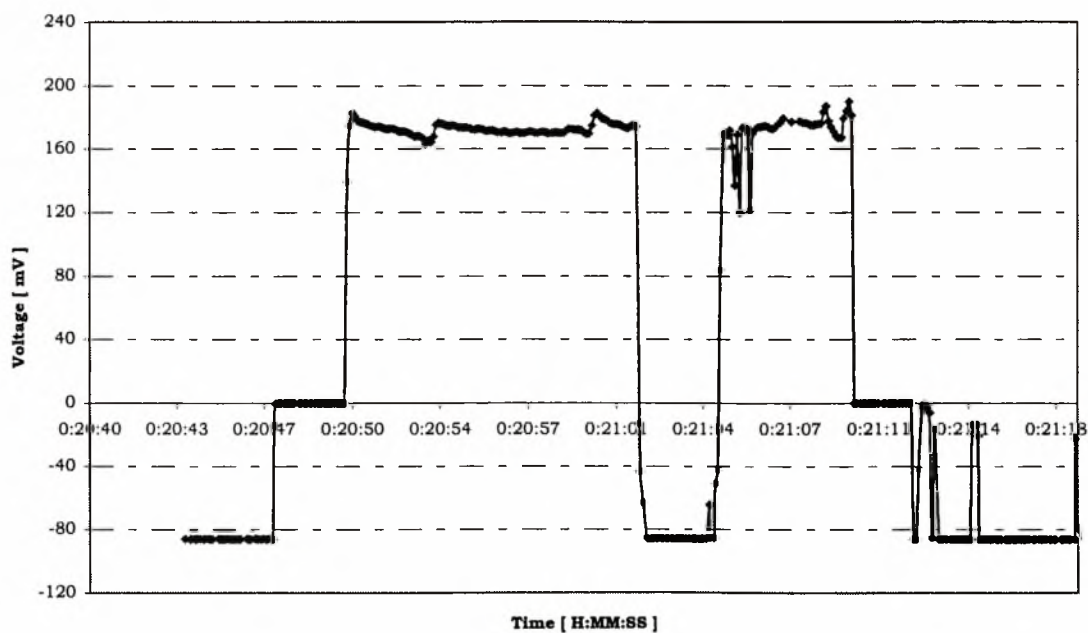
Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής είναι πολύ καλή, όπως φαίνεται και από το Σχ. 5.2.2.7, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η καμπύλη μεταβολής της διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, η οποία μετράται από το data logger φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.8. Η τιμή της, για τα πρώτα 12 sec περίπου του θερμικού παλμού, κυμαίνεται αρχικά από τα 180.5 mV στα 164.2, στη συνέχεια αυξάνεται και πηγαίνει στα 175.5 mV, και αρχίζει να μειώνεται μέχρι τα 169.7 mW. Τέλος, παρουσιάζει ένα μέγιστο στα 182.4 mW, και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τα 174.2 mW. Το αξιοθαύμαστο είναι ότι τα δύο ελάχιστα που παρουσιάζονται στην παραπάνω μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, στα 4 και 10 sec μετά την έναρξη του θερμικού παλμού, αντιστοιχούν, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχ. 5.2.2.9, στα σημεία αποχώρησης των φυσαλίδων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, οφείλεται στην ανάπτυξη της φυσαλίδας

Ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, έγινε με τη τιμή των $350.6 = 2 \times 175.3 \text{ mV}$, και υπολογίστηκαν σε 12.4 mW και 40.0°C, αντίστοιχα.

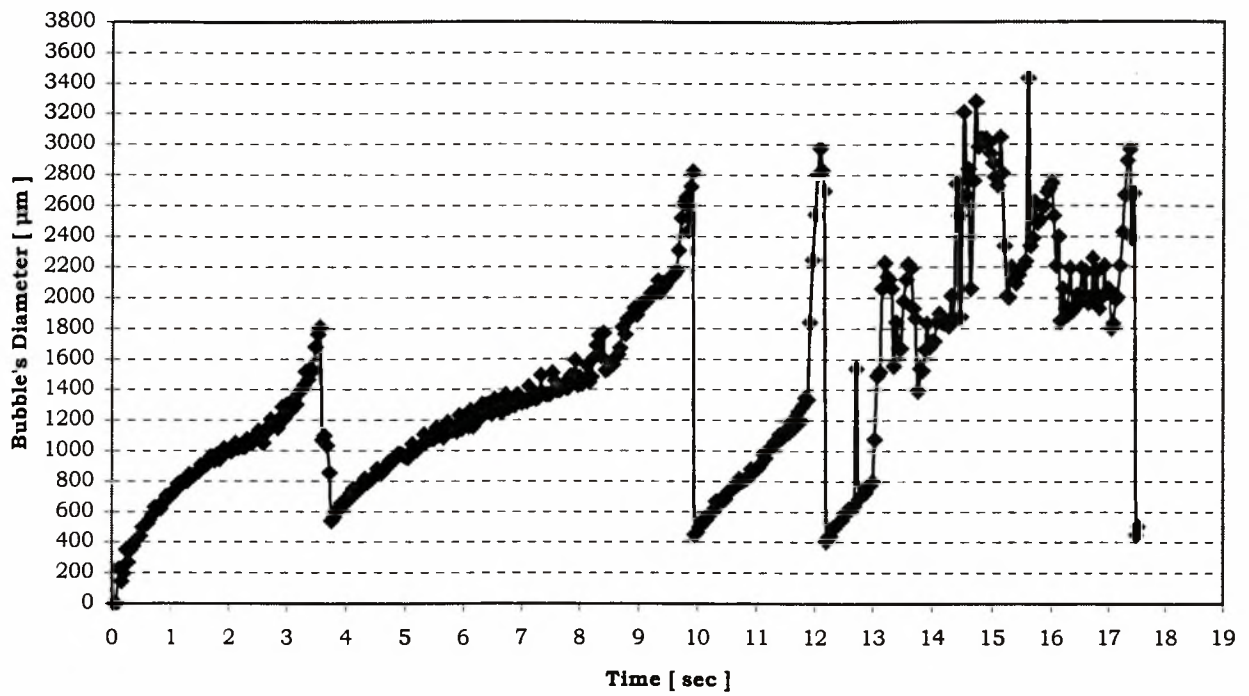
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	$V_{DL}/2$ [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	7	7	12.4	20	175.3	40.0	\$2004



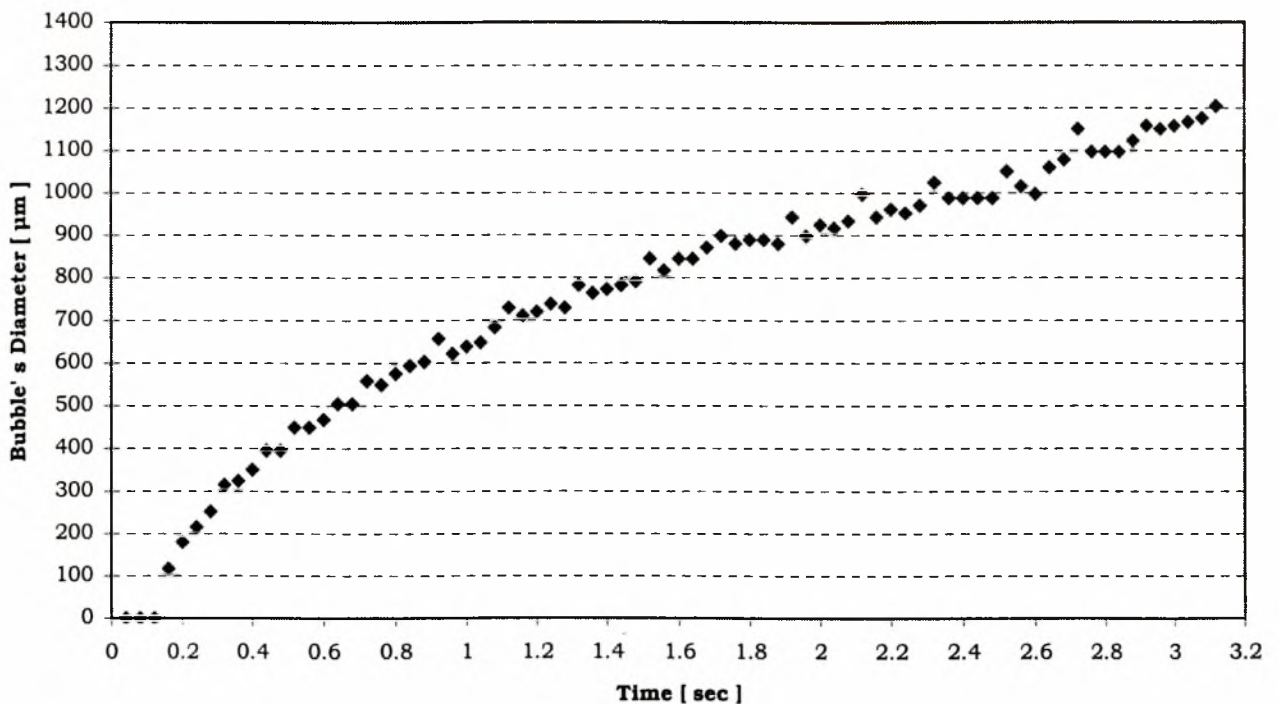
Σχήμα 5.2.2.7 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 7^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



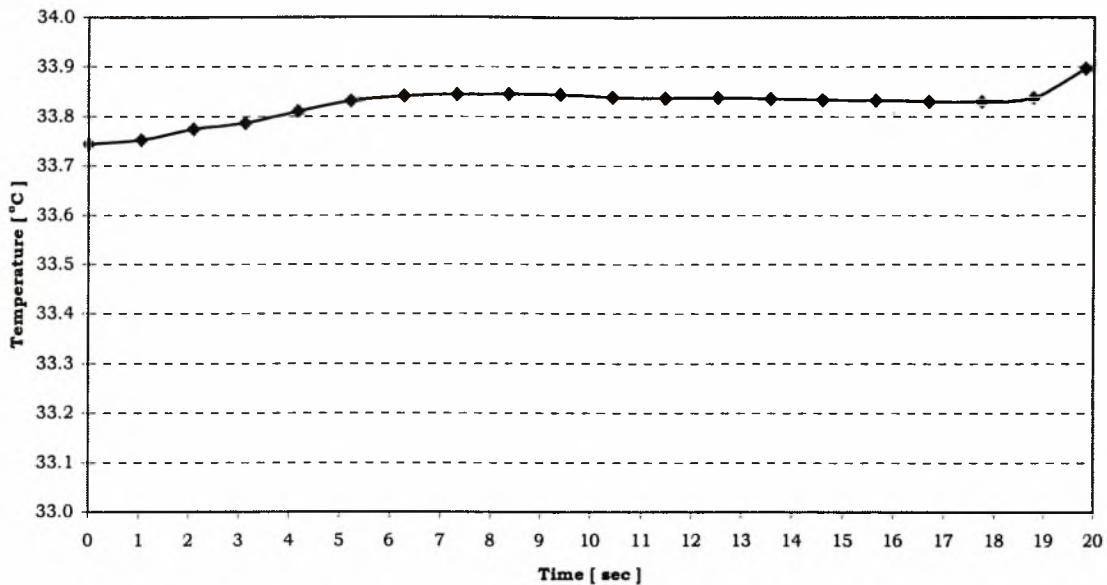
Σχήμα 5.2.2.8 Μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, από το data logger, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού της 7^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.9 Μεταβολή της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 7^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



Σχήμα 5.2.2.10 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας για τα πρώτα 3.12 sec του πειράματος της 7^{ης} παραβολής.



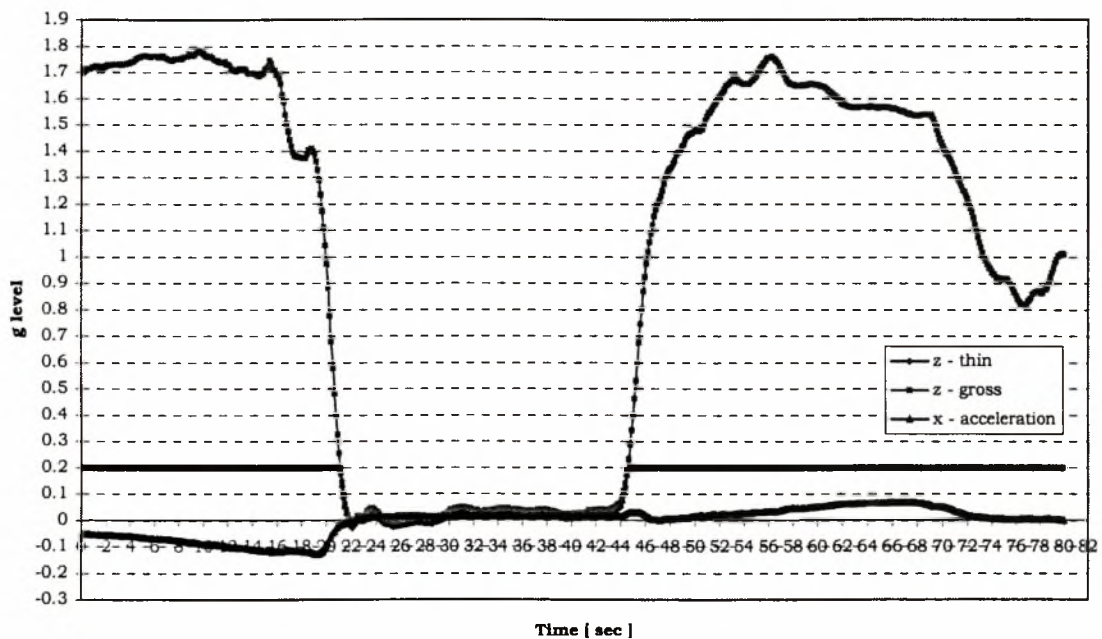
Σχήμα 5.2.2.11 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 7^η παραβολή της τρίτης μέρας.

Το πείραμα που έγινε κατά τη διάρκεια της 11^{ης} παραβολής ήταν το πρώτο που διεξήχθη στο 9^ο κελί κατά τη διάρκεια της τρίτης μέρας των πτήσεων. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού ήταν 15,000, και η χρονική του διάρκεια ίση με 20 δευτερόλεπτα. Στο Σχ. 5.2.2.12 απεικονίζεται η μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι αρκετά καλή.

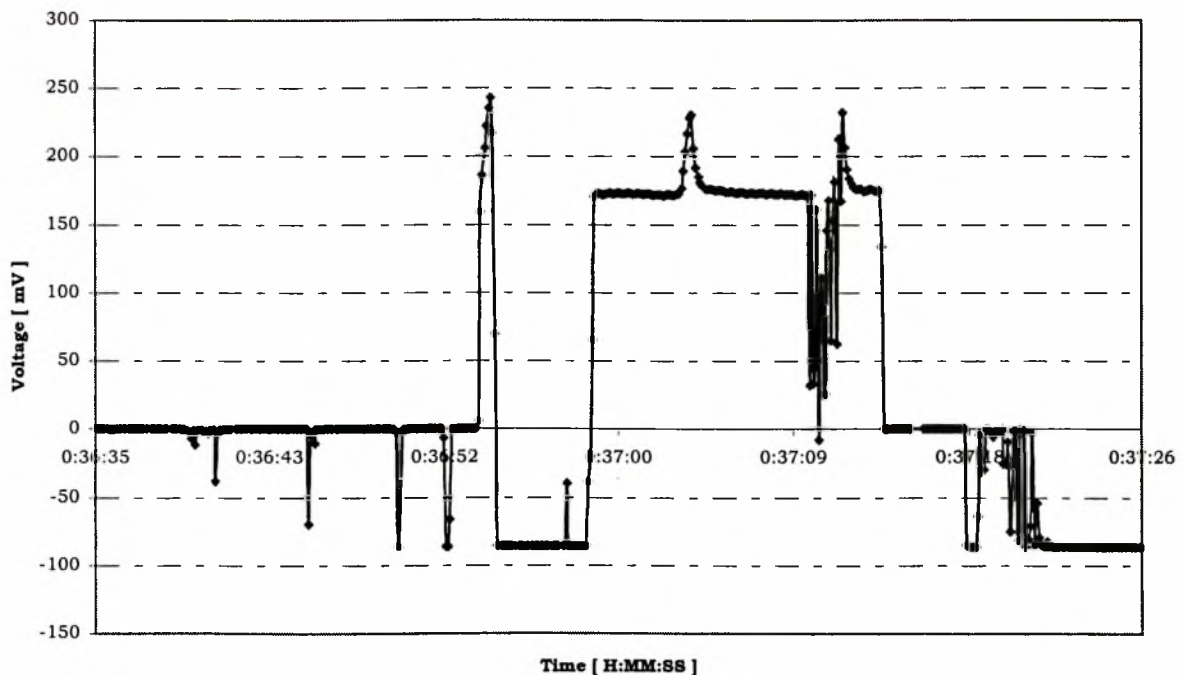
Στο Σχ. 5.2.2.13 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της μετρούμενης από το data logger διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$. Παρατηρούμε ότι αυτή παρουσιάζει μία πολύ έντονη μεταβολή κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, η οποία προφανώς οφείλεται σε καταγραφόμενο θόρυβο. Η καμπύλη μεταβολής της $V_{DL}/2$ παρουσιάζει τρία μέγιστα στα 240 mV περίπου, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις καταγραφόμενες τιμές της όπως αυτές έχουν καταγραφεί από τους ερευνητές στο βίντεο του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού V_{DL} , όπως αυτή έχει καταγραφεί στο βίντεο του πειράματος είναι: [0.79 ~ 0.79 ~ 0.74 ~ 0.60 ~ 0.35 ~ 0.55 ~ 0.55 ~ 0.45 ~ 0.35] Volts. Η μέση τιμή των παραπάνω τιμών είναι τα 0.574 Volts ή 574 mV, και γι' αυτή τη τιμή θα γίνει ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δόθηκε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όσο και η θερμοκρασία του thermistor. Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, υπολογίζονται σε 17.0 mW και 58.0°C, αντίστοιχα.

Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος φαίνονται στο Σχ. 5.2.2.14. Κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού αναπτύσσονται τρεις κύριες φυσαλίδες, όσες και οι καμπύλες του Σχ. 5.2.2.14. Η κάθε μία τους είναι προϊόν της συγχώνευσης δύο μικρών φυσαλίδων, οι οποίες αναπτύσσονται με την έναρξη του θερμικού παλμού, όσον αφορά την πρώτη, με την αποχώρηση της πρώτης φυσαλίδας, όσον αφορά τη

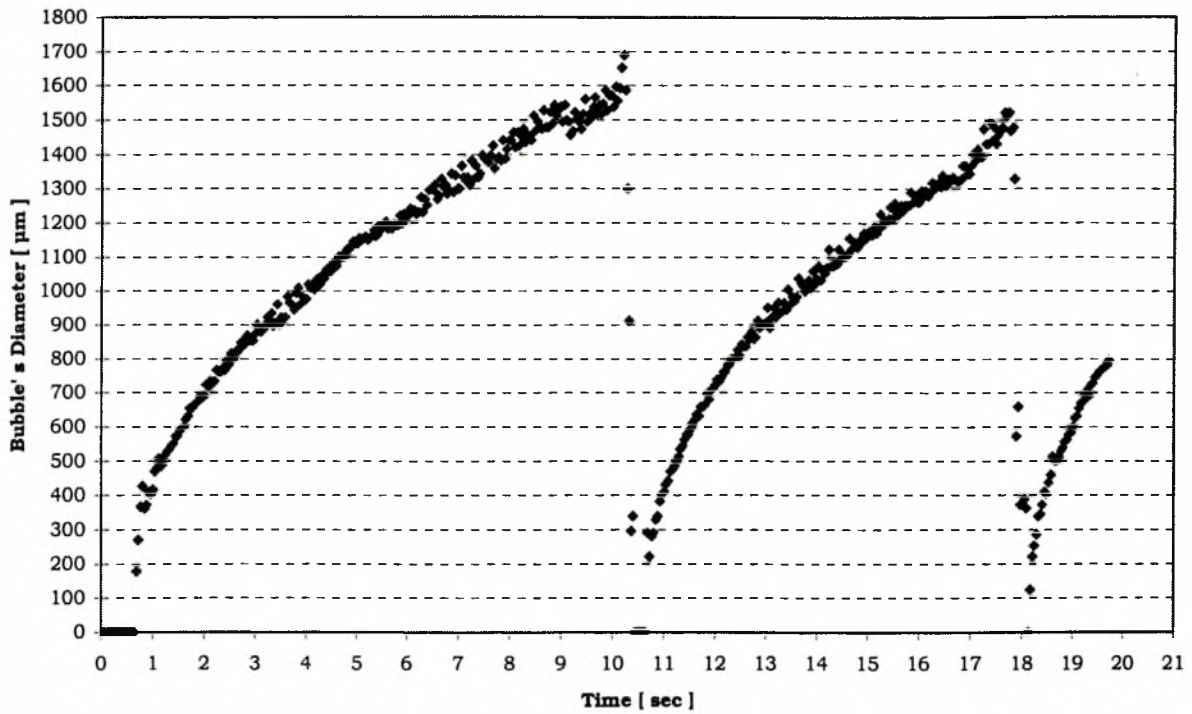
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	$V_{DL} / 2$ [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	11	9	17.0	20	287	58.0	\$2005



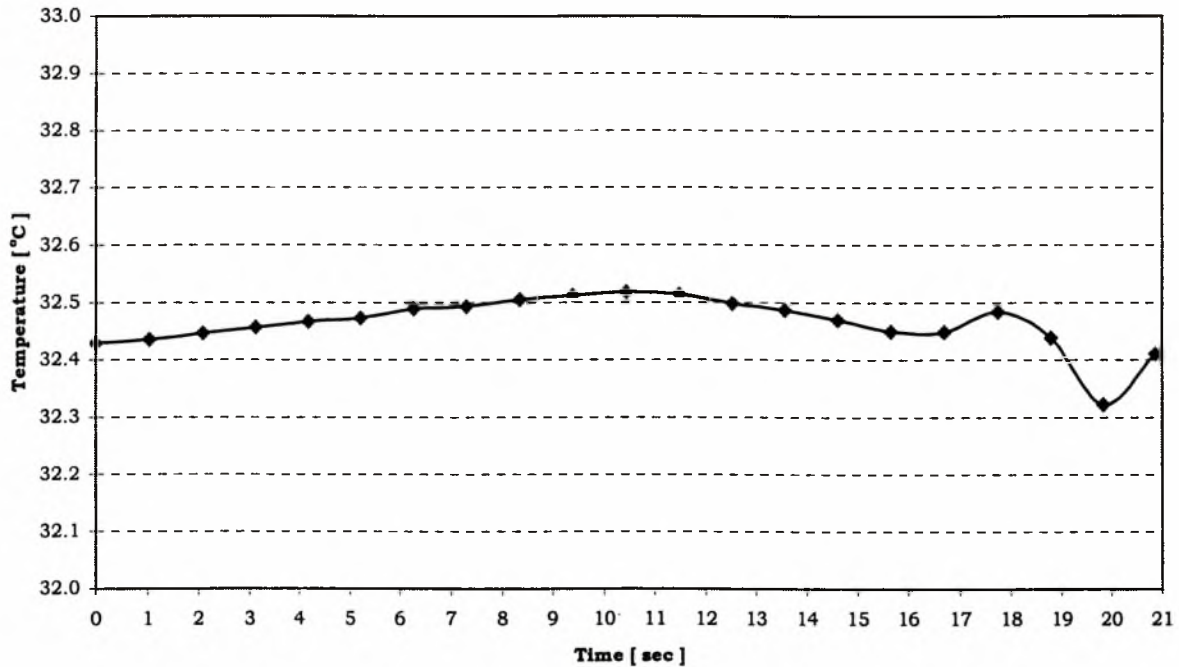
Σχήμα 5.2.2.12 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.13 Μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.14 Μεταβολή της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

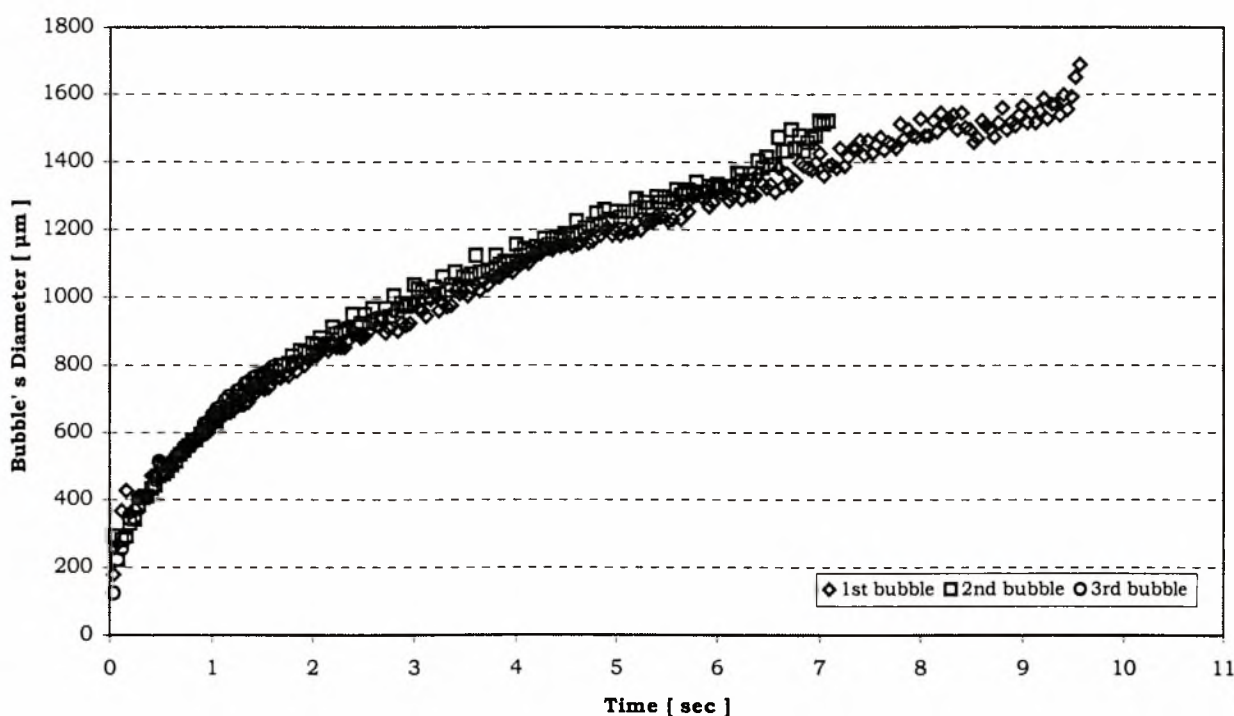


Σχήμα 5.2.2.15 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 11^η παραβολή της τρίτης μέρας.

δεύτερη, και με την αποχώρηση της δεύτερης φυσαλίδας, όσον αφορά τη τρίτη. Δυστυχώς τα αρχικά στάδια της ανάπτυξης των φυσαλίδων, όπου η ταχύτητα εξέλιξης των φαινομένων είναι

εκρηκτική, δεν μπορούν να διερευνηθούν περισσότερο, αφού για να το κάνουμε αυτό χρειαζόμαστε να πάρουμε από το βίντεο περισσότερα frames το δευτερόλεπτο. Η μορφή των καμπυλών μεταβολής της διαμέτρου των φυσαλίδων είναι η ίδια με αυτή που έχουμε παρατηρήσει και στα αποτελέσματα των προηγούμενων πειραμάτων, αρχικά παραβολική, και στη συνέχεια γραμμική. Το τελικό μέγεθος της πρώτης φυσαλίδας είναι ίσο με 1600 μm , της δεύτερης ίσο με 1500 μm περίπου, και της τρίτης στα 800 μm , γεγονός που οφείλεται στο πέρας του θερμικού παλμού στα 20 sec.

Η επαναληψιμότητα των καμπυλών μεταβολής της διαμέτρου των τριών αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.16. Αυτή είναι πολύ καλή και για τις τρεις φυσαλίδες, εκτός από τα αρχικά στάδια ανάπτυξης που δεν έχουμε αρκετά δεδομένα.

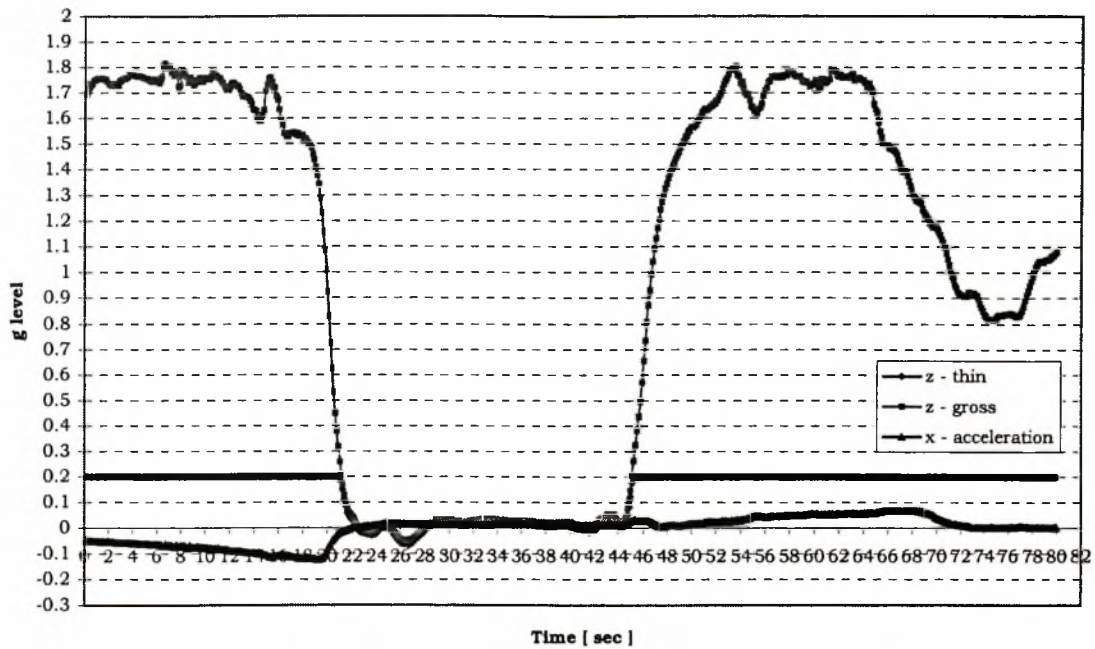


Σχήμα 5.2.2.16 Εξέταση επαναληψιμότητας μεταξύ των τριών αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.

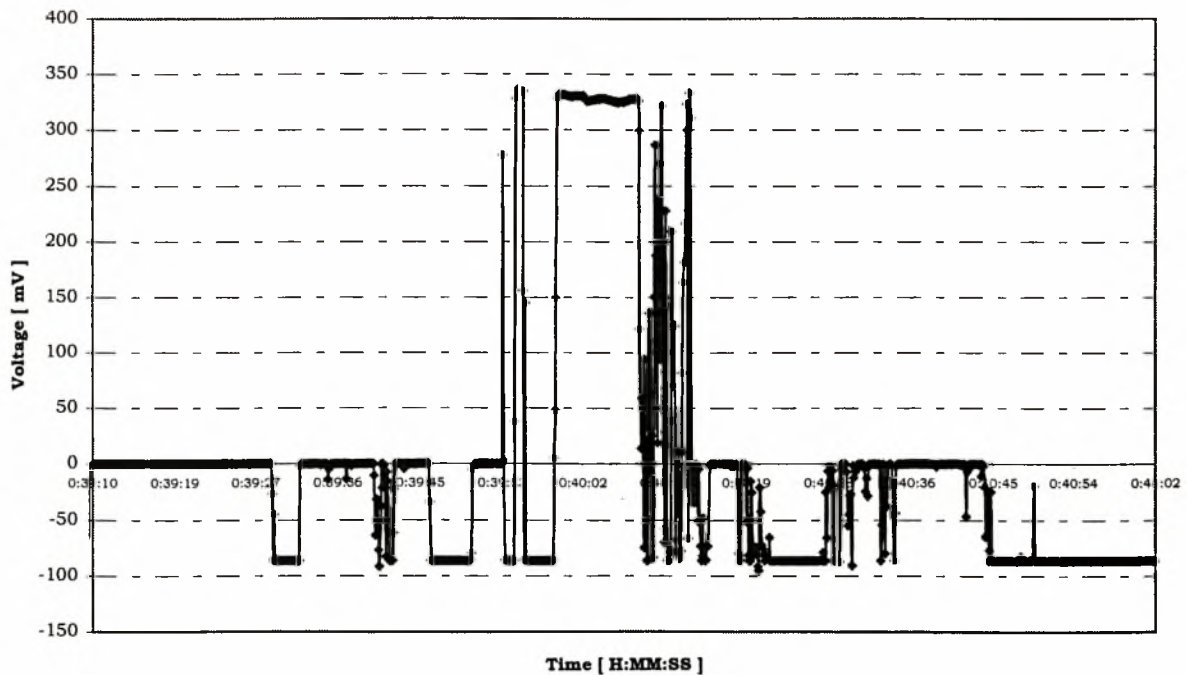
Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος που διεξήχθη στη 12^η παραβολή της τρίτης μέρας ήταν 20,000, ενώ η χρονική του διάρκεια ήταν 20 δευτερόλεπτα. Το πείραμα ήταν το δεύτερο σε σειρά που διεξήχθη στο 9^ο κελί. Το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής ήταν \$2005, δηλαδή fine mode, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν σταθερή, και έγινε ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας της μονάδας κελιού και των κλίσεων της.

Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής ήταν πολύ καλή, όπως μπορεί να συμπεράνει κανείς από το Σχ. 5.2.2.17 όπου απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής.

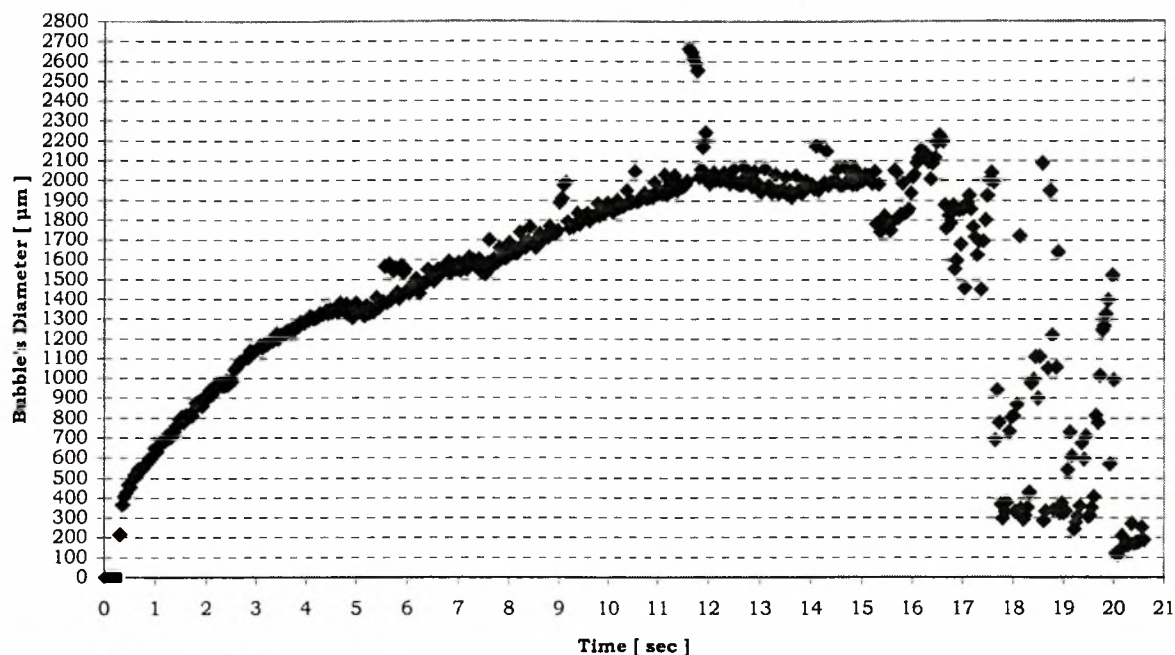
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	$V_{DL} / 2$ [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	12	9	27.9	20	330	51.0	\$2005



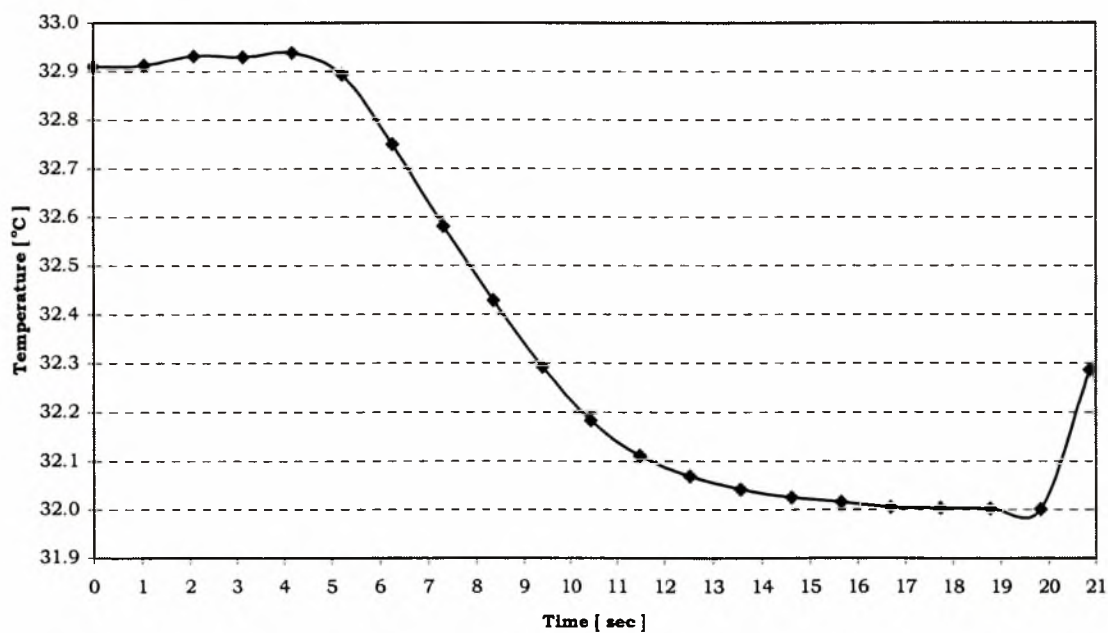
Σχήμα 5.2.2.17 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 12^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.18 Μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού της 12^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.19 Μεταβολή της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 12^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

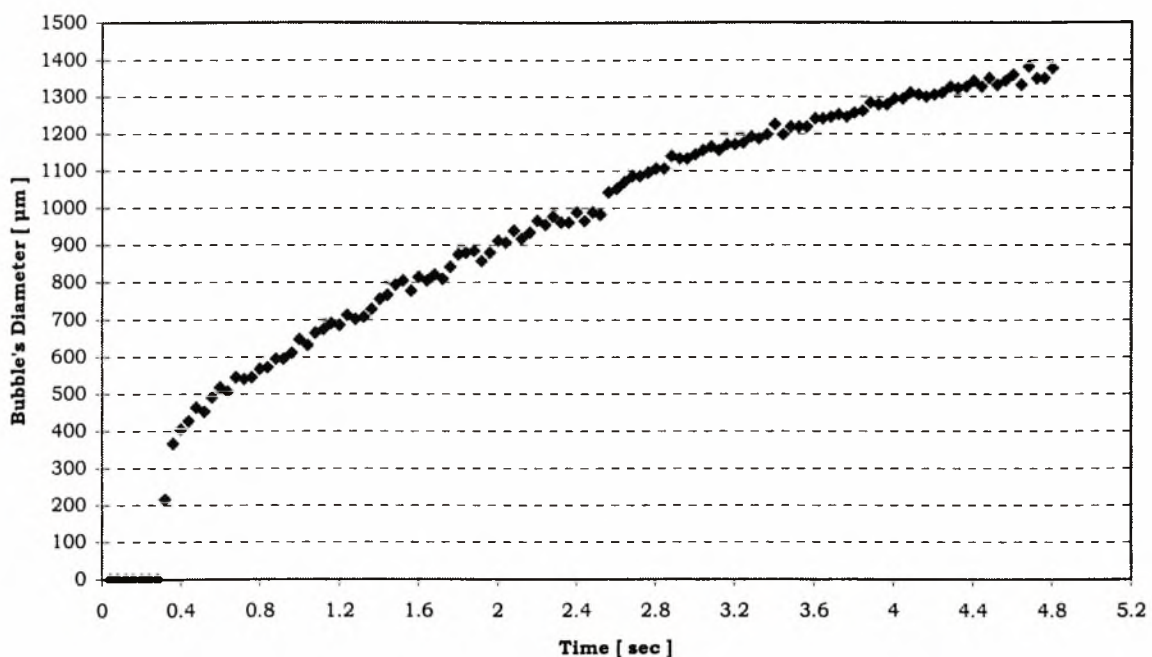


Σχήμα 5.2.2.20 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 12^η παραβολή της τρίτης μέρας.

Η καμπύλη μεταβολής της διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 5.2.2.18, παρουσιάζει έντονες μεταβολές αρχικά, στη συνέχεια σταθεροποιείται στο επίπεδο των 330 mV, και στη συνέχεια μεταβάλλεται πάλι πολύ έντονα. Η μέγιστη καταγραφόμενη τιμή των 330 mV η οποία καταγράφηκε από το data logger, επιβεβαιώνεται και από τις τιμές που αναφέρουν οι ερευνητές στο βίντεο του

πειράματος. Οι τιμές της θερμικής ισχύος που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού από το θερμαντήρα, και της θερμοκρασίας του, υπολογίζονται για τη τιμή των 660 mV, του διπλάσιου των 330 mV, και είναι 27.9 mW και 51.0°C, αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, τώρα, αρχικά αναπτύσσεται μία και μοναδική φυσαλίδα, η οποία μεγαλώνει πολύ γρήγορα. Το μέγεθος της γίνεται τόσο μεγάλο, όπου σε 11 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη του θερμικού παλμού, ένα τμήμα της βρίσκεται εκτός των ορίων του οπτικού πεδίου της κάμερας. Η διάμετρος της σε αυτό το χρονικό σημείο φθάνει περίπου τα 1950 μm. Μετά από 16 sec από την έναρξη του θερμικού παλμού, η φυσαλίδα αποκολλάται από το θερμαντήρα, και στη συνέχεια αναπτύσσονται πολλές μικρότερες φυσαλίδες οι οποίες αναχωρούν από το θερμαντήρα πολύ γρήγορα. Η ανάπτυξη πολλών μικρών φυσαλίδων και η γρήγορη αναχώρησή τους από το θερμαντήρα, θυμίζει το φαινόμενο του βρασμού.



Σχήμα 5.2.2.21 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας για τα πρώτα 5 sec του πειράματος της 12^{ης} παραβολής.

Στο Σχ. 5.2.2.119 απεικονίζεται η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου των φυσαλίδων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπως αυτή υπολογίζεται από τα αποτελέσματα του κώδικα υπολογισμού της διαμέτρου των φυσαλίδων. Σε αυτό το διάγραμμα διακρίνουμε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι από την έναρξη του θερμικού παλμού μέχρι τα 4.8 sec, όπου έχουμε τα καλύτερα και ακριβέστερα αποτελέσματα και δεν παρατηρείται καθόλου θόρυβος. Η δεύτερη είναι μεταξύ 4.8 και 15 sec περίπου, όπου το μέγεθος της φυσαλίδας είναι πολύ μεγάλο και παρατηρείται θόρυβος στις μετρήσεις μας, ο οποίος οφείλεται: α) στην μετακίνηση της φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής της, και β) σε αιωρούμενες πολύ μικρές φυσαλίδες οι οποίες καταγράφονται στα δεδομένα εικόνας. Από τα 11 sec μέχρι τα 15, οπότε και η φυσαλίδα αναχωρεί, πρέπει να αναφέρουμε ότι το μετρούμενο μέγεθος της από το κώδικα είναι πάντα μικρότερο από το πραγματικό, αφού όπως προείπαμε ένα τμήμα της φυσαλίδας βρίσκεται εκτός των ορίων της καταγραφόμενης εικόνας. Η τρίτη περιοχή του διαγράμματος είναι μετά από τα 15 sec όπου η φυσαλίδα έχει αποκολληθεί από το θερμαντήρα

και αρχίζουν ν' αναπτύσσονται πολλές μικρές φυσαλίδες οι οποίες έχουν μέγεθος μέχρι 400 μm . Τα σημεία του διαγράμματος του Σχ. 5.2.2.19, τα οποία αντιστοιχούν σε χρόνο μεγαλύτερο από 15 sec και οι τιμές τους είναι μεγαλύτερες από 500 μm , οφείλονται σε θόρυβο που δημιουργείται από αντανάκλασεις που προκαλούνται από τη κύρια φυσαλίδα που αποκολλήθηκε από το θερμοαντήρα, και από μικρότερες αιωρούμενες φυσαλίδες. Στο Σχ. 5.2.2.21 απεικονίζεται το τμήμα του διαγράμματος του Σχ. 5.2.2.19 που αντιστοιχεί στα πρώτα 4.8 sec του πειράματος.

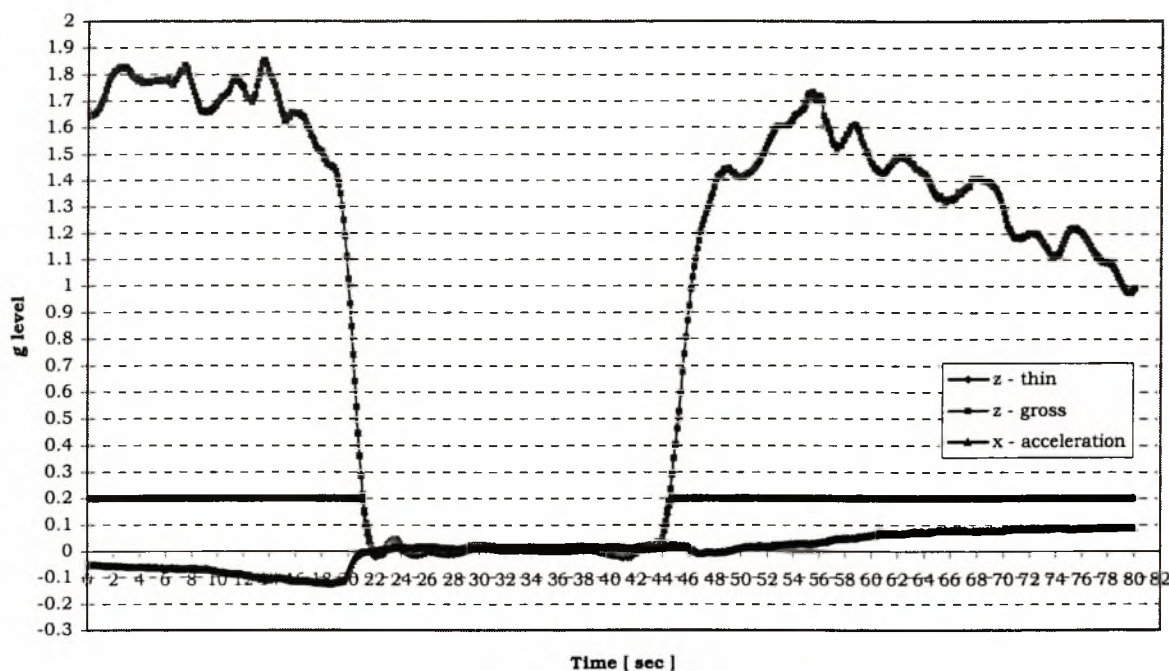
Η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας USR2 για το πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 12^{ης} παραβολής (Σχ. 5.2.2.20), παρουσιάζει την εντονότερη μεταβολή που έχουμε δει στα μέχρι τώρα αποτελέσματα των πειραμάτων μας, και μάλιστα αντί η θερμοκρασία USR2 να αυξάνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, αυτή μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα, με την έναρξη του θερμικού παλμού η θερμοκρασία USR2 είναι ίση με 32.910°C, όπου και παραμένει για 4 sec, και στη συνέχεια μειώνεται και μέσα σε 10 sec φθάνει στους 32.0°C περίπου, όπου και παραμένει μέχρι το τέλος του θερμικού παλμού.

Το τελευταίο πείραμα με χρησιμοποιούμενο υγρό το κανονικό επτάνιο έγινε κατά τη διάρκεια της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας των πτήσεων. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν αρκετά υψηλό και ίσο με 25,000, ενώ η χρονική του διάρκεια ήταν 10 δευτερόλεπτα. Το πείραμα ήταν το τρίτο σε σειρά που διεξήχθη στο 9^ο κελί. Το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής ήταν \$2005, δηλαδή fine mode, επομένως η λειτουργία του θερμοστάτη κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν σταθερή.

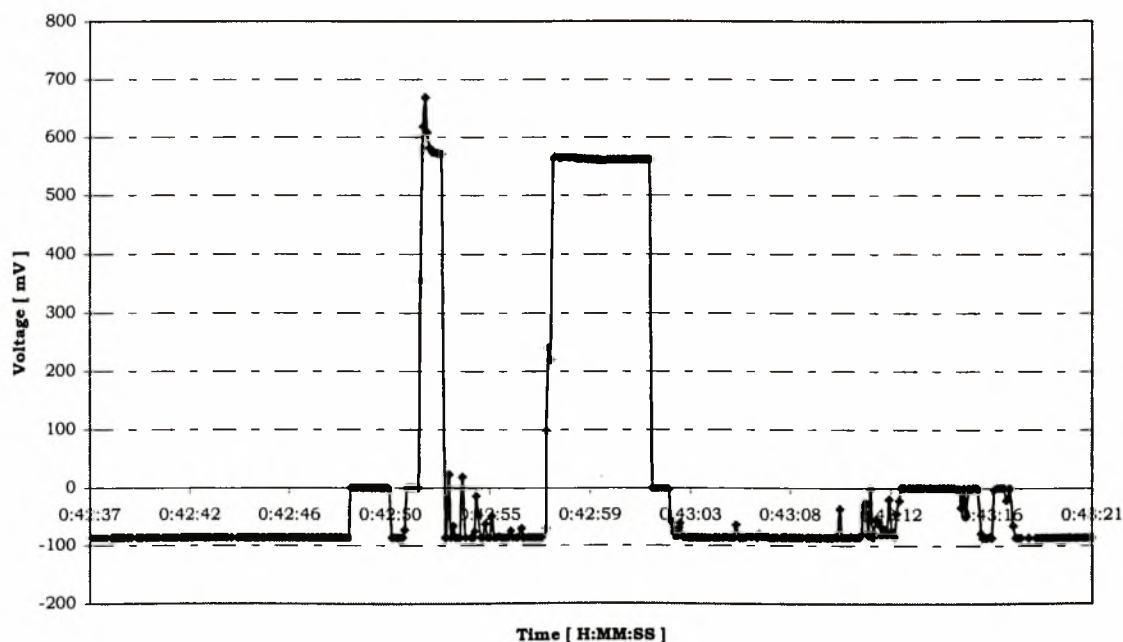
Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής ήταν πολύ καλή, όπως μπορεί να συμπεράνει κανείς από το Σχ. 5.2.2.22, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής.

Οι τιμές της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όπως αυτές απεικονίζονται στην καμπύλη μεταβολής της του Σχ. 5.2.2.23, δεν αντιστοιχούν στις αναφερόμενες από τους ερευνητές τιμές της που έχουν καταγραφεί στο βίντεο του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή που προκύπτει από τη μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, όπως αυτή φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.23, είναι $668.6 \times 2 = 1337.2 \text{ mV} = 1.337 \text{ Volts}$, ενώ στη συνέχεια η τιμή της σταθεροποιείται στα $570.8 \times 2 = 1141.6 \text{ mV} = 1.142 \text{ Volts}$. Αντίστοιχα, οι τιμές που καταγράφονται από τους ερευνητές είναι: [αρχικά 1.2 ~ 2.03 ~ 2.04 και στο τέλος του θερμικού παλμού ~ 2.03] Volts. Ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού και της θερμοκρασίας του thermistor έγινε τελικά παίρνοντας σαν τιμή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , τη τιμή της μέγιστης τιμής της από το διάγραμμα του Σχ. 5.2.2.23, δηλ. τη τιμή των $668.6 \times 2 = 1337.2 \text{ mV} = 1.337 \text{ Volts}$. Οι τιμές που προέκυψαν για τα παραπάνω μεγέθη ήταν 52.7 mW για το μέγεθος της θερμικής ισχύος, και 76.0°C για τη θερμοκρασία του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού.

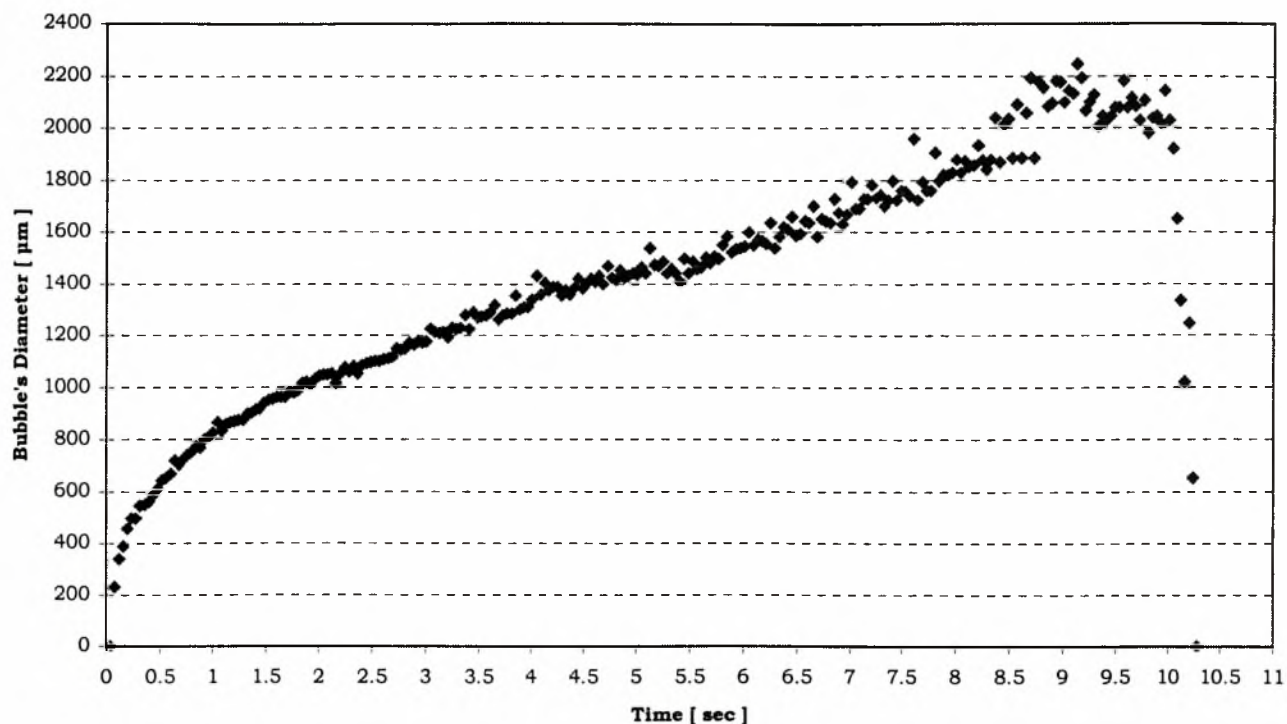
Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	$V_{DL} / 2$ [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
03/06/99	13	9	52.7	10	668.6	76.0	\$2005



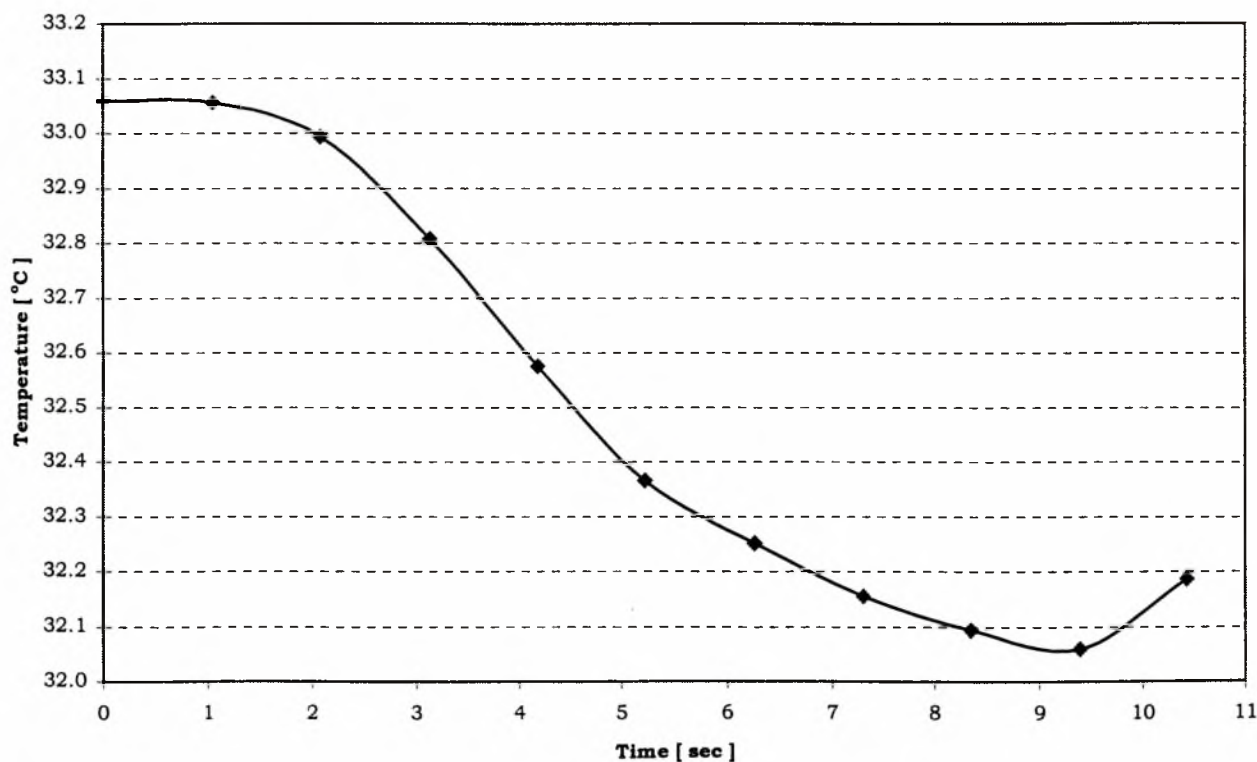
Σχήμα 5.2.2.22 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.23 Μεταβολή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, $V_{DL}/2$, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας.



Σχήμα 5.2.2.24 Μεταβολή της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.



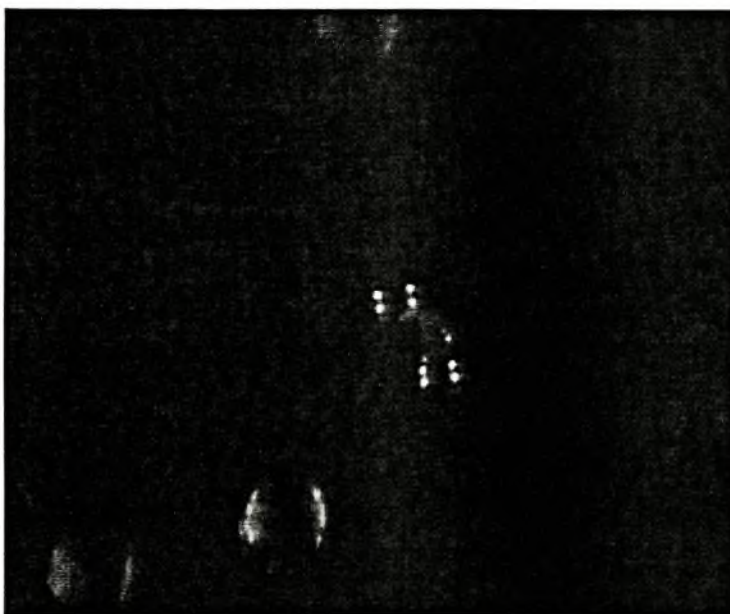
Σχήμα 5.2.2.25 Μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, USR2, κατά τη διάρκεια των συνθηκών μικροβαρύτητας για την 13^η παραβολή της τρίτης μέρας.

Αν και το μέγεθος της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού είναι το μεγαλύτερο που έχει δοθεί για τα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το επτάνιο, εντούτοις δεν παρατηρείται το φαινόμενο της ανάπτυξης πολλών μικρών φυσαλίδων κατά την έναρξη του θερμικού παλμού, αλλά αναπτύσσεται μόνο μία φυσαλίδα. Η φυσαλίδα αυτή αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς, και η τιμή της διαμέτρου της, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.2.24, φθάνει τα 1900 μm σε 8.5 sec από την έναρξη του θερμικού παλμού. Μετά τα 8.5 sec παρατηρούμε στο βίντεο του πειράματος ότι η φυσαλίδα ταλαντώνεται για ένα περίπου sec, προκαλώντας το θόρυβο που βλέπουμε στο διάγραμμα του Σχ. 5.2.2.24. Με το πέρας του θερμικού παλμού στα 10 sec, η φυσαλίδα αποκολλάται από την επιφάνεια του θερμαντήρα και δεν αναπτύσσονται νέες φυσαλίδες.

Η μετρούμενη θερμοκρασία USR2 κατά τη διάρκεια του πειράματος παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με αυτή που παρατηρήσαμε στα αποτελέσματα του πειράματος της προηγούμενης παραβολής. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία USR2 μειώνεται κατά 1.0°C κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, αφού με την έναρξη του θερμικού παλμού είναι ίση με 33.059°C , και στο τέλος του φθάνει στους 32.059°C .

5.2.3 Γλυκερίνη - Νερό

Τα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το δυαδικό μείγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β. πήραν μέρος κατά τη διάρκεια της πρώτης και δεύτερης μέρας των παραβολικών πτήσεων. Συνολικά διεξήχθησαν 18 πειράματα, από τα οποία μπορέσαμε να πάρουμε σημαντική πληροφορία μόνο για δύο απ' αυτά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα περισσότερα πειράματα που έγιναν υπήρχαν παραμένουσες φυσαλίδες από τα προηγούμενα πειράματα που είχαν γίνει στο ίδιο κελί, αλλά και φυσαλίδες που είχαν παραμείνει στο διάλυμα από τη διαδικασία κορεσμού. Δεν είναι τυχαίο ότι και τα δύο πειράματα από τα οποία μπορέσαμε να πάρουμε σημαντική πληροφορία ήταν τα πρώτα που γινόντουσαν στο κάθε κελί. Για να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα παραπάνω, στο Σχ. 5.2.3.1 παρουσιάζεται η πρώτη εικόνα του βίντεο της 17^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας των πτήσεων. Η εικόνα αυτή δείχνει την κατάσταση που επικρατούσε στο κελί πριν την έναρξη του θερμικού παλμού. Παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια του θερμαντήρα υπάρχουν δύο παραμένουσες φυσαλίδες, οι οποίες έχουν παραμείνει εκεί από την προηγούμενη παραβολή, και ότι υπάρχουν παραμένουσες φυσαλίδες και στο ίδιο το διάλυμα.



Σχήμα 5.2.3.1 Παραμένουσες φυσαλίδες πριν την έναρξη του πειράματος της 17^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας των πτήσεων.

Οι φυσαλίδες που αναπτύσσονται στα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το δυαδικό μείγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β., είναι πολύ μικρότερες απ' αυτές που είδαμε για τα άλλα δύο υγρά, και το μέγεθος τους σπάνια είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο της διαμέτρου του θερμαντήρα. Να υπενθυμίσουμε ότι για τα πειράματα που έγιναν κατά τη διάρκεια της πρώτης μέρας δεν έχουμε δεδομένα από το πρόγραμμα Snopy.

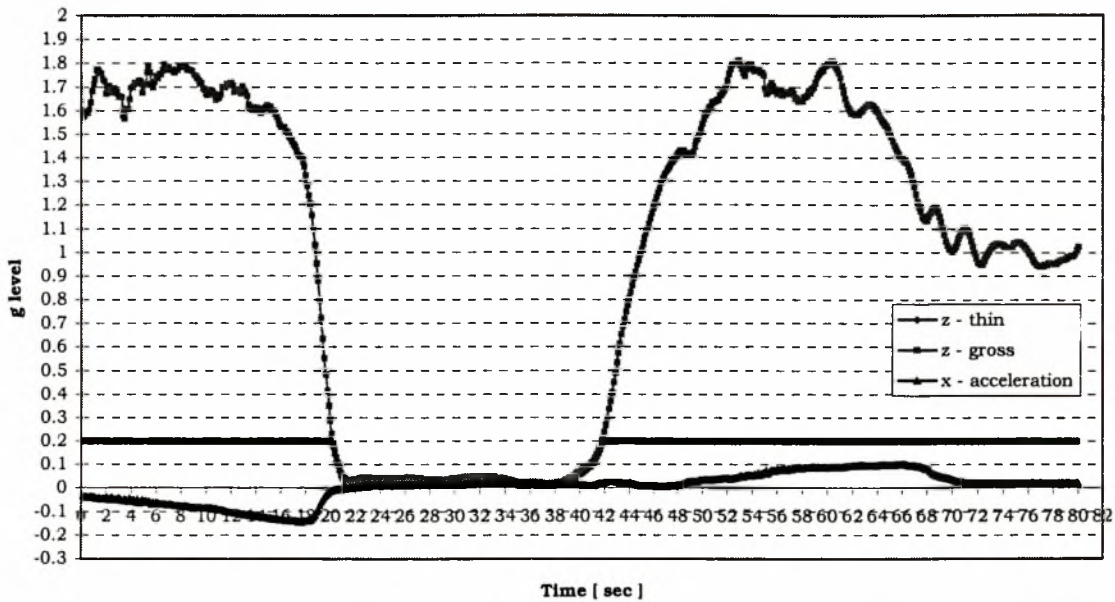
Το πρώτο πείραμα με χρησιμοποιούμενο υγρό το δυαδικό μείγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β., από το οποίο καταφέραμε να εξάγουμε σημαντική πληροφορία ήταν αυτό που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας των πτήσεων. Το πείραμα αυτό είναι το πρώτο που γίνεται στο 5^ο κελί. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού που δόθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 30,000 και η χρονική του διάρκεια ήταν 30 sec. Δεδομένα του προγράμματος Snopy δεν υπάρχουν για το πείραμα, αφού αυτό διεξήχθη κατά τη διάρκεια της πρώτης μέρας των πτήσεων, άρα δεν μπορούμε να γνωρίζουμε το είδος λειτουργίας του θερμοστάτη της πειραματικής μας συσκευής, αλλά ούτε τη μεταβολή της θερμοκρασίας USR2, κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής ήταν πολύ καλή, όπως μπορεί να συμπεράνει κανείς από το Σχ. 5.2.3.2, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής.

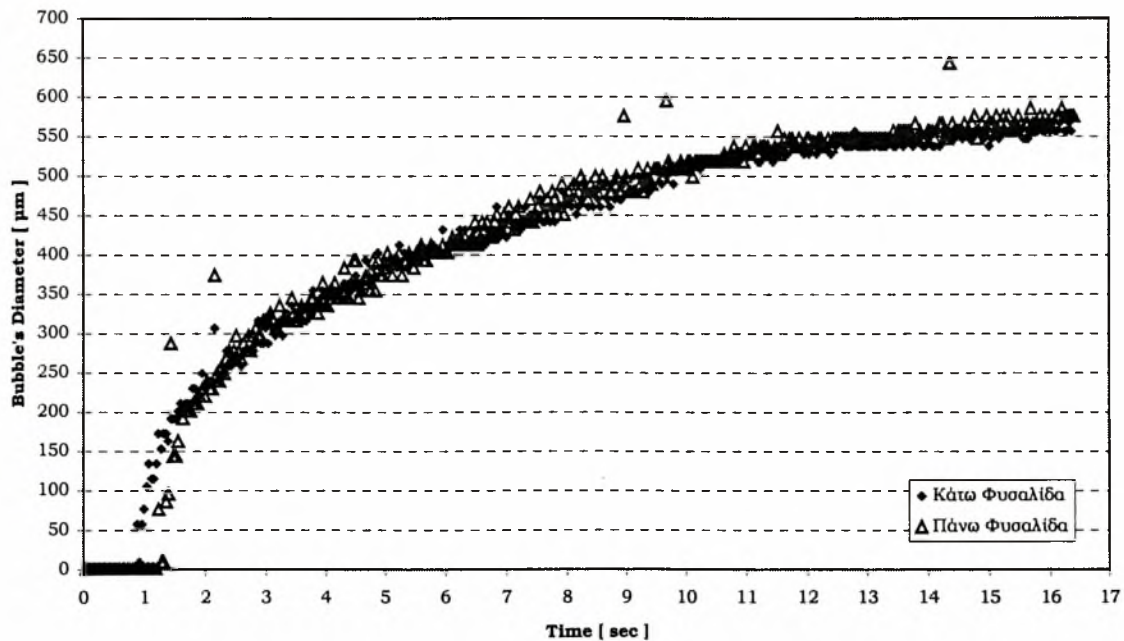
Για το πείραμα αυτό δεν υπάρχουν δεδομένα από τη μετρούμενη διαφορά δυναμικού, V_{DL} , αφού η χωρητικότητα του data logger είχε ήδη εξαντληθεί από τις τιμές που είχε καταγράψει κατά τη διάρκεια των προηγούμενων πειραμάτων. Δυστυχώς δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα δεδομένα για τη μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , ούτε στο βίντεο του πειράματος, επομένως, αναγκαστήκαμε για να υπολογίσουμε το μέγεθος της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, ν' αναζητήσουμε κάποιο άλλο πείραμα με χρησιμοποιούμενο υγρό το δυαδικό μείγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β. στο οποίο δίνεται το ίδιο επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού, και για το οποίο έχουμε δεδομένα από το data logger. Αυτό είναι το πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 12^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας όπου η τιμή της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , ήταν ίση με 2156 mV. Οι τιμές της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, που υπολογίσαμε με την παραπάνω τιμή της V_{DL} , είναι 72.3 mW και 95.0°C, αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος αναπτύσσονται δύο φυσαλίδες, μία στην πάνω μεριά του θερμοαντήρα, και μία στην κάτω. Η καμπύλη μεταβολής της διαμέτρου των δύο φυσαλίδων φαίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 5.2.3.3. Οι δύο καμπύλες ταυτίζονται μεταξύ τους μετά τα 2 sec από την έναρξη του θερμικού παλμού, αν και η κάτω φυσαλίδα αναπτύχθηκε πρωτίτερα από την πάνω κατά μερικά δέκατα του δευτερολέπτου. Το τελικό μέγεθος των φυσαλίδων στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας φθάνει τα 575 μm περίπου. Η μορφή των καμπυλών είναι η ίδια με αυτή που έχουμε παρατηρήσει στα αποτελέσματα των πειραμάτων με νερό και επτάνιο, αρχικά παραβολική και στη συνέχεια γραμμική.

Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
01/06/99	16	5	72.3	30	2156	95.0	-



Σχήμα 5.2.3.2 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας των πτήσεων.



Σχήμα 5.2.3.3 Μεταβολή της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 16^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

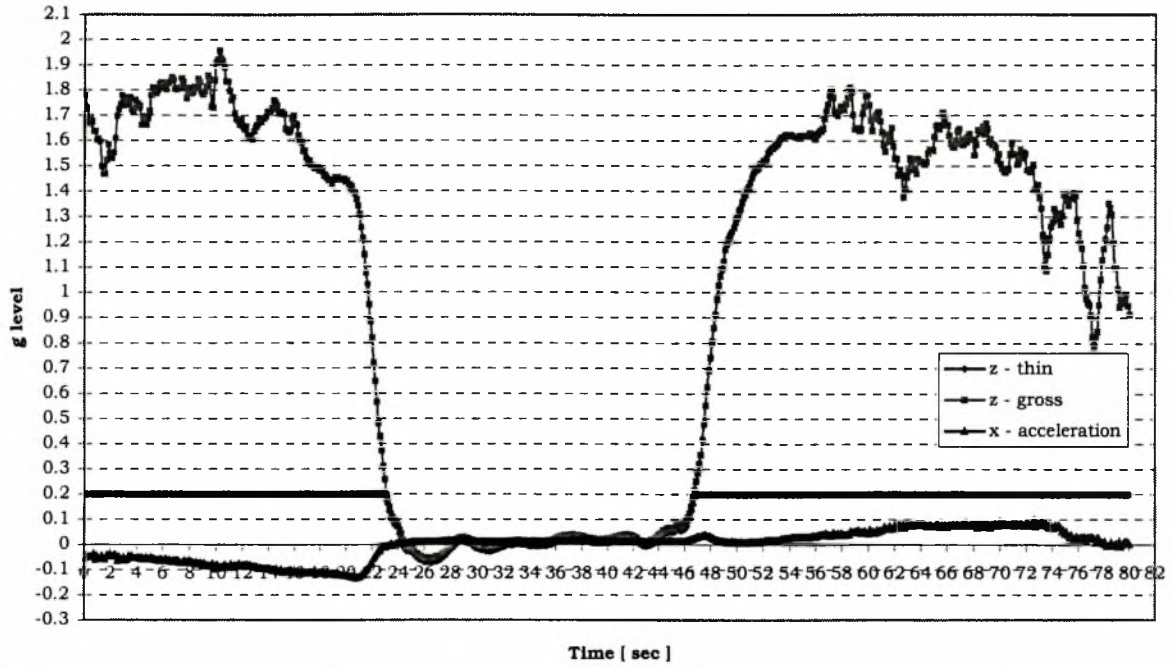
Το πείραμα που διεξήχθη κατά τη διάρκεια της 21^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας ήταν το πρώτο που έγινε στο 7^ο κελί κατά τη διάρκεια της πρώτης μέρας των πτήσεων. Το επίπεδο ισχύος του θερμικού παλμού ήταν 36,000, και η χρονική του διάρκεια ήταν 30 sec.

Στο Σχ. 5.2.3.4 απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής. Η ποιότητα των συνθηκών μικροβαρύτητας κατά τη διάρκεια της παραβολής είναι πολύ καλή.

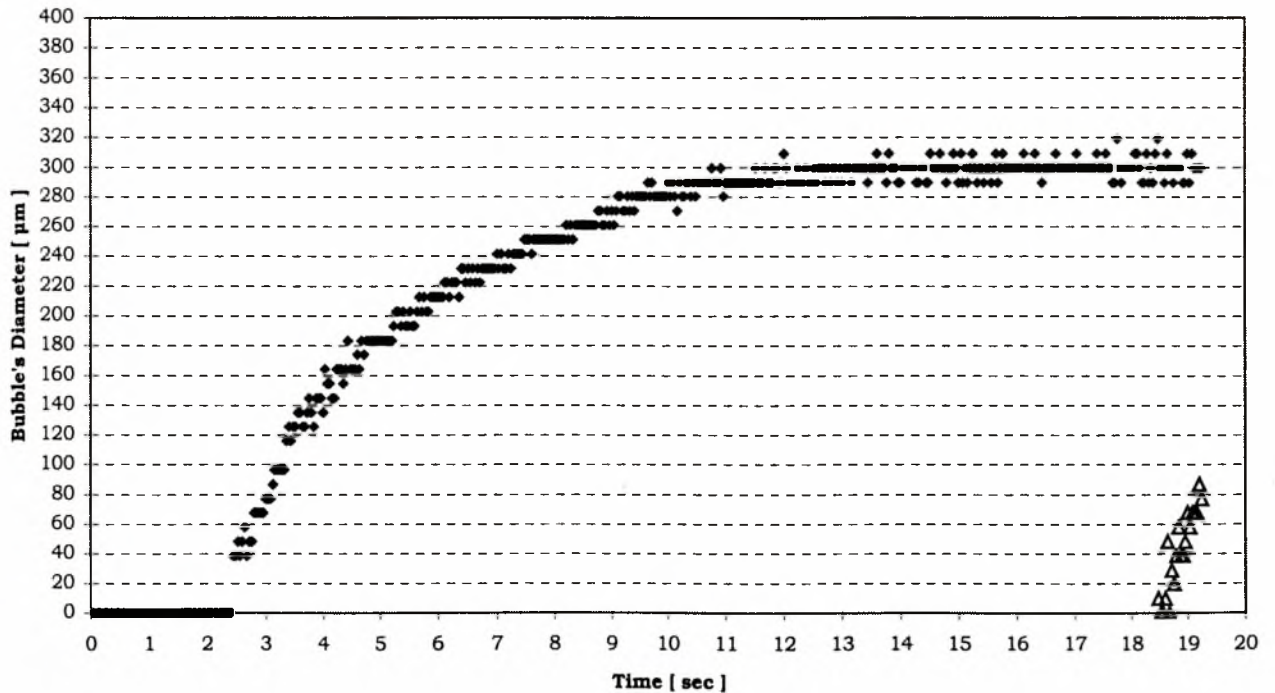
Όπως και για την 16^η παραβολή της πρώτης μέρας, έτσι και για την 21^η, δεν έχουμε δεδομένα για τη μετρούμενη διαφορά δυναμικού, V_{DL} , αλλά σε αντίθεση με την 21^η παραβολή, στο βίντεο του πειράματος αναφέρεται ότι η τιμή της V_{DL} κυμαίνεται στα 1900 mV. Οι τιμές της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, που υπολογίσαμε με την παραπάνω τιμή της V_{DL} , είναι 75.5 mW και 85.0°C, αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, αναπτύσσεται, με χρονική υστέρηση 2.5 sec περίπου από την έναρξη του θερμικού παλμού, μία φυσαλίδα στην κάτω μεριά του θερμοαντήρα, και μετά από 11 sec περίπου, η διάμετρος της φυσαλίδας είναι ίση με 290 μm . Τα παραπάνω φαίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 5.2.3.5. Από τα 11 sec και μετά, μέχρι το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας στα 19.24 sec, η διάμετρος της φυσαλίδας παραμένει σχεδόν σταθερή και δεν ξεπερνά τα 320 μm . Ακριβώς πριν το τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας, λίγο πριν τα 19 sec, αναπτύσσεται και μια δεύτερη φυσαλίδα στο πάνω μέρος του θερμοαντήρα, όπως αυτός φαίνεται στην καταγεγραφήμενη εικόνα, η οποία δεν ξεπερνά σε μέγεθος τα 90 μm στο τέλος των συνθηκών μικροβαρύτητας.

Ημερομηνία	α/α Παραβολής	Κελί	Ισχύς [mW]	Χρονική Διάρκεια [sec]	V_{DL} [mV]	Θερμοκρασία Thermistor [°C]	Mode
01/06/99	21	7	75.5	30	1900	85.0	-



Σχήμα 5.2.3.4 Μεταβολή των τιμών των συνιστωσών της επιτάχυνσης της βαρύτητας που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της 21^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας των πτήσεων.



Σχήμα 5.2.3.5 Μεταβολή της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια του πειράματος της 21^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας, σε συνθήκες μικροβαρύτητας.

Στο σημείο αυτό θα μπορούσαμε ν' αναφέρουμε σαν γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας, τόσο από αυτά που παρουσιάζονται στα πλαίσια αυτής της διατριβής, όσο και απ' αυτά που δεν παρουσιάστηκαν για τους λόγους που έχουμε αναφέρει, ότι η τιμή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , από το data logger μειώνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όταν αναπτύσσεται μία νέα φυσαλίδα. Όταν τώρα, υπάρχει στο thermistor κάποια παραμένουσα φυσαλίδα πριν την έναρξη του θερμικού παλμού, όπως παρατηρήθηκε μόνο στα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό ή το μείγμα γλυκερίνης – νερού, τότε αν το μέγεθος της παραμένουσας φυσαλίδας είναι αρκετά μεγάλο, τότε η μετρούμενη τάση V_{DL} παραμένει σχεδόν σταθερή, ενώ αν το μέγεθος της είναι μικρό, αυτή μειώνεται κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό.

Η μείωση τώρα της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όταν αναπτύσσεται μία νέα φυσαλίδα, οφείλεται στο γεγονός ότι αν και η αέρια φυσαλίδα έχει μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, k , από το υγρό, έχει μεγαλύτερη τιμή της θερμικής διαχυτότητας¹⁹, α ($\alpha=k/\rho C_p$), αφού το γινόμενο της πυκνότητας, ρ , επί την ειδική θερμότητα, C_p , για το αέριο είναι πολύ μικρότερο από αυτό του υγρού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος της φυσαλίδας, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό θερμότητας που διαχέεται διαμέσου της προς το κυρίως σώμα του διαλύματος, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του thermistor. Η μείωση της θερμοκρασίας του thermistor έχει σαν επακόλουθο την αύξηση της τιμής της αντίστασής του, επομένως της μείωση της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, I , που διαρρέει την αντίσταση R_L , και άρα και τη μείωση της τιμής της τάσης V_{DL} που μετράται από το data logger (σχέση 4.2).

Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , αναφέρεται στο θόρυβο που παρατηρούμε σε όλα σχεδόν τα διαγράμματα όπου απεικονίζεται η μεταβολή της. Ο θόρυβος αυτός είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται στην ανάπτυξη της ίδιας της φυσαλίδας, αφού παρατηρώντας τις τιμές που παίρνει η μετρούμενη διαφορά δυναμικού, V_{DL} , κατά τη διάρκεια πειραμάτων όπου δεν αναπτύχθηκε φυσαλίδα, και τα οποία για ευνόητους λόγους δεν παρουσιάζονται στα πλαίσια αυτής της διατριβής, ανακαλύψαμε ότι δεν παρατηρείται κανένας θόρυβος, και ότι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Τα παραπάνω υποστηρίζουν την εξήγηση που δόθηκε για τη μείωση της V_{DL} όταν αναπτύσσεται φυσαλίδα, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

¹⁹ Γι' αυτό και η φυσαλίδα θεωρείται ισοθερμοκρασιακή.

5.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

5.3.1 Ημιεμπειρική προσαρμογή αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην προσπάθεια προσαρμογής των καμπυλών μεταβολής της διαμέτρου των αναπτυσσόμενων φυσαλίδων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Αναφέρθηκε επανειλημμένα στην προηγούμενη ενότητα, ότι η μορφή αυτών των καμπυλών είναι αρχικά παραβολική και στη συνέχεια, μετά από μία μεταβατική περιοχή, γραμμική. Η προσπάθεια προσαρμογής του παραβολικού τμήματος των καμπυλών έγινε λαμβάνοντας υπ' όψιν τους μηχανισμούς που ελέγχουν την ανάπτυξη των φυσαλίδων στο βρασμό πυρήνων, όπως αυτός έχει εξηγηθεί στην ενότητα 2.1.5. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη της φυσαλίδας μετά την πυρήνωση της και αφού ξεπεράσει το κρίσιμο θερμοδυναμικό μέγεθος, ελέγχεται από δύο παράγοντες: την αδράνεια του υγρού, η οποία ελέγχει την ανάπτυξη της φυσαλίδας σε πολύ μικρούς χρόνους, της τάξης των μερικών msec [11, 30, 36, 37], και τη διάχυση θερμότητας, η οποία ελέγχει την ανάπτυξη της φυσαλίδας σε μεγαλύτερους χρόνους, πάνω από τα 10 msec περίπου. Η ακτίνα της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας όταν η ανάπτυξη της ελέγχεται από την αδράνεια του υγρού είναι ανάλογη του χρόνου, ενώ όταν ελέγχεται από τη διάχυση θερμότητας, είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (ενότητα 2.1.5, Σχ. 2.1.8 και Σχ.2.1.9).

Δυστυχώς, τα αρχικά στάδια ανάπτυξης της φυσαλίδας, όπου η ανάπτυξη της ελέγχεται από την αδράνεια του υγρού, δεν μπόρεσαν να μελετηθούν κατά τη διάρκεια της παρούσης διατριβής, αφού η καταγραφή της ανάπτυξης της φυσαλίδας ξεκινούσε μετά από 40 msec²⁰ από την έναρξη της ανάπτυξης της.

Εμπνεόμενοι από την εξάρτηση της ακτίνας της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας από τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου, όταν η ανάπτυξη της ελέγχεται από διάχυση θερμότητας στο βρασμό πυρήνων, και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στην περίπτωση του εξεταζόμενου προβλήματος ο ελέγχων μηχανισμός ανάπτυξης της φυσαλίδας είναι συνδυασμός διάχυσης θερμότητας και μάζας, αποφασίσαμε να κάνουμε προσαρμογή του παραβολικού τμήματος της καμπύλης της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας συσχετίζοντας τη διάμετρο της, D_{bubble} , με τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου:

$$D_{bubble} = \alpha t^{1/2} \quad (5.1)$$

όπου α είναι ένας συντελεστής, του οποίου την εξάρτηση από διάφορους παράγοντες θα εξετάσουμε στην επόμενη ενότητα.

²⁰ Η ταχύτητα καταγραφής των δεδομένων εικόνας που μπορέσαμε να εκμεταλλευτούμε από τα θεωρητικά των 150frames/sec ήταν 25 frames/sec, επομένως η πρώτη μέτρηση της διαμέτρου της φυσαλίδας που παίρναμε είναι σε 1/25=0.04 sec = 40 msec.

Για το γραμμικό τμήμα της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας, το οποίο παρατηρήθηκε σε όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η προσαρμογή έγινε συσχετίζοντας τη διάμετρο της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας, D_{bubble} , με το χρόνο ως εξής:

$$D_{bubble} = \beta \cdot t + \gamma \quad (5.2)$$

όπου β και γ είναι σταθεροί συντελεστές. Η εξάρτηση του συντελεστή β από διάφορους παράγοντες θα εξεταστεί στην επόμενη ενότητα.

Η προσαρμογή έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica, και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Παράρτημα Β.4.

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής ήταν άκρως ικανοποιητικά, τόσο για το παραβολικό όσο και για το γραμμικό τμήμα της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας. Η προσαρμογή έγινε για τα αποτελέσματα και των τριών χρησιμοποιούμενων υγρών, αν και θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ασφαλή συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν περισσότερο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό και το επτάνιο, αφού για το δυαδικό μίγμα γλυκερίνης νερού 80-20% κ.β. δεν έχουμε αρκετό αριθμό αποτελεσμάτων, όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα.

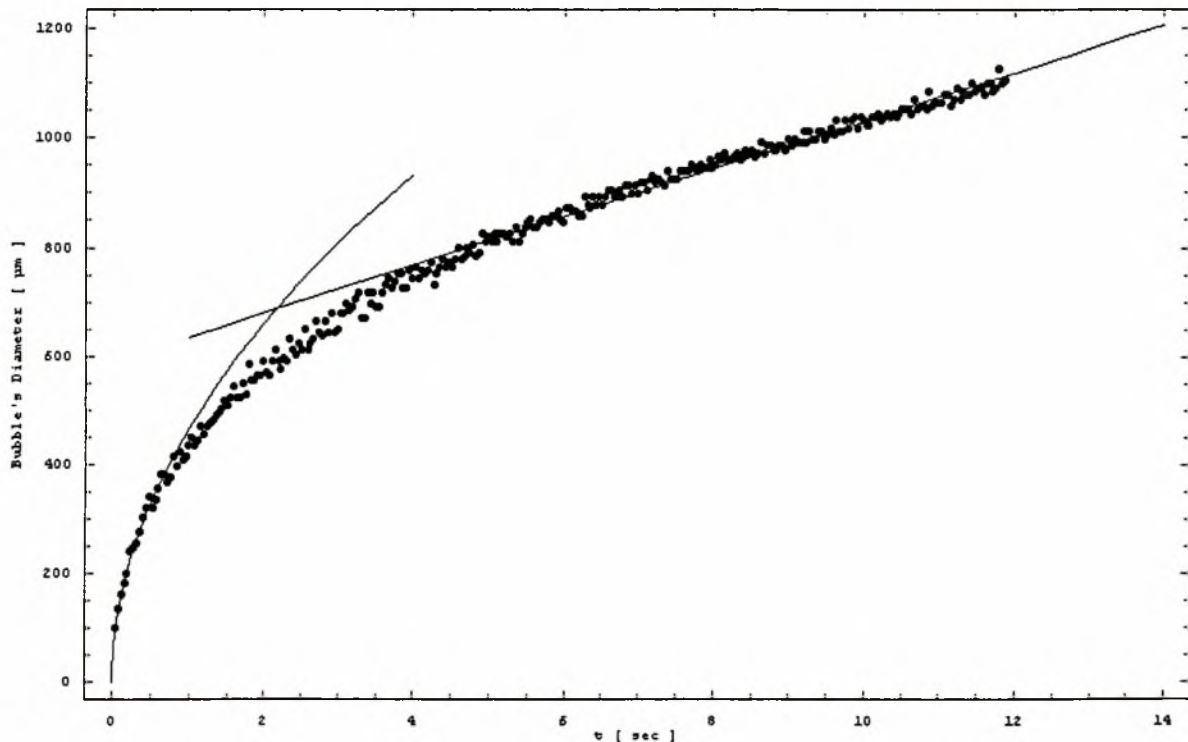
Στα επόμενα τρία διαγράμματα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας για ένα πείραμα από κάθε χρησιμοποιούμενο υγρό. Όλα τα αποτελέσματα της προσαρμογής των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, για τα τρία χρησιμοποιούμενα υγρά, φαίνονται στο Παράρτημα Θ.

Στο Σχ. 5.3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που πήραμε από την προσπάθεια προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος με νερό που διεξήχθη στην 21^η παραβολή της τρίτης μέρας. Η προσαρμογή του παραβολικού τμήματος της καμπύλης έγινε για τα πρώτα 14 σημεία της καμπύλης (0.56 sec), ενώ του γραμμικού τμήματος έγινε για τα σημεία 100-298 (4-12 sec). Οι τιμές των συντελεστών α , β , και γ , των σχέσεων (5.1) και (5.2), καθώς και οι τιμές του *συντελεστή προσδιορισμού*, R^2 , ο οποίος δείχνει μία ένδειξη της ποιότητας της προσαρμογής που επιτεύχθηκε, τόσο για το γραμμικό, όσο και για το παραβολικό τμήμα της καμπύλης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

a	R^2 (παραβολή)	β	R^2 (γραμμικό τμήμα)	γ
465.91	0.9828	43.95	0.9858	591.54

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσαρμογής είναι άκρως ικανοποιητικά, τόσο για το παραβολικό, όσο και για το γραμμικό τμήμα της καμπύλης. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνουμε τρεις περιοχές της καμπύλης:

- 0 - 1 sec: παραβολική περιοχή $D_{bubble} = \alpha \cdot t^{1/2}$
- 1 - 5 sec: μεταβατική περιοχή
- 5 - 12 sec: γραμμική περιοχή $D_{bubble} = \beta \cdot t + \gamma$



Σχήμα 5.3.1 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 21ης παραβολής της τρίτης μέρας, για πείραμα με νερό.

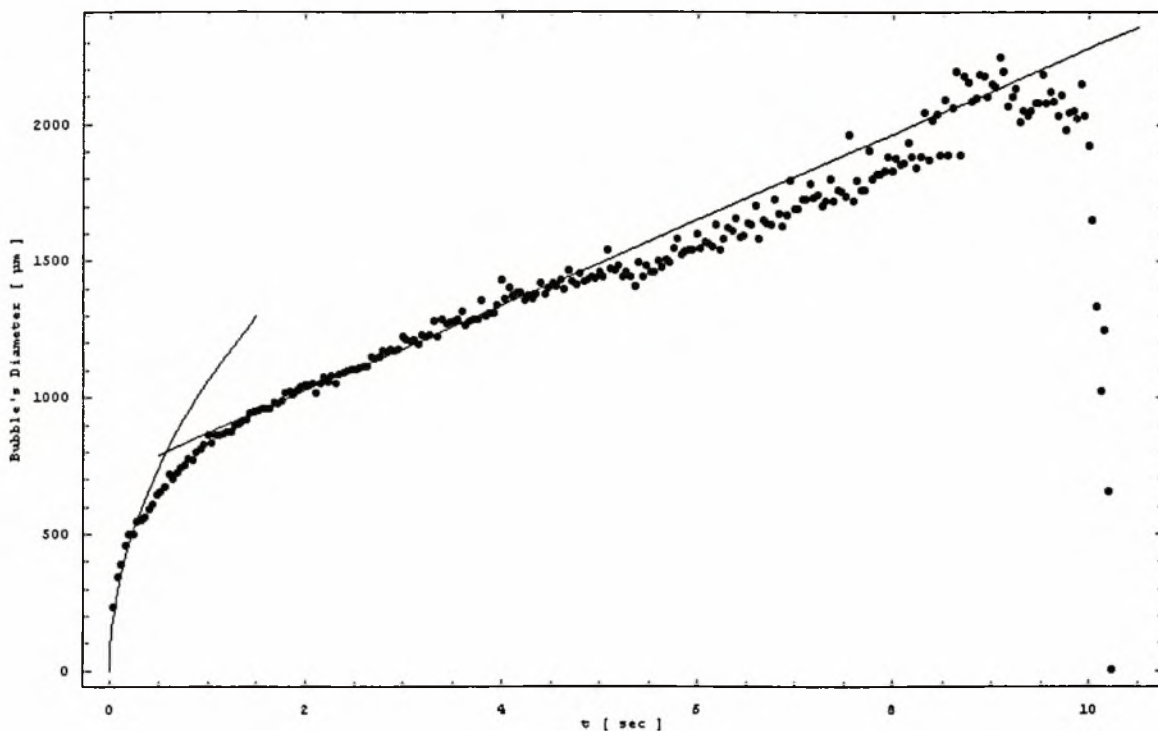
Τα αποτελέσματα που πήραμε από την προσπάθεια προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος με επτάνιο που διεξήχθη στην 13η παραβολή της τρίτης μέρας, φαίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 5.3.2. Η προσαρμογή του παραβολικού τμήματος της καμπύλης έγινε για τα πρώτα 9 σημεία της καμπύλης (0.36 sec), ενώ του γραμμικού τμήματος έγινε για τα σημεία 45-125 (1.8-5 sec). Η προσαρμογή της καμπύλης του Σχ. 5.3.2 έγινε για τα πρώτα 5 sec του πειράματος γιατί μετά τα 5 sec υπάρχει στη μέτρηση της διαμέτρου έντονος θόρυβος ο οποίος οφειλόταν σε αντανάκλασεις παραμένουσων φυσαλίδων στο διάλυμα.

Οι τιμές των συντελεστών α , β , και γ , των σχέσεων (5.1) και (5.2), καθώς και των συντελεστών προσδιορισμού, για το πείραμα της 13ης παραβολής της τρίτης μέρας, είναι ίσες με:

α	R^2 (παραβολή)	β	R^2 (γραμμικό τμήμα)	γ
1059.81	0.9142	156.58	0.9833	712.22

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσαρμογής είναι άκρως ικανοποιητικά, για το γραμμικό τμήμα της καμπύλης, και αρκετά καλά για το παραβολικό. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνουμε τρεις περιοχές της καμπύλης:

- 0 – 0.32 sec: παραβολική περιοχή $D_{bubble} = \alpha \cdot t^{1/2}$
- 0.32 – 1.5 sec: μεταβατική περιοχή
- 1.5 - 10 sec: γραμμική περιοχή $D_{bubble} = \beta \cdot t + \gamma$



Σχήμα 5.3.2 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας, για πείραμα με καν. επτάνιο.

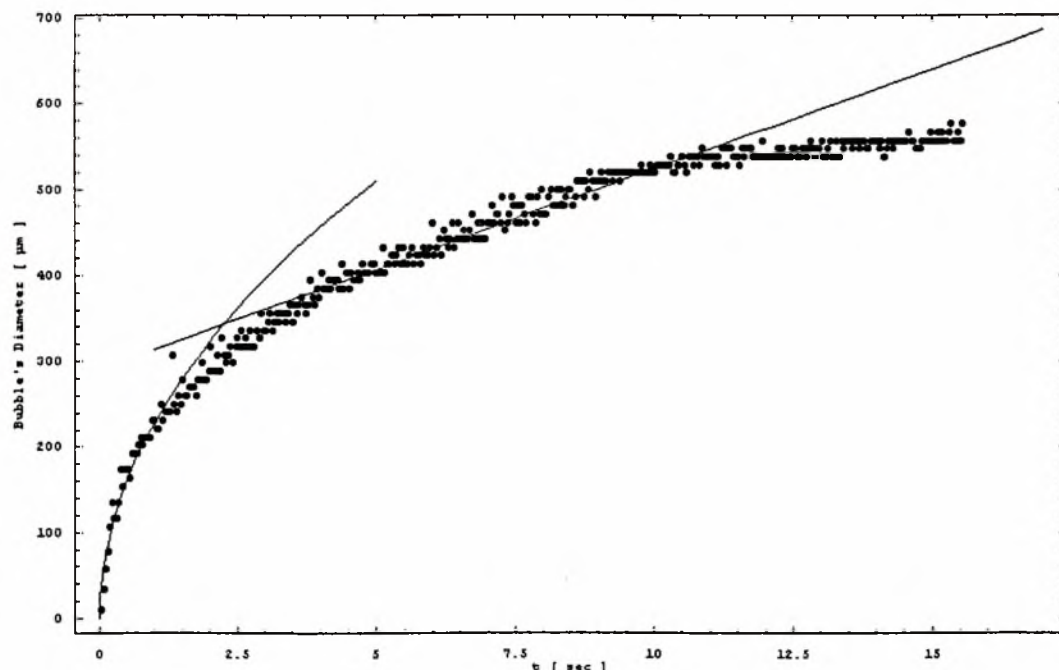
Για το επτάνιο η παραβολική περιοχή της καμπύλης είναι μικρότερη απ' αυτή που είδαμε για το νερό, γεγονός που οφείλεται στην εκρηκτική ανάπτυξη της φυσαλίδας. Αρκετά μικρή είναι και η μεταβατική περιοχή - λίγο μεγαλύτερη από 1 sec - σε αντίθεση με αυτή που παρατηρήσαμε για νερό που ήταν ίση με 4 sec περίπου. Θα πρέπει να τονίσουμε το γεγονός ότι αρνητική επίδραση στην προσπάθεια προσαρμογής του παραβολικού τμήματος των καμπυλών μεταβολής της διαμέτρου της φυσαλίδας στα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το επτάνιο, είχε το γεγονός ότι δεν είχαμε αρκετά δεδομένα για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης της φυσαλίδας, γεγονός που οφείλεται όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, στην εκρηκτική ταχύτητας ανάπτυξη των φυσαλίδων στα πειράματα με επτάνιο.

Στο Σχ. 5.3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που πήραμε από την προσαρμογή της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια του πειράματος με μίγμα γλυκερίνης-νερού 80-20% κ.β. που διεξήχθη στην 16^η παραβολή της πρώτης μέρας. Η προσαρμογή του παραβολικού τμήματος της καμπύλης έγινε για τα πρώτα 40 σημεία της καμπύλης (1.6 sec), ενώ του γραμμικού τμήματος έγινε για τα σημεία 120-289 (4.8-11.56 sec). Οι τιμές των συντελεστών α , β , και γ , των σχέσεων (5.1) και (5.2), καθώς και των συντελεστών προσδιορισμού, φαίνονται παρακάτω:

a	R^2 (παραβολή)	β	R^2 (γραμμικό τμήμα)	γ
227.74	0.9456	23.29	0.9614	290.66

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της προσαρμογής είναι αρκετά ικανοποιητικά, τόσο για το παραβολικό, όσο και για το γραμμικό τμήμα της καμπύλης. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνουμε τρεις περιοχές της καμπύλης:

- 0 - 1.6 sec: παραβολική περιοχή $D_{bubble} = \alpha \cdot t^{1/2}$
- 1.6 - 4.8 sec: μεταβατική περιοχή
- 4.8 - 12 sec: γραμμική περιοχή $D_{bubble} = \beta \cdot t + \gamma$



Σχήμα 5.3.3 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της κάτω αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας, για πείραμα με γλυκερίνη.

Στο σημείο αυτό είναι ανάγκη να διευκρινίσουμε ότι τόσο οι καμπύλες των παραπάνω σχημάτων, όσο και αυτές που βρίσκονται στο Παράρτημα Θ, φαίνεται να ξεκινούν από την αρχή των αξόνων, γεγονός που όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα δεν ισχύει, αφού στις περισσότερες των περιπτώσεων, υπάρχει μία χρονική υστέρηση στην ανάπτυξη της φυσαλίδας από την έναρξη του θερμικού παλμού, και τα σημεία της καμπύλης ξεκινούν μετά τα 0.04 sec. Η μεταφορά αυτή των καμπυλών στην αρχή των αξόνων έγινε έτσι ώστε να συμπίπτουν κάθε φορά τα δεδομένα μας με τη παραβολική καμπύλη και την ευθεία προσαρμογής.

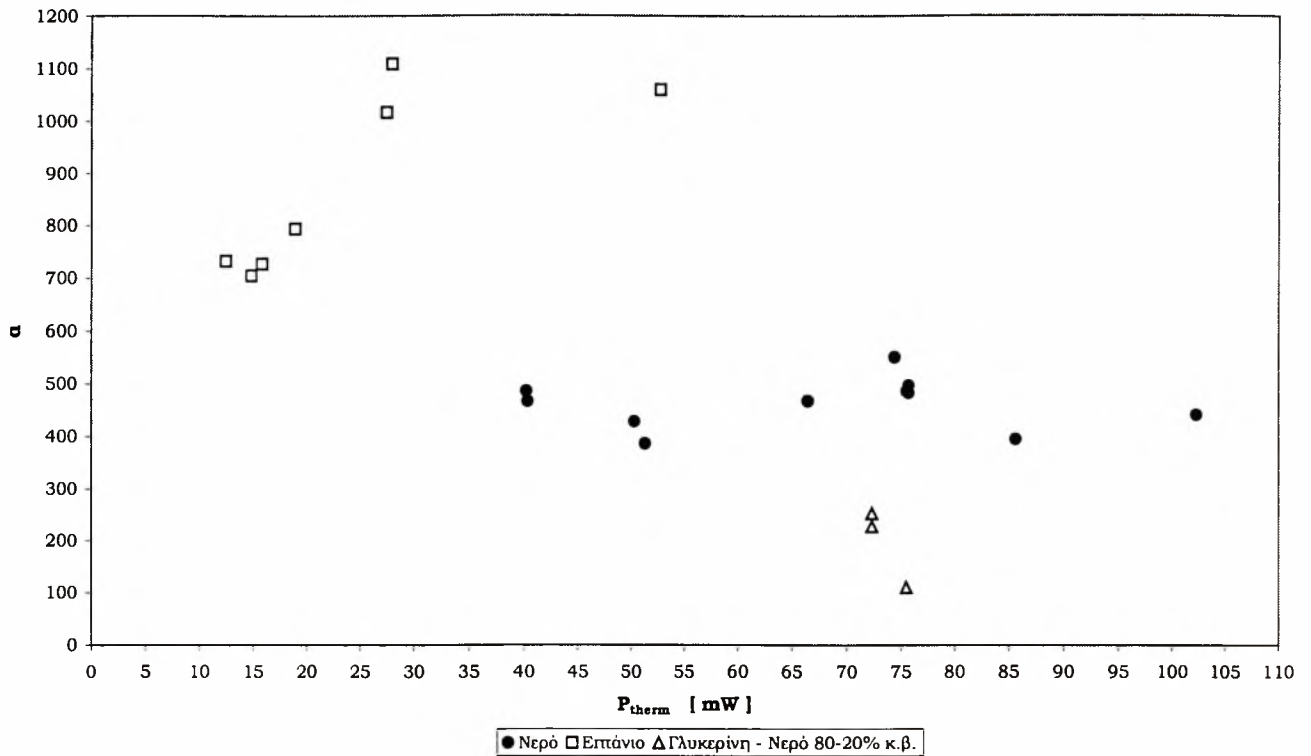
5.3.2 Διερεύνηση εξάρτησης του ρυθμού ανάπτυξης

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε την εξάρτηση των συντελεστών a και β των εξισώσεων (5.1) και (5.2), αντίστοιχα, από το είδος του χρησιμοποιούμενου υγρού στα πειράματά μας, καθώς και από το επίπεδο της θερμικής ισχύος, P_{therm} , που δίνουμε κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, και της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται ο thermistor, T_{therm} , κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού.

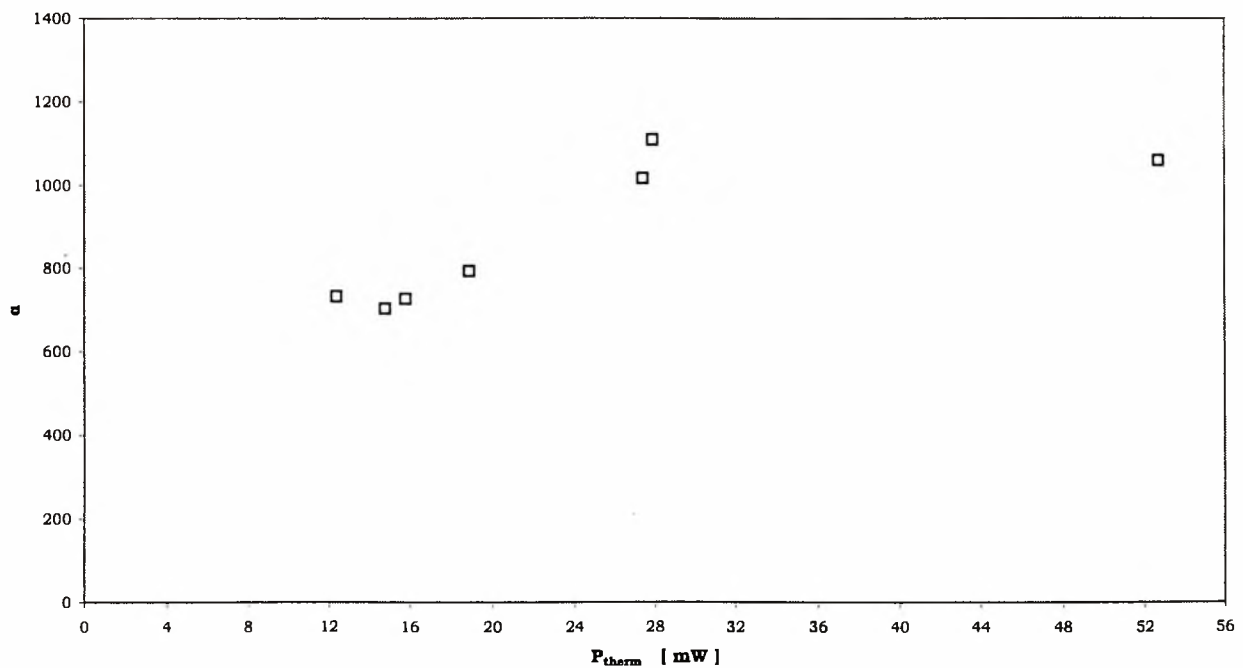
Στο Σχ. 5.3.4, απεικονίζονται οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής a , της παραβολικής καμπύλης προσαρμογής, συναρτήσει της τιμής της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, για τα τρία χρησιμοποιούμενα υγρά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή a συναντώνται στα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το μείγμα γλυκερίνης – νερού, ενώ οι μέγιστες, σε αυτά του επτανίου. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του a για τα πειράματα με επτάνιο κυμαίνονται μεταξύ 704 και 1110, για ένα εύρος τιμών της θερμικής ισχύος από 12.4 έως 52.7 mW περίπου. Οι τιμές του a για τα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό κυμαίνονται μεταξύ 385 και 550, για ένα εύρος τιμών της θερμικής ισχύος από 40 έως 102 mW περίπου. Τέλος, για το μείγμα γλυκερίνης – νερού, οι τιμές του συντελεστή a , ο οποίος καθορίζει το ρυθμό ανάπτυξης της φυσαλίδας στα πρώτα δευτερόλεπτα της ανάπτυξης της, κυμαίνονται μεταξύ 110 και 253, για τιμές της θερμικής ισχύος οι οποίες ελάχιστα διαφέρουν μεταξύ τους, 72-76 mW.

Ασφαλή συμπεράσματα για την εξάρτηση του συντελεστή a από τη τιμή της θερμικής ισχύος, μπορούν να εξαχθούν μόνο από τα δεδομένα που έχουμε για το νερό και το επτάνιο, αφού για τη γλυκερίνη αυτά είναι ελάχιστα, και κάθε συμπέρασμα θα ήταν παρακινδυνευμένο. Στις τιμές που παίρνει ο συντελεστής a , συναρτήσει της ισχύος, για τα πειράματα με επτάνιο (Σχ. 5.3.5), παρατηρούμε ότι υπάρχει μία σαφής αυξητική τάση, όταν η τιμή της ισχύος αυξάνεται. Αυτό επιβεβαιώνεται και στα αποτελέσματα των πειραμάτων μας με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό (Σχ. 5.3.6), όπου φαίνεται μία σαφής αυξητική τάση του a με την αύξηση της θερμοκρασίας, εκτός από τα δύο σημεία του διαγράμματος για τις μέγιστες τιμές της προσφερόμενης θερμικής ισχύος (85.6 & 102.3 mW), για τα οποία θα περιμέναμε ότι οι τιμές του a θα ήταν αρκετά μεγαλύτερες. Τα δύο αυτά σημεία αντιστοιχούν στα πειράματα που έγιναν κατά τη διάρκεια της 26ης και 28ης παραβολής της τρίτης μέρας των πτήσεων. Μία πιθανή εξήγηση των χαμηλών τιμών του συντελεστή a για τα δύο παραπάνω πειράματα, θα μπορούσε να έχει να κάνει με την αρκετά χαμηλότερη, από τη θερμοκρασία κορεσμού, θερμοκρασία του διαλύματος νερού - διοξειδίου του άνθρακα που παρατηρήθηκε πριν την έναρξη του θερμικού παλμού, όπως φαίνεται στην ενότητα 5.2.1. Η χαμηλή θερμοκρασία του διαλύματος έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό, αλλά και την αύξηση της διαλυτότητας του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό, με αποτέλεσμα τη μείωση της

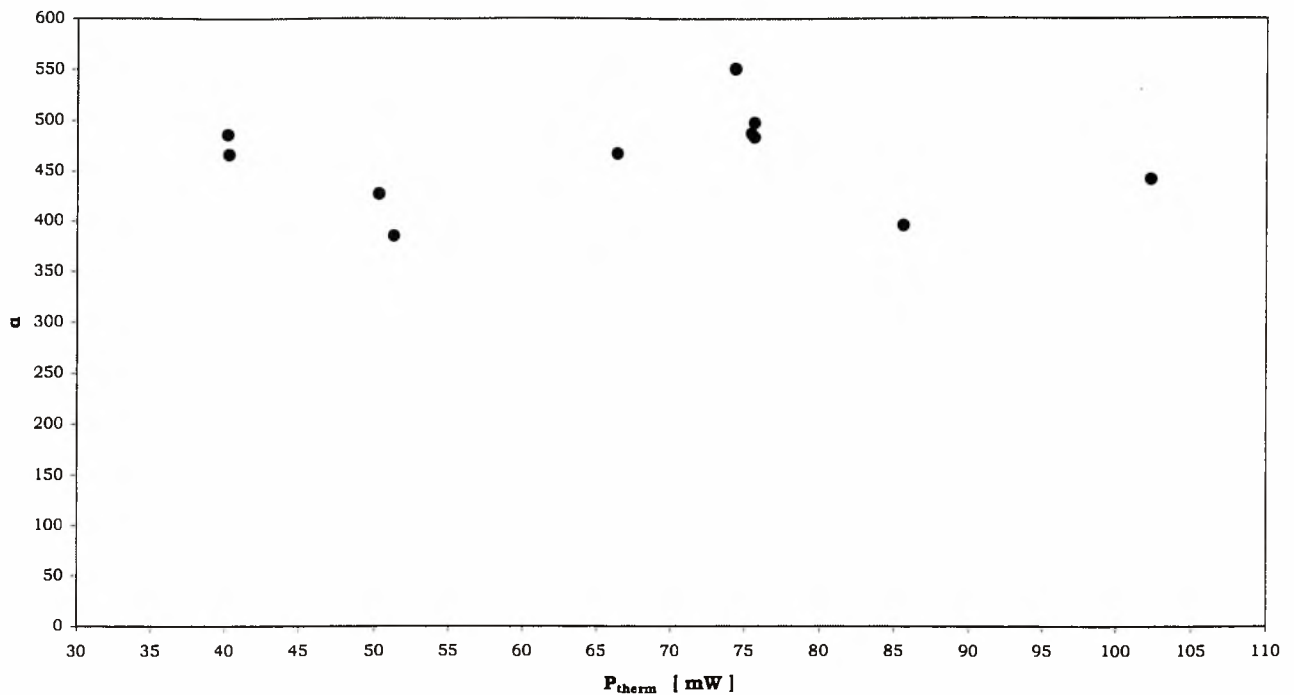
ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα προς σχηματισμό φυσαλίδων.



Σχήμα 5.3.4 Εξάρτηση του συντελεστή a , της παραβολικής καμπύλης προσαρμογής, από τη τιμή της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, και το είδος του χρησιμοποιούμενου υγρού κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 5.3.5 Εξάρτηση του συντελεστή a , της παραβολικής καμπύλης προσαρμογής, από τη τιμή της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, για τα πειράματα με επτάνιο.



Σχήμα 5.3.6 Εξάρτηση του συντελεστή α , της παραβολικής καμπύλης προσαρμογής, από τη τιμή της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, για τα πειράματα με νερό.

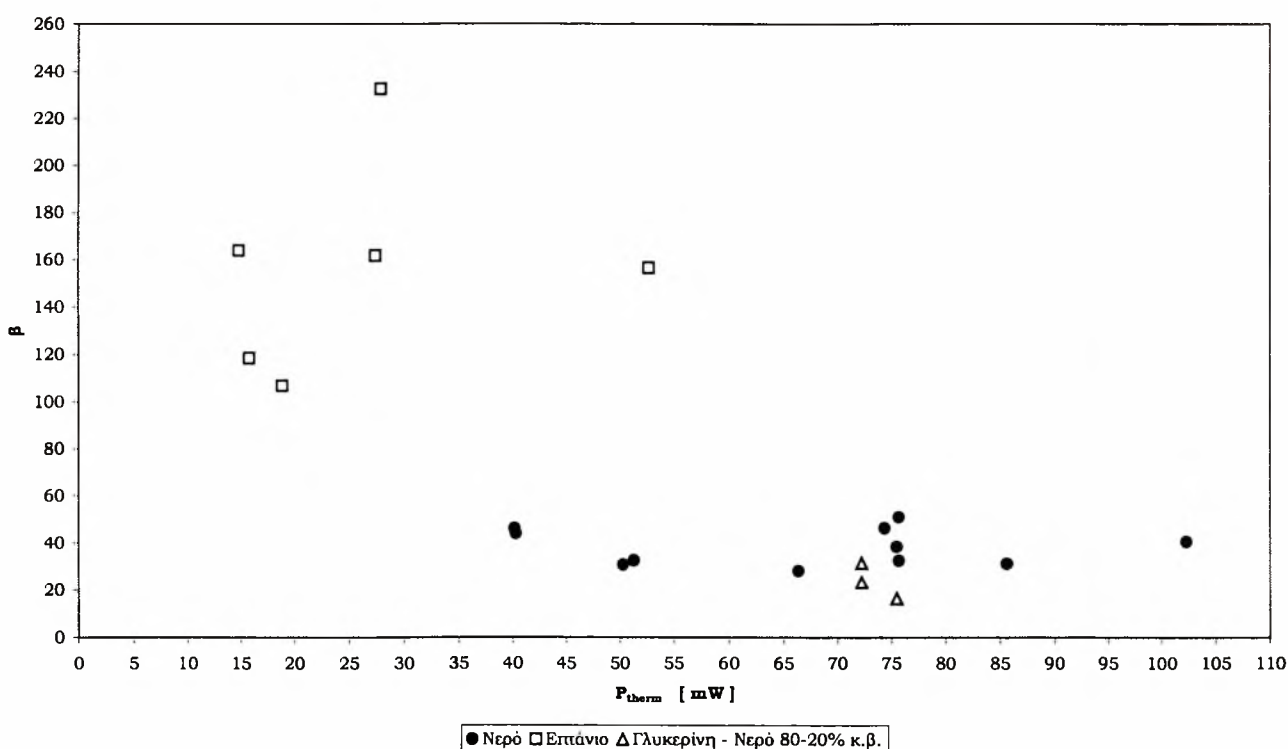
Οι τιμές του συντελεστή β , συναρτήσει της προσφερόμενης θερμικής ισχύος, και ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υγρό, φαίνεται στο Σχ. 5.3.7. Παρατηρούμε ότι και ο συντελεστής β , όπως και ο α , παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές στα πειράματα που διεξήχθησαν με το επτάνιο. Οι τιμές του β για τα πειράματα με επτάνιο κυμαίνονται μεταξύ 107 και 233, για ένα εύρος τιμών της θερμικής ισχύος από 15 έως 53 mW περίπου. Οι τιμές του β για τα πειράματα με χρησιμοποιούμενο υγρό το νερό κυμαίνονται μεταξύ 28 και 51, για ένα εύρος τιμών της θερμικής ισχύος από 40 έως 102 mW περίπου. Τέλος, για το μείγμα γλυκερίνης – νερού, οι τιμές του συντελεστή β , ο οποίος καθορίζει το ρυθμό ανάπτυξης της φυσαλίδας στη γραμμική περιοχή της ανάπτυξης της, κυμαίνονται μεταξύ 16 και 31, για τιμές της θερμικής ισχύος οι οποίες ελάχιστα διαφέρουν μεταξύ τους, 72-76 mW. Παρατηρώντας κανείς το διάγραμμα του Σχ. 5.3.7, δεν μπορεί να συμπεράνει μια σαφή εξάρτηση του συντελεστή β και από τη τιμή της θερμικής ισχύος.

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε ν' αναφέρουμε ότι το είδος του χρησιμοποιούμενου υγρού στα πειράματα μας είναι καθοριστικό για τη τιμή των συντελεστών α και β , άρα και του ρυθμού ανάπτυξης της φυσαλίδας, και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τις τιμές των συντελεστών, όπως αυτές φαίνονται στα Σχ. 5.3.4 και 5.3.7. Αυτό που παίζει καθοριστικό ρόλο είναι οι διαφορετικές τιμές των φυσικών ιδιοτήτων των τριών χρησιμοποιούμενων υγρών, και πιο συγκεκριμένα του συντελεστή διάχυσης και της διαλυτότητας του διοξειδίου του άνθρακα στο χρησιμοποιούμενο υγρό. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαλυτότητα, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα υπάρχει μέσα στο διάλυμα, η οποία μπορεί να σχηματίσει φυσαλίδες. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διάχυσης, τόσο πιο έντονη είναι η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα από το κυρίως σώμα του διαλύματος προς τη φυσαλίδα, και άρα πιο γρήγορη η ανάπτυξη της φυσαλίδας. Τα παραπάνω δικαιολογούν τις μεγάλες τιμές των συντελεστών α και

β για το επτάνιο, αφού αυτό, όπως είδαμε στην ενότητα 5.1 και φαίνεται στα δεδομένα του πίνακα 5.1, έχει σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερη διαλυτότητα, και πάνω από 3 φορές μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης, του διοξειδίου του άνθρακα από το νερό. Η διαφορά αυτή των ιδιοτήτων του επτανίου με το νερό γίνεται ακόμα μεγαλύτερη αν τις συγκρίνει με τις αντίστοιχες του μίγματος γλυκερίνης – νερού, όπως φαίνεται από τα πειραματικά μας αποτελέσματα, γεγονός όμως που δεν καταφέραμε να επιβεβαιώσουμε πλήρως, αφού δεν καταφέραμε να εντοπίσουμε δεδομένα διαλυτότητας και δεδομένα εξάρτησης του συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα από τη θερμοκρασία, για το μείγμα γλυκερίνης – νερού 80-20% κ.β..

Η επίδραση της επιφανειακής τάσης είναι ένα θέμα που πρέπει να μελετηθεί εκτεταμένα, για να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε αξιόπιστα συμπεράσματα, ενώ η επίδραση του ιξώδους γνωρίζουμε ότι είναι καθοριστική στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης της φυσαλίδας, τα οποία όμως δεν μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής.

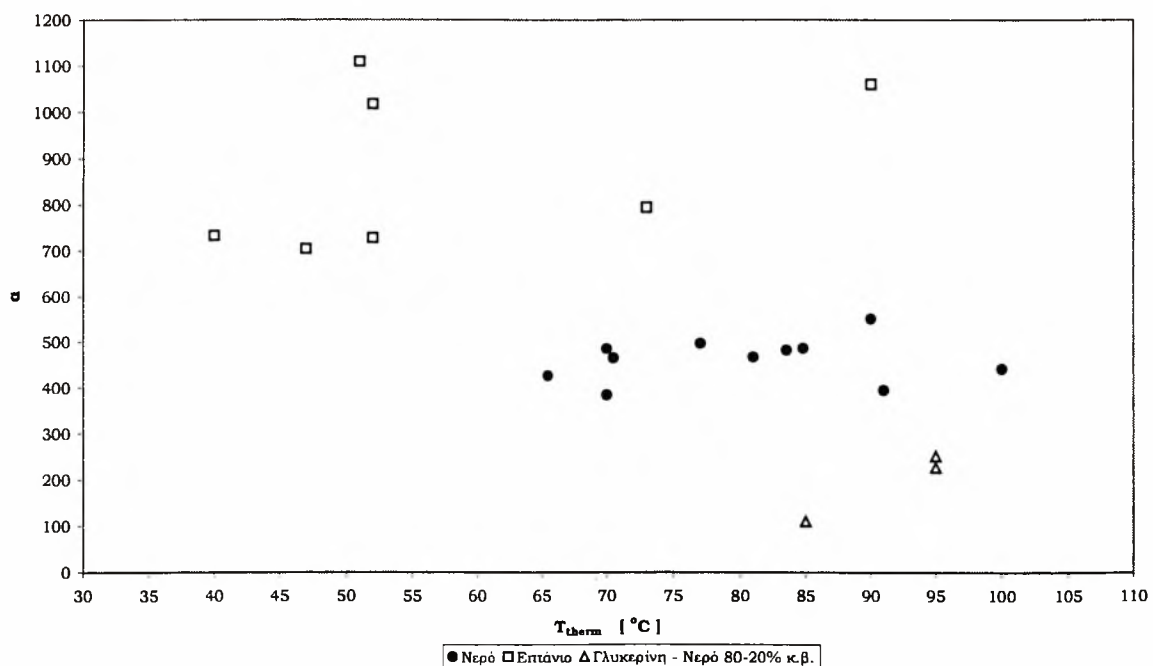
Η επίδραση της τάσης ατμών του υγρού στην αναπτυσσόμενη φυσαλίδα, εκτιμάται ότι είναι δευτερεύουσας σημασίας, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Πιθανόν, σε υψηλές θερμοκρασίες να γίνεται σημαντική, αλλά αυτό πρέπει να εξακριβωθεί με τη διενέργεια πειραμάτων αναφοράς όπου θα εξετάζεται η ανάπτυξη φυσαλίδων σε κάθε ένα από τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματά μας, χωρίς αυτά να περιέχουν διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα.



Σχήμα 5.3.7 Εξάρτηση του συντελεστή β , της ευθείας προσαρμογής, από τη τιμή της θερμικής ισχύος που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, και το είδος του χρησιμοποιούμενου υγρού κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

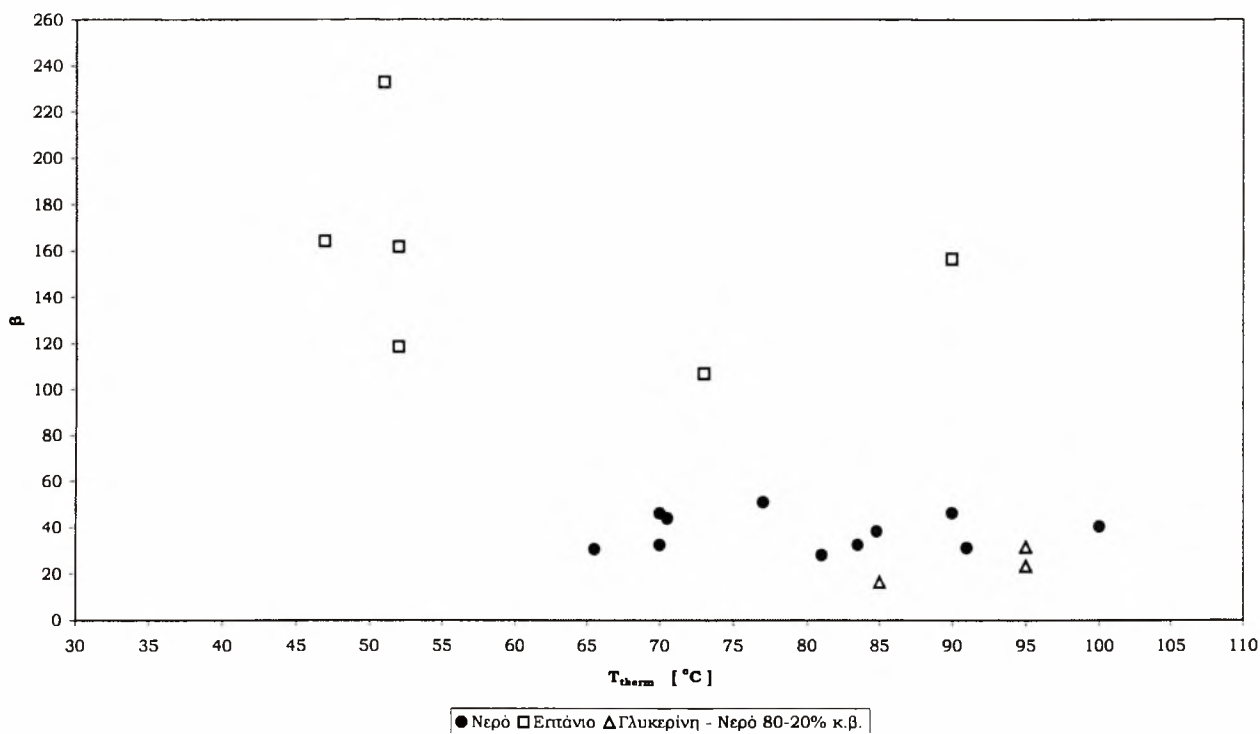
Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να διακριβώσουμε αν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των συντελεστών α και β και της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Η θερμοκρασία του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, είναι πολύ σημαντική παράμετρος του εξεταζόμενου προβλήματος, αφού αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οριακή συνθήκη του προβλήματος στην προσπάθεια προσομοίωσης του ή αναλυτικής επίλυσης του. Η χρησιμοποίηση της θερμοκρασίας του thermistor σαν οριακής συνθήκης του προβλήματος, πλεονεκτεί έναντι της χρησιμοποίησης της τιμής της διδόμενης θερμικής ισχύος κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, γιατί η θερμότητα που δίνεται στην δεύτερη περίπτωση δεν δίνεται ολόκληρη στη φυσαλίδα, αλλά διαχέεται ισομερώς στο χώρο. Είναι πολύ δύσκολο κανείς, λοιπόν, να υπολογίσει το ακριβές ποσό της θερμικής ισχύος που δίνεται στη φυσαλίδα κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Αντίθετα η θερμοκρασία, αν και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, μέσω της μεταβολής της διδόμενης θερμικής ισχύος όπως είδαμε στα αποτελέσματα των πειραμάτων στην ενότητα 5.2, μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του χρόνου και να χρησιμοποιηθεί αυτούσια σαν οριακή συνθήκη του προβλήματος, χωρίς να χρειάζονται περαιτέρω υπολογισμοί.

Στα Σχ. 5.3.8 και 5.3.9 φαίνονται οι τιμές των συντελεστών α και β , αντίστοιχα, συναρτήσει της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού. Τόσο στις τιμές του συντελεστή α για τα πειράματα με επτάνιο, όσο και γι' αυτά με γλυκερίνη υπάρχει μία σαφής αυξητική τάση της τιμής του α συναρτήσει της θερμοκρασίας. Το ίδιο δείχνουν και τα αποτελέσματα για το νερό, εκτός από τα δύο σημεία του διαγράμματος του Σχ. 5.3.8 που αντιστοιχούν σε τιμές της θερμοκρασίας του thermistor ίση με 91 και 100°C. Τα δύο αυτά σημεία αντιστοιχούν στα πειράματα που έγιναν κατά τη διάρκεια της 26^{ης} και 28^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας των πτήσεων, και στα οποία αναφερθήκαμε και προηγουμένως.



Σχήμα 5.3.8 Εξάρτηση του συντελεστή α , της παραβολικής καμπύλης προσαρμογής, από τη θερμοκρασία του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, και το είδος του χρησιμοποιούμενου υγρού κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Οι τιμές του συντελεστή β , όπως αυτές φαίνονται στο Σχ. 5.3.8, φανερώνουν ότι δεν υπάρχει σαφή εξάρτηση των τιμών του συντελεστή από τη θερμοκρασία του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, όπως ακριβώς δεν υπήρχε και εξάρτηση από τη τιμή της θερμικής ισχύος. Η εξάρτηση όμως, του συντελεστή β , από το χρησιμοποιούμενο υγρό, είναι και εδώ εμφανής.



Σχήμα 5.3.9 Εξάρτηση του συντελεστή β , της ευθείας προσαρμογής, από τη τιμή της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, και το είδος του χρησιμοποιούμενου υγρού κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Μελετώντας προσεκτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είμαστε σε θέση να αναφέρουμε επιγραμματικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν απ' αυτά, καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

Τα συμπεράσματα που αφορούν στη λειτουργία της πειραματικής μας συσκευής και τη διαδικασία ανάλυσης των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, είναι τα εξής:

- ✓ Έγινε με επιτυχία η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, και αποδείχθηκε ότι η διαδικασία μέτρησης της διαμέτρου της φυσαλίδας με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε έχει αξιόπιστα αποτελέσματα.
- ✓ Καλύτερα πειραματικά αποτελέσματα, από τα οποία μπορούν να εξαχθούν πιο αξιόπιστα συμπεράσματα είχαμε από τα πειράματα που το χρησιμοποιούμε υγρό ήταν το νερό και το επτάνιο, ενώ τα αξιοποιησιμα αποτελέσματα των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκε το μείγμα γλυκερίνης - νερού ήταν ελάχιστα.
- ✓ Η μετρούμενη θερμοκρασία στο thermistor USR2, απέναντι από το thermistor θέρμανσης, δεν έχει αξιόλογες μεταβολές κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, με αποτέλεσμα να μην γνωρίζουμε την ακριβή μεταβολή της θερμοκρασίας του διαλύματος κατά τη διάρκεια του πειράματος.
- ✓ Η τιμή της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού, V_{DL} , μειώνεται με την ανάπτυξη της φυσαλίδας.
- ✓ Η τιμή της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, που δίνεται κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, μεταβάλλονται με την ανάπτυξη της φυσαλίδας, η τιμή τους δηλαδή είναι συνάρτηση του χρόνου. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική γιατί τόσο η ισχύς, όσο και η θερμοκρασία του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, μπορούν να αποτελέσουν οριακή συνθήκη του εξεταζόμενου προβλήματος.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, είναι τα εξής:

- ✓ Η μορφή της καμπύλης μεταβολής της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας είναι παραβολική για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης αυτής, και στη συνέχεια γραμμική. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για τα τρία χρησιμοποιούμενα υγρά.
- ✓ Έγινε προσαρμογή της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας, σε δύο τμήματα, το παραβολικό, όπου η διάμετρος της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, και το γραμμικό, όπου η διάμετρος της φυσαλίδας είναι ανάλογη του χρόνου.

- ✓ Στο παραβολικό τμήμα της καμπύλης ανάπτυξης της φυσαλίδας, ελέγχων μηχανισμός είναι η διάχυση μάζας και θερμότητας. Δεν καταφέραμε να εξηγήσουμε ποιος είναι ο μηχανισμός που ελέγχει την ανάπτυξη της φυσαλίδας όταν η διάμετρος της μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο.
- ✓ Οι τιμές των συντελεστών α και β εξαρτώνται από το χρησιμοποιούμενο υγρό. Για το επτάνιο παρατηρούμε τις μεγαλύτερες τιμές των συντελεστών, ενώ οι χαμηλότερες είναι αυτές των πειραμάτων που το χρησιμοποιούμενο υγρό ήταν το μείγμα γλυκερίνης - νερού.
- ✓ Οι υψηλότερες τιμές των συντελεστών α και β για το επτάνιο, οφείλονται στις πολύ υψηλές τιμές διαλυτότητας και του συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα σε αυτό.
- ✓ Παρατηρήσαμε ότι υπάρχει μια σαφής αυξητική τάση της τιμής του συντελεστή α της παραβολικής καμπύλης προσαρμογής, όταν αυξάνεται, είτε το μέγεθος της θερμικής ισχύος, είτε η τιμή της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού.
- ✓ Ο συντελεστής β , της ευθείας προσαρμογής, δεν εξαρτάται με σαφή τρόπο από τη τιμή της θερμικής ισχύος και τη τιμή της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού.
- ✓ Το ιξώδες και η επιφανειακή τάση παίζουν σημαντικό ρόλο στα αρχικά στάδια ανάπτυξης της φυσαλίδας, τα οποία δεν μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής, εξαιτίας της χαμηλής ταχύτητας δειγματοληψίας της καταγραφόμενης εικόνας.

Οι προτάσεις που θα μπορούσαν να γίνουν για μελλοντική έρευνα και συνέχισης της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής, είναι οι εξής:

- Η διεξαγωγή των αντίστοιχων πειραμάτων σε συνθήκες γήινης βαρύτητας, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της βαρύτητας στην ανάπτυξη της φυσαλίδας, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα σε συνθήκες μικροβαρύτητας.
- Να αναλύσουμε τα δεδομένα εικόνας από τα πειράματα σε interlaced και 3 χρώματα, έτσι ώστε να πάρουμε μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας (150 frames/sec). Η μεγαλύτερη ταχύτητα δειγματοληψίας είναι πολύ σημαντική:
 - για τη καταγραφή των αρχικών σταδίων ανάπτυξης των φυσαλίδων, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης
 - για να πάρουμε καλύτερα αποτελέσματα στη προσαρμογή του παραβολικού τμήματος, αφού θα έχουμε περισσότερα δεδομένα για τα αρχικά στάδια ανάπτυξης της φυσαλίδας, ειδικά για τα πειράματα με επτάνιο, όπου η ταχύτητα ανάπτυξης της φυσαλίδας είναι εκρηκτική.

- Καταγραφή της έναρξης του θερμικού παλμού στα δεδομένα εικόνας και καλύτερη μέτρηση του θερμοκρασιακού πεδίου.
- Ο υπολογισμός της τιμής της θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, συναρτήσει του χρόνου, για να χρησιμοποιηθούν σαν οριακές συνθήκες του προβλήματος.
- Να γίνει προσομοίωση ή απλοποιημένο αναλυτικό μοντέλο, του εξεταζόμενου προβλήματος, έτσι ώστε να επιβεβαιωθούν τα πειραματικά μας αποτελέσματα, και για να μελετηθεί η επίδραση της προσφερόμενης θερμικής ισχύος και της θερμοκρασίας του thermistor, κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού στους συντελεστές α και β .

Βιβλιογραφία

1. J. M. Prausnitz, R. N. Lichtenthaler & E. G. de Azevedo, *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*, Prentice-Hall, 2nd Edition (1986).
2. David R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 77th Edition (1996-97).
3. R. C. Reid, J. M. Prausnitz & B. E. Poling, *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, 4th Edition (1987).
4. G. F. Hewitt, G. L. Shires & Y. V. Polezhaev, *International Encyclopedia of Heat & Mass Transfer*, CRC Press (1999).
5. *ESA's 25th Parabolic Flight Campaign Users' Manual*, Novespace (1998).
6. P. B. Whalley, *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Oxford University Press (1996).
7. Hans Dieter Baehr & Karl Stephan, *Heat and Mass Transfer*, Springer (1998).
8. L. E. Scriven, "On the dynamics of phase growth", *Chemical Engineering Science* **10** (1959) 1-13.
9. M. Cable and J. K. Frade, "Diffusion-controlled growth of multi-component gas bubbles", *Journal of Material Science* **22** (1987) 919-924.
10. E. J. Barlow and W. E. Langlois, "Diffusion of gas from a liquid into an expanding bubble", *IBM J. Res. Dev.* **6** (1962) 329-337.
11. M. S. Plesset and S. A. Zwick, "The growth of vapor bubbles in superheated liquids", *Journal of Applied Physics* **25** (1954) 493-500.
12. Daniel E. Rosner and Michael Epstein, "Effects of interface kinetics, capillarity and solute diffusion on bubble growth rates in highly supersaturated liquids", *Chemical Engineering Science* **27** (1972) 69-88.
13. E. Ruckenstein, "On mass transfer in the continuous phase from spherical bubbles or drops", *Chemical Engineering Science* **19** (1964) 131-146.
14. Hee Ju Yoo and Chang Dae Han, "Oscillatory behavior of a gas bubble growing (or collapsing) in viscoelastic liquids", *AIChE Journal* **28** (1982) 1002-1009.
15. R. K. Upadhyay, "Study of bubble growth in foam injection molding", *Adv. Polymer Technology* **5** (1985) 55-64.
16. Parviz Payvar, "Mass transfer – controlled bubble growth during rapid decompression of a fluid", *Int. J. Heat Mass Transfer* **30** (1987) 699-706.
17. Ali Arefmanesh, Suresh G. Advani and Efstathios E. Michaelides, "A parametric study of bubble growth during low pressure foam molding process", *Polym. Engng. Sci.* **30** (1990) 1330-1338.
18. Ali Arefmanesh, Suresh G. Advani and Efstathios E. Michaelides, "An accurate numerical solution for mass diffusion - induced bubble growth in viscous liquids containing limited dissolved gas", *Int. J. Heat Mass Transfer* **35** (1992) 1711-1722.
19. A. Arefmanesh and S. G. Advani, "Diffusion-induced growth of a gas in a viscoelastic fluid", *Rheologica Acta* **30** (1991) 274-283.
20. A. Arefmanesh, S. G. Advani and E. E. Michaelides, "A numerical study of bubble growth during low pressure structural foam molding process", *Polymer Engineering and Science* **30** (1990) 1330-1337.
21. D. C. Venerus, N. Yala, and B. Bernstein, "Analysis of diffusion – induced bubble growth in viscoelastic liquids", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **75** (1998) 55-75.

22. D. Lastochkin and M. Favelukis, "Bubble growth in a variable diffusion coefficient liquid", *Chemical Engineering Journal* **69** (1998) 21-25.
23. Maarten Sneep, *Bubble growth during a temperature rise in a liquid*, Graduate Thesis, Van der Waals-Zeeman Instituut, University Van Amsterdam (1997).
24. T. S. H. van Lieshout & A. C. Michels, "*MicroKelvin Gradient-Reduction Thermostats for Fluid Experiments on Microgravity Platforms*", Proc. of Second European Symposium "Fluids in Space" (1996).
25. Robert de Bruijn, "*Heat Transfer in a Critical Fluid under Microgravity Conditions*", PhD Thesis, University of Amsterdam (1999).
26. Robert H. Perry, Don W. Green, "*Perry's Chemical Engineers' Handbook*", McGraw-Hill (1999).
27. Carl L. Yaws, "*Chemical Properties Handbook*", McGraw-Hill (1999).
28. B. B. Mikic, W. M. Rohsenow and P. Griffith, "On bubble growth rates", *Int. J. Heat Mass Transfer* **13** (1970) 657-666.
29. Ho Sung Lee and Herman Merte, Jr, "Spherical vapor bubble growth in uniformly superheated liquids", *Int. J. Heat Mass Transfer* **39** (1996) 2427-2447.
30. P. Dergarabedian, "Observations on bubble growth in various superheated liquids", *J. Fluid Mech.* **9** (1960) 39-48.
31. L. W. Florschuetz, C. L. Henry and A. Rashid Khan, "Growth rates of free vapor bubbles in liquids at uniform superheats under normal and zero gravity conditions", *Int. J. Heat Mass Transfer* **12** (1969) 1465-1489.
32. Y. C. Lien, "*Bubble growth rates at reduced pressure*", D. Sci. Thesis, MIT (1969).
33. P. G. Kosky, "Bubble growth measurements in uniformly superheated liquids" *Numer. Engng. Sci.* **23** (1968) 695-706.
34. T. H. Bohrer, "*Bubble growth in highly superheated liquids*", M.S. Thesis, Chemical Engineering, Purdue University (1973).
35. Lord Rayleigh, *Phil. Mag.* **34** (1917) 94.
36. A. Prosperetti and M. Plesset, "Vapor-bubble growth in a superheated liquid", *J. Fluid Mechanics* **85** (1978) 349-368.
37. M. G. Cooper, "The microlayer and bubble growth in nucleate pool boiling", *Int. J. Heat Mass Transfer* **12** (1969) 915-933.
38. H. Kalra, H. Kubota, D. B. Robinson & Heng-Joo Ng, "Equilibrium phase properties of the carbon dioxide-n-heptane system", *Journal of Chemical & Engineering Data* **23** (1978) 317-321.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Β. Μποντόζογλου, Αν. Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, για τη βοήθειά του και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να καταπιαστώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Θ. Καραπάντσιο, Λέκτορα του Τμήματος Χημείας του Α.Π.Θ., για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση του, αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, ακόμη, τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Α. Μ. Σταματέλλο, Αν. Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Γ. Λυμπερόπουλο, Επικ. Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας και Σπ. Καραμάνο, Λέκτορα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, για τη τιμή που μου έκαναν αποδεχόμενοι την πρότασή μου για να είναι μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διατριβής μου.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω:

Τους Ολλανδούς συνεργάτες μας, και ιδιαιτέρως τον Robert de Bruijn, ο οποίος με βοήθησε να εξοικειωθώ με το χειρισμό της πειραματικής συσκευής.

Τους Νίκο Παπααρηγορίου, Δρ. Μιχάλη Βλαχογιάννη, Σπύρο Παπασπύρου, Κώστα Ζαρογουλίδη, για τη σημαντική βοήθεια τους, καθώς και τον Νίκο Χολέβα, Μηχανικό Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, για την πολύτιμη βοήθεια του.

Τον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Καθηγητή Παντελή Λαζαρίδη, και διευθυντή του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικής Επικοινωνίας και Οπτικοακουστικής Τεκμηρίωσης, του Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, καθώς και το συνεργάτη του Εργαστηρίου, Γιάννη Βογιατζή, για την βοήθεια τους σε θέματα επεξεργασίας ψηφιακού βίντεο.

Τους φίλους μου Στέλιο Κουκούμιαλο, Γιάννη Λιάτσικο, Σάββα Δουβαρτζίδη, Νίκο Αλεξόπουλο, Αλέξη Αναστασιάδη, για την ηθική τους υποστήριξη.

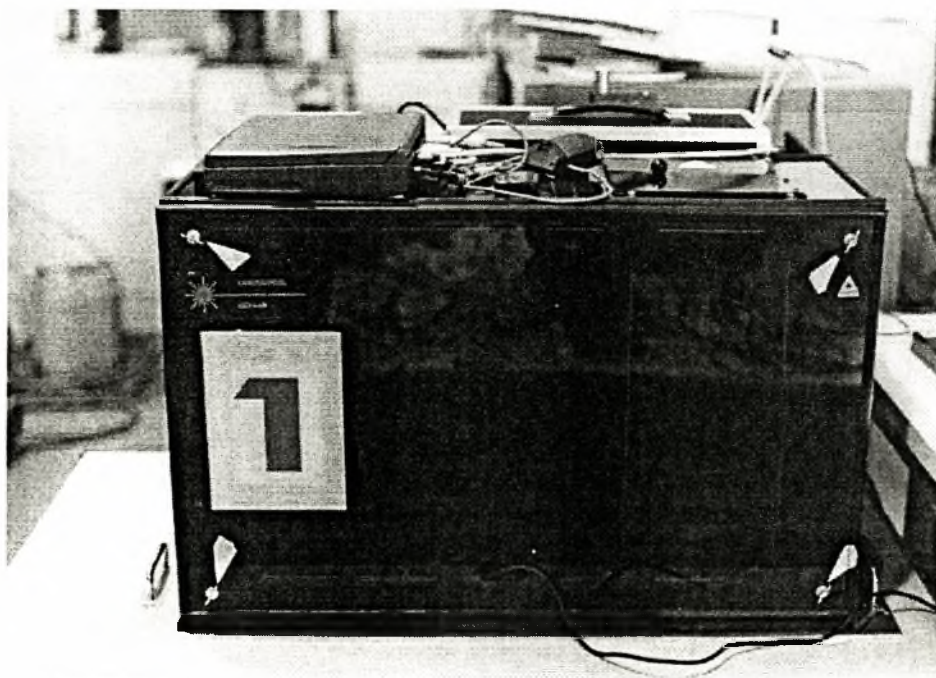
Τους γονείς μου, χάρις στους κόπους τους και τις θυσίες των οποίων, μου έδωσαν τη δυνατότητα να αποκτήσω το Μεταπτυχιακό μου Δίπλωμα, και τα αδέρφια μου, Ουρανία και Γιάννη, για τη συμπαράστασή τους.

Την Σοφία Παναρέτου για την συνεχή συμπαράσταση και στήριξη της, τόσο στις καλές, όσο και στις δύσκολες στιγμές αυτής της δουλειάς.

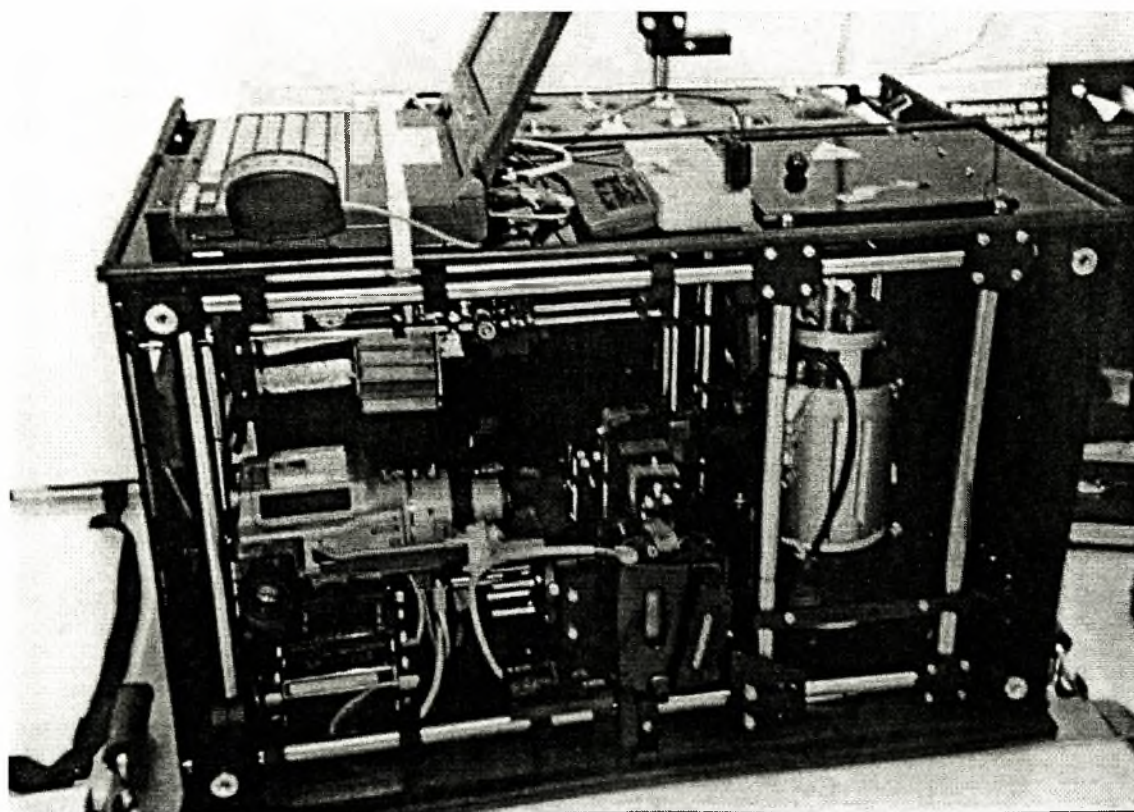
Παράρτημα

- A. Φωτογραφίες
- B. Κώδικες
- Γ. Αρχείο εξόδου του προγράμματος Snoop
- Δ. Τα μηχανικά συστήματα
- Ε. Οι θερμαντήρες
- ΣΤ. Οδηγίες χρήσης του προγράμματος Snoop
- Z. Υπολογισμός των P_{therm} και T_{therm}
- Η. Δεδομένα διαχυτότητας και επιφανειακής τάσης
- Θ. Ημιεμπειρική προσαρμογή των αποτελεσμάτων
- I. Πίνακες Μετασχηματισμού Laplace

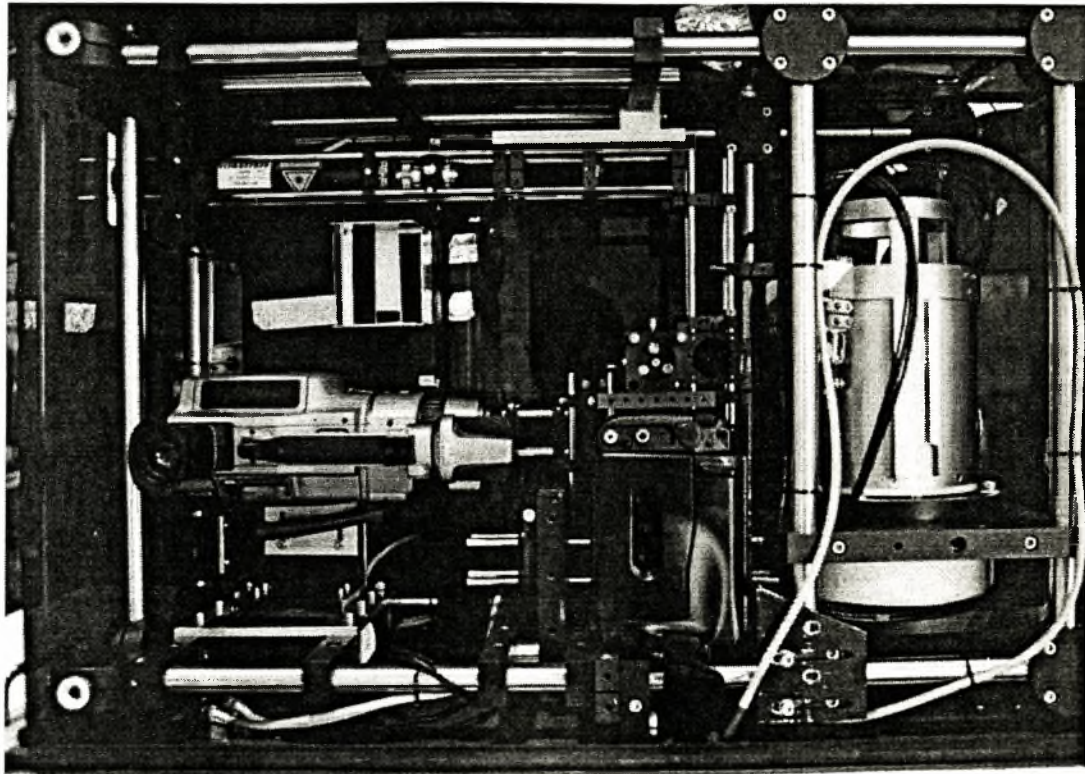
Α. Φωτογραφίες



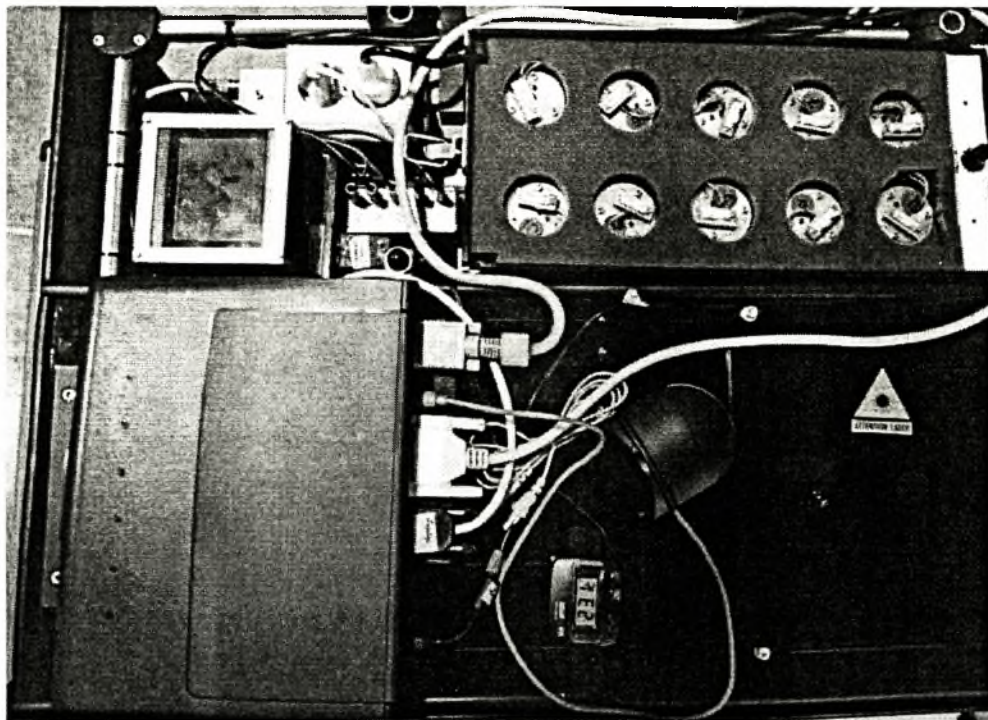
Φωτογραφία Α.1 Η πειραματική μας συσκευή.



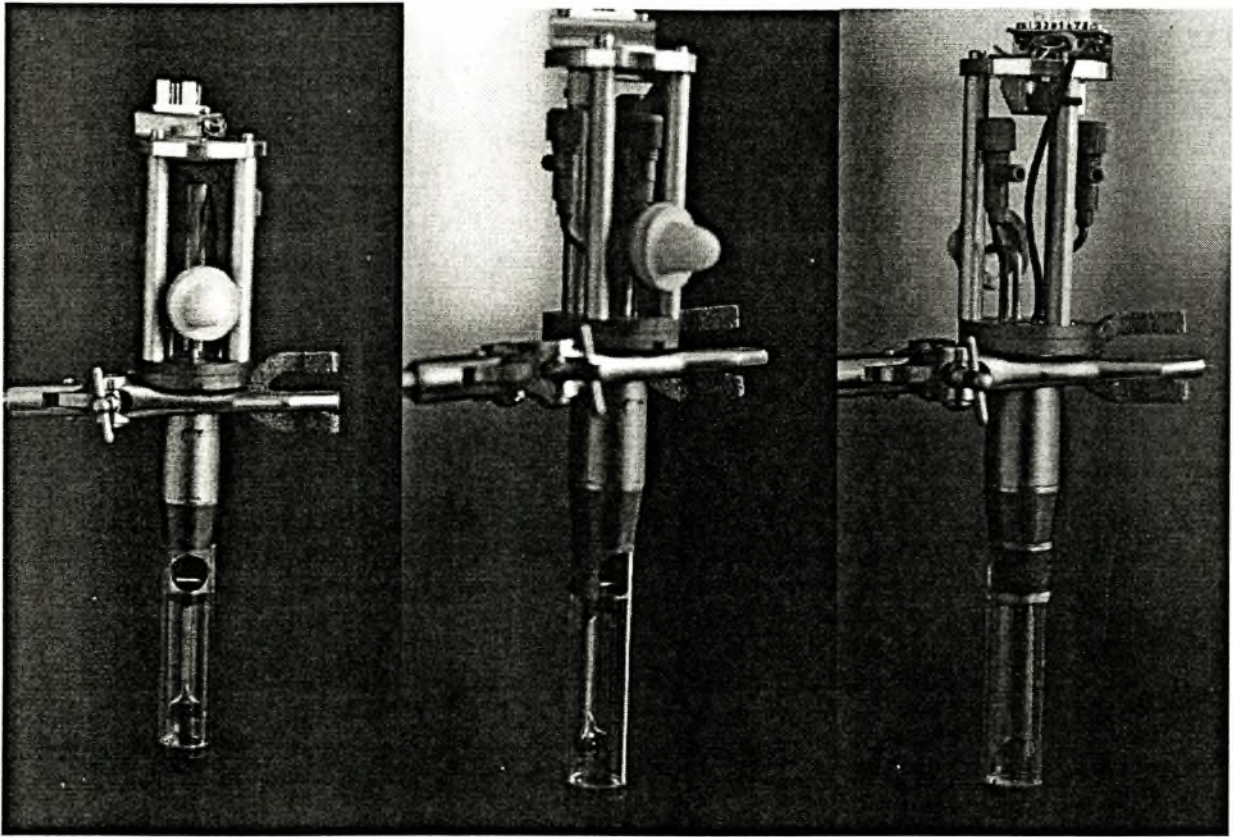
Φωτογραφία Α.2 Η πειραματική μας συσκευή κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



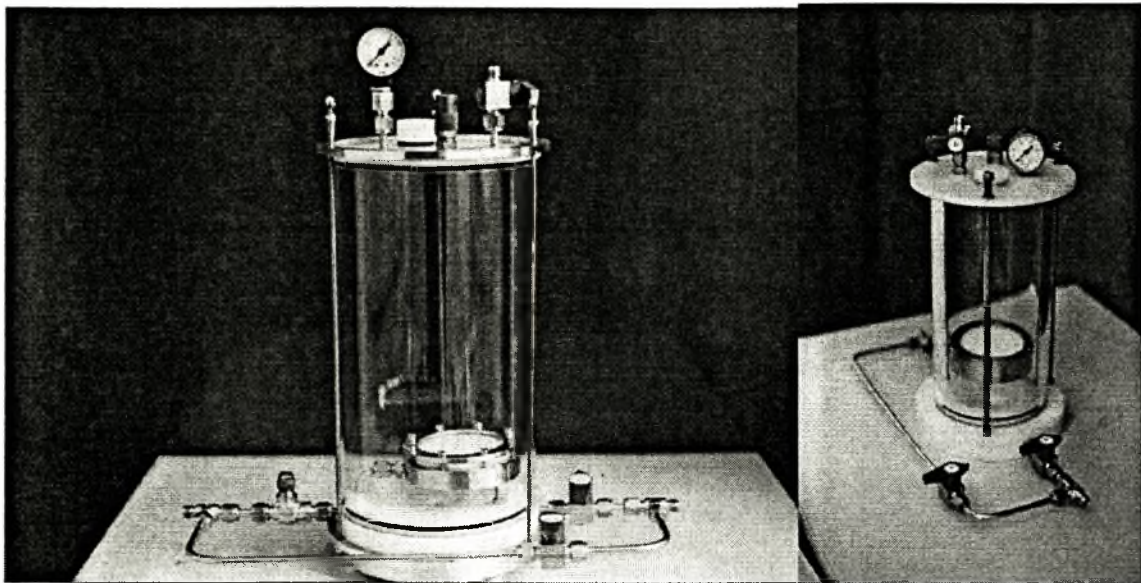
Φωτογραφία Α.3 Ο θερμοστάτης, το σύστημα οπτικών, οι κάμερες και η μονάδα laser, της πειραματικής μας συσκευής.



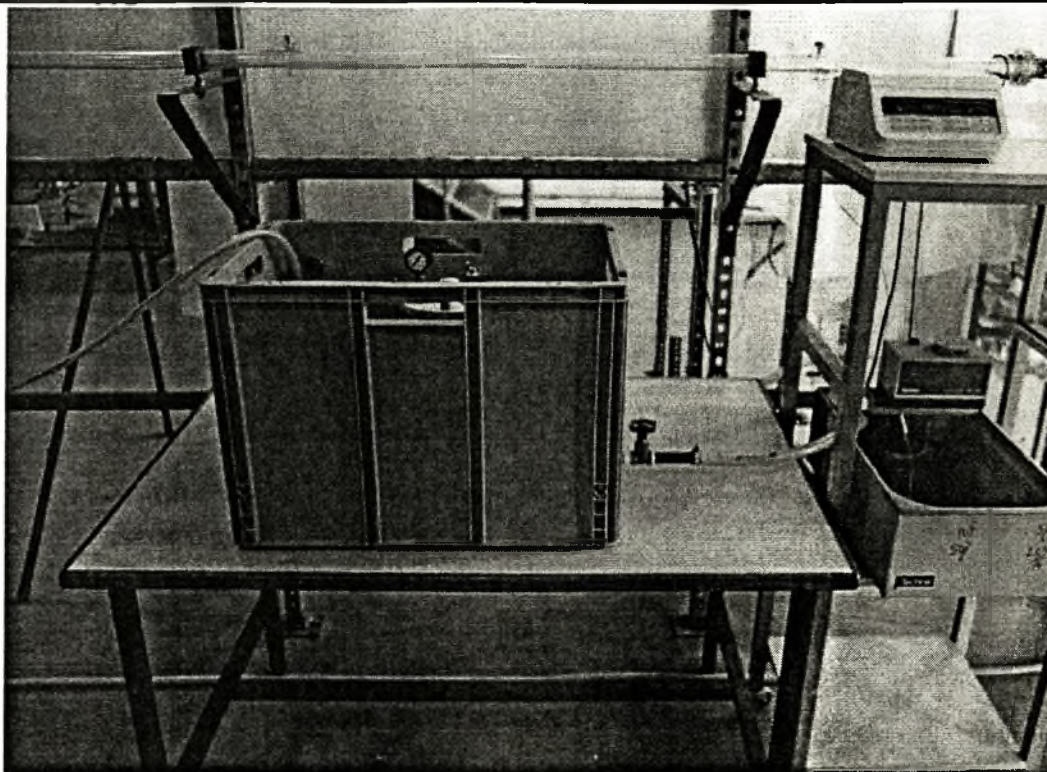
Φωτογραφία Α.4 Κάτοψη της πειραματικής μας συσκευής. Διακρίνονται κάτω αριστερά ο ηλ. υπολογιστής, και πάνω δεξιά, το κιβώτιο φύλαξης των κελιών.



Φωτογραφία Α.5 Διαφορετικές όψεις του εναλλάξιμου κελιού.



Φωτογραφία Α.6 Οι δύο συσκευές κορεσμού.



Φωτογραφία Α.7 Η διάταξη του ισοθερμοκρασιακού λουτρού.

B. Κώδικες

B.1 Κώδικας Corel Photoshop

```
REM Created in CorelPhotoPaint Version 9.337
REM Created On Thursday, November, 30, 2000 by C. S. Panoutsos
dim a
dim b
dim i
for i= 1 to 1200
  a="E:\Frames\030699\Water\030699_28\030699_28_" & i & ".bmp"
  b="E:\Frames\030699\Water\030699_28\bw\030699_28_" & i & ".bmp"
WITHOBJECT "CorelPhotoPaint.Automation.9"
  .FileOpen a, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1
  .ImageConvert 2, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, FALSE
  .FileSave b, 769, 0
  .FileClose
END WITHOBJECT
next i
```

B.2 Κώδικες MatLab

B.2.1 Κώδικας υπολογισμού οριζόντιας διαμέτρου

```

tic
echo off
first=textread('input.txt','%s','headerline',1);
first=char(first)
numm=1;
number=input('give the total number of images ');
limitx1=input('give the pixel number x1 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
limitx2=input('give the pixel number x2 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
limity1=input('give the pixel number y1 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
limity2=input('give the pixel number y2 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
heater=double(imread(strcat(first,int2str(numm)),'bmp'));
qwertia1=max(max(heater));
qwertia2=mean(mean(heater));
for num=1:number
    num;
    temporary_matrix1=double(imread(strcat(first,int2str(num)),'bmp'));
    secmatrix=temporary_matrix1(limitx1:limitx2,limity1:limity2)-
heater(limitx1:limitx2,limity1:limity2);
    [C,Vi]=max(secmatrix);
    CC=35;
    counter=round(1);
    lim=round(limity2-limity1+1);
    for k=1:lim
        if (C(k)>(CC))
            %counter=1
            vvv(counter)=k;
            counter=round(counter+1);
            Dbubble(num)=max(vvv)-min(vvv);
            D=Dbubble'; % D is the horizontal diameter of the bubble
        else
            continue
        end
    end
end
clear vvv CC C Vi counter
end
toc

```

B.2.2 Κώδικας υπολογισμού κάθετης διαμέτρου

```

tic
echo off
first=textread('input.txt','%s','headerline',1);
first=char(first)
numm=1;

```

```
number=input('give the total number of images ');
limitx1=input('give the pixel number x1 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
limitx2=input('give the pixel number x2 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
limity1=input('give the pixel number y1 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
limity2=input('give the pixel number y2 for the secondary matrix -where the bubble exists- ');
heater=double(imread(strcat(first,int2str(numm)),'bmp'));
qwertia1=max(max(heater));
qwertia2=mean(mean(heater));
for num=1:number
    num;
        temporary_matrix1=double(imread(strcat(first,int2str(num)),'bmp'));
        secmatrix=temporary_matrix1(limitx1:limitx2,limity1:limity2)-
heater(limitx1:limitx2,limity1:limity2);
    [C,Vi]=max(secmatrix');
    CC=25;
    counter=round(1);
    lim=round(limitx2-limitx1+1);
    for k=1:lim
        if (C(k)>(CC))
            %counter=1
            vvv(counter)=k;
            counter=round(counter+1);
            Dbubble(num)=max(vvv)-min(vvv);
            DV=Dbubble'; % DV is the vertical diameter of the bubble
        else
            end
    end
end
clear vvv CC C Vi counter
end
toc
```

B.3 Κώδικας Python

```
#!/usr/bin/env python
import struct
import sys

# original 112 bytes
# a line equals 108 bytes

#format = '6s 12l l 42s L'
#format = '104sL'
#format = '6s 46s 6s 46s L'
#format = '<6s 42s l 6s 46s L'
#format = '6s 46s 6s 44s B B L'
# some (30x) ... USR3(l), SCUr(l), SCUm(l), USR1(l), USR2(l), TPE(l), Tsetp(l)
# some (46x)... time(L)
#format = '<6x 6l 7l 46x L' # little endian
format = '<6x 6l 7l 22x 5H 14x L' # little endian

data = open(sys.argv[1]).read()

start, stop = 0, struct.calcsize(format)

print "Time\tTsetp\tUSR1\tUSR2\tUSR3\tSCUr\tSCUm\t\
thermistor_heater_on\tplate_heater_on\t\
plate_heater_current\tthermistor_voltage\t\
Mode"

while start < len(data):
    output = struct.unpack(format, data[start:stop])

    Time = output[-1]; Tsetp = output[12]*1e-6
    USR1 = output[9]*1e-6; USR2 = output[10]*1e-6; USR3 = output[6]*1e-6
    SCUr = output[7]*1e-6; SCUm = output[8]*1e-6
    Vdac = (output[-6], output[-5], output[-4], output[-3], output[-2])
    thermistor_heater_on = (Vdac[4] & (0x1 << 10)) == (0x1 << 10)
    plate_heater_on = (Vdac[4] & (0x1 << 9)) == (0x1 << 9)
    plate_heater_current = Vdac[3] * plate_heater_on
    thermistor_voltage = Vdac[2] * thermistor_heater_on

    outformat= "%d\t%8.6f\t%8.6f\t%8.6f\t%8.6f\t%8.6f\t%8.6f\t%u\t%x\t%u\t%u\t$%04X"
    print outformat % ( Time, Tsetp, USR1, USR2, USR3, SCUr, SCUm,
        thermistor_heater_on, plate_heater_on,
        plate_heater_current, thermistor_voltage,
        Vdac[4] )

    start, stop = stop, stop + struct.calcsize(format)
```

B.4 Κώδικας Mathematica

```

Dat = Import["F:106.txt", "Table"];
DOG = Table[Dat[[n]], {n, 100, 322}];
DOG1 = Table[Dat[[n]], {n, 1, 28}];
<< Statistics`NonlinearFit`
NonlinearFit[DOG1, a * t1/2, {t}, {a}]
P2 = Plot[%, {t, 0, 5}, PlotRange -> All]
P1 = ListPlot[DOG1]
P3 = ListPlot[DOG]
Fit[DOG, {1, x}, x]
P4 = Plot[%, {x, 1, 14}]
P5 = ListPlot[Dat]
Show[P1, P2, P3, P4, P5, Frame -> True, FrameLabel -> {"t [ sec ]", "Bubble's Diameter [ μm ]"}]
<< Statistics`LinearRegression`
b1 = Regress[DOG, {1, x}, x] // MatrixForm
modtotal = b1[[1]][[5]][[2]][[1]][[1]][[2]]
total = b1[[1]][[5]][[2]][[1]][[3]][[2]]
r2linear = modtotal / total
aa = NonlinearRegress[DOG1, a * t1/2, {t}, {a}]
correctedtotal = aa[[4]][[2]][[1]][[4]][[2]]
residuals = aa[[4]][[2]][[1]][[2]][[2]]
r2 = 
$$\frac{\text{correctedtotal} - \text{residuals}}{\text{correctedtotal}}$$


```

Γ. Αρχείο εξόδου του προγράμματος Snoopry

Στον παρακάτω Πίνακα Γ.1, παρουσιάζεται η μορφή με την οποία το πρόγραμμα *Snoopry* αποθηκεύει τις μεταβλητές τις οποίες καταγράφει, στο αρχείο εξόδου κατάληξης .log. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των μεταβλητών αναφέρονται σε ένα τμήμα του αρχείου 02069915.log.txt της δεύτερης μέρας των πτήσεων, το οποίο είναι το αρχείο που παίρνουμε μετά τη μετατροπή του αρχείου 02069915.log, από το κώδικα Python.

Οι μεταβλητές που δεν έχουμε εξηγήσει τη σημασία τους στην ενότητα 4.2.2, και φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα Γ.1 είναι οι εξής:

- **Spherical Heater ON:** παίρνει τη τιμή 1 ή 0, όταν ο σφαιρικός θερμαντήρας δίνει θερμικό παλμό ή όχι, αντίστοιχα.
- **Spherical Heater Voltage:** είναι το μέγεθος του θερμικού παλμού (**Vdac3**, όπως απεικονίζεται στην οθόνη του *Snoopry*) σε τιμή διαφοράς δυναμικού [x 1 mV], για το πείραμα του σφαιρικού θερμαντήρα.
- **Plate Heater ON:** παίρνει τη τιμή 1 ή 0, όταν ο επίπεδος θερμαντήρας δίνει θερμικό παλμό ή όχι, αντίστοιχα.
- **Plate Heater Current:** είναι το μέγεθος του θερμικού παλμού (**Vdac4**, όπως απεικονίζεται στην οθόνη του *Snoopry*) σε τιμή έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος [x 20 μ A], για το πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα.

Time [sec]	Tsetp [°C]	USR1 [°C]	USR2 [°C]	USR3 [°C]	SCUr [°C]	SCUm [°C]	Spherical Heater ON	Spherical Heater Voltage [10 mV]	Plate Heater ON	Plate Heater Current [20 μ A]	Mode
54500	32	-0.750881	-0.460649	-0.024486	-0.072481	-0.116797	0	0	0	0	\$2004
54501	32	-0.749361	-0.458919	-0.024024	-0.072903	-0.116877	0	0	0	0	\$2004
54502	32	-0.747677	-0.457116	-0.023517	-0.07316	-0.116963	0	0	0	0	\$2004
54503	32	-0.746084	-0.455364	-0.023013	-0.073298	-0.117068	0	0	0	0	\$2004
54505	32	-0.744468	-0.45362	-0.022546	-0.073356	-0.117183	0	0	0	0	\$2004
54506	32	-0.742872	-0.451875	-0.02211	-0.073337	-0.117305	0	0	0	0	\$2004
54507	32	-0.74118	-0.450089	-0.021714	-0.073263	-0.117417	0	0	0	0	\$2004
54508	32	-0.739546	-0.448331	-0.02136	-0.073164	-0.117532	0	0	0	0	\$2004
54509	32	-0.737857	-0.446583	-0.021058	-0.073053	-0.117645	0	0	0	0	\$2004
54510	32	-0.736317	-0.444847	-0.020799	-0.072939	-0.117768	0	0	0	0	\$2004
54511	32	-0.734718	-0.443127	-0.020564	-0.072817	-0.117873	0	0	0	0	\$2004
54512	32	-0.733026	-0.441414	-0.020353	-0.072696	-0.117978	0	0	0	0	\$2004
54513	32	-0.731469	-0.438009	-0.020156	-0.072579	-0.11808	0	0	0	0	\$2004
54514	32	-0.728128	-0.436314	-0.019776	-0.072356	-0.118257	0	0	0	0	\$2004
54515	32	-0.726549	-0.434626	-0.019581	-0.072247	-0.118326	0	0	0	0	\$2004
54516	32	-0.725055	-0.43294	-0.019368	-0.072129	-0.118374	0	0	0	0	\$2004
54517	32	-0.723693	-0.431299	-0.019157	-0.07203	-0.11844	0	0	0	0	\$2004
54518	32	-0.722195	-0.429645	-0.018942	-0.07193	-0.118483	0	0	0	0	\$2004
54519	32	-0.720656	-0.428112	-0.018729	-0.071844	-0.118536	0	0	0	0	\$2004
54520	32	-0.646221	-0.428321	-0.018511	-0.071754	-0.118587	1	30000	0	0	\$2404

Ανάπτυξη φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα, υπό συνθήκες μικροβαρύτητας

Time [sec]	Tsetp [°C]	USR1 [°C]	USR2 [°C]	USR3 [°C]	SCU _r [°C]	SCU _m [°C]	Spherical Heater ON	Spherical Heater Voltage [10 mV]	Plate Heater ON	Plate Heater Current [20μA]	Mode
54521	32	-0.38811	-0.425414	-0.018267	-0.071656	-0.118598	1	30000	0	0	\$2404
54522	32	-0.233756	-0.422718	-0.01803	-0.071571	-0.11863	1	30000	0	0	\$2404
54523	32	-0.140797	-0.4203	-0.017792	-0.071484	-0.118647	1	30000	0	0	\$2404
54524	32	-0.086166	-0.417398	-0.017561	-0.071398	-0.118666	1	30000	0	0	\$2404
54525	32	-0.053289	-0.414814	-0.017379	-0.071331	-0.118698	1	30000	0	0	\$2404
54526	32	-0.032097	-0.403096	-0.017967	-0.07128	-0.11871	1	30000	0	0	\$2404
54527	32	-0.019335	-0.390015	-0.019089	-0.07131	-0.118725	1	30000	0	0	\$2404
54529	32	-0.011648	-0.374622	-0.01977	-0.071428	-0.118717	1	30000	0	0	\$2404
54530	32	-0.007019	-0.356571	-0.019833	-0.071534	-0.118655	1	30000	0	0	\$2404
54531	32	-0.004232	-0.337792	-0.019463	-0.071664	-0.118608	1	30000	0	0	\$2404
54532	32	-0.002553	-0.317925	-0.018813	-0.071757	-0.118524	1	30000	0	0	\$2404
54533	32	-0.001542	-0.295963	-0.018006	-0.071809	-0.118439	1	30000	0	0	\$2404
54534	32	-0.000933	-0.273597	-0.017143	-0.071823	-0.118345	1	30000	0	0	\$2404
54535	32	-0.000566	-0.250482	-0.016311	-0.071802	-0.118242	1	30000	0	0	\$2404
54536	32	-0.000345	-0.200112	-0.015554	-0.071761	-0.118166	1	30000	0	0	\$2404
54537	32	-0.000132	-0.173805	-0.014352	-0.071639	-0.118038	1	30000	0	0	\$2404
54538	32	-0.000083	-0.146875	-0.013901	-0.071566	-0.117993	1	30000	0	0	\$2404
54539	32	-0.000054	-0.119801	-0.013556	-0.0715	-0.117958	1	30000	0	0	\$2404
54540	32	-0.000037	-0.092175	-0.013271	-0.071413	-0.117934	1	30000	0	0	\$2404
54541	32	-0.000027	-0.050919	-0.01304	-0.071323	-0.1179	1	30000	0	0	\$2404
54542	32	-0.00002	0.016518	-0.012842	-0.071232	-0.117879	1	30000	0	0	\$2404
54543	32	-0.000016	0.124338	-0.012652	-0.071133	-0.117852	1	30000	0	0	\$2404
54544	32	-0.000014	0.273271	-0.012497	-0.07105	-0.117833	1	30000	0	0	\$2404
54545	32	-0.000012	0.447108	-0.012343	-0.070973	-0.117835	1	30000	0	0	\$2404
54546	32	-0.000012	0.629201	-0.01215	-0.070872	-0.117807	1	30000	0	0	\$2404
54547	32	-0.000012	0.810459	-0.011983	-0.070802	-0.11781	1	30000	0	0	\$2404
54548	32	-0.000012	0.960567	-0.0118	-0.070734	-0.117819	1	30000	0	0	\$2404
54549	32	-0.000012	1.065887	-0.011634	-0.070695	-0.117843	1	30000	0	0	\$2404
54550	32	0.116378	1.124397	-0.011445	-0.070656	-0.117868	0	0	0	0	\$2004
54551	32	0.602692	1.139581	-0.011219	-0.070597	-0.117879	0	0	0	0	\$2004
54553	32	0.888636	1.119081	-0.010974	-0.070533	-0.117875	0	0	0	0	\$2004
54554	32	1.401888	1.075644	-0.010726	-0.070482	-0.117897	0	0	0	0	\$2004
54555	32	1.56539	1.017253	-0.010442	-0.070409	-0.117874	0	0	0	0	\$2004
54556	32	1.54301	0.949418	-0.010147	-0.070327	-0.117861	0	0	0	0	\$2004
54557	32	1.446611	0.876537	-0.009866	-0.070238	-0.117835	0	0	0	0	\$2004
54558	32	1.322706	0.801755	-0.0104	-0.070163	-0.117792	0	0	0	0	\$2004
54559	32	1.194733	0.727905	-0.012326	-0.070175	-0.117734	0	0	0	0	\$2004
54560	32	0.958712	0.590811	-0.015178	-0.070394	-0.117592	0	0	0	0	\$2004
54561	32	0.855396	0.528702	-0.018319	-0.071337	-0.117449	0	0	0	0	\$2004
54562	32	0.762059	0.468711	-0.017744	-0.071805	-0.117208	0	0	0	0	\$2004
54563	32	0.677716	0.414036	-0.01626	-0.072174	-0.116922	0	0	0	0	\$2004
54564	32	0.603674	0.364314	-0.014295	-0.072442	-0.116615	0	0	0	0	\$2004

Ανάπτυξη φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα, υπό συνθήκες μικροβαρύτητας

Time [sec]	Tsetp [°C]	USR1 [°C]	USR2 [°C]	USR3 [°C]	SCU _r [°C]	SCU _m [°C]	Spherical Heater ON	Spherical Heater Voltage [10 mV]	Plate Heater ON	Plate Heater Current [20μA]	Mode
54565	32	0.537534	0.31947	-0.012159	-0.072598	-0.116306	0	0	0	0	\$2004
54566	32	0.473639	0.279006	-0.010087	-0.072658	-0.116004	0	0	0	0	\$2004
54567	32	0.414882	0.242581	-0.008253	-0.07266	-0.115746	0	0	0	0	\$2004
54568	32	0.360942	0.209685	-0.006712	-0.072594	-0.11551	0	0	0	0	\$2004
54569	32	0.311159	0.17976	-0.005508	-0.072501	-0.115327	0	0	0	0	\$2004
54570	32	0.265154	0.152451	-0.004629	-0.07239	-0.115199	0	0	0	0	\$2004
54571	32	0.222505	0.12745	-0.004011	-0.072247	-0.115079	0	0	0	0	\$2004
54572	32	0.182977	0.105221	-0.003581	-0.072069	-0.11497	0	0	0	0	\$2004
54573	32	0.146222	0.084726	-0.003281	-0.071849	-0.114838	0	0	0	0	\$2004
54574	32	0.112797	0.064831	-0.003122	-0.071658	-0.114769	0	0	0	0	\$2004
54576	32	0.081351	0.046585	-0.00306	-0.071488	-0.114725	0	0	0	0	\$2004
54577	32	0.05036	0.029776	-0.003033	-0.071321	-0.1147	0	0	0	0	\$2004
54578	32	0.021484	0.014406	-0.00309	-0.071232	-0.114759	0	0	0	0	\$2004
54579	32	-0.005532	0.00041	-0.003059	-0.071078	-0.114766	0	0	0	0	\$2004
54580	32	-0.030689	-0.01231	-0.002987	-0.070911	-0.114763	0	0	0	0	\$2004
54581	32	-0.054327	-0.024033	-0.002909	-0.07078	-0.114796	0	0	0	0	\$2004
54582	32	-0.076398	-0.03482	-0.002793	-0.07065	-0.114822	0	0	0	0	\$2004
54583	32	-0.097199	-0.044845	-0.002658	-0.070538	-0.11487	0	0	0	0	\$2004
54584	32	-0.135034	-0.062562	-0.002168	-0.070194	-0.114834	0	0	0	0	\$2004
54585	32	-0.152302	-0.070404	-0.001796	-0.06994	-0.114729	0	0	0	0	\$2004
54586	32	-0.16866	-0.077725	-0.001482	-0.069755	-0.114687	0	0	0	0	\$2005
54587	32	-0.184004	-0.084819	-0.000735	-0.069488	-0.114562	0	0	0	0	\$2005
54588	32	-0.198566	-0.091125	0.007529	-0.069312	-0.114518	0	0	0	0	\$2005
54589	32	-0.212348	-0.097028	0.031043	-0.069163	-0.1145	0	0	0	0	\$2005
54590	32	-0.223134	-0.102556	0.067178	-0.06897	-0.114408	0	0	0	0	\$2005
54591	32	-0.23462	-0.10767	0.110831	-0.068792	-0.114357	0	0	0	0	\$2005
54592	32	-0.245573	-0.112446	0.158043	-0.068619	-0.114307	0	0	0	0	\$2005
54593	32	-0.256296	-0.116972	0.206287	-0.068473	-0.1143	0	0	0	0	\$2005
54594	32	-0.266412	-0.121214	0.245484	-0.068373	-0.11433	0	0	0	0	\$2005
54595	32	-0.276246	-0.12522	0.270763	-0.068215	-0.114313	0	0	0	0	\$2005
54596	32	-0.285374	-0.128942	0.286833	-0.068027	-0.114291	0	0	0	0	\$2005
54597	32	-0.294116	-0.132426	0.297036	-0.067833	-0.114282	0	0	0	0	\$2005
54598	32	-0.302418	-0.135696	0.303523	-0.067591	-0.114243	0	0	0	0	\$2005
54600	32	-0.310372	-0.138745	0.307621	-0.067321	-0.114186	0	0	0	0	\$2005
54601	32	-0.317906	-0.141642	0.310224	-0.067025	-0.114121	0	0	0	0	\$2005
54602	32	-0.325099	-0.144399	0.311886	-0.06669	-0.114035	0	0	0	0	\$2005
54603	32	-0.331903	-0.146889	0.312909	-0.066328	-0.11394	0	0	0	0	\$2005
54604	32	-0.338466	-0.149301	0.3135	-0.065935	-0.11382	0	0	0	0	\$2005
54605	32	-0.344693	-0.15156	0.313807	-0.06552	-0.113685	0	0	0	0	\$2005
54606	32	-0.356093	-0.155622	0.313954	-0.064624	-0.113323	0	0	0	0	\$2005
54607	32	-0.361407	-0.157527	0.313909	-0.06417	-0.113107	0	0	0	0	\$2005
54608	32	-0.36654	-0.159235	0.313848	-0.063684	-0.112851	0	0	0	0	\$2005

Ανάπτυξη φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα, υπό συνθήκες μικροβαρύτητας

Time [sec]	Tsetp [°C]	USR1 [°C]	USR2 [°C]	USR3 [°C]	SCU _r [°C]	SCU _m [°C]	Spherical Heater ON	Spherical Heater Voltage [10 mV]	Plate Heater ON	Plate Heater Current [20μA]	Mode
54609	32	-0.371257	-0.1608	0.313776	-0.063174	-0.112548	0	0	0	0	\$2005
54610	32	-0.375793	-0.162223	0.313726	-0.062674	-0.112251	0	0	0	0	\$2005
54611	32	-0.380004	-0.163604	0.313704	-0.062186	-0.111939	0	0	0	0	\$2005
54612	32	-0.384171	-0.164841	0.31371	-0.061704	-0.111623	0	0	0	0	\$2005
54613	32	-0.388085	-0.166089	0.313734	-0.061228	-0.111297	0	0	0	0	\$2005
54614	32	-0.391968	-0.167234	0.313786	-0.060727	-0.110928	0	0	0	0	\$2005
54615	32	-0.395709	-0.168367	0.313819	-0.060315	-0.110643	0	0	0	0	\$2005
54616	32	-0.399248	-0.16941	0.31383	-0.059892	-0.11033	0	0	0	0	\$2005
54617	32	-0.402722	-0.170349	0.313832	-0.059455	-0.109989	0	0	0	0	\$2005
54618	32	-0.405942	-0.171184	0.313823	-0.058998	-0.109618	0	0	0	0	\$2005
54619	32	-0.409003	-0.172014	0.3138	-0.058543	-0.109247	0	0	0	0	\$2005
54620	32	-0.411782	-0.172702	0.313766	-0.05808	-0.108862	0	0	0	0	\$2005
54621	32	-0.41448	-0.17336	0.313723	-0.057624	-0.108478	0	0	0	0	\$2005
54622	32	-0.417033	-0.173917	0.313676	-0.057194	-0.108096	0	0	0	0	\$2005
54624	32	-0.419479	-0.17444	0.313625	-0.056751	-0.107701	0	0	0	0	\$2005
54625	32	-0.421727	-0.174954	0.313572	-0.056295	-0.107282	0	0	0	0	\$2005
54626	32	-0.423989	-0.175383	0.31352	-0.055857	-0.106887	0	0	0	0	\$2005
54627	32	-0.42605	-0.175779	0.31347	-0.05541	-0.106469	0	0	0	0	\$2005
54628	32	-0.428066	-0.176112	0.31342	-0.054957	-0.106047	0	0	0	0	\$2005
54629	32	-0.429941	-0.176436	0.313372	-0.054507	-0.105616	0	0	0	0	\$2005
54630	32	-0.433432	-0.176841	0.313275	-0.053585	-0.104746	0	0	0	0	\$2005
54631	32	-0.435173	-0.177033	0.313224	-0.053143	-0.104315	0	0	0	0	\$2005
54632	32	-0.436862	-0.177221	0.31317	-0.052702	-0.103888	0	0	0	0	\$2005
54633	32	-0.438336	-0.177344	0.313115	-0.052259	-0.103446	0	0	0	0	\$2005
54634	32	-0.439787	-0.177388	0.313058	-0.051807	-0.103007	0	0	0	0	\$2005
54635	32	-0.441103	-0.177416	0.313002	-0.051348	-0.102552	0	0	0	0	\$2005
54636	32	-0.442464	-0.17739	0.312951	-0.05088	-0.10209	0	0	0	0	\$2005
54637	32	-0.443646	-0.177325	0.312897	-0.050421	-0.101628	0	0	0	0	\$2005
54638	32	-0.444811	-0.177266	0.312834	-0.049971	-0.101181	0	0	0	0	\$2005
54639	32	-0.4458	-0.17715	0.312759	-0.049541	-0.100753	0	0	0	0	\$2005
54640	32	-0.446821	-0.176989	0.312693	-0.049066	-0.100281	0	0	0	0	\$2005
54641	32	-0.44769	-0.176799	0.312623	-0.048596	-0.099981	0	0	0	0	\$2005
54642	32	-0.448623	-0.176595	0.312552	-0.048134	-0.099355	0	0	0	0	\$2005
54643	32	-0.449394	-0.176401	0.312478	-0.047695	-0.098925	0	0	0	0	\$2005
54644	32	-0.450174	-0.176171	0.312402	-0.047274	-0.098525	0	0	0	0	\$2005
54645	32	-0.450865	-0.175917	0.312322	-0.046866	-0.098131	0	0	0	0	\$2005
54646	32	-0.451551	-0.175616	0.312242	-0.046444	-0.097695	0	0	0	0	\$2005
54648	32	-0.45216	-0.175336	0.31216	-0.046011	-0.09725	0	0	0	0	\$2005
54649	32	-0.452724	-0.17502	0.312077	-0.045576	-0.096793	0	0	0	0	\$2005
54650	32	-0.453231	-0.174635	0.31199	-0.045152	-0.096369	0	0	0	0	\$2005
54651	32	-0.453684	-0.174232	0.311904	-0.044721	-0.095916	0	0	0	0	\$2005
54652	32	-0.454114	-0.173807	0.311817	-0.044315	-0.095505	0	0	0	0	\$2005

Ανάπτυξη φυσαλίδων διοξειδίου του άνθρακα σε κορεσμένο διάλυμα, υπό συνθήκες μικροβαρύτητας

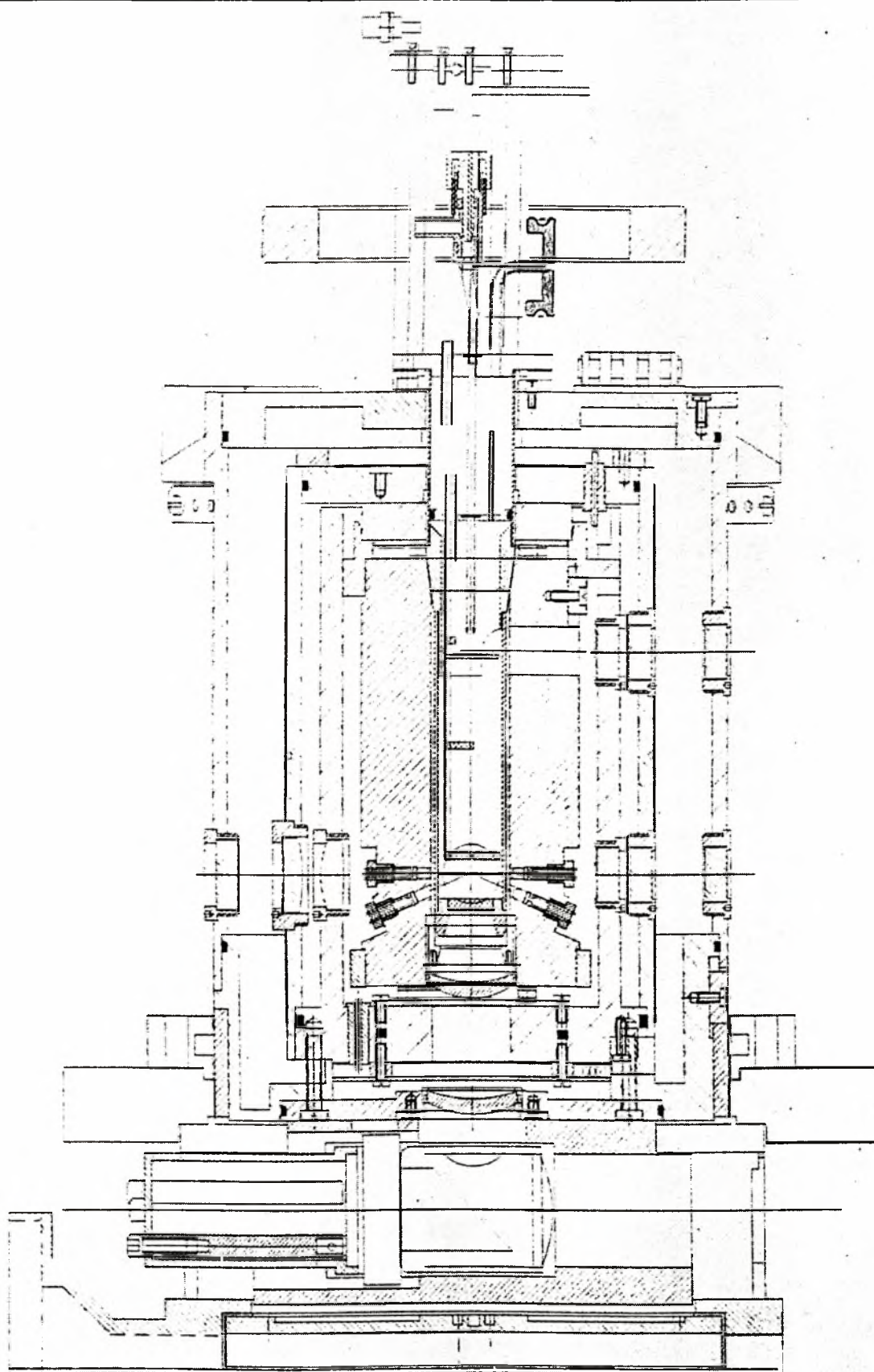
Time [sec]	Tsetp [°C]	USR1 [°C]	USR2 [°C]	USR3 [°C]	SCU _r [°C]	SCU _m [°C]	Spherical Heater ON	Spherical Heater Voltage [10 mV]	Plate Heater ON	Plate Heater Current [20μA]	Mode
54653	32	-0.454809	-0.172975	0.311649	-0.04348	-0.094653	0	0	0	0	\$2005
54654	32	-0.455053	-0.172527	0.31157	-0.043054	-0.094221	0	0	0	0	\$2005
54655	32	-0.455469	-0.172055	0.311493	-0.042621	-0.093777	0	0	0	0	\$2005
54656	32	-0.455745	-0.171597	0.311415	-0.042183	-0.09333	0	0	0	0	\$2005
54657	32	-0.455924	-0.171013	0.311338	-0.041753	-0.092888	0	0	0	0	\$2005
54658	32	-0.456093	-0.170474	0.311262	-0.041313	-0.092445	0	0	0	0	\$2005
54659	32	-0.456293	-0.169941	0.311183	-0.040877	-0.091997	0	0	0	0	\$2005
54660	32	-0.456479	-0.169375	0.311109	-0.040445	-0.091557	0	0	0	0	\$2005
54661	32	-0.456573	-0.168747	0.311038	-0.040026	-0.091128	0	0	0	0	\$2005
54662	32	-0.456743	-0.168216	0.310968	-0.039622	-0.090717	0	0	0	0	\$2005
54663	32	-0.45695	-0.167746	0.31089	-0.039244	-0.090324	0	0	0	0	\$2005
54664	32	-0.457024	-0.1671	0.310829	-0.038828	-0.089911	0	0	0	0	\$2005
54665	32	-0.457164	-0.166566	0.310768	-0.038424	-0.089491	0	0	0	0	\$2005
54666	32	-0.457271	-0.165987	0.310707	-0.038053	-0.089112	0	0	0	0	\$2005
54667	32	-0.457285	-0.165455	0.310642	-0.037715	-0.088761	0	0	0	0	\$2005
54668	32	-0.457292	-0.164838	0.310577	-0.037341	-0.088377	0	0	0	0	\$2005
54669	32	-0.457143	-0.164165	0.310522	-0.03692	-0.087942	0	0	0	0	\$2005
54670	32	-0.457102	-0.163485	0.310476	-0.036474	-0.087477	0	0	0	0	\$2005
54672	32	-0.456873	-0.162757	0.31044	-0.036012	-0.086992	0	0	0	0	\$2005
54673	32	-0.456732	-0.162029	0.310395	-0.035526	-0.086492	0	0	0	0	\$2005
54674	32	-0.456471	-0.161279	0.310343	-0.035059	-0.086019	0	0	0	0	\$2005
54675	32	-0.45625	-0.160521	0.310306	-0.034579	-0.085521	0	0	0	0	\$2005
54676	32	-0.456048	-0.159777	0.310267	-0.034149	-0.08508	0	0	0	0	\$2005
54677	32	-0.45572	-0.158318	0.310188	-0.033314	-0.084228	0	0	0	0	\$2005
54678	32	-0.455614	-0.157588	0.31015	-0.032917	-0.083815	0	0	0	0	\$2005
54679	32	-0.455604	-0.156852	0.31011	-0.032523	-0.083406	0	0	0	0	\$2005
54680	32	-0.455554	-0.156154	0.310069	-0.032157	-0.083022	0	0	0	0	\$2005
54681	32	-0.455547	-0.155445	0.310034	-0.031789	-0.082653	0	0	0	0	\$2005
54682	32	-0.455459	-0.154729	0.309994	-0.031431	-0.082281	0	0	0	0	\$2005
54683	32	-0.455443	-0.154032	0.30995	-0.031065	-0.081903	0	0	0	0	\$2005
54684	32	-0.455367	-0.153325	0.309916	-0.03068	-0.081487	0	0	0	0	\$2005
54685	32	-0.455241	-0.152601	0.309888	-0.030299	-0.08109	0	0	0	0	\$2005
54686	32	-0.454977	-0.151836	0.309864	-0.029907	-0.080676	0	0	0	0	\$2005
54687	32	-0.454895	-0.151119	0.309836	-0.029533	-0.080286	0	0	0	0	\$2005
54688	32	-0.454614	-0.150371	0.309813	-0.029147	-0.079881	0	0	0	0	\$2005
54689	32	-0.454355	-0.149646	0.309795	-0.028767	-0.079477	0	0	0	0	\$2005
54690	32	-0.45398	-0.148932	0.309776	-0.028386	-0.079077	0	0	0	0	\$2005
54691	32	-0.453623	-0.1482	0.309765	-0.028012	-0.078683	0	0	0	0	\$2005
54692	32	-0.453245	-0.147461	0.309777	-0.027633	-0.078282	0	0	0	0	\$2005
54693	32	-0.452868	-0.146712	0.309777	-0.027276	-0.077893	0	0	0	0	\$2005
54694	32	-0.452492	-0.14597	0.309792	-0.026907	-0.077509	0	0	0	0	\$2005
54696	32	-0.45195	-0.145198	0.30982	-0.026541	-0.077115	0	0	0	0	\$2005

Time [sec]	Tsetp [°C]	USR1 [°C]	USR2 [°C]	USR3 [°C]	SCU _r [°C]	SCU _m [°C]	Spherical Heater ON	Spherical Heater Voltage [10 mV]	Plate Heater ON	Plate Heater Current [20μA]	Mode
54697	32	-0.451494	-0.144438	0.309859	-0.02619	-0.076752	0	0	0	0	\$2005
54698	32	-0.450921	-0.14366	0.309904	-0.025826	-0.076368	0	0	0	0	\$2005
54699	32	-0.450405	-0.142897	0.30995	-0.025476	-0.075995	0	0	0	0	\$2005
54700	32	-0.449081	-0.141352	0.31005	-0.024786	-0.075255	0	0	0	0	\$2005
54701	32	-0.448605	-0.140571	0.310107	-0.024465	-0.074916	0	0	0	0	\$2005
54702	32	-0.44811	-0.139686	0.310179	-0.024097	-0.074519	0	0	0	0	\$2005
54703	32	-0.44751	-0.138912	0.310272	-0.0237	-0.074088	0	0	0	0	\$2005
54704	32	-0.44691	-0.138103	0.310334	-0.023346	-0.073707	1	30000	0	0	\$2405
54705	32	-0.29397	-0.137265	0.310356	-0.02389	-0.07619	1	30000	0	0	\$2405
54706	32	-0.177061	-0.135167	0.310388	-0.023214	-0.074709	1	30000	0	0	\$2405
54707	32	-0.106653	-0.13383	0.310425	-0.022602	-0.07361	1	30000	0	0	\$2405
54708	32	-0.06701	-0.130871	0.310466	-0.022109	-0.072798	1	30000	0	0	\$2405
54709	32	-0.040361	-0.125754	0.310508	-0.021666	-0.072168	1	30000	0	0	\$2405
54710	32	-0.024311	-0.115769	0.31055	-0.021278	-0.071639	1	30000	0	0	\$2405
54711	32	-0.014646	-0.100689	0.310591	-0.020853	-0.071145	1	30000	0	0	\$2405
54712	32	-0.008824	-0.082263	0.310632	-0.020485	-0.070701	1	30000	0	0	\$2405
54713	32	-0.005319	-0.061716	0.31067	-0.020151	-0.070317	1	30000	0	0	\$2405
54714	32	-0.003207	-0.036378	0.310704	-0.0198	-0.069904	1	30000	0	0	\$2405
54715	32	0.46296	-0.010824	0.310742	-0.019453	-0.069518	0	0	0	0	\$2005
54716	32	1.772466	0.014174	0.310777	-0.019102	-0.069127	0	0	0	0	\$2005
54717	32	2.216179	0.038741	0.310814	-0.018762	-0.068746	0	0	0	0	\$2005

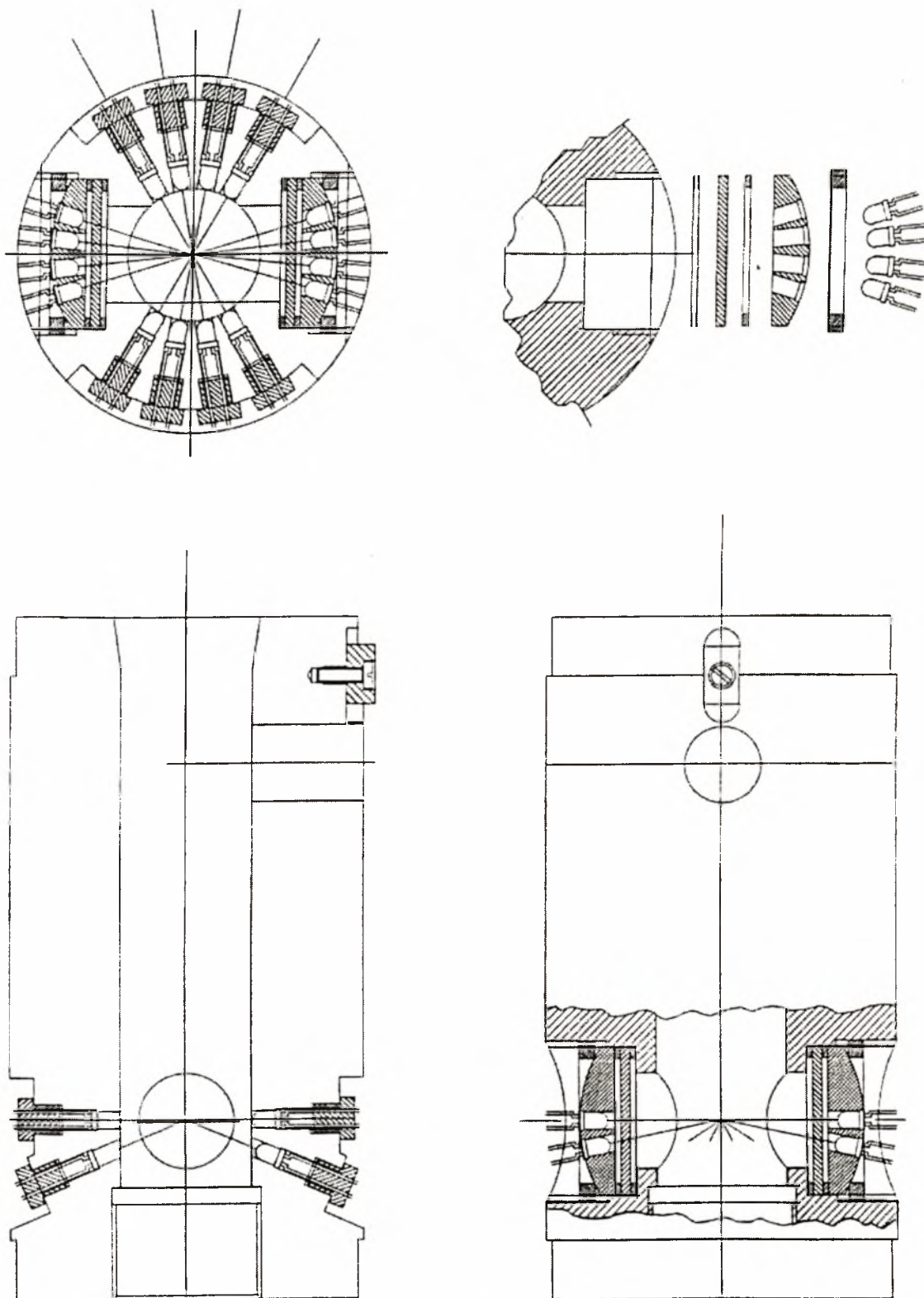
Πίνακας Γ.1 Μορφή αρχείου εξόδου του προγράμματος *Spoozy*.

Δ. Τα Μηχανικά Συστήματα

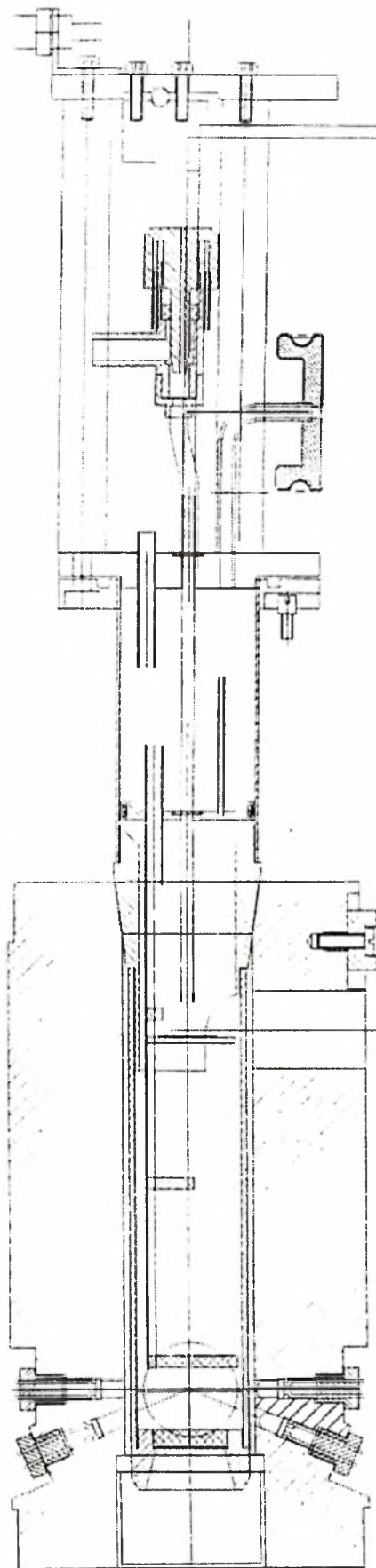
Στην ενότητα αυτή του Παραρτήματος, παρουσιάζονται τα μηχανικά μέρη που κατασκευάστηκαν για το πείραμα μας. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται, όπως έχουμε αναφέρει, ένας θερμοστάτης τύπου CPF-2. Τα κατασκευαστικά σχέδια του συγκεκριμένου θερμοστάτη καταλαμβάνουν περίπου 150 σελίδες, γι' αυτό στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μόνο μία συνολική εικόνα του θερμοστάτη. Θα πρέπει επίσης να ξεκαθαρίσουμε ότι τα σχέδια που παρουσιάζονται σ' αυτή την ενότητα, δείχνουν μία συνολική εικόνα των μηχανικών τμημάτων της πειραματικής μας συσκευής, και δεν είναι τα κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευάσει κανείς τη συσκευή από την αρχή.



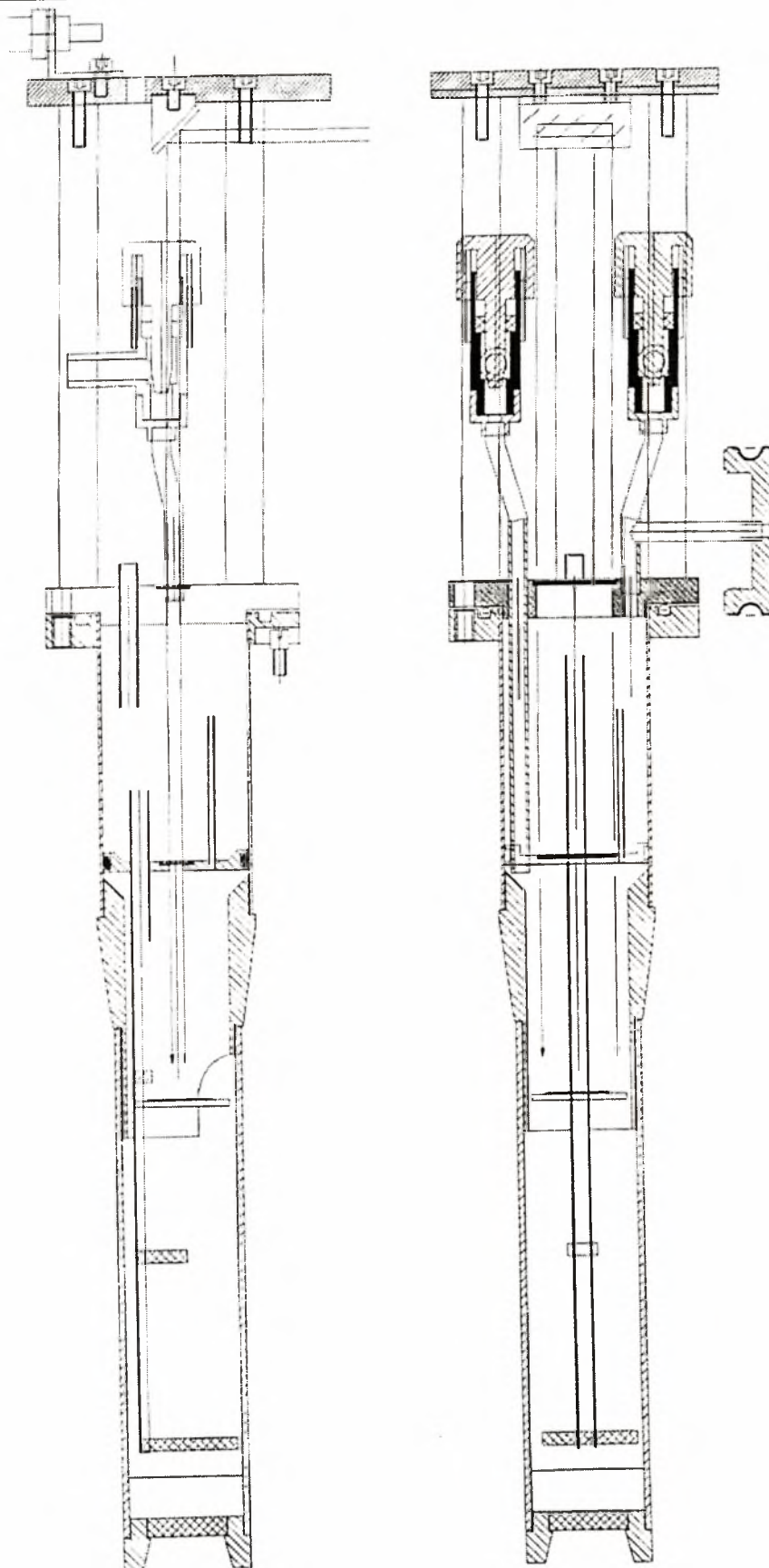
Σχήμα Δ.1 Ο θερμοστάτης, ο εναλλάκτης θερμότητας και η μονάδα του κελιού [23].



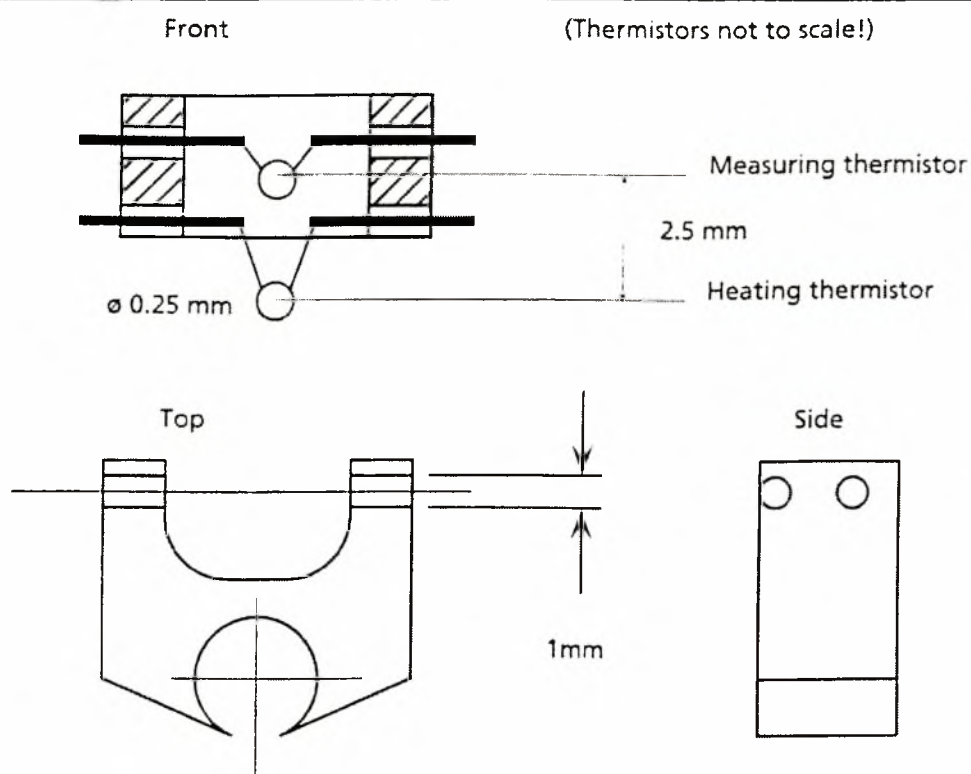
Σχήμα Δ.2 Η ανακατασκευασμένη μονάδα του κελιού και οι θέσεις των LEDs [23].



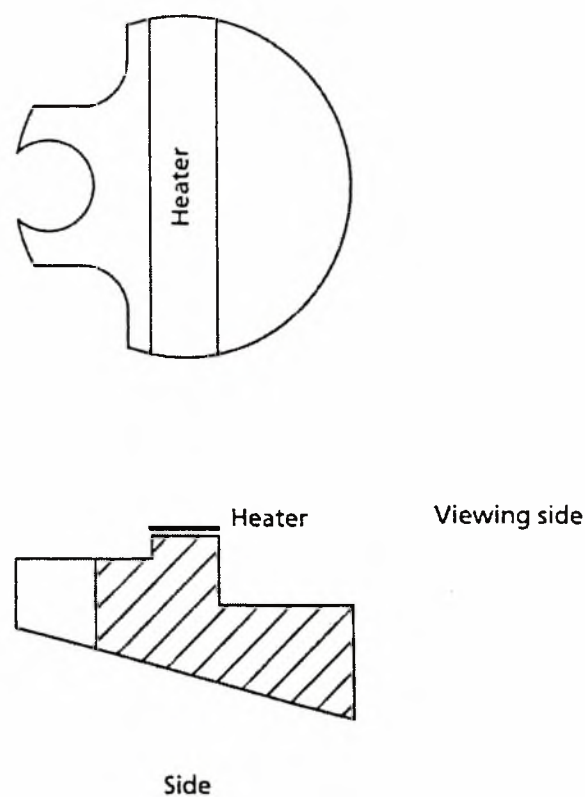
Σχήμα Δ.3 Η ανακατασκευασμένη μονάδα του κελιού με ένα εναλλάξιμο κελί [23].



Σχήμα Δ.4 Δύο όψεις ενός εναλλάξιμου κελιού [23].



Σχήμα Δ.5 Λεπτομέρειες της διάταξης των thermistors στο πείραμα της μοναδικής φυσαλίδας [23].



Σχήμα Δ.6 Λεπτομέρειες της διάταξης των thermistors στο πείραμα του επίπεδου θερμαντήρα [23].

Τμήμα	Μέγεθος [mm]
Διάμετρος THU	145
Ύψος THU	246
Διάμετρος ανακατασκευασμένης μονάδας κελιού	60
Ύψος ανακατασκευασμένης μονάδας κελιού	115
Απόσταση μεταξύ της πάνω και κάτω οπτικής διόδου	60
Εξωτερική διάμετρος του γυάλινου σωλήνα του εναλλάξιμου κελιού	20
Εσωτερική διάμετρος του γυάλινου σωλήνα του εναλλάξιμου κελιού	18

Πίνακας Δ.1 Χαρακτηριστικές διαστάσεις του θερμοστάτη.

Ε. Οι θερμοαντήρες

Ε.1 Ο σφαιρικός θερμοαντήρας

Ο thermistor που χρησιμοποιήθηκε σαν θερμοαντήρας για το πείραμα της μοναδικής φυσαλίδας είναι ένας “glass coated bead thermistor” της εταιρείας Thermometrics με αριθμό προϊόντος B10KA103K.

Ιδιότητα	Τιμή
Διάμετρος	0.254 mm
Διάμετρος καλωδίων	0.025 mm
Ονομαστική Αντίσταση στους 25 °C	10 kΩ
Ανοχή στους 25 °C	10%
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	300 °C
Μέγιστη επιτρεπτή αιχμή θερμοκρασίας	600 °C
Κωδικός αριθμός υλικού	A5

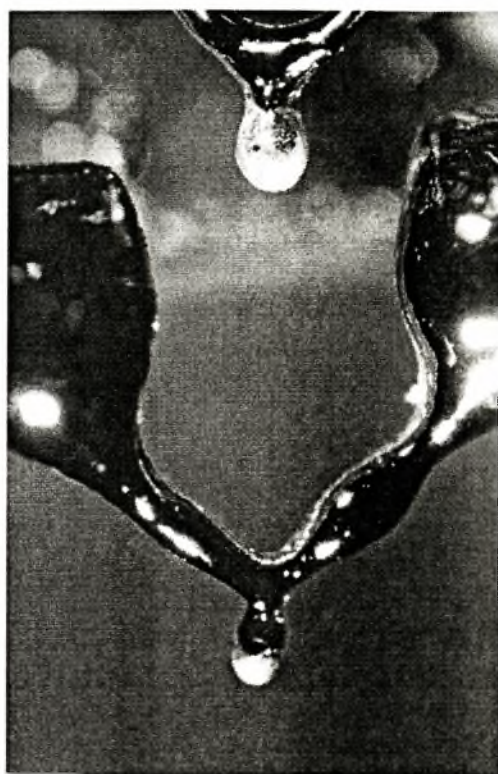
Πίνακας Ε.1 Χαρακτηριστικά του σφαιρικού thermistor.

Τα καλώδια σύνδεσης του thermistor είναι μη-επικαλυμμένα. Αν το νερό έρθει σε επαφή με τα καλώδια, έχουμε σαν αποτέλεσμα μία ηλεκτρολυτική αντίδραση, αποτέλεσμα δυσμενές για το πείραμα μας, αφού έτσι θα σχηματιζόνταν και άλλες φυσαλίδες εκτός απ’ αυτές που θα θέλαμε να σχηματιστούν για να τις μελετήσουμε. Με τη βοήθεια μιας πολύ μικρής βούρτσας και ενός μικροσκοπίου, καταφέραμε να επικαλύψουμε τα καλώδια με ένα μονωτικό στρώμα.

Πρέπει ν’ αναφέρουμε επίσης ότι στα πλαίσια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων των πειραμάτων μας, και ειδικά της μέτρησης του ρυθμού ανάπτυξης της φυσαλίδας μέσω της μέτρησης της διαμέτρου της, χρειάστηκε να μετρήσουμε με ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των thermistors όλων των κελιών. Για να το κάνουμε αυτό φωτογραφήσαμε τα thermistors όλων των κελιών. Ανακαλύψαμε ότι το σχήμα των thermistors δεν είναι ακριβώς σφαιρικό, αλλά ελλειπτικό, όπως φαίνεται στη Φωτογραφία Ε.1.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται η διάμετρος του thermistor θέρμανσης, **D4**, όπως αυτή φαίνεται από το φακό που βρίσκεται στο κάτω μέρος του κελιού. Η διάμετρος αυτή χρησιμοποιείται σαν μήκος αναφοράς έτσι ώστε να μετρήσουμε τη διάμετρο της φυσαλίδας στην ενότητα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Για να μετρήσουμε τη διάμετρο D4, φωτογραφήσαμε σε μεγέθυνση τα thermistors κάθε κελιού, με τη βοήθεια ειδικού συστήματος μικροσκοπίου και φωτογραφικής μηχανής του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος μας, και στη συνέχεια από την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη μεγέθυνση, τη μεγέθυνση της φωτογραφικής μηχανής και τη μεγέθυνση του φιλμ, καταφέραμε να υπολογίσουμε σε πόσα μm αντιστοιχεί το κάθε cm που μετράμε πάνω στη φωτογραφία.



Φωτογραφία Ε.1 Ο thermistor θέρμανσης (κάτω) και ο thermistor μέτρησης της θερμοκρασίας (πάνω) για το 3^ο κελί.

Κελί	D4 (μm)
1	302
2	- *
3	288
4	306
5	288
6	261
7	261
8	288
9	297
10	324

Πίνακας Ε.2 Διάμετρος του thermistor θέρμανσης για κάθε κελί.

* Δεν καταφέραμε να μετρήσουμε τη διάμετρο του thermistor γι' αυτό το κελί, γιατί η φωτογραφία που πήραμε ήταν εκτός εστίασης.

E.2 Ο επίπεδος θερμαντήρας

Ο επίπεδος θερμαντήρας είναι μία αντίσταση με στρώμα πλατίνας. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίν. E.3.

Ιδιότητα	Τιμή
Αντίσταση	100 Ω
Μέγεθος	3 × 7 mm

Πίνακας E.3 Χαρακτηριστικά του επίπεδου θερμαντήρα.

Επειδή η αντοχή μίας αντίστασης από πλατίνα αυξάνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος υπερθέρμανσης του πλατινένιου θερμαντήρα. Γι' αυτό και δεν υπάρχει καμία άλλη αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με την πλατινένια αντίσταση. Η μεταβολή της τιμής της αντίστασης του πλατινένιου θερμαντήρα για μία μεταβολή της θερμοκρασίας πάνω από 25K, είναι ίση με 10%. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς που δίνουμε στο θερμαντήρα μεταβάλλεται κατά 10% περίπου κατά τη διάρκεια του πειράματος.

ΣΤ. Οδηγίες χρήσης του προγράμματος Snoopy

Ξεκίνημα

Κάνε το κατάλογο “c:\snoopy\” τρέχων κατάλογο.

Επέλεξε το πρόγραμμα “snoopy.exe”.

Θέσε το είδος λειτουργίας στο “TCS”, και συνέχισε πατώντας το κουμπί plot.

Ξεκίνησε με [s] [u] [5] [Enter] [u] [6] [Enter].

Ενεργοποίηση των thermistors.

USR1: [Shift]+[~]→[14]→[0]

USR2: [Shift]+[~]→[15]→[0]

USR3: [Shift]+[~]→[16]→[0]

Έλεγχος

Ο πίνακας ΣΤ.1 περιέχει τις εντολές ελέγχου της συμπεριφοράς του θερμοστάτη.

Εντολή	Ειδικό	Εντολή	Ειδικό
Adjust device †	*	Quench parameters †	&
Communication continue	S	Quenchstep (mK)	
Control device †	~	Quit	q
Exchange sensor parameters	m	Safemode force/exit	u
Initialize protocol	s	Temperature absolute (°C)	t
Linear heating/cooling	/	Thermostat ID	x
Nulling set/clear	n	Waittime (minutes)	w

Πίνακας ΣΤ.1 Εντολές ελέγχου της συμπεριφοράς του θερμοστάτη.

† Μερικές από τις παραπάνω εντολές χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται μερικές επιπλέον πληροφορίες γι' αυτές τις εντολές.

Device	Parameter
VSS	σε 10 mV
CSS	σε 20 μ A
Thermistors	low power = 0 high power = 1

Πίνακας ΣΤ.2 Επιπλέον πληροφορίες για την εντολή “adjust device”.

<i>Device</i>	<i>Device number</i>	<i>Parameter</i>
CSS	11	σε 50 ms (coarse mode) ή 122 μs (fine mode)
VSS	12	σε 50 ms (coarse mode) ή 122 μs (fine mode)
USR1	14	0
USR2	15	0
USR3	16	0

Πίνακας ΣΤ.3 Επιπλέον πληροφορίες για την εντολή “control device”.

<i>Command</i>	<i>Range</i>
Give precool THU parameter	0 .. 255 (default = 100)
Give preheat SCU parameter	
Quench down time	
Quench up time	

Πίνακας ΣΤ.4 Επιπλέον πληροφορίες για την εντολή “Quench parameters”.

Απεικόνιση

Ο παρακάτω πίνακας ΣΤ.5 περιέχει τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί κανείς να ρυθμίσει τα είδη απεικόνισης του προγράμματος Snoop.

<i>Command</i>	<i>Key</i>
Filter more/less	Z/z
Printer on/off	=
Scale automatically	^
Timescale faster/slower	>/<

Πίνακας ΣΤ.5 Διαφορετικούς τρόποι με τους οποίους μπορεί κανείς να ρυθμίσει τα είδη απεικόνισης του προγράμματος Snoop.

Είναι επίσης εφικτό να μεταβάλλεις τη κλίμακα κάθε ίχνους πάνω στην οθόνη του Snoop ανεξάρτητα, αντί να το κάνεις για όλα μαζί αυτόματα (πίνακας ΣΤ.6).

<i>Command</i>	<i>Key</i>	<i>Command</i>	<i>Key</i>
Upscale OTSh	A	Downscale OTSh	a
Upscale OTSI	B	Downscale OTSI	b
Upscale TPL	C	Downscale TPL	c
Upscale BPE	D	Downscale BPE	d
Upscale CPL	E	Downscale CPL	e
Upscale TPE	F	Downscale TPE	f
Upscale BPL	G	Downscale BPL	g
Upscale SCUr	H	Downscale SCUr	h
Upscale SCUm	I	Downscale SCUm	I
Upscale USR1	J	Downscale USR1	j
Upscale USR2	K	Downscale USR2	k
Upscale USR3	L	Downscale USR3	l

Πίνακας ΣΤ.6 Μεταβολή της κλίμακας απεικόνισης κάθε ίχνους πάνω στην οθόνη του Snoopy.

Z. Υπολογισμός των P_{therm} και T_{therm}

Η τιμή της ολικής διαφοράς δυναμικού, V_o , που εφαρμόζεται στα άκρα των τριών αντιστάσεων κατά τη διάρκεια του θερμικού παλμού, ανάλογα με το επίπεδο ισχύος που επιλέγουμε μέσω του προγράμματος *Spoozy*, φαίνεται στον Πίνακα Z.1. Αυτή μπορεί να μετρηθεί συνδέοντας ένα βολτόμετρο στις υποδοχές VSSh-GRD οι οποίες βρίσκονται στο πάνω μέρος της πειραματικής μας συσκευής, τη χρονική στιγμή ακριβώς πριν δώσουμε το θερμικό παλμό.

Power Level	V_o [Volts]
15000	10.653
20000	14.203
22000	15.623
25000	17.753
28000	19.883
30000	21.32
32000	22.74
36000	25.58

Πίνακας Z.1 Ολική διαφορά δυναμικού, V_o , ανάλογα με το επίπεδο ισχύος.

Στον Πίνακα Z.2 παρουσιάζονται οι τιμές των αντιστάσεων R_s και R_{DL} για τις τρεις μέρες των πειραμάτων. Η τιμή της αντίστασης R_{DL} δεν είναι η ίδια και για τις τρεις μέρες γιατί στο μέσο της δεύτερης μέρας τοποθετήθηκε στη συνδεσμολογία των αντιστάσεων ένας *διαιρέτης τάσης*, Voltage Divider, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ολικής αντίστασης R_{DL} . Ο *διαιρέτης τάσης* χρησιμοποιήθηκε και κατά τη διάρκεια της τρίτης μέρας, αλλά με διαφορετική συνδεσμολογία αντιστάσεων από τη δεύτερη μέρα, γι' αυτό και η τιμή της R_{DL} για τη τρίτη μέρα, είναι διαφορετική από τη τιμή της κατά τη δεύτερη μέρα όταν χρησιμοποιήθηκε ο V.D.

Ημέρα	R_s [Ω]	R_{DL} [Ω]	
1	1249	249	
2	1249	V.D. = OFF	V.D. = ON
		249	230
3	1249	239	

Πίνακας Z.2 Οι τιμές των αντιστάσεων R_s και R_{DL} κατά τη διάρκεια των τριών ημερών των πειραμάτων.

Στον Πίνακα Z.3 φαίνονται οι τιμές της αντίστασης των thermistors στους 25°C, R25, οι οποίες μετρήθηκαν στο εργαστήριο.

Cell	R25 (Ω)
1	9,648‡
2	11,821
3	9,301
4	9,358
5	9,417
6	12,852‡
7	10,081
8	9,381
9	9,331
10	10,000‡

Πίνακας Z.3 Μετρούμενες τιμές της αντίστασης των thermistors στους 25°C.

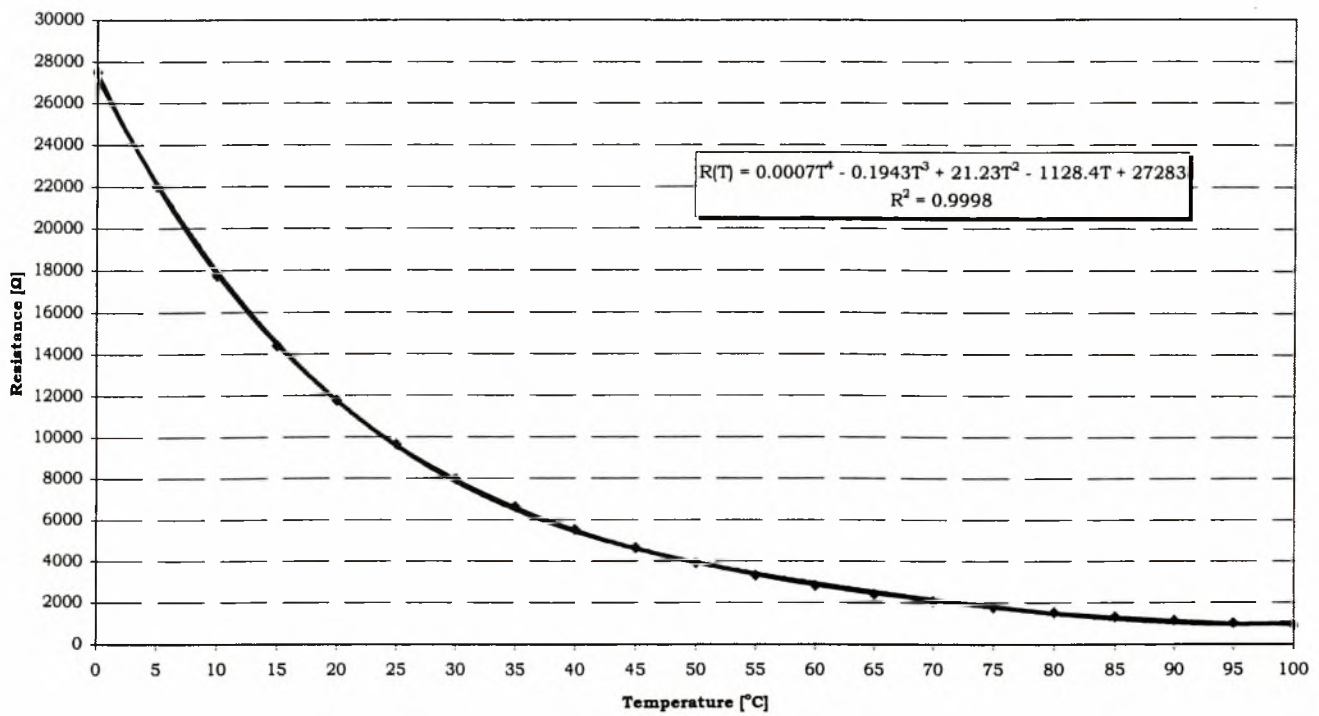
Στον Πίνακα Z.4 παρουσιάζονται οι τιμές της ονομαστικής αντίστασης των thermistors που δίνει ο κατασκευαστής συναρτήσει της θερμοκρασίας και της τιμής της αντίστασης στους 25°C, R25. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε “glass coated bead thermistor” της εταιρείας Thermometrics με αριθμό προϊόντος B10KA103K και κωδικό αριθμό συστήματος υλικού A5.

‡ Για το 1^ο και 6^ο κελί, δεν μπορέσαμε να μετρήσουμε την αντίσταση στους 25°C εξαιτίας αστοχίας που παρουσίασαν τα thermistors τους - δεν παίρναμε καμία ένδειξη στο όργανο μέτρησης. Οι τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα Z.3 προκύπτουν από προσαρμογή των τιμών που είχαμε μετρήσει στους 21°C. Η αντίσταση του thermistor του 10^{ου} κελιού δεν μετρήθηκε ούτε στους 21°C, και η τιμή που αναγράφεται στον πίνακα είναι η ονομαστική τιμή που δίνει ο κατασκευαστής.

Temperature (°C)	Rt/R25 nominal	Temp Coef (%/°C)	Temperature (°C)	Rt/R25 nominal	Temp Coef (%/°C)
-60	76.05	-6.60	100	0.09245	-2.58
-55	54.97	-6.39	105	0.08138	-2.52
-50	40.15	-6.18	110	0.07186	-2.46
-45	29.62	-5.99	115	0.06364	-2.40
-40	22.06	-5.79	120	0.05654	-2.34
-35	16.59	-5.61	125	0.05036	-2.28
-30	12.59	-5.43	130	0.04487	-2.23
-25	9.632	-5.26	135	0.04023	-2.16
-20	7.433	-5.10	140	0.03619	-2.10
-15	5.783	-4.94	145	0.03264	-2.04
-10	4.534	-4.79	150	0.02953	-1.98
-5	3.581	-4.65	155	0.02680	-1.92
0	2.849	-4.51	160	0.02438	-1.87
5	2.282	-4.37	165	0.02224	-1.82
10	1.840	-4.24	170	0.02033	-1.76
15	1.493	-4.12	175	0.01864	-1.72
20	1.218	-4.00	180	0.01713	-1.67
25	1.000	-3.88	185	0.01577	-1.62
30	0.8262	-3.77	190	0.01456	-1.58
35	0.6860	-3.67	195	0.01347	-1.54
40	0.5725	-3.56	200	0.01248	-1.50
45	0.4802	-3.46	205	0.01159	-1.46
50	0.4048	-3.37	210	0.01079	-1.42
55	0.3428	-3.28	215	0.01006	-1.38
60	0.2917	-3.19	220	0.009395	-1.35
65	0.2492	-3.10	225	0.008790	-1.31
70	0.2138	-3.02	230	0.008239	-1.28
75	0.1842	-2.94	235	0.007735	-1.25
80	0.1593	-2.87	240	0.007274	-1.22
85	0.1383	-2.79	245	0.006850	-1.19
90	0.1205	-2.72	250	0.006462	-1.16
95	0.1054	-2.65	255	0.006104	-1.13
			260	0.005774	-1.10

Πίνακας Ζ.4 Ονομαστικός λόγος της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας, ως προς τη τιμή της αντίστασης στους 25°C .

Στο Σχ. Ζ.1 παρουσιάζεται η καμπύλη εξάρτησης της αντίστασης του thermistor του 1^{ου} κελιού από τη θερμοκρασία. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από τις τιμές του Πίνακα Ζ.4. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι οι τιμές που απεικονίζονται στο Σχ. Ζ.1 είναι οι ονομαστικές τιμές που δίνονται από το κατασκευαστή.



Σχήμα Z.1 Η εξάρτηση της αντίστασης του thermistor του 1^{ου} κελιού από τη θερμοκρασία.

Η. Δεδομένα διαχυτότητας και επιφανειακής τάσης

Η.1 Δεδομένα διαχυτότητας

Τα δεδομένα διαχυτότητας του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό και το επτάνιο, υπολογίστηκαν με τη βοήθεια διαγράμματος υπολογισμού του συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα, σαν συνάρτηση του ιξώδους του διαλύτη [3]. Στο διάγραμμα αυτό, βλέπε Σχήμα Η.1, οι διαχυτότητες οργανικών ουσιών όπως n-Heptane, Ethanol, Isobutyl alcohol, και του νερού, απεικονίζονται σε δύο ευθείες, συναρτήσεως του ιξώδους. Επομένως, μπορούμε υπολογίζοντας το ιξώδες του διαλύτη, το οποίο είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, να υπολογίσουμε το συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα. Για το νερό, υπάρχει στο διάγραμμα συγκεκριμένη ευθεία από την οποία υπολογίζουμε το συντελεστή διάχυσης, ενώ για το επτάνιο χρησιμοποιούμε την ευθεία των οργανικών ουσιών.

Ο υπολογισμός του ιξώδους για διαφορετικές θερμοκρασίες (από 25-100 °C), έγινε με τη βοήθεια της συσχέτισης υπολογισμού του ιξώδους υγρών [27]:

$$\log_{10}n_{liq} = A + \frac{B}{T} + C \cdot T + D \cdot T^2 \quad (H.1)$$

όπου

n_{liq} = το ιξώδες του υγρού, [cP],

A, B, C και D = regression coefficients for chemical compound,

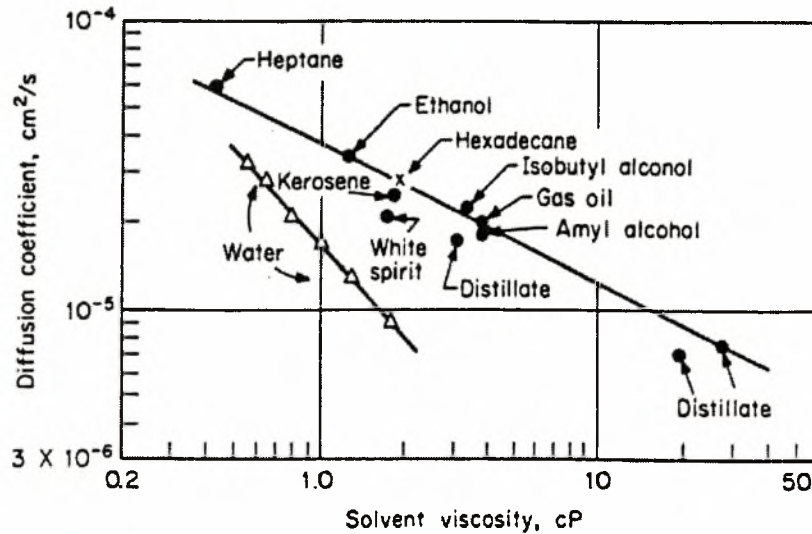
T = θερμοκρασία, [K].

Οι τιμές των συντελεστών A, B, C και D, για το νερό και το επτάνιο που χρησιμοποιήσαμε στους υπολογισμούς του ιξώδους, καθώς και οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες που ισχύει η συσχέτιση (H.1), φαίνονται στον Πίνακα Η1.

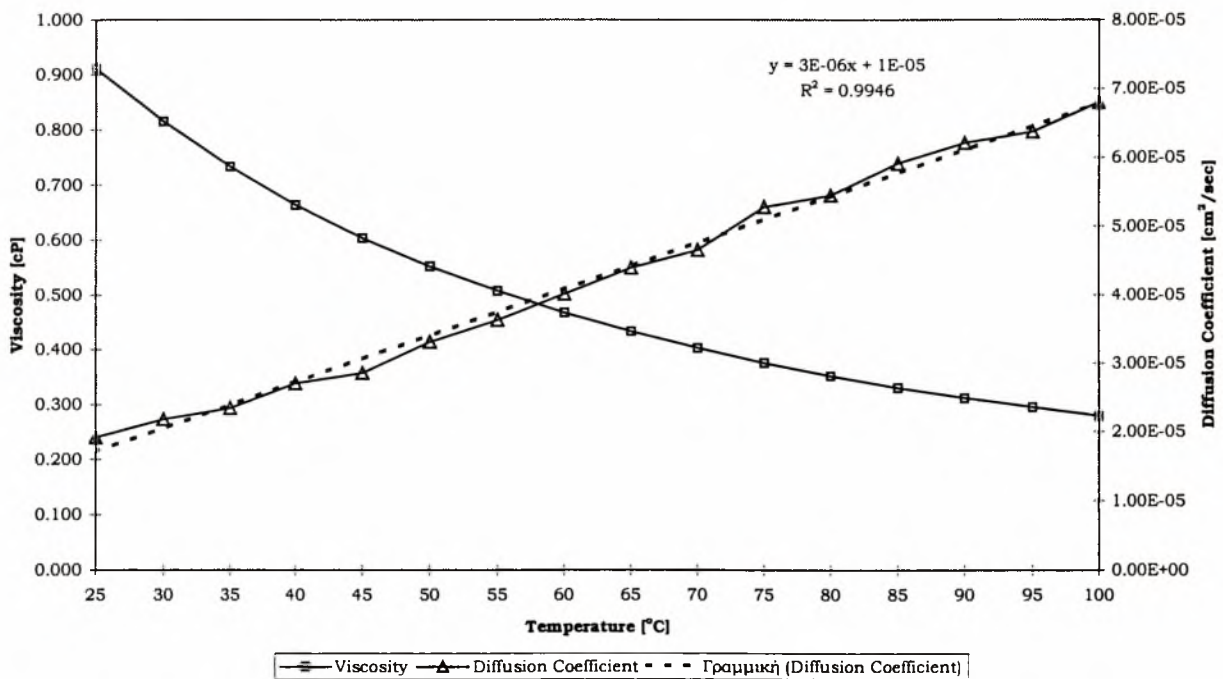
Υγρό	A	B	C	D	T_{min} [K]	T_{max} [K]
Νερό	-10.2158	1.7925E+03	1.7730E-02	-1.2631E-05	273	643
Επτάνιο	-5.7782	8.0587E+02	1.3355E-02	-1.4794E-05	183	540

Πίνακα Η1 Τιμές των συντελεστών A, B, C και D, για το νερό και το επτάνιο, και οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες που ισχύει η συσχέτιση (H.1).

Στα Σχήματα Η.2 και Η.3, απεικονίζονται οι τιμές του ιξώδους συναρτήσεως της θερμοκρασίας, για το νερό και το επτάνιο, αντίστοιχα, που υπολογίσαμε μέσω της συσχέτισης H.1, και οι τιμές του συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό και το επτάνιο, που υπολογίσαμε με τη βοήθεια του Σχ. Η.1. Η διακεκομμένη γραμμή που υπάρχει στα δύο σχήματα, έχει προκύψει με προσαρμογή (fitting) των σημείων των σχημάτων με μία ευθεία, η εξίσωση της οποίας φαίνεται για κάθε υγρό πάνω στο αντίστοιχο σχήμα.



Σχήμα Η.1 Συντελεστές διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορους διαλύτες •²¹ ×²² Δ²³ [3].

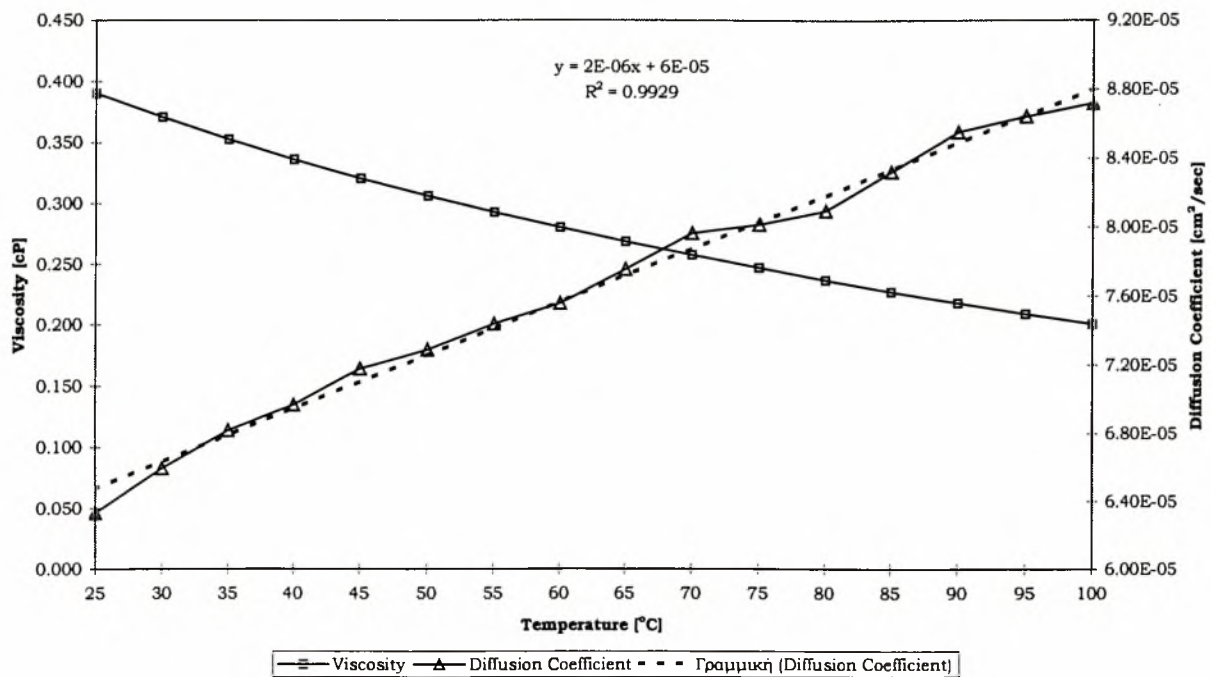


Σχήμα Η.2 Ιξώδες και συντελεστής διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

²¹ Τα σημεία της καμπύλης προέρχονται από τη δημοσίευση: Davies, G. A., A. B. Ponter and K Craine: *Can. J. Chem. Eng.*, **45**: 372 (1967).

²² Τα σημεία της καμπύλης προέρχονται από τη δημοσίευση: Hayduk, W., and S.. C. Cheng: *Chem. Eng. Sci.*, **26**: 635 (1971).

²³ Τα σημεία της καμπύλης προέρχονται από τη δημοσίευση: Himmelblau, D. M.: *Chem. Rev.*, **64**: 527 (1964).



Σχήμα Η.3 Ιξώδες και συντελεστής διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στο επτάνιο, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

H.2 Δεδομένα επιφανειακής τάσης

Τα δεδομένα επιφανειακής τάσης για το νερό, το επτάνιο και τη γλυκερίνη, που φαίνονται στο Σχ. Η.4, για διαφορετικές θερμοκρασίες (από 20-120 °C), υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της συσχέτισης για την επιφανειακή τάση [27]:

$$\sigma = A \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^n \quad (\text{H.2})$$

όπου

σ = η επιφανειακή τάση, [mN/m],

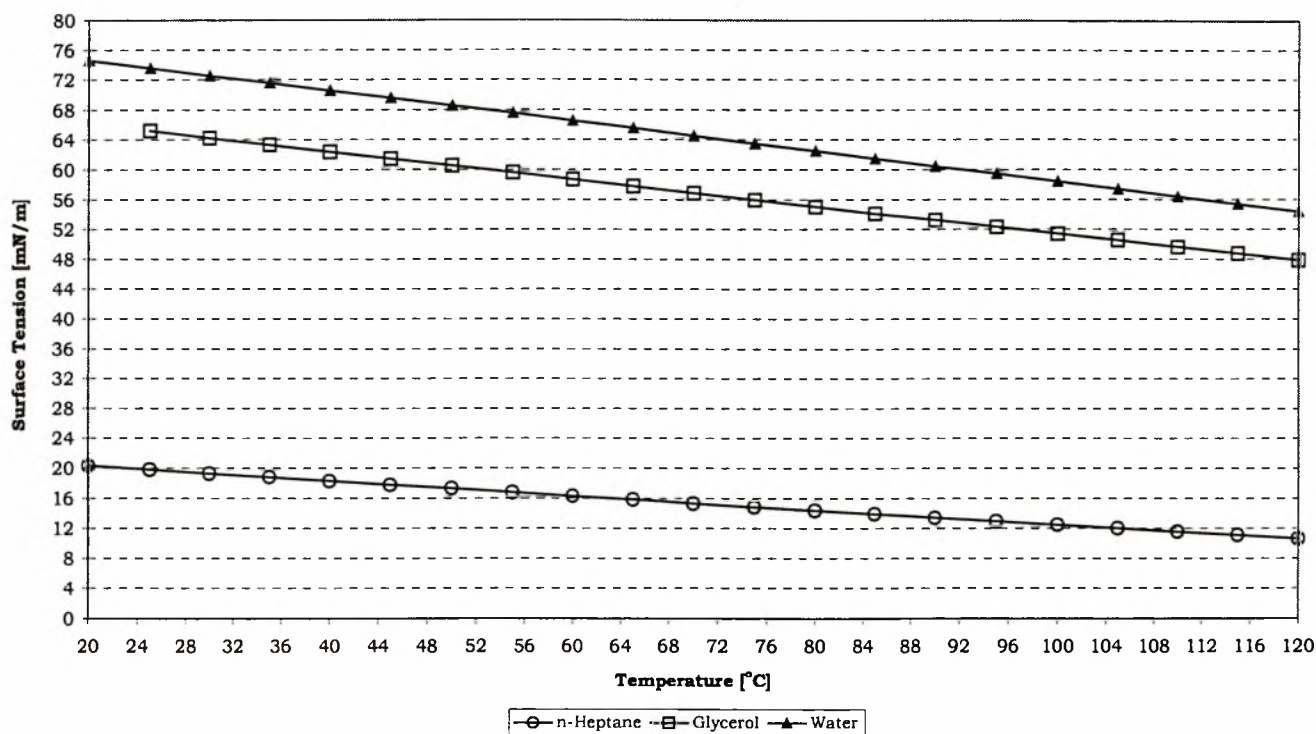
A, T_c και n = regression coefficients for chemical compound,

T = θερμοκρασία, [K].

Οι τιμές των συντελεστών A, T_c , και n, για το νερό, τη γλυκερίνη και το επτάνιο που χρησιμοποιήσαμε στους υπολογισμούς της επιφανειακής τάσης, καθώς και οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες που ισχύει η συσχέτιση (H.2), φαίνονται στον Πίνακα Η2.

Υγρό	A	T_c	n	T_{min} [K]	T_{max} [K]
Νερό	132.674	647.13	0.9550	273.15	647.13
Γλυκερίνη	124.793	723.00	1.2222	291.33	723.00
Επτάνιο	53.640	540.26	1.2431	182.56	540.26

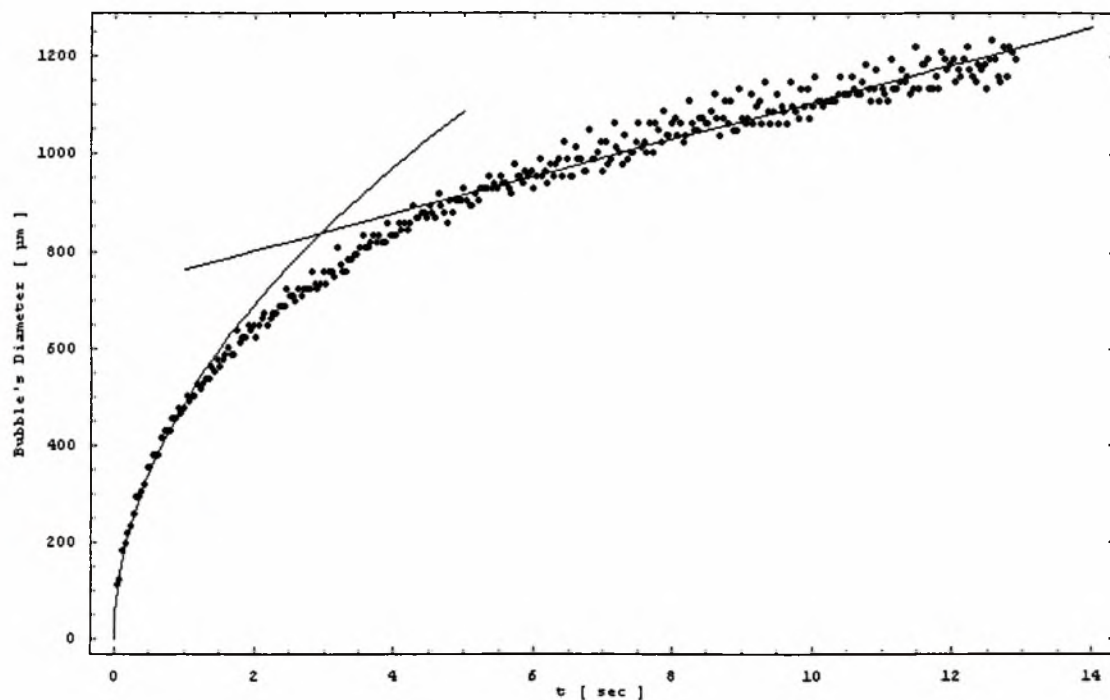
Πίνακα Η2 Τιμές των συντελεστών A , T_c , και n , για το νερό, τη γλυκερίνη και το επτάνιο, και οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες που ισχύει η συσχέτιση (Η.2)



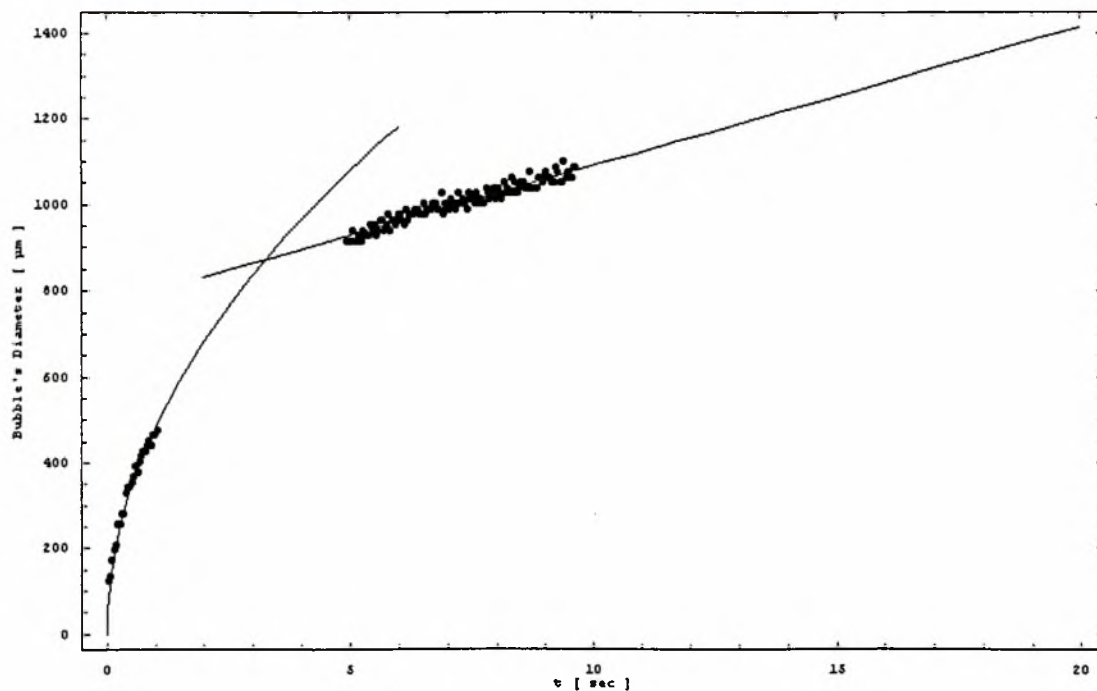
Σχήμα Η.4 Δεδομένα επιφανειακής τάσης, συναρτήσει της θερμοκρασίας, για το νερό, τη γλυκερίνη και το επτάνιο .

Θ. Ημιεμπειρική προσαρμογή των αποτελεσμάτων

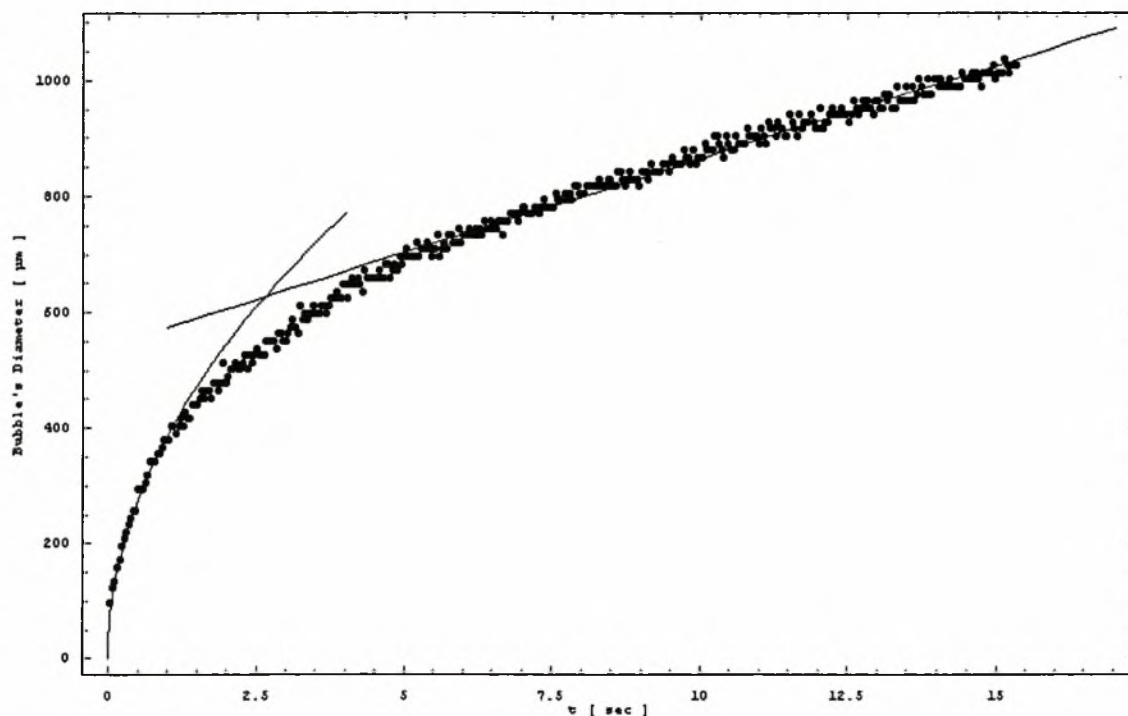
Θ.1 Νερό



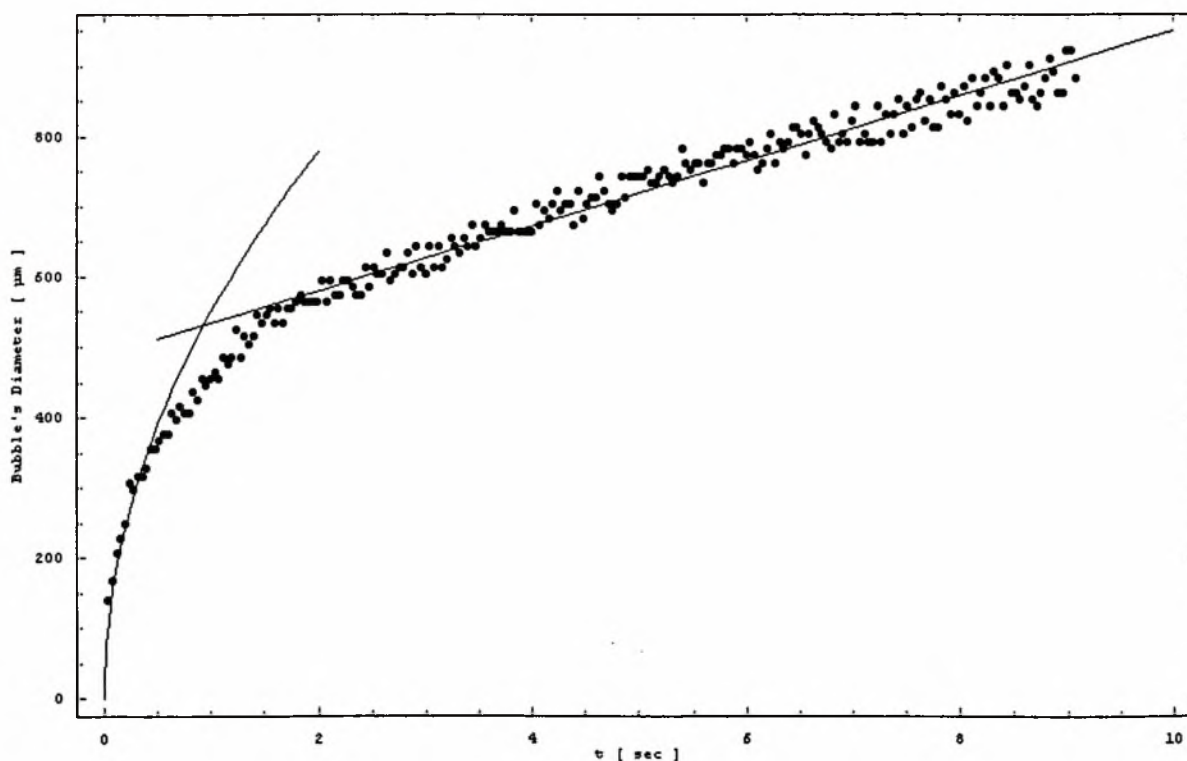
Σχήμα Θ.1 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας ($\alpha=486.33 - R^2=0.991649$, $\beta=38.34 - R^2=0.930865$, $\gamma=723.46$).



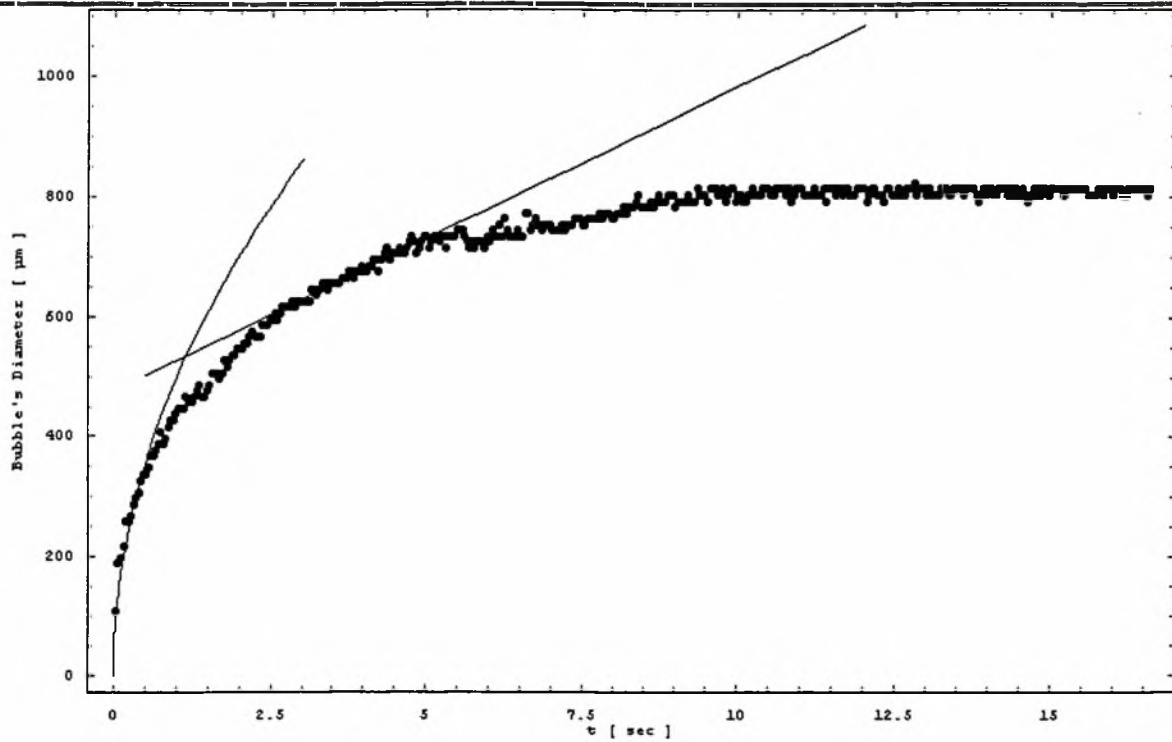
Σχήμα Θ.2 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 7^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας ($\alpha=482.56 - R^2=0.985587$, $\beta=32.45 - R^2=0.922665$, $\gamma=766.16$).



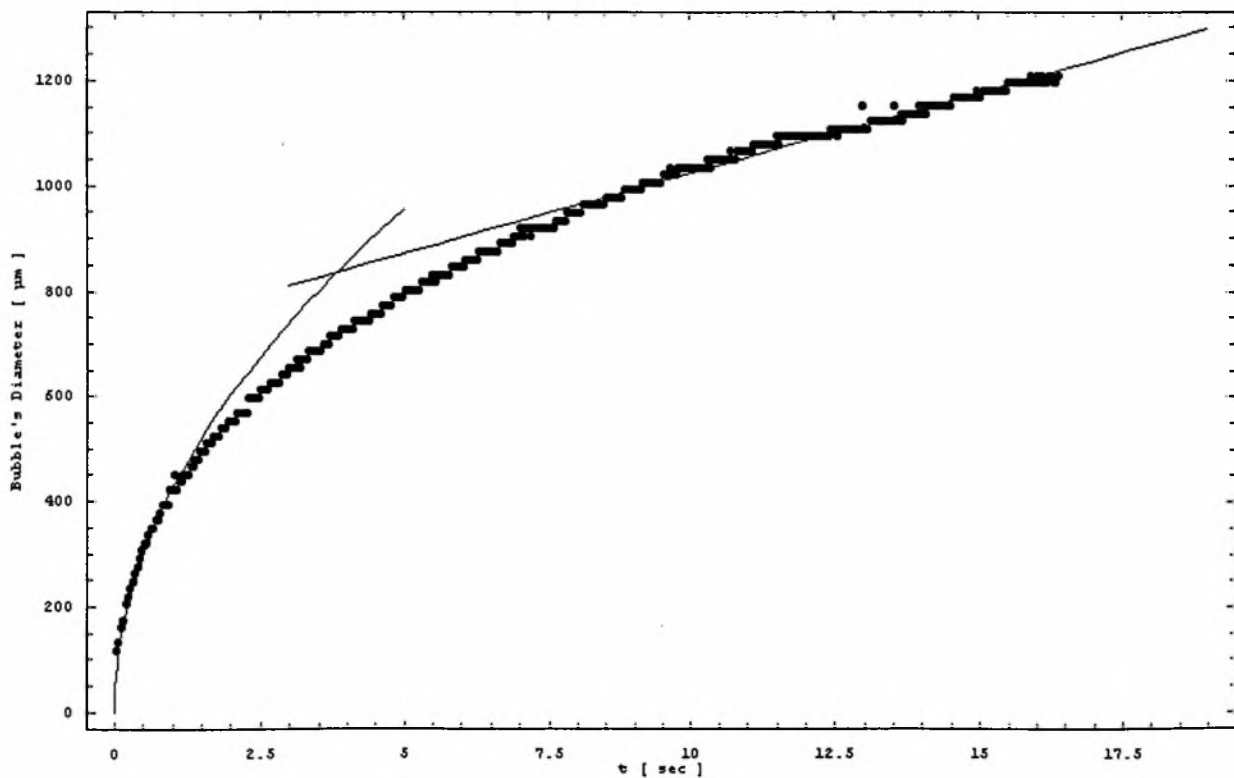
Σχήμα 3.3 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 8ης παραβολής της πρώτης μέρας ($\alpha=385.05$ - $R^2=0.992209$, $\beta=32.32$ - $R^2=0.985513$, $\gamma=541.30$).



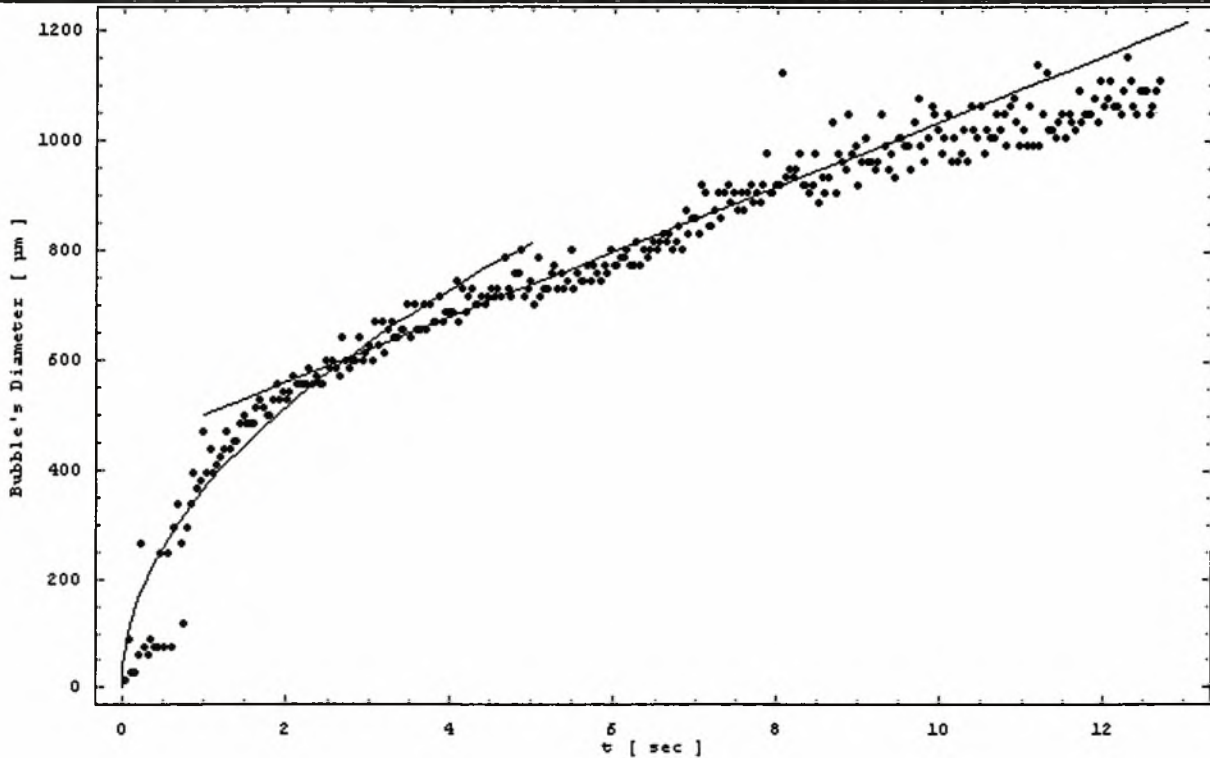
Σχήμα 3.4 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 2ης παραβολής της δεύτερης μέρας ($\alpha=550.35$ - $R^2=0.929441$, $\beta=46.24$ - $R^2=0.964936$, $\gamma=488.55$).



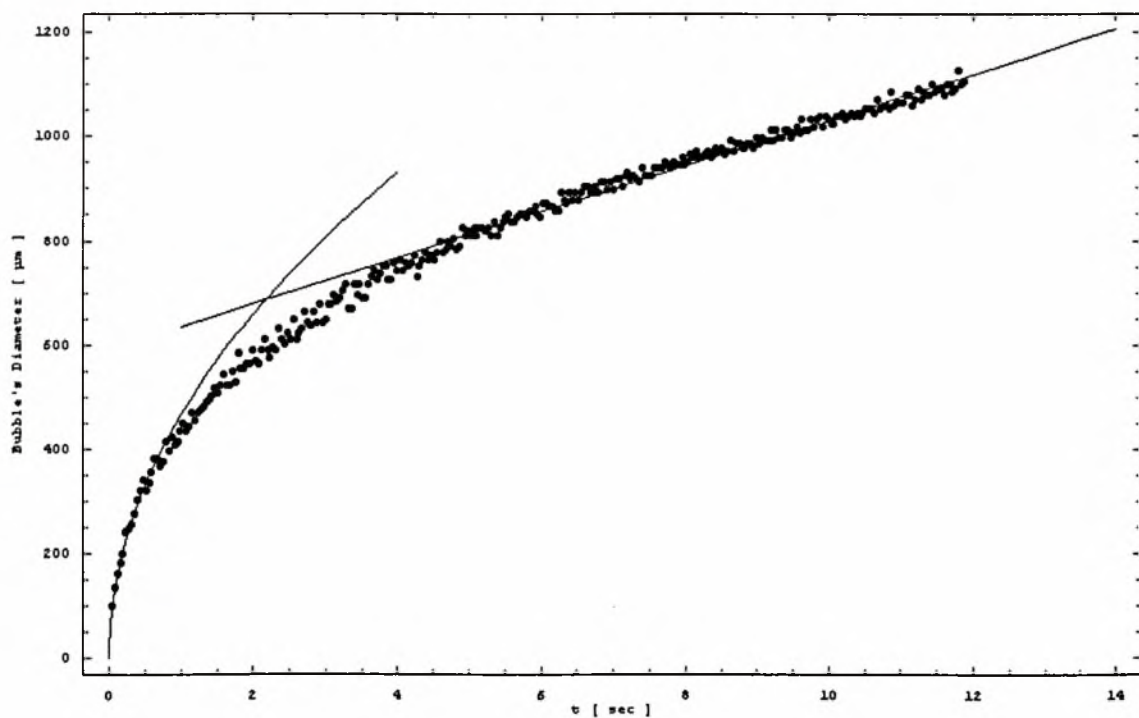
Σχήμα Θ.5 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 3ης παραβολής της δεύτερης μέρας ($\alpha=496.97$ - $R^2=0.908233$, $\beta=50.91$ - $R^2=0.718767$, $\gamma=475.54$).



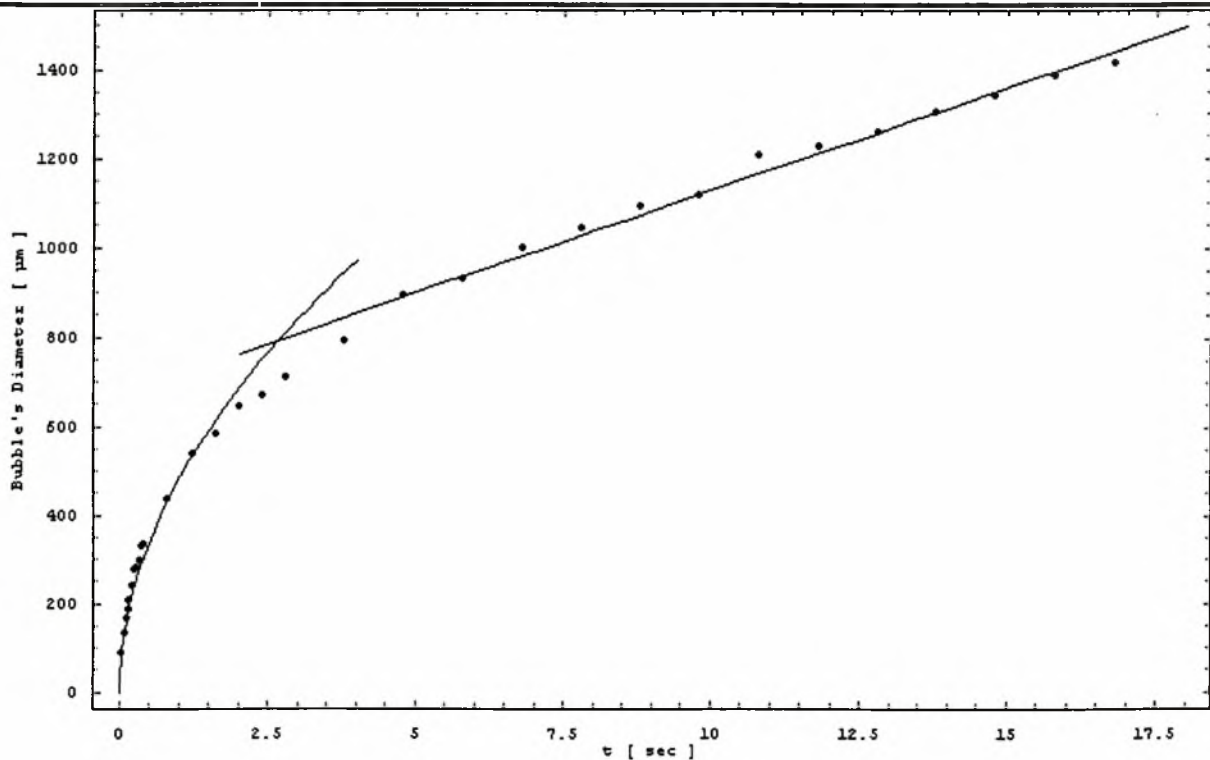
Σχήμα Θ.6 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 6ης παραβολής της δεύτερης μέρας ($\alpha=426.82$ - $R^2=0.985147$, $\beta=30.59$ - $R^2=0.982007$, $\gamma=717.91$).



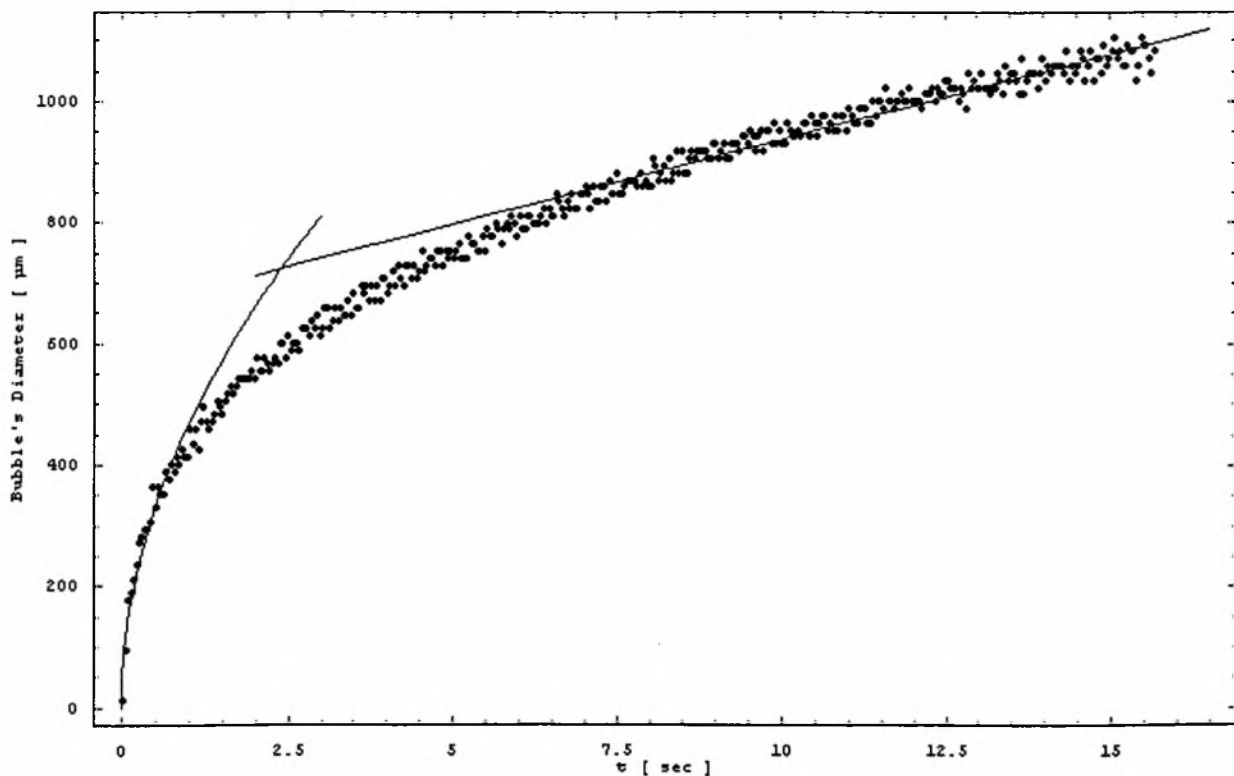
Σχήμα 0.7 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της δεύτερης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 7^{ης} παραβολής της δεύτερης μέρας ($\alpha=364.40 - R^2=0.791086$, $\beta=59.74 - R^2=0.93906$, $\gamma=438.99$).



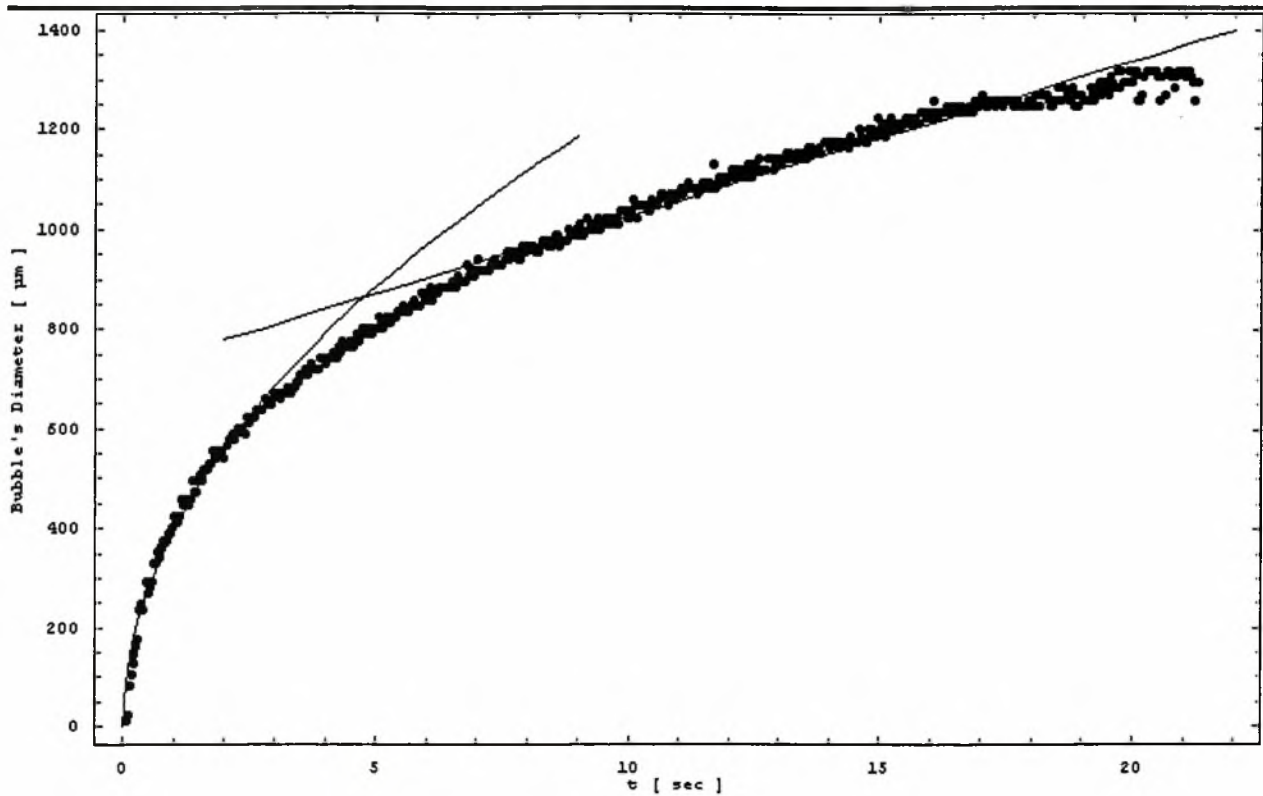
Σχήμα 0.8 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 21^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=465.91 - R^2=0.982799$, $\beta=43.95 - R^2=0.985821$, $\gamma=591.55$).



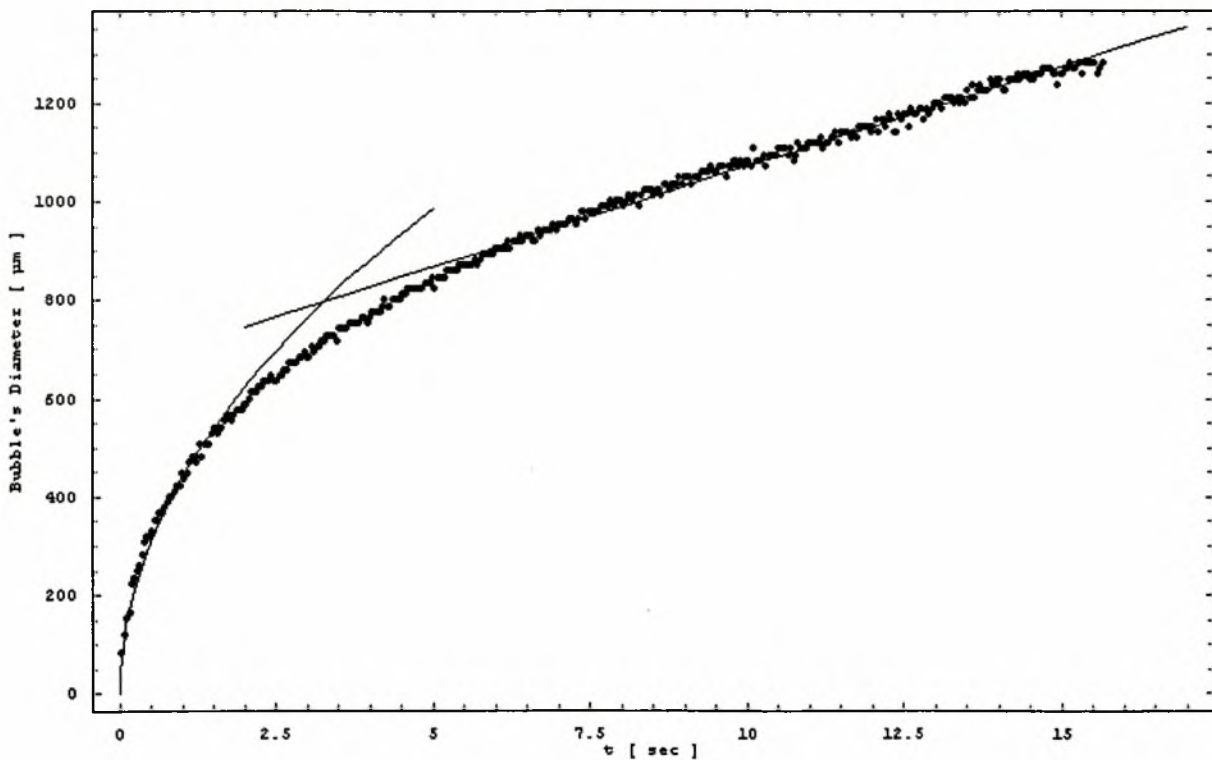
Σχήμα Θ.9 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 22^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=485.62$ - $R^2=0.978512$, $\beta=46.03$ - $R^2=0.986593$, $\gamma=668.80$).



Σχήμα Θ.10 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 26^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=467.04$ - $R^2=0.936802$, $\beta=28.09$ - $R^2=0.951834$, $\gamma=657.15$).

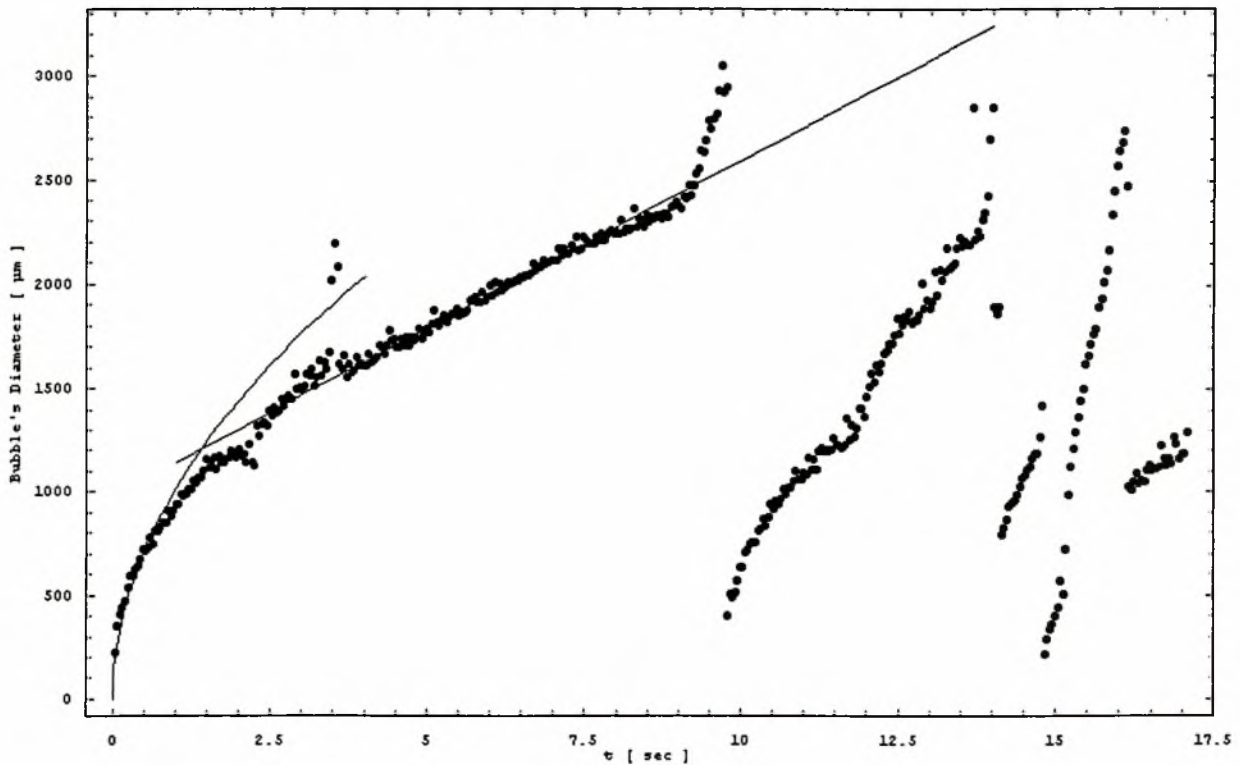


Σχήμα Θ.11 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 27^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=395.02 - R^2=0.981013$, $\beta=31.12 - R^2=0.972405$, $\gamma=715.16$).

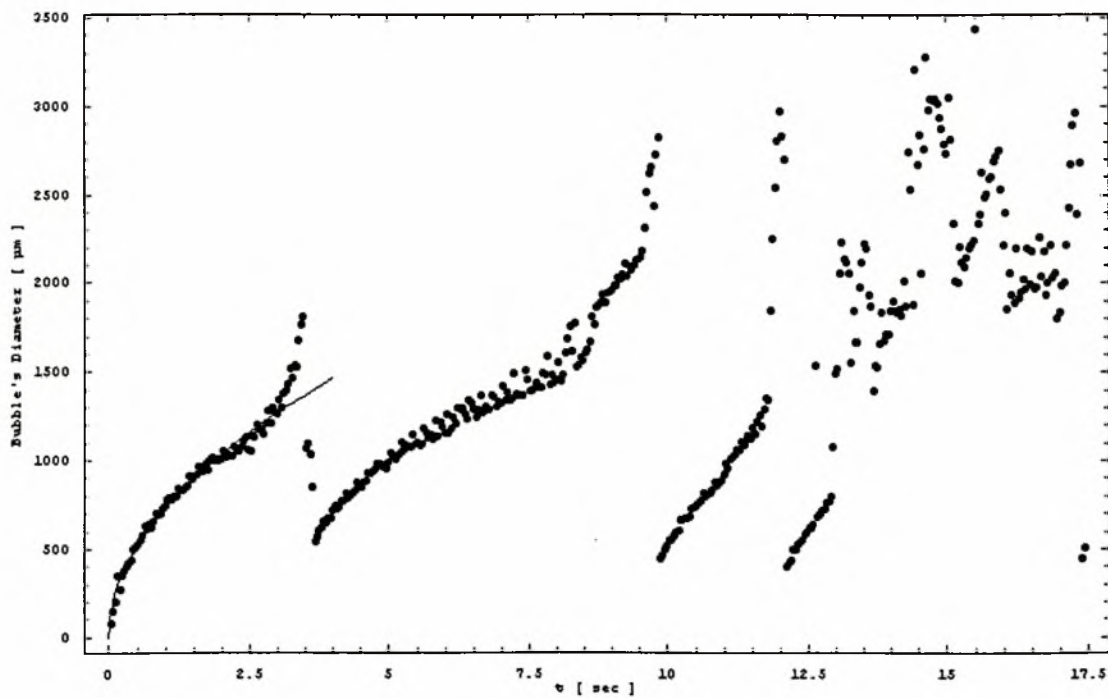


Σχήμα Θ.12 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 28^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=441.26 - R^2=0.985736$, $\beta=40.54 - R^2=0.990814$, $\gamma=665.326$).

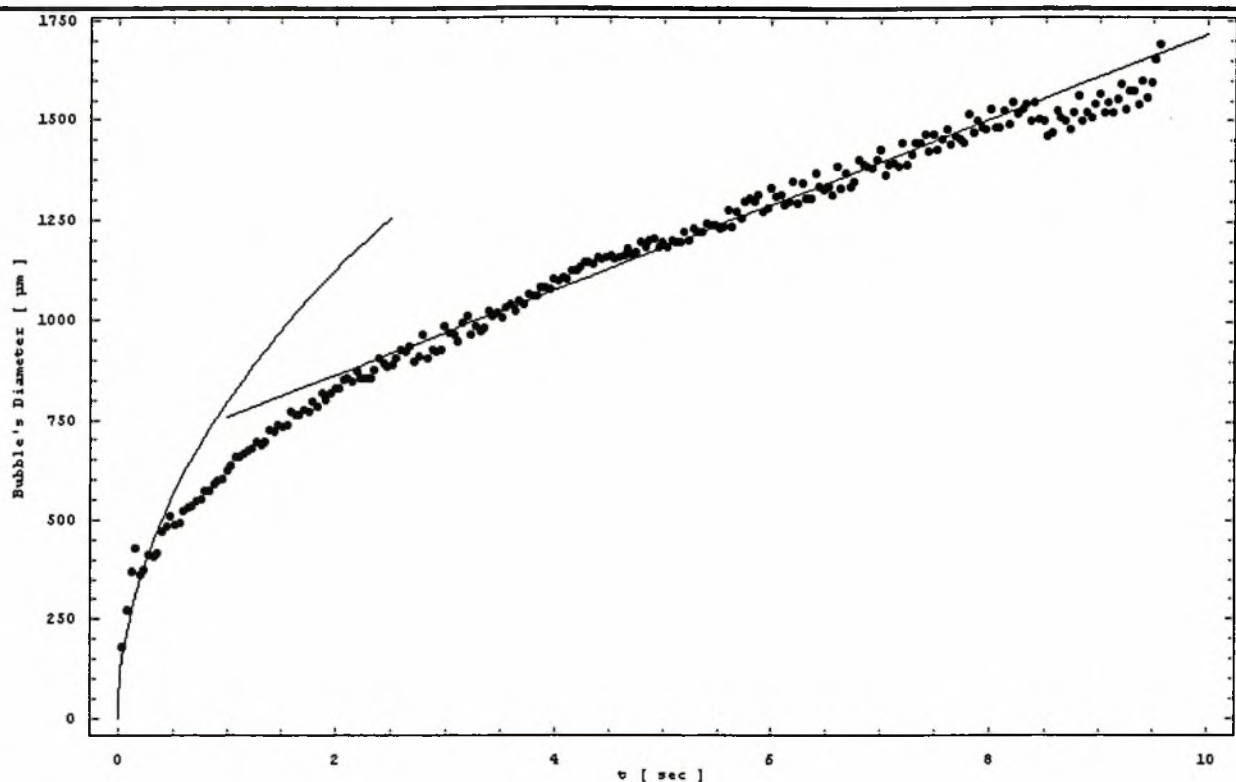
Θ.2 Επτάνιο



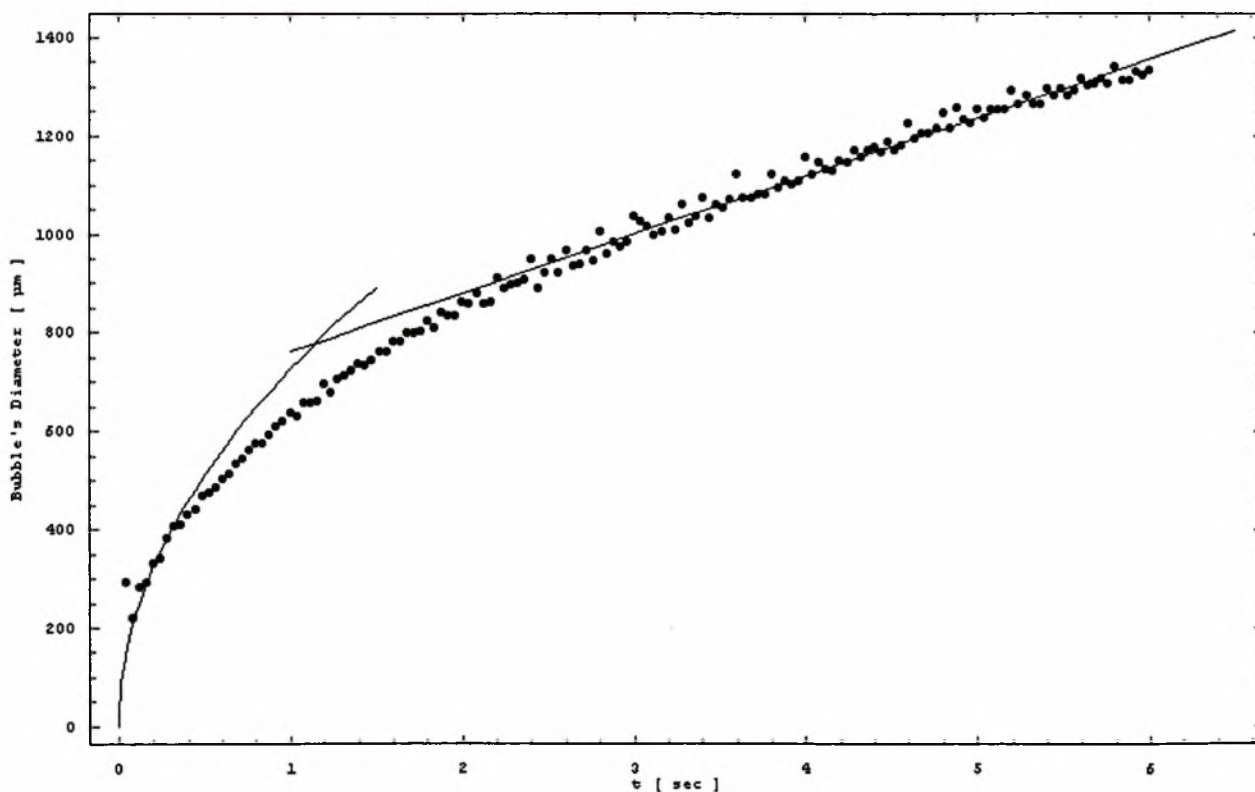
Σχήμα Θ.13 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πρώτης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 6^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=1016.86 - R^2=0.951102$, $\beta=161.67 - R^2=0.982699$, $\gamma=978.52$).



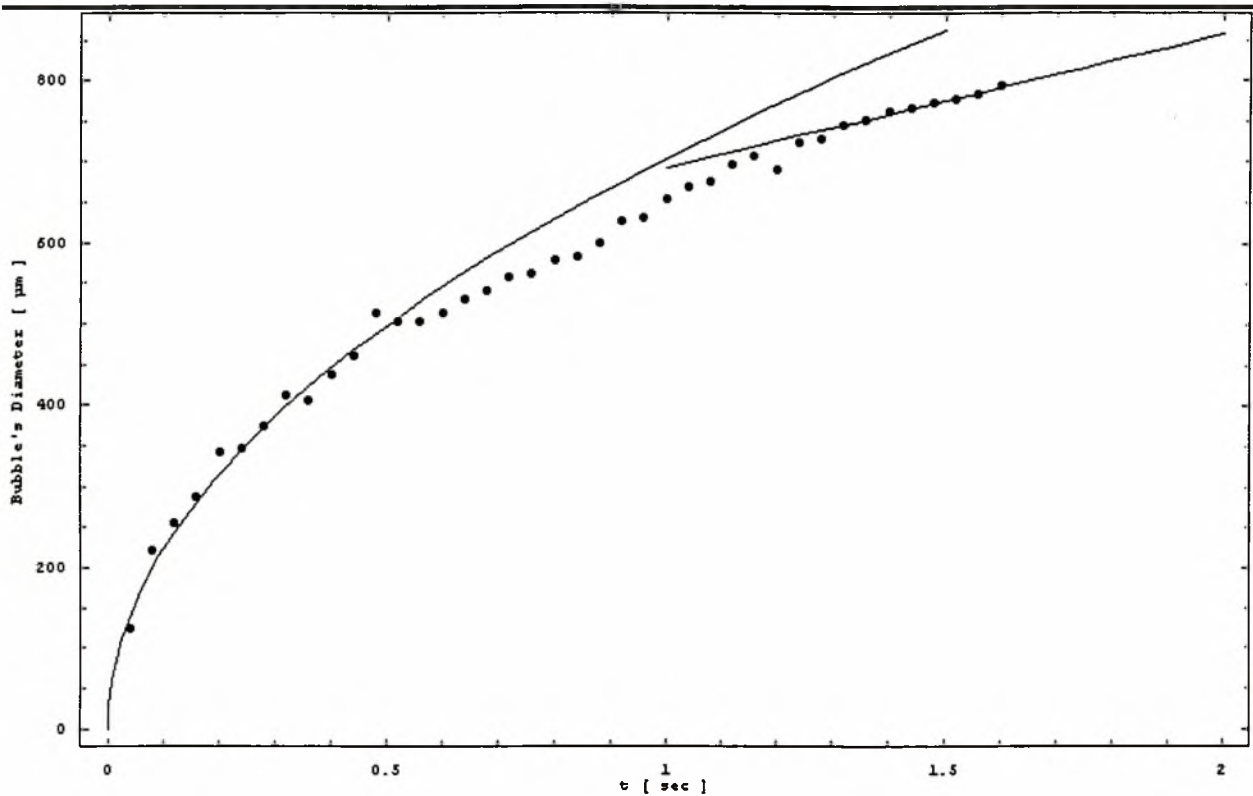
Σχήμα Θ.14 Αποτελέσματα προσαρμογής του παραβολικού τμήματος της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πρώτης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 7^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=732.792 - R^2=0.971607$).



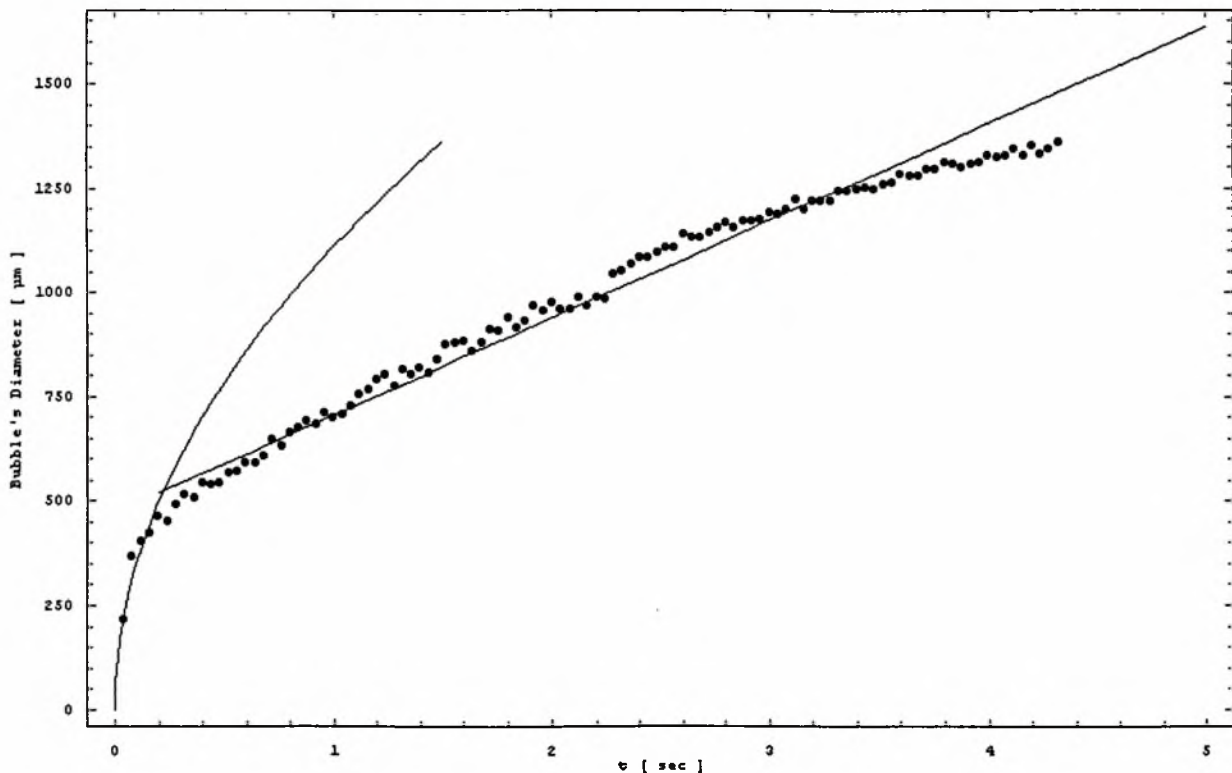
Σχήμα Θ.15.α Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πρώτης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=793.83 - R^2=0.539699$, $\beta=106.74 - R^2=0.985675$, $\gamma=647.901$).



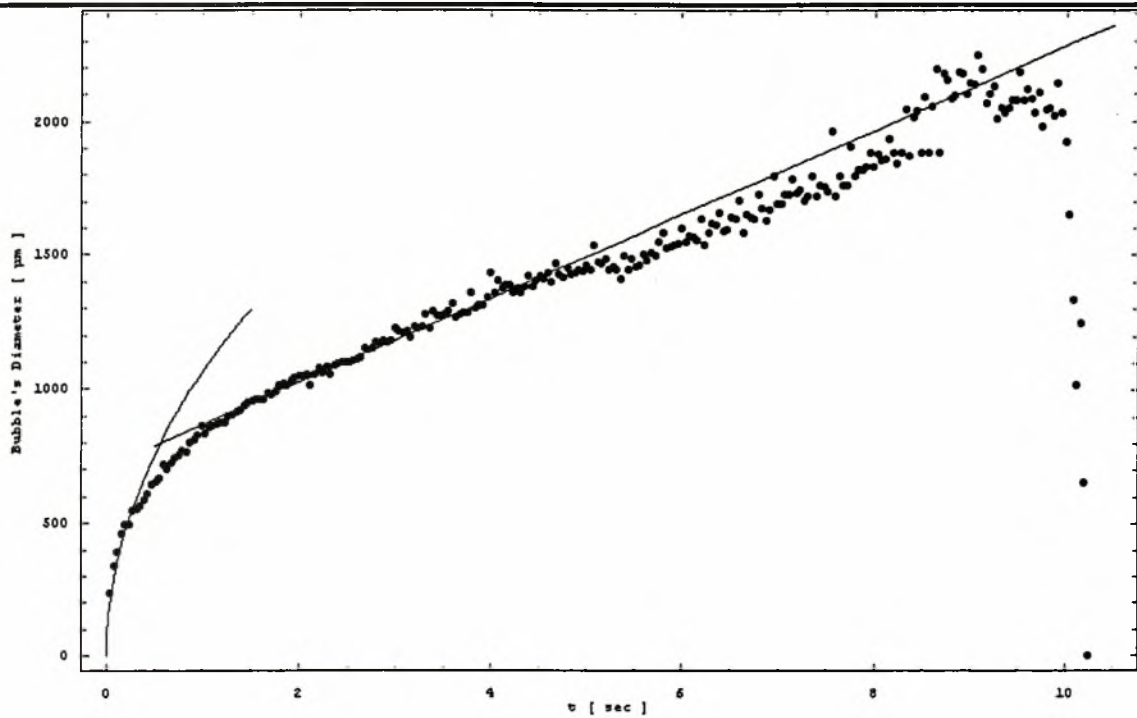
Σχήμα Θ.15.β Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της δεύτερης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=727.13 - R^2=0.421777$, $\beta=118.40 - R^2=0.980416$, $\gamma=644.35$).



Σχήμα Θ.15.γ Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της τρίτης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 11^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=704.06 - R^2=0.980681$, $\beta=163.93 - R^2=0.982993$, $\gamma=529.29$).

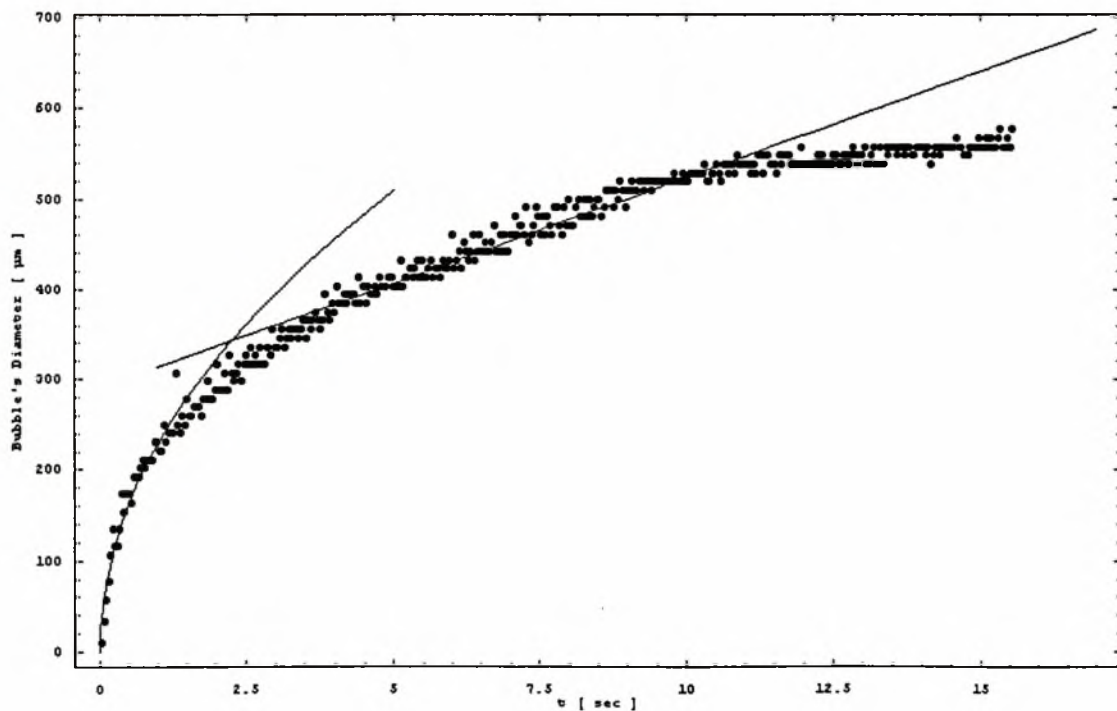


Σχήμα Θ.16 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πρώτης αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 12^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=1109.07 - R^2=0.874837$, $\beta=232.67 - R^2=0.980399$, $\gamma=473.52$).

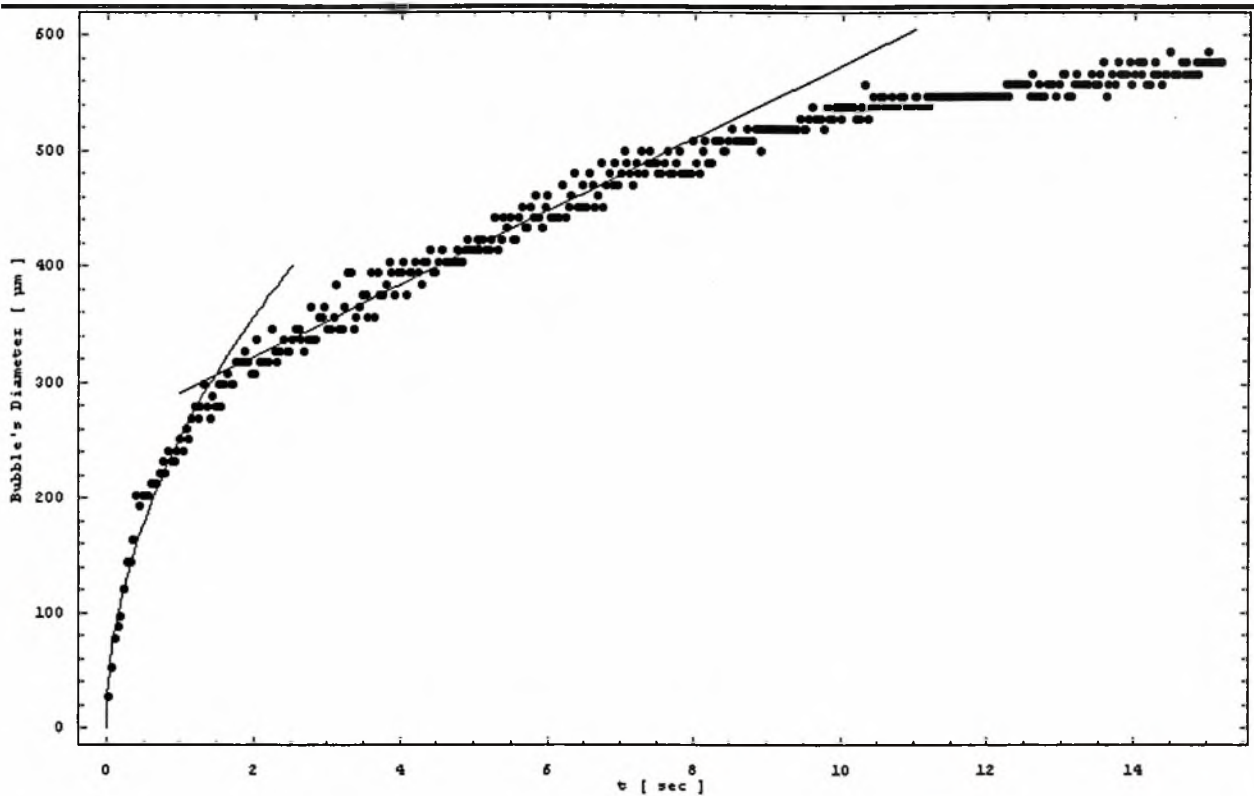


Σχήμα Θ.17 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 13^{ης} παραβολής της τρίτης μέρας ($\alpha=1059.81$ - $R^2=0.91415$, $\beta=156.58$ - $R^2=0.983302$, $\gamma=712.224$).

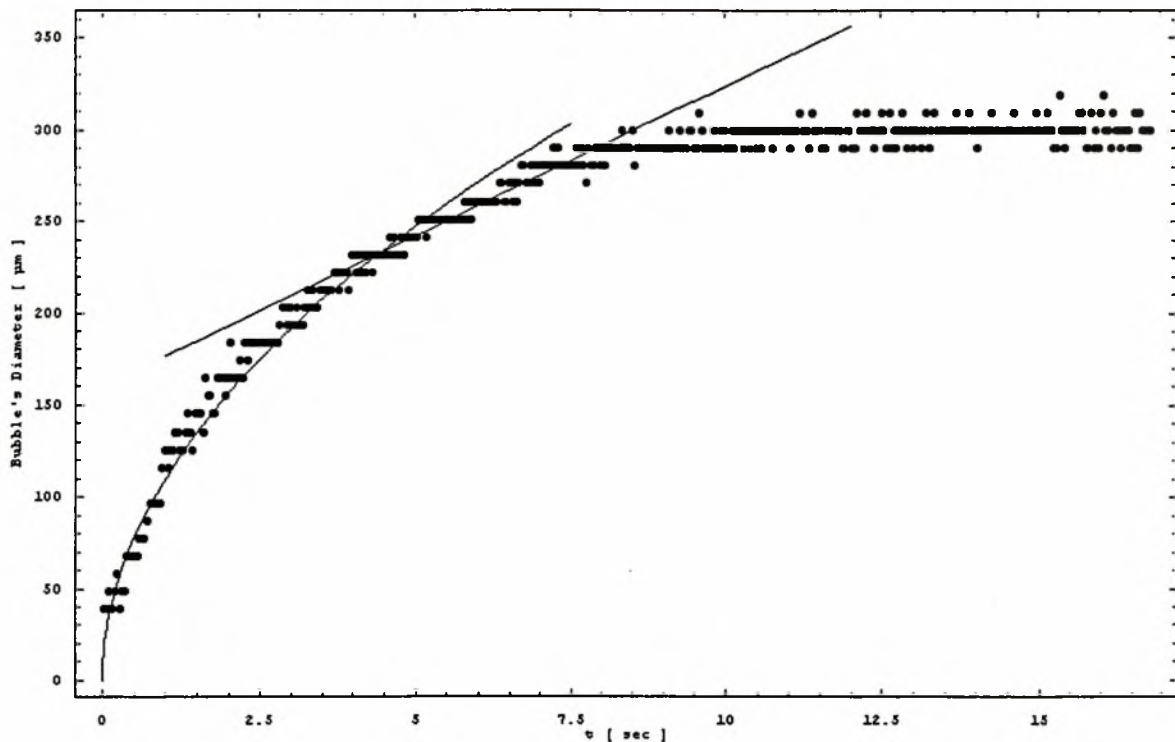
Θ.3 Γλυκερίνη



Σχήμα Θ.18.α Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της κάτω αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας ($\alpha=227.74$ - $R^2=0.945596$, $\beta=23.29$ - $R^2=0.961369$, $\gamma=290.66$).



Σχήμα Θ.18.β Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πάνω αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 16^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας ($\alpha=252.80$ - $R^2=0.953203$, $\beta=31.49$ - $R^2=0.947403$, $\gamma=259.19$).



Σχήμα Θ.19 Αποτελέσματα προσαρμογής της καμπύλης μεταβολής της διαμέτρου της πάνω αναπτυσσόμενης φυσαλίδας κατά τη διάρκεια της 21^{ης} παραβολής της πρώτης μέρας ($\alpha=110.62$ - $R^2=0.980076$, $\beta=16.39$ - $R^2=0.934191$, $\gamma=160.08$).

I. Πίνακες Μετασχηματισμού Laplace

	$u(s, x)$	$\vartheta(t, x)$
1.	$\frac{c}{s}$	c
2.	$\frac{1}{s^{\nu+1}}, \nu > -1$	$\frac{t^{\nu}}{\Gamma(\nu+1)}$, Γ this is the Gamma function, see below
3.	$\frac{1}{s+c}$	e^{-ct}
4.	e^{-px}	$\frac{\xi}{\sqrt{\pi t}} e^{-\xi^2}$
5.	$\frac{e^{-px}}{p}$	$\sqrt{\frac{a}{\pi t}} e^{-\xi^2}$
6.	$\frac{e^{-px}}{s}$	$\text{erfc } \xi$, complementary error function, see below
7.	$\frac{e^{-px}}{sp}$	$2\sqrt{at} \left(\frac{e^{-\xi^2}}{\sqrt{\pi}} - \xi \text{erfc } \xi \right) = 2\sqrt{at} \text{ierfc } \xi$
8.	$\frac{e^{-px}}{s^2}$	$t \left[(1 + 2\xi^2) \text{erfc } \xi - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \xi e^{-\xi^2} \right]$
9.	$\frac{e^{-px}}{p+h}$	$\sqrt{\frac{a}{\pi t}} e^{-\xi^2} - h a e^{hx+ah^2t} \text{erfc}(\xi + h\sqrt{at})$
10.	$\frac{e^{-px}}{p(p+h)}$	$a e^{hx+ah^2t} \text{erfc}(\xi + h\sqrt{at})$
11.	$\frac{e^{-px}}{s(p+h)}$	$\frac{1}{h} \left[\text{erfc } \xi - e^{hx+ah^2t} \text{erfc}(\xi + h\sqrt{at}) \right]$

Special values of the Gamma function:

$$\Gamma(1) = 1 \quad ; \quad \Gamma(n) = (n-1)! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) \quad , \quad (n = 2, 3, \dots)$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi} \quad ; \quad \Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2^n} \quad , \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Πίνακας I.1 Μερικές αντιστοιχίες. $u(s,x)$ είναι ο μετασχηματισμός Laplace του $\vartheta(t,x)$.
 $p = \sqrt{s/a}$ και $\xi = x/2\sqrt{at}$ [7].

$$1. \mathcal{L}\{\vartheta_1 + \vartheta_2\} = \mathcal{L}\{\vartheta_1\} + \mathcal{L}\{\vartheta_2\}$$

$$2. \mathcal{L}\left\{\frac{\partial \vartheta}{\partial t}\right\} = s\mathcal{L}\{\vartheta\} - \vartheta_0 = s u - \vartheta_0(x)$$

with $\vartheta_0(x) = \lim_{t \rightarrow +0} \vartheta(x, t)$, (Initial temperature profile)

$$3. \mathcal{L}\left\{\frac{\partial^n \vartheta}{\partial x^n}\right\} = \frac{\partial^n u}{\partial x^n}$$

$$4. \mathcal{L}\left\{\int_0^t \vartheta(t') dt'\right\} = \frac{1}{s}\mathcal{L}\{\vartheta\}$$

5. If $\mathcal{L}\{\vartheta(t)\} = u(s)$ and k is a positive constant, then

$$\mathcal{L}\{\vartheta(kt)\} = \frac{1}{k} u\left(\frac{s}{k}\right)$$

$$6. \mathcal{L}\left\{\int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau\right\} = \mathcal{L}\left\{\int_0^t f_2(\tau) f_1(t-\tau) d\tau\right\}$$

$$= \mathcal{L}\{f_1(t)\} \cdot \mathcal{L}\{f_2(t)\} ,$$

so-called convolution theorem, which is applied, in particular, to time dependent boundary conditions.

Πίνακας I.2 Μερικές γενικές σχέσεις για το μετασχηματισμό Laplace $L\{\vartheta\} = u$ [7].



