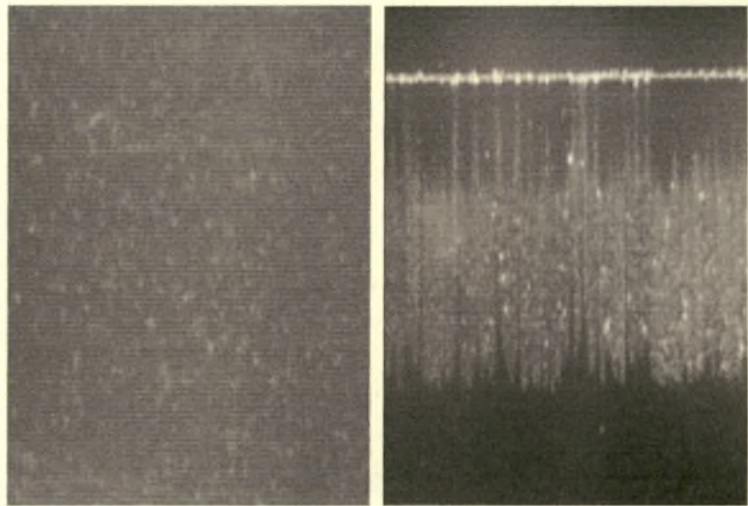


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ
ΣΕ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ ΥΜΕΝΑ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ
ΜΙΚΡΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:
ΠΑΛΙΑΝΟΠΟΥΛΟΥ ΙΩΑΝΝΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2003



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

Αριθ. Εισ.: 2488/1
Ημερ. Εισ.: 04-03-2004
Δωρεά:
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ
2003
ΠΑΛ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070527

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι μετρήσεις ταχύτητας σε ροή υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα με χρήση δύο τεχνικών οπτικοποίησης. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στην προκειμένη περίπτωση είναι των φυσαλίδων υδρογόνου και των μικροσωματιδίων ανίχνευσης. Η προσπάθεια που έχει γίνει έχει ως σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας, φαινόμενα δηλαδή ροής σε υγρούς υμένες.

Για το σχηματισμό του υμένα χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα πειραματική διάταξη (κανάλι), ενώ κατασκευάστηκε για την εφαρμογή της τεχνικής φυσαλίδων υδρογόνου ένα σύστημα στήριξης και ιδιοσυσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού. Η δεύτερη τεχνική βασίστηκε σε εισαγωγή μικροσωματιδίων διαμέτρου 20 μm , διαθέσιμων στο εμπόριο. Και οι δύο τεχνικές χρησιμοποιούν κατάλληλους προβολείς φωτός και μία ψηφιακή κάμερα υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας (έως 1000 fps).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου φυσαλίδων υδρογόνου οι προκύπτουσες μετρήσεις έγιναν σε επίπεδο τοίχωμα με κλίση 3.4° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η μέθοδος αποδείχτηκε μερικά επιτυχής, γιατί οι μετρήσεις είναι σε συμφωνία με θεωρητικές προβλέψεις μακριά από το τοίχωμα, ενώ κοντά του παρατηρείται απόκλιση. Η μέθοδος μικροσωματιδίων, η οποία πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο τοίχωμα με κλίση 0.65° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, έδωσε περισσότερο ομοιόμορφα αποτελέσματα, αλλά προς το παρόν περιορίζεται στον υπολογισμό μέσης ταχύτητας για ολόκληρο το βάθος του υμένα. Με κατάλληλες βελτιώσεις (που προτείνονται στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων) και οι δύο τεχνικές έχουν τη δυνατότητα παραγωγής αξιόπιστων τοπικών μετρήσεων ταχύτητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη στιγμή της εισαγωγής μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας μέχρι και τώρα, που σιγά σιγά διαβαίνω τα σκαλιά της εξόδου του, αισθάνθηκα την ανάγκη να εκφράσω ευγνωμοσύνη σε κάποια άτομα που στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν να αναπτύξω σημαντικές ικανότητες που πρέπει να έχει μία σύγχρονη μηχανικός.

Αρχικά οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή του τμήματος Δρ Βασίλη Μποντόζογλου, ο οποίος μου έκανε την τιμή να επιβλέψει την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Με την σωστή καθοδήγηση και το ενδιαφέρον του, τη συνέπεια και ειλικρίνεια που τον διέκρινε, μπόρεσα να ολοκληρώσω την εργασία. Η εκτίμησή μου προς το άτομό του είναι απεριόριστη.

Το πρόσωπο με το οποίο συνεργάστηκα στο αρχικό στάδιο της διπλωματικής μου εργασίας πριν φύγει για την Τσεχία και στο οποίο χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ είναι η υποψήφια διδάκτωρ του τμήματος, Κατερίνα Αργυριάδη. Την ευχαριστώ, γιατί μου εμφύσησε την αγάπη για το εργαστήριο και μου μετέδωσε γνώσεις πάνω στην πειραματική διαδικασία. Τη σκυτάλη παίρνει έπειτα ο επιστημονικός συνεργάτης του τμήματος, Μιχάλης Βλαχογιάννης, με τον οποίο είχα μια άψογη συνεργασία. Η προσπάθειά του να με βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπιζα και να μου μεταδώσει γνώσεις και τρόπο σκέψης ήταν τεράστια.

Δεν θα μπορούσα με τίποτε να ξεχάσω τις αδερφικές μου φίλες και πλέον συναδέλφους, Σούλα Λαλιώτη και Όλγα Λιάντη για τα αξέχαστα πέντε χρόνια που περάσαμε μαζί, χρόνια που χαρακτηρίζονται όχι μόνο από ξεγνοιασιά, εκδρομές και ατέλειωτες συζητήσεις κοινωνικών σχολίων αλλά και από μελέτη, συνεργασία, διάβασμα. Όλα όσα περάσαμε μαζί, χαρές και λύπες, είτε οι τρεις μας ή και μαζί με άλλους, θα μείνουν ανεξίτηλα στο πέρας των χρόνων.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη και ένα τεράστιο ευχαριστώ χρωστάω στον φίλο και συνάδερφό μου Δημήτρη Πάζη, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό Βιομηχανίας, για την απεριόριστη υπομονή, κουράγιο και φροντίδα προς το πρόσωπό μου αλλά και τις επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ εγκάρδια τους γονείς μου για την απεριόριστη αγάπη τους και την ηθική και οικονομική βοήθεια που μου προσέφεραν στα χρόνια των σπουδών μου, όπως επίσης και τα αδέρφια μου, Γιάννη και Θωδωρή.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΕΛΙΔΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....11

2.1 Μέθοδοι οπτικοποίησης της ροής.....11

2.1.1 Χρωστικές σε ροή υγρού.....14

2.1.2 Καπνός σε ροή αερίου.....14

2.1.3 Χρωστικές ουσίες στην επιφάνεια του σώματος.....15

2.1.4 Πλέγμα νημάτων.....16

2.1.5 Στερεά σωματίδια στη ροή σωματιδίων.....17

2.1.6 Η τεχνική των φυσαλίδων υδρογόνου.....17

2.2 Η Μέθοδος Ταχυμετρίας Εικόνας Σωματιδίων18

2.3 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα20

2.4 Δυναμική Μοναζικών κυμάτων σε ροές υμένα.....23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....30

3.1 Το σύστημα ροής(κανάλι).....30

3.2 Ιδιότητες των ρευστών, του υδρογόνου και των σωματιδίων

3.3 ανίχνευσης.....34

3.4 Μέθοδος απεικόνισης και δειγματοληψίας.....35

3.5 Παράμετροι του πειράματος.....36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....37

4.1 Βαθμονόμηση και έλεγχος καλής λειτουργίας των πειραματικών μεθόδων
.....37

4.2 Ροή φυσαλίδων υδρογόνου38

4.2.1 Ποιοτικά αποτελέσματα φυσαλίδων υδρογόνου41

4.2.2	Ποσοτικά αποτελέσματα φυσαλίδων υδρογόνου	44
4.3	Ροή με στερεά σωματίδια αντίχνευσης.....	54
4.3.1	Ποιοτικά αποτελέσματα ροής με στερεά σωματίδια.....	54
4.3.2	Ποσοτικά αποτελέσματα ροής με στερεά σωματίδια	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	72
-------------------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	78
------------------------------	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	79
----------------	----

Περιεχόμενα εικόνων

<i>Εικόνα 2.1:</i> Οπτικοποίηση στρωτής ροής με χρωστική γύρω από αξονοσυμμετρικό σώμα	14
<i>Εικόνα 2.2:</i> Οπτικοποίηση της ροής γύρω από αεροτομή σε αεροσύραγμα με την τεχνική του καπνού	15
<i>Εικόνα 2.3:</i> οπτικοποίηση του ομόρου πτέρυγας δέλτα με πλέγμα νηματιδίων	16
<i>Εικόνα 2.4:</i> Οπτικοποίηση της ροής με σειρές φυσαλίδων υδρογόνου	18
<i>Εικόνα 2.5:</i> Οπτικοποίηση της ροής σε συγκλίνον ακροφύσιο με τη μέθοδο των πακέτων φυσαλίδων υδρογόνου	18
<i>Εικόνα 2.6:</i> Το φαινόμενο της συγχώνευσης μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων. Το μεγαλύτερο μοναχικό κύμα απορροφά το μικρότερο του, που προπορεύεται.....	24
<i>Εικόνα 3.1:</i> Η Πειραματική Διάταξη.....	32
<i>Εικόνα 3.2:</i> Τμήματα της πειραματικής διάταξης: α) Το κανάλι ροής β) Το δοχείο υπερχειλίσσης γ) Το δοχείο κατανομής δ) Το δοχείο συλλογής.....	33
<i>Εικόνα 4.1 :</i> Τμήματα της πειραματικής διάταξης (1): τριπλό τροφοδοτικό. (2): συσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού. (3) : ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π.....	38
<i>Εικόνα 4.2 :</i> Ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π.....	39
<i>Εικόνα 4.3:</i> Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των φυσαλίδων υδρογόνου με απόσταση 100 μm από τον πυθμένα του καναλιού. $t_1=45$ msec και $t_2=400$ msec: α: $Re = 21$. β: $Re = 42$	41
<i>Εικόνα 4.4:</i> Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των φυσαλίδων υδρογόνου με απόσταση 200 μm από τον πυθμένα του καναλιού. $t_1=45$ msec και $t_2=400$ msec: α: $Re = 23$. β: $Re = 31$, γ: $Re = 62$	43
<i>Εικόνα 4.5:</i> Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των φυσαλίδων υδρογόνου με απόσταση 350 μm από τον πυθμένα του καναλιού. $t_1=45$ msec και $t_2=400$ msec: α: $Re = 21$, β: $Re = 38$, γ: $Re = 51$	44
<i>Εικόνα 4.6:</i> Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των στερεών σωματιδίων με	

αρχική συγκέντρωση 10 ppm και αριθμούς Reynolds α: $Re = 16$, β: $Re = 34$, γ: $Re = 54$, δ: $Re = 102$	55
Εικόνα 4.7: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των στερεών σωματιδίων με αρχική συγκέντρωση 20 ppm και αριθμό Reynolds :α: $Re = 17$, β: $Re = 36$, γ: $Re = 55$, δ: $Re = 102$	56
Εικόνα 4.8: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των στερεών σωματιδίων με αρχική συγκέντρωση 30 ppm και αριθμό Reynolds: α: $Re = 17$, β: $Re = 36$, γ: $Re = 58$, δ: $Re = 101$	58
Εικόνα 4.9: Χαρακτηριστική εικόνα από την κίνηση φωτεινού σωματιδίου από πολυαμίδιο στο κανάλι ροής με αριθμό Reynolds 102 και συγκέντρωση σωματιδίων πολυαμιδίου 20 ppm.....	66
Εικόνα 4.10: Χαρακτηριστική εικόνα από την κίνηση θαμπού σωματιδίου από πολυαμίδιο στο κανάλι ροής με αριθμό Reynolds 102 και συγκέντρωση σωματιδίων πολυαμιδίου 20 ppm.....	68
Εικόνα 4.11 : Σχεδιασμός οπτικού πεδίου.....	68
Εικόνα 4.12 : Αιτία στρέβλωσης των αποτελεσμάτων.....	69
Εικόνα 4.13 : Σχεδιασμός οπτικού πεδίου παράλληλο με το πεδίο ροής	70

Περιεχόμενα σχημάτων

Σχήμα 2.1 : Η βασική ροή σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα.....	20
Σχήμα 2.2: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re.....	26
Σχήμα 2.3: Ο κρίσιμος αριθμός Re συναρτήσει της επιβαλλόμενης συχνότητας f . Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιοριζόμενα όρια των διαφόρων ασταθειών. Παράμετροι του πειράματος: $\phi=6.4^\circ$, υδατικό διάλυμα γλυκερίνης 54% κ.β.....	27
Σχήμα 3.1: Σχέση του αριθμού σπειρών του κοχλία συναρτήσει της κλίσης του καναλιού σε μοίρες, όπου: $S = 6,03M + 16,1$ και $R^2 = 0,9993$	31
Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση της μέσης θεωρητικής ταχύτητας των φυσαλίδων συναρτήσει της πειραματικής ταχύτητας των φυσαλίδων με βάση τις αποστάσεις του μεταλλικού σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού.....	47
Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση της ταχύτητας των φυσαλίδων ροής, δηλαδή της μέσης θεωρητικής ταχύτητας των φυσαλίδων και της πειραματικής ταχύτητας συναρτήσει του αριθμού Reynolds για όλες τις αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού.....	50
Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση του λόγου U/U_{meso} , που εκφράζει την ταχύτητα στην κατεύθυνση της ροής προς τη μέση ταχύτητα της ροής του υμένα συναρτήσει του λόγου y/H_n , που εκφράζει την απόσταση του πλατινένιου σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού προς το θεωρητικό πάχος υμένα κατά Nusselt.....	53
Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση της ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης, δηλαδή της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης καθώς και της ταχύτητας που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 10 ppm.....	62

- Σχήμα 4.5:** Γραφική παράσταση της ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης ,δηλαδή της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης καθώς και της ταχύτητας που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 20 ppm.....63
- Σχήμα 4.6:** Γραφική παράσταση της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης καθώς και της πειραματικής συναρτήσει του αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 30 ppm.....64
- Σχήμα 4.7:** Γραφική παράσταση της μέσης ταχύτητας ενός φωτεινού σωματιδίου ανίχνευσης συναρτήσει του αριθμού λήψης της κάθε φωτογραφίας του στην περίπτωση συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων 20 ppm και αριθμού Reynolds 102.....65
- Σχήμα 4.8:** Γραφική παράσταση της μέσης ταχύτητας ενός θαμπού σωματιδίου ανίχνευσης συναρτήσει του αριθμού λήψης της κάθε φωτογραφίας στην περίπτωση συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων 20 ppm και αριθμού Reynolds 102.....67

Περιεχόμενα πινάκων

<i>Πίνακας 2.1:</i> Σωματίδια ανίχνευσης για ροές υγρών.....	19
<i>Πίνακας 4.1:</i> Δεδομένα για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, όπως η απόσταση από τον πυθμένα του καναλιού, η επιτάχυνση της βαρύτητας, το κινηματικό ιξώδες, η γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες, η πυκνότητα και η μαζική παροχή στην έξοδο του καναλιού..	46
<i>Πίνακας 4.2:</i> Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η ογκομετρική παροχή, το πάχος υμένα κατά Nusselt, ο αριθμός Reynolds και ο αριθμός Reynolds που προέκυψε πειραματικά.....	47
<i>Πίνακας 4.3:</i> Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η μέση θεωρητική ταχύτητα και η πειραματική ταχύτητα.....	47
<i>Πίνακας 4.4:</i> Αδιάστατοι λόγοι ταχυτήτων και αποστάσεων για την καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας ροής και της απόστασης από τον πυθμένα του καναλιού.....	52
<i>Πίνακας 4.5:</i> Δεδομένα για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, όπως η Συγκέντρωση στερεών σωματιδίων ανίχνευσης, η επιτάχυνση της βαρύτητας, το κινηματικό ιξώδες, η γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες, η πυκνότητα και η μαζική παροχή στην έξοδο του καναλιού..	60
<i>Πίνακας 4.6:</i> Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η ογκομετρική παροχή, το πάχος υμένα κατά Nusselt, και ο αριθμός Reynolds.....	60
<i>Πίνακας 4.7:</i> Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η μέση θεωρητική ταχύτητα, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα και η πειραματική ταχύτητα.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος αυτής είναι οι μετρήσεις ταχύτητας σε ροή υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα με χρήση φυσαλίδων υδρογόνου και μικροσωματιδίων. Η προσπάθεια που έχει γίνει έχει ως σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν φαινόμενα μεταφοράς μάζας ή θερμότητας, φαινόμενα δηλαδή ροής σε υγρούς υμένες.

Το πρόβλημα της ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές μέχρι σήμερα, εξαιτίας των θεωρητικών και πρακτικών εφαρμογών του. Οι ρυθμοί μεταφοράς επηρεάζονται σε έντονο βαθμό από το πεδίο ροής του υμένα, το οποίο επίσης καθορίζει και το βαθμό απόδοσης των συσκευών. Ροή υγρού υμένα συναντάται σε συσκευές εναλλαγής θερμότητας, όπως είναι οι εξατμιστήρες και οι συμπυκνωτές ατμού και σε συσκευές εναλλαγής μάζας, όπως στήλες απορρόφησης με πληρωτικά υλικά. Συναντάται επίσης και σε άλλες πιο σύγχρονες τεχνολογικές διεργασίες, όπως είναι οι ηλεκτροχημικές επιμεταλλώσεις και οι χημικές μετατροπές σε καταλυτικούς αντιδραστήρες.

Η ροή υγρού υμένα πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα έχει μελετηθεί διεξοδικά τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά. Η ανάλυση της ευστάθειας της ροής, η κατανόηση της εξέλιξης μιας ασταθούς ροής καθώς και το αποτέλεσμα αυτής στην εξέλιξη της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας, συνιστούν μερικά από τα φαινόμενα που διέπουν το πρόβλημα.

Όπως έχει διαπιστωθεί από το πλήθος των εφαρμογών κατά τη ροή υγρού υμένα πάνω από επιφάνειες επίπεδες, η οπτικοποίηση της ροής παίζει τεράστιο ρόλο στη μελέτη των διαφόρων φαινομένων. Αυτό συμβαίνει διότι από την οπτικοποίηση μιας ροής εκτός από τη συνολική εικόνα του πεδίου, είναι δυνατή και η εξαγωγή ποσοτικών χαρακτηριστικών μεγεθών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ταχύτητα της ροής σε ορισμένες θέσεις του πεδίου, με την εφαρμογή φυσικά των κατάλληλων τεχνικών.

Ωστόσο, τίθεται το ερώτημα αν η χρήση κάποιων συγκεκριμένων τεχνικών οπτικοποίησης θα προσέφερε τα απαραίτητα ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά μεγέθη

που χαρακτηρίζουν τη ροή υγρού υμένα. Στην περίπτωση μας, ερευνάται η χρήση φυσαλίδων υδρογόνου και μικροσωματιδίων για την ποσοτικοποίηση ορισμένων μεγεθών. σε σύγκριση πάντα με αυτά που προκύπτουν θεωρητικά για μια μόνιμη, στρωτή, ασυμπιεστή ροή, με ομοιόμορφο πάχος υμένα και νευτωνικό ρευστό σταθερού ιξώδους.

Ο σχηματισμός του υμένα γίνεται με τη χρήση πειραματικής συσκευής κατάλληλης για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και η παρατήρηση των χαρακτηριστικών του πραγματοποιείται με κατάλληλη μέθοδο απεικόνισης. Η πρώτη τεχνική ποσοτικής οπτικοποίησης πραγματοποιείται με την παραγωγή ηλεκτρικού παλμού και τη δημιουργία κύματος φυσαλίδων. Για τη δημιουργία των τελευταίων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη διάταξη με στοιχεία ένα τριπλό τροφοδοτικό, μια συσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού και μια ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π. Από την άλλη πλευρά, για τη δεύτερη τεχνική ποσοτικής οπτικοποίησης, στον υμένα προστίθενται πολλά στερεά μικροσωματίδια ανίχνευσης, τα οποία παρασύρονται με τη ροή.

Τα μέρη που αποτελούν το πρόβλημα και η βιβλιογραφική ανασκόπηση που υπάρχει μέχρι και σήμερα αναλύονται στο δεύτερο κεφάλαιο. Αρχικά γίνεται αναφορά στις μεθόδους οπτικοποίησης της ροής, δηλαδή τον τρόπο και τις τεχνικές που μας βοηθούν στην καταγραφή και τον υπολογισμό της ροής και στα φαινόμενα που εξελίσσονται κατά την διάρκεια αυτής. Στη συνέχεια αναφέρονται οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την ροή υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα, αν θεωρήσουμε ότι το ρευστό είναι νευτωνικό με σταθερό ιξώδες, ασυμπιεστό, η ροή μόνιμη και στρωτή και το πάχος του υμένα ομοιόμορφο. Επίσης, επιχειρείται να παρουσιαστεί η μέχρι σήμερα ερευνητική δραστηριότητα που σχετίζεται με το θέμα αυτό, δηλαδή πειράματα που έγιναν για την μελέτη της αλληλεπίδρασης των κυμάτων και τη σύγκλιση των εργαστηριακών πειραμάτων με τα υπολογιστικά.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της ροής υγρού υμένα στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του πειράματος. Η διάταξη - η οποία κατασκευάστηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής - αποτελείται από το σύστημα ροής και το σύστημα συλλογής και επεξεργασίας εικόνων. Γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των ρευστών και των σωματιδίων ανίχνευσης και αναλύονται οι παράμετροι του πειράματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται ο τρόπος βαθμονόμησης της διαδικασίας και εκθέτονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των

μεθόδων οπτικοποίησης της ροής με χρήση φυσαλίδων υδρογόνου και μικροσωματιδίων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, ενώ συγκρίνονται μεταξύ τους και γίνονται κάποιες προτάσεις για το μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Θεωρητική Ανάλυση – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα μέρη που αποτελούν το πρόβλημα και η βιβλιογραφική ανασκόπηση που υπάρχει μέχρι και σήμερα αναλύονται στο παρόν κεφάλαιο. Αρχικά θα αναφερθούμε στις μεθόδους οπτικοποίησης της ροής, δηλαδή τον τρόπο και τις τεχνικές που μας βοηθούν στο να καταγράψουμε και να υπολογίζουμε την ροή και τα φαινόμενα που εξελίσσονται κατά την διάρκεια αυτής. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε τις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την ροή υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα και σε πειράματα που έγιναν για την μελέτη της αλληλεπίδρασης των κυμάτων και τη σύγκλιση των εργαστηριακών πειραμάτων με τα υπολογιστικά με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

2.1 Μέθοδοι Οπτικοποίησης της ροής

Η οπτική παρατήρηση υπήρξε για όλους τους κλάδους των φυσικών επιστημών η πρώτη προσέγγιση για τη μελέτη των φυσικών φαινομένων. Το ίδιο συνέβη και με την μηχανική των ρευστών όπου η φυσική παρατήρηση της ροής έδινε και δίνει την εικόνα ολόκληρου του πεδίου ροής. Όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα ρευστά ή αέρια είναι διαφανή και άρα η κίνησή τους δε γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι ή τα όργανα που αποτυπώνουν την οπτική εικόνα (π.χ. φωτογραφία). Για να γίνει αντιληπτή από την ανθρώπινη όραση η κίνηση των στοιχείων του ρευστού και να δοθεί μια οπτική εικόνα ενός πεδίου ροής πρέπει να καταφύγουμε σε ειδικές τεχνικές, όπως τεχνικές οπτικοποίησης του πεδίου ροής. Από την οπτικοποίηση μιας ροής, εκτός από τη συνολική ποιοτική εικόνα του πεδίου, είναι δυνατή και η εξαγωγή ποσοτικών χαρακτηριστικών μεγεθών, όπως π.χ της ταχύτητας σε ορισμένες θέσεις εάν φυσικά εφαρμοσθεί η κατάλληλη τεχνική.

Η οπτικοποίηση ως τεχνική μέτρησης παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μέτρησης της ταχύτητας λόγω της μηδενικής της λεπτότητας, δηλ. δεν επηρεάζει το μετρούμενο μέγεθος και συγκεκριμένα στην περίπτωση μας δεν επηρεάζει τη ροή. Συνεπώς είναι κατάλληλη για μετρήσεις στις οποίες άλλες μέθοδοι θα αστοχούσαν, όπως για τη διερεύνηση των συνθηκών μετάβασης από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η

οπτικοποίηση ροής δίνει μια συνολική εικόνα ενός πεδίου, ενώ με κάθε άλλη μέθοδο γίνεται μέτρηση σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Οι διάφορες τεχνικές οπτικοποίησης είναι δυνατό να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές στις οποίες ένα ξένο σώμα, το οποίο δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του ρευστού, προστίθεται στη ροή του ρευστού, υγρού ή αερίου. Το ξένο αυτό σώμα πρέπει να είναι ορατό και υπό ορισμένες συνθήκες (όταν π.χ. τα σωματίδια του ξένου σώματος είναι σχετικά μικρά και η πυκνότητά τους δε διαφέρει σημαντικά από αυτήν του ρευστού) είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι η κίνησή του είναι ταυτόσημη (έχει την ίδια ταχύτητα) με την κίνηση του στοιχείου του ρευστού του οποίου τη θέση καταλαμβάνει. Άρα η τεχνική αυτή της οπτικοποίησης είναι έμμεση, επειδή δεν γίνεται παρατήρηση της κίνησης των ίδιων των στοιχείων του ρευστού. Οι τεχνικές αυτής της κατηγορίας δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα στην περίπτωση που εφαρμόζονται σε μόνιμες ροές. Στην περίπτωση όμως των μη μόνιμων ροών τα σφάλματα μπορεί να είναι πολύ μεγάλα τα οποία οφείλονται στο πεπερασμένο μέγεθος των ξένων σωματιδίων.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές που βασίζονται στις μεταβολές της πυκνότητας του αερίου, οι οποίες οφείλονται στο πεδίο της πίεσης ή της θερμοκρασίας του ρευστού (η μεταβολή της πυκνότητας των υγρών είναι ελάχιστη) : η μεταβολή της πυκνότητας του αερίου συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή του δείκτη διαθλάσεως η οποία είναι δυνατόν να γίνει αισθητή με κατάλληλες οπτικές μεθόδους. Άρα πρόκειται για μέθοδο που δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί παρά μόνο σε συμπίεστές ροές. Μία ομοιόμορφης έντασης δέσμη φωτός που διαπερνά τη συμπίεστη ροή προσπίπτει σε φωτοευαίσθητη επιφάνεια αποτυπώνοντας τις μεταβολές της πυκνότητας και άρα της πίεσης. Οι τεχνικές αυτές δεν επηρεάζουν την εξεταζόμενη ροή (μηδενική λεπτότητα), όμως η εξαγωγή ποσοτικών μεγεθών είναι δύσκολη, λόγω του ότι η εικόνα που προκύπτει είναι αποτέλεσμα ολοκλήρωσης του φαινομένου σε ολόκληρη τη διαδρομή της δέσμης δια του ρευστού. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσεται η μέθοδος Schlieren.

Η τρίτη κατηγορία τεχνικών οπτικοποίησης περιλαμβάνει τεχνικές που μπορεί να θεωρηθούν ως συνδυασμός των δύο προηγούμενων κατηγοριών με τη διαφορά ότι αντί για ξένα σωματίδια προστίθεται στη ροή μία μορφή ενέργειας υπό μορφή θερμότητας ή ηλεκτρικής εκκένωσης. Τα στοιχεία του ρευστού διαφοροποιούνται

από το ποσό της ενέργειας που απορροφούν (θερμοκρασιακές μεταβολές) και γίνονται αντιληπτά από οπτικές μεθόδους. Οι τεχνικές αυτές επηρεάζουν, περισσότερο ή λιγότερο, την ίδια τη ροή λόγω της ενέργειας που απορροφάται από αυτή και εφαρμόζονται περισσότερο στην περίπτωση ροής αερίου χαμηλής πυκνότητας.

Τέλος διακρίνονται διάφορες τεχνικές οπτικοποίησης που δεν είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε μία από τις προηγούμενες τρεις κατηγορίες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η οπτικοποίηση μιας ροής αποτελεί συχνά ένα ιδιαίτερο πρόβλημα και η επιτυχία εξαρτάται από μεγάλο αριθμό παραγόντων που δεν είναι εύκολο να αξιολογηθούν. Δεν είναι δηλαδή εύκολο να γίνει η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής και να εξασφαλισθεί η αναμενόμενη επιτυχία παρά μόνο μετά από αρκετές δοκιμές και εμπειρία.

Οι τεχνικές που βασίζονται στην προσθήκη σωματιδίων στη ροή εφαρμόζονται σε ροές υγρών και αερίων με μόνη διαφορά ως προς το είδος των προστιθέμενων σωματιδίων. Τα ξένα σωματίδια μπορεί να είναι χρωστικές ουσίες, καπνός, πλέγμα νημάτων, φυσαλίδες υδρογόνου ή στερεά σωματίδια τα οποία προστίθενται σε διακριτά σημεία της ροής και παρασύρονται από αυτήν. Η κίνηση των σωματιδίων αυτών μπορεί να γίνει εμφανής με κατάλληλο φωτισμό και να αποτυπωθεί. Ανάλογα με τη θέση των σημείων στα οποία προστίθενται τα σωματίδια, το ρυθμό με τον οποίο προστίθενται και τη διάρκεια κατά την οποία γίνεται η αποτύπωση σε φωτογραφική κάμερα (ταχύτητα διαφράγματος), είναι δυνατή η καταγραφή των γραμμών ροής, των τροχιών ή των filament lines (σημειώνεται ότι στην περίπτωση μόνιμης ροής οι γραμμές ροής ταυτίζονται με τις τροχιές). Ακόμη, ανάλογα με την ταχύτητα φωτογράφισης προκύπτουν οι τροχιές ή οι γραμμές ροής και το πεδίο της ταχύτητας. Μια άλλη παράμετρος που μπορεί να τροποποιήσει σημαντικά τις φωτογραφικές εικόνες είναι η ταχύτητα της ίδιας της κάμερας, οπότε οι γραμμές ροής ή η ταχύτητα που αποτυπώνεται είναι η σχετική ταχύτητα.

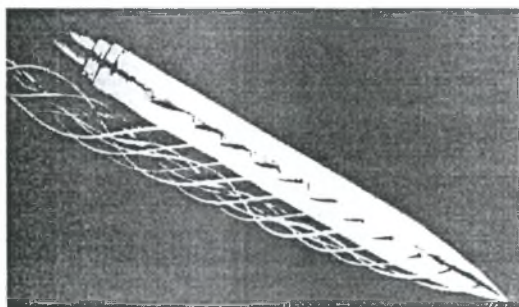
Στη συνέχεια αναφέρονται και σχολιάζονται σύντομα οι τεχνικές οπτικοποίησης με προσθήκη σωματιδίων.

2.1.1 Χρωστικές σε ροή υγρού

Πρόκειται για την πιο γνωστή και περισσότερο εφαρμοσμένη τεχνική οπτικοποίησης που βασίζεται στην έκχυση χρωστικής ουσίας σε υγρή μορφή (π.χ μελάνι, ουρανίνη) από τροφοδοτικό σωληνάκι ή από μικρή οπή που έχει διαμορφωθεί στο τοίχωμα στερεής επιφάνειας. Η ταχύτητα με την οποία εκχύεται η χρωστική ουσία πρέπει να είναι μικρή ώστε να μην επηρεάζεται η εξεταζόμενη ροή.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με μεγαλύτερη επιτυχία στη στρωτή παρά στην τυρβώδη περιοχή της ροής, άρα είναι περισσότερο κατάλληλη για ροές χαμηλών ταχυτήτων. Όσο περισσότερο στρωτή είναι η ροή, τόσο μικρότερη είναι η διάχυση της χρωστικής ουσίας τα στοιχεία της οποίας ακολουθούν πιστά την εξεταζόμενη ροή.

Η παραπάνω τεχνική παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα όταν εφαρμόζεται σε κλειστό κύκλωμα λόγω της συνεχούς αύξησης του χρωματισμού του νερού, οπότε θα πρέπει μετά από κάθε σειρά πειραμάτων να γίνεται ανανέωση του νερού. Η χρωστική ουσία, εκτός από την επιθυμητή απόχρωση που πρέπει να έχει για να αποτυπώνεται κατά τον καλύτερο τρόπο στην φωτογραφική πλάκα, πρέπει να έχει παραπλήσια πυκνότητα με αυτή του υγρού ώστε τα στοιχεία του να αποκλίνουν το λιγότερο δυνατόν από τα στοιχεία του υγρού. Στην εικόνα 2.1 δίνεται παράδειγμα οπτικοποίησης στρωτής ροής με την τεχνική των υγρών χρωστικών.

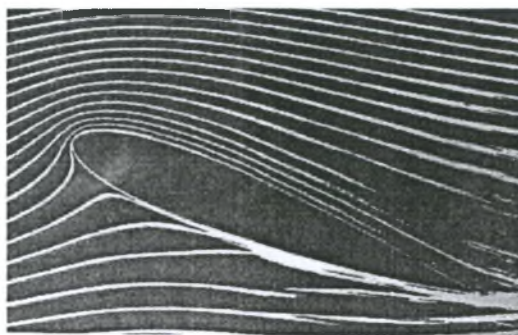


Εικόνα 2.1: Οπτικοποίηση στρωτής ροής με χρωστική γύρω από αξονοσυμμετρικό σώμα

2.1.2 Καπνός σε ροή αερίου

Πρόκειται για μια τεχνική αντίστοιχη με την προηγούμενη με μόνη διαφορά ότι αντί για υγρό έγχρωμο διάλυμα, χρησιμοποιείται καπνός, στη γενική έννοια του όρου. Ο καπνός εκχύεται στη ροή από σωληνάκια ανάντη του μοντέλου, έτσι ώστε να οπτικοποιείται η ροή γύρω από αυτό (εικόνα 2.2). Η ευστάθεια των γραμμών ροής

που οπτικοποιούνται με τον καπνό είναι τόσο καλύτερη όσο μικρότερο είναι το επίπεδο τύρβης της σήραγγας και, σε μικρότερο βαθμό, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός Reynolds της ροής.



Εικόνα 2.2: Οπτικοποίηση της ροής γύρω από αεροτομή σε αεροσύραγγα με την τεχνική του καπνού

Ο καπνός πρέπει να είναι πυκνός και άσπρου ή κίτρινου χρώματος ώστε να βελτιώνεται η οπτική αντίθεση, δηλαδή το κοντράστ (σημαντικό ρόλο γι' αυτό παίζει ο φωτισμός). Επίσης ο καπνός δεν πρέπει να είναι τοξικός και να προκαλεί κατακαθίσεις στα τοιχώματα του μοντέλου ή της σήραγγας. Με τον καπνό οπτικοποιείται τόσο η ροή γύρω από το μοντέλο όσο και η ροή στον ομόρου του, με την επιφύλαξη ότι οι τροχιές των στοιχείων του καπνού, λόγω διαφορετικής πυκνότητας, δεν ταυτίζονται με αυτές του αέρα σε περιοχές με έντονο στροβιλισμό (επίδραση των φυγόκεντρων δυνάμεων).

Ο καπνός παρασκευάζεται σε ειδικές συσκευές και προέρχεται από την καύση ξύλου ή χάρτου, ή από την εξάτμιση ορυκτών ελαίων και έπειτα αναμιγνύεται με αέρα-πριν την είσοδό του στη σήραγγα- για να αποκτήσει την επιθυμητή πυκνότητα. Ως πηγές φωτισμού χρησιμοποιούνται ακτίνες Laser που είναι ισχυρές σημειακές πηγές φωτός.

2.1.3 Χρωστικές ουσίες στην επιφάνεια του σώματος

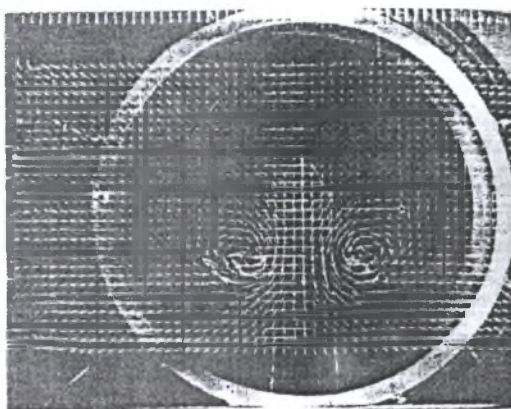
Σύμφωνα με την τεχνική αυτή η εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου που έρχεται σε επαφή με τη ροή επιστρώνεται με ειδική χρωστική ουσία, συνήθως σε λουρίδες κάθετες προς της μέση διεύθυνση της ροής. Η ροή παρασύρει τη χρωστική ουσία κατά τη διεύθυνση των γραμμών ροής και αποτυπώνεται στην επιφάνεια του μοντέλου. Με την τεχνική αυτή αποδίδεται μία ποιοτική εικόνα των γραμμών ροής,

είναι όμως δυνατός ο προσδιορισμός μιας ζώνης ανακυκλοφορίας και του σημείου αποκόλλησης της ροής. Η χρησιμότητα της μεθόδου είναι ιδιαίτερα εμφανής στη διερεύνηση της ροής γύρω από τρισδιάστατο χώρο. Προφανώς πρόκειται για μια μέθοδο που δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μη μόνιμη ροή.

Η χρωστική ουσία είναι απαραίτητο να έχει την κατάλληλη ρευστότητα, ώστε να μην «τρέχει» υπό την επίδραση της βαρύτητας και να μην παρασύρεται από τη ροή, παρά μόνο όταν η ταχύτητα ξεπεράσει κάποια τιμή. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξαρτώνται από τη συνεκτικότητα και την επιφανειακή τάση της χρωστικής ουσίας.

2.1.4 Πλέγμα νημάτων

Η τεχνική αυτή συνίσταται στην τοποθέτηση στη ροή λεπτών νημάτων, τα οποία παίρνουν τη διεύθυνση της ροής στη θέση αυτή, και η οποία εφαρμόζεται και σε ροή υγρού και σε αερίου. Τα νήματα τοποθετούνται (με κόλλα) στην εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου ή σε πλέγμα που τοποθετείται κατά ένα επίπεδο, π.χ στον ομόρου. Ακόμη και σε μόνιμη ροή η κίνηση των νημάτων είναι ασταθής, δηλαδή τα νήματα παρουσιάζουν μία ταλάντωση γύρω από μία μέση διεύθυνση και η οποία θεωρείται και ως η τοπική διεύθυνση της ροής. Η ταλάντωση γίνεται εντονότερη όσο πιο τυρβώδης είναι η ροή και όσο περισσότερο πλησίον είναι οι συνθήκες αποκόλλησης της ροής. Η τεχνική αρμόζει να εφαρμόζεται σε σημεία όπου η ταχύτητα της ροής είναι τέτοια, ώστε η επίδραση της βαρύτητας στη θέση του νήματος να είναι αμελητέα. Το πλέγμα νημάτων χρησιμοποιείται κυρίως για μια ποιοτική αποτύπωση της ροής (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Οπτικοποίηση του ομόρου πτέρυγας δέλτα με πλέγμα νηματιδίων.

2.1.5 Στερεά σωματίδια στη ροή σωματιδίων

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή η οπτικοποίηση της ροής επιτυγχάνεται με τη διασπορά στο εσωτερικό της ροής στερεών σωματιδίων υπό μορφής λεπτής σκόνης. Το μέγεθος του σωματιδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον διαθέσιμο χρόνο παρατήρησης του φαινομένου.

Σε περίπτωση ανομοιόμορφης ροής, η ταχύτητα που περιβάλλει το σωματίδιο είναι ανομοιόμορφη και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς στατικής πίεσης στις δύο πλευρές του σωματιδίου. Η διαφορά αυτή προκαλεί την ανάπτυξη δύναμης «άνωσης» που έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση της τροχιάς του σωματιδίου από αυτή των στοιχείων του ρευστού.

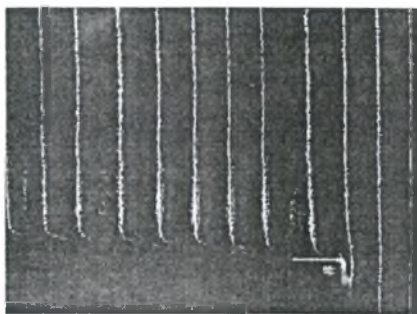
Ως στερεά σωματίδια χρησιμοποιείται σκόνη αλουμινίου, σφαιρίδια πολυστυρενίου διαμέτρου της τάξεως του 0.1 mm, σταγονίδια ορυκτελαίου κ.ά.

Με την παραπάνω τεχνική-εκτός από την ποιοτική απεικόνιση-είναι δυνατή και η ποσοτική διερεύνηση της ροής. Φωτογραφίζοντας τα στερεά σωματίδια με πεπερασμένη ταχύτητα έκθεσης, η κίνηση κάθε σωματιδίου καταγράφεται στην φωτογραφική πλάκα ως ένα τμήμα, του οποίου το μήκος είναι ίσο προς την ταχύτητα του σωματιδίου (και άρα της ροής) επί το χρονικό διάστημα της έκθεσης. Υπολογίζεται έτσι η συνιστώσα της ταχύτητας (εκτός από τη διεύθυνση) σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της φωτογράφισης. Ο υπολογισμός της ταχύτητας με τη μέθοδο αυτή είναι ανακριβής, κυρίως επειδή το χρονικό διάστημα έκθεσης των φωτογραφικών μηχανών («ταχύτητα») δεν είναι ακριβές και λόγω φαινομένων οπτικής διάχυσης. Για την αποτύπωση τρισδιάστατης ροής απαιτείται η ταυτόχρονη φωτογράφιση της ροής με δύο κάμερες κάθετες μεταξύ τους. Με σκοπό την αποφυγή σφάλματος, που οφείλεται στην ανακρίβεια της διάρκειας έκθεσης, εφαρμόζεται η μέθοδος φωτισμού με πολύ σύντομης διάρκειας λάμπες ανά σταθερά χρονικά διαστήματα. Σε όλο το διάστημα του πειράματος το διάφραγμα της φωτογραφικής κάμερας παραμένει ανοικτό. Στη φωτογραφική πλάκα η κίνηση του σωματιδίου αποτυπώνεται ως διαδοχικά σημεία από την απόσταση των οποίων υπολογίζεται η συνιστώσα της ταχύτητας στη θέση αυτή.

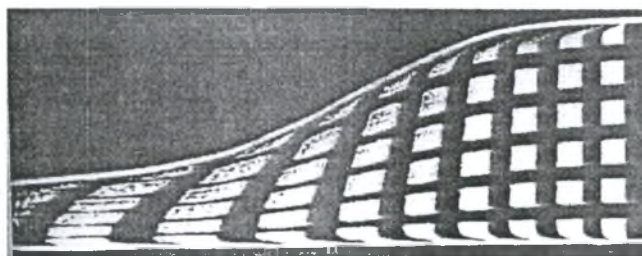
2.1.6 Η τεχνική των φουσαλίδων υδρογόνου

Η μέθοδος των φουσαλίδων υδρογόνου είναι χρήσιμη στην ποιοτική μελέτη των παγκόσμιων μορφών ροής γύρω από τα σώματα. Εξαιτίας της χρησιμότητάς της στη λήψη ποσοτικής και ποιοτικής πληροφορίας για το πεδίο ροής, αυτή η μέθοδος

έχει αυξημένη χρήση για εσωτερικές και εξωτερικές ροές. Στην εικόνα 2.4 δίνεται παράδειγμα οπτικοποίησης της ροής οριακού στρώματος με διαδοχικές σειρές φυσαλίδων υδρογόνου, ενώ στην εικόνα 2.5 δίνεται παράδειγμα οπτικοποίησης με τη μέθοδο φυσαλίδων που παράγονται επί κάποιο χρονικό διάστημα (παλμός πεπερασμένης διάρκειας).



Εικόνα 2.4: Οπτικοποίηση της ροής με σειρές φυσαλίδων υδρογόνου



Εικόνα 2.5: Οπτικοποίηση της ροής σε συγκλίνον ακροφύσιο με τη μέθοδο των πακέτων φυσαλίδων υδρογόνου

2.2 Η Μέθοδος Ταχυμετρίας Εικόνας Σωματιδίων

Η Ταχυμετρία Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry) είναι μια τεχνική που επιτρέπει τη μέτρηση ταχυτήτων ροής σε ένα επίπεδο. Εφαρμόστηκε αρχικά στη μηχανική ρευστών για τη μελέτη απλών ροών σε αέρα και νερό. Όμως, με την πρόοδο των τελευταίων ετών στην χημική βιομηχανία, είναι απαραίτητη η εφαρμογή της σε πιο πολύπλοκες ροές. Τελευταία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας και της συμπεριφοράς των σωματιδίων σε συστήματα διαφασικών ροών.

Για την εφαρμογή της μεθόδου συνήθως προστίθενται σωματίδια ανίχνευσης στη ροή, τα οποία φωτίζονται σε ένα επίπεδο της ροής για τουλάχιστον δύο φορές μέσα σε πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Τα σωματίδια αυτά, τα οποία έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης από αυτόν του ρευστού, σκεδάζουν το προσπίπτον φως και η σκεδαζόμενη ακτινοβολία συλλέγεται σε ψηφιακή κάμερα. Η δε επεξεργασία των εικόνων γίνεται με τη χρήση τεχνικών συσχέτισης δηλαδή, γνωρίζοντας το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δύο απεικονίσεων της θέσης των σωματιδίων και τη μεγέθυνση της κάμερας, υπολογίζεται η ταχύτητά τους .

Η μέθοδος PIV είναι μια τεχνική μέτρησης η οποία λειτουργεί με έμμεσο τρόπο, γιατί γίνεται μέτρηση της ταχύτητας των σωματιδίων και όχι του ίδιου του ρευστού. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά οι μηχανικές ιδιότητες του ρευστού που προστίθενται, έτσι ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα ανάμεσα στην κίνηση του ρευστού και των σωματιδίων. Μετά από μελέτες προέκυψε πως η ιδανική περίπτωση κατά την οποία η ταχύτητα των σωματιδίων είναι ίδια με αυτή του ρευστού, συμβαίνει όταν οι πυκνότητές τους ταυτίζονται. Κάτι άλλο που πρέπει να ελέγχεται επίσης είναι το μέγεθος των σωματιδίων ανίχνευσης και συγκεκριμένα, η διάμετρός τους, πρέπει να είναι κατάλληλη, ώστε τα σωματίδια να ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια την κίνηση του ρευστού. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα μεγέθη των σωματιδίων ανίχνευσης για ροή υγρών.

Τύπος	Υλικό	Μέση διάμετρος (μm)
Στερεά	Πολυστερίνη	10-100
	Αλουμίνιο	2-7
	Σφαιρικά σωματίδια γυαλιού	10-100
	Κόκκοι για συνθετικές επικαλύψεις	10-500
Υγρά	Διάφορα Έλαια	50-500
Αέρια	Φυσαλίδες οξυγόνου	50-1000

Πίνακας 2.1: Σωματίδια ανίχνευσης για ροές υγρών

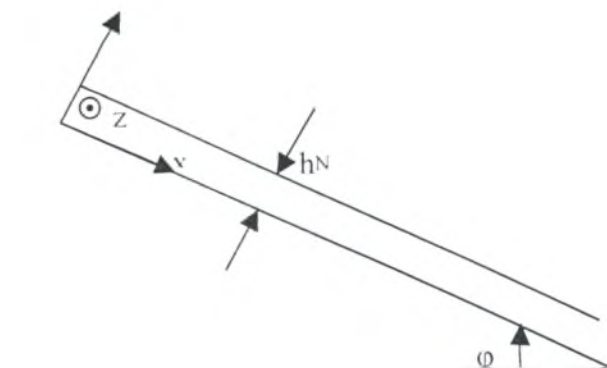
Όταν η τεχνική εφαρμόζεται σε ροές υγρών - κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση μας - είναι εύκολο να βρεθούν σωματίδια που να ανταποκρίνονται στις παραπάνω απαιτήσεις. Συνήθως προστίθενται στερεά σωματίδια μέσα στο υγρό, τα οποία αναδεύονται συνεχώς για να δημιουργηθεί μια ομογενής κατανομή σωματιδίων, ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να είναι αξιόπιστα.

Η σχέση που συνδέει την ένταση του φωτός και τη διάμετρο των σωματιδίων χαρακτηρίζεται από γρήγορες ταλαντώσεις για μια συγκεκριμένη γωνία παρατήρησης. Αυτό συμβαίνει γιατί στις εικόνες υψηλής έντασης τα σωματίδια δεν περνούν πάντα από το μέσο της περιοχής παρατήρησης. Επίσης ο καθορισμός της θέσης των σωματιδίων που βρίσκονται εκτός πεδίου δεν είναι συνήθως εφικτός από τη θεωρία ανάλυσης της θέσης των σωματιδίων σε ένα φύλλο φωτός με γνωστή την κατανομή της έντασης της εικόνας.

Στο προκείμενο πείραμα η συνεχής απεικόνιση των σωματιδίων γίνεται με την βοήθεια μιας ψηφιακής κάμερας υψηλής ευκρίνειας η οποία είναι τοποθετημένη σταθερά, καταγράφοντας ένα τμήμα της ροής και ταυτόχρονα το απεικονίζει σε μία οθόνη όπου με την βοήθεια του υπολογιστή μπορούμε να υπολογίσουμε τα μεγέθη και τις παραμέτρους της ροής. Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη και τις συσκευές που χρησιμοποιούμε θα αναφερθούν στο επόμενο Κεφάλαιο.

2.3 Βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ροής υγρού υμένα κατά μήκος ενός επιπέδου κεκλιμένου τοιχώματος απαιτείται η μελέτη του δισδιάστατου προβλήματος.



Σχήμα 2.1 : Η βασική ροή σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα

Έστω ότι η έχουμε ασυμπίεστη, στρωτή ροή και το πάχος του υμένα είναι ομοιόμορφο. Η εξίσωση της συνέχειας παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Το ρευστό κινείται μόνο κατά τη διεύθυνση x, οπότε $U_x=U_y=0$ (2.2)

Η εξίσωση της συνέχειας παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

Έστω ακόμη ότι το ρευστό είναι νευτωνικό με σταθερό ιξώδες. Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις Navier- Stokes στις διευθύνσεις x και y και λαμβάνοντας υπόψη τις (2.1) και (2.2) έχουμε:

$$\rho \cdot \frac{\partial U_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \quad (2.4)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y \quad (2.5)$$

Έστω επίσης πως έχουμε μόνιμη ροή. Τότε $\frac{\partial U_x}{\partial t} = 0$ (2.6)

Η (2.4) γίνεται :

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \quad (2.7)$$

Ολοκληρώνοντας την (2.5) προκύπτει:

$$P(y) = +\rho \cdot g_y \cdot y + C \quad (2.8)$$

A) Στη διεπιφάνεια όμως υγρού- αέρα η πίεση είναι σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική, δηλαδή:

$$P(x, h_N) = -P_{atm} \quad (\text{συνοριακή συνθήκη}) \quad (2.9)$$

για κάθε x.

Η (2.8) λαμβάνοντας υπόψη την (2.9) γίνεται:

$$P(h_N) = +\rho \cdot g_y \cdot h_N + C = -P_{atm} \Rightarrow C = -P_{atm} - \rho \cdot g_y \cdot h_N$$

και επομένως:

$$P(y) = +\rho \cdot g_y \cdot y - P_{atm} - \rho \cdot g_y \cdot h_N \quad (2.10)$$

$$\text{B) Η πίεση δεν εξαρτάται από το } x \text{ στη διεπιφάνεια οπότε } \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

Άρα η (2.7) γίνεται:

$$\mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} = -\rho \cdot g_x \Rightarrow \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{g_x}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)} \cdot y + C_1 \Rightarrow \quad (2.12)$$

$$\Rightarrow U_x(y) = -\frac{g_x}{\nu} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 \cdot y + C_2 \quad (2.13)$$

Οι οριακές συνθήκες είναι:

A) Για $y = h_N$ στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού η διατμητική τάση μηδενίζεται, οπότε έχουμε:

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \frac{\partial U_x}{\partial y} \Big|_{y=h_N} = 0 \Rightarrow \frac{\partial U_x}{\partial y} \Big|_{y=h_N} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{g_x}{\nu} \cdot h_N \quad (2.14)$$

B) Για $y=0$ ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης στη διεπιφάνεια μεταξύ τοιχώματος-ρευστού οπότε:

$$U_x(y=0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (2.15)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.13) τις (2.14) και (2.15) παίρνουμε:

$$U_x(y) = \frac{g_x}{\nu} \cdot \left(y \cdot h_N - \frac{y^2}{2} \right) \quad (2.16)$$

Η μέση ταχύτητα είναι:

$$\overline{U_x} = \frac{\int_0^{h_N} U_x(y) dy}{h_N} \stackrel{16}{=} \frac{g_x \cdot h_N^2}{3 \cdot \nu} = \frac{g \cdot h_N^2 \cdot \sin \phi}{3 \cdot \nu} \quad (2.17)$$

ενώ η μέγιστη ταχύτητα έχει τιμή:

$$U_{\max} = U_x(h_N) = \frac{g_x}{\nu} \cdot \left(h_N^2 - \frac{h_N^2}{2} \right) = \frac{g \cdot h_N^2 \cdot \sin \phi}{2 \cdot \nu} \quad (2.18)$$

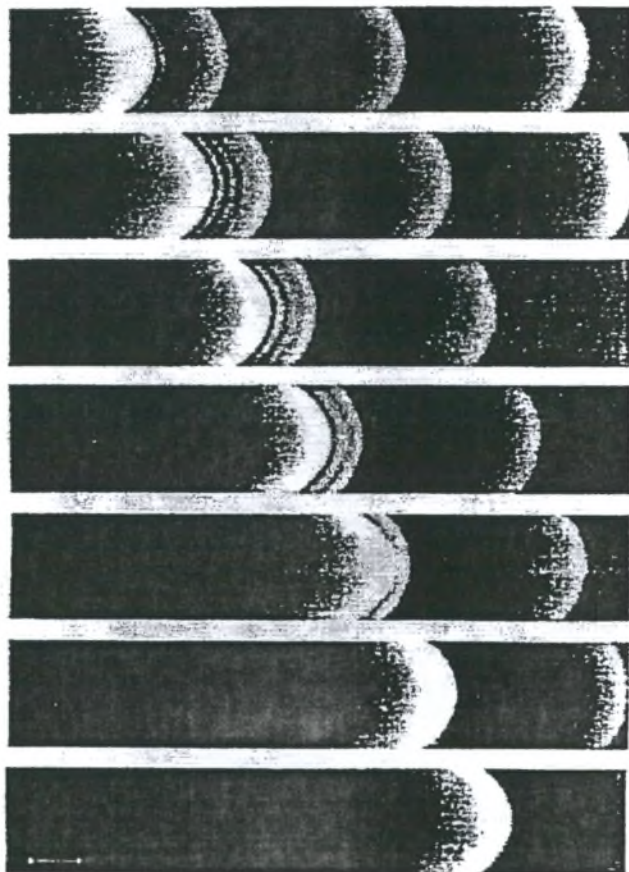
Η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού υμένα απασχόλησε κατά καιρούς πολλούς επιστήμονες λόγω της άγνωστης γεωμετρίας, προσπαθώντας να προσομοιάσουν και να ερευνήσουν τις ιδιότητες των ρευστών στην διφασική ροή. Τα τελευταία όμως χρόνια λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των υπολογιστών γίνεται προσπάθεια να βρεθεί λύση στο πρόβλημα με την βοήθεια της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής επιλύοντας πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις.

2.4 Δυναμική Μοναχικών κυμάτων σε ροές υμένα

Κατά την διεξαγωγή του πειράματος με την μέθοδο οπτικοποίησης της ροής με φυσαλίδες υδρογόνου, λόγω της στιγμιαίας ηλεκτρόλυσης που είναι απαραίτητη για την απελευθέρωση φυσαλίδων υδρογόνου παρατηρήσαμε την δημιουργία κυμάτων. Παρακάτω παραθέτουμε περιληπτικά την βιβλιογραφία σχετικά με την ύπαρξη κυμάτων σε ροή υμένα.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές πειραματικές και θεωρητικές μελέτες, που αφορούν τη ροή υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Τα αποτελέσματα που αυτές παρουσιάζουν, περιγράφουν τη διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του υμένα, υπό την επιβολή εξωτερικών, τεχνητών ή φυσικών διαταραχών. Αποτέλεσμα των διαταραχών, είναι η δημιουργία κυμάτων στην επιφάνεια του υμένα, τα οποία παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση ανάλογα με το μηχανισμό δημιουργίας τους.

Μία πειραματική εργασία η οποία πραγματοποιήθηκε από τους J. P. Gollub και J. Liu[1] μελέτησε τη δυναμική των μοναχικών κυμάτων. Η ανάπτυξη και η αλληλεπίδραση των παλμών των μοναχικών κυμάτων είναι κρίσιμη για την κατανόηση των ροών σε υμένα σε μια κεκλιμένη επίπεδη επιφάνεια. Στην κατεύθυνση του ρεύματος, η δομή του κύματος αποτελείται από μια ακανόνιστη αλληλουχία μοναχικών κυμάτων ανεξάρτητα των συνθηκών εισόδου. Η ταχύτητα των περιοδικά μοναχικών κυμάτων έχει βρεθεί να εξαρτάται από τη συχνότητα και το πλάτος. Οι μεγαλύτεροι παλμοί ταξιδεύουν γρηγορότερα αυτή η ιδιότητα συν τη ανελαστικότητα, προκαλεί κάποιους μεγάλους παλμούς να απορροφούν άλλους κατά τη διάρκεια των αλληλεπιδράσεων, αφήνοντας μια κοινή επιφάνεια από πίσω. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στην παρακάτω ακολουθία εικόνων του σχήματος 2.10, οι οποίες έχουν μεταξύ τους χρονική διαφορά 0.2 sec. Οι παραπάνω αλληλεπιδράσεις κυμάτων οδηγούν στην παραγωγή σειρών από μοναχικά κύματα που προέρχονται από κάποια περιοδικά με μικρό πλάτος. Η απόσταση μεταξύ των μοναχικών κυμάτων μπορεί να είναι ακανόνιστη για διάφορους λόγους συμπεριλαμβανομένου την ενίσχυση από περιβαλλοντική επίδραση (π.χ θόρυβος) και την ίδια την διαδικασία της αλληλεπίδρασης. Από την άλλη πλευρά, αυτή η αταξία εξαφανίζεται με την προσθήκη περιοδικής δύναμης.



Εικόνα 2.6: Το φαινόμενο της συγχώνευσης μεταξύ δύο μοναχικών κυμάτων. Το μεγαλύτερο μοναχικό κύμα απορροφά το μικρότερο του, που προπορεύεται.

Αναλυτικότερα πια μπορεί να ειπωθεί πως τοπικές συνεκτικές δομές, όπως ατέλειες και μοναχικά κύματα, παίζουν συχνά σημαντικό ρόλο σε μη γραμμικά φαινόμενα όπως χώρο - χρονικό χάος και τυρβώδεις ροές. Όταν ένα σύστημα ρευστών περιλαμβάνει τοπικές δομές, περίπλοκα μη γραμμικά φαινόμενα σε μερικές περιπτώσεις ίσως να περιγράφονται από τις κινήσεις αυτών των στοιχειωδών στοιχείων, καταλήγοντας σε μια δραματική μείωση στον αριθμό των βαθμών ελευθερίας.

Τα μοναχικά κύματα απαντώνται συχνά στη μη γραμμική συμπεριφορά υγρών υμένων που ρέουν σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Τα μοναχικά κύματα σε ροές υμένων παρατηρήθηκαν στην αρχική εργασία των Kapitza και Kapitza [2] και αργότερα μελετήθηκαν και από άλλους ερευνητές. Οι ροές αυτές επίσης μια μετάβαση στην

τύρβη, μια διαδικασία που ίσως να γίνεται καλύτερα κατανοητή μέσω της δυναμικής των μοναχικών κυμάτων.

Τα φυσικά κύματα λόγω του περιβαλλοντικού θορύβου ενισχύονται καθώς οι υμένες ρέουν κατά μήκος της ροής και ο μέσος όρος μήκος κύματος είναι κοντά στην κλίμακα μήκους. Όμως, κορεσμένα περιοδικά κύματα δεν εμφανίζονται χωρίς ενίσχυση εξαιτίας των μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων και το μεταφορικό χαρακτήρα της αστάθειας. Παρόλα αυτά, διάφορα ανεπτυγμένα τρισδιάστατα κύματα είναι πάντα άτακτα και αποτελούνται από μοναχικά κυρτώματα που ελέγχουν την υδροδυναμική συμπεριφορά και τις συνδεόμενες διαδικασίες μεταφοράς. Εξάλλου, μετά την επαρκή μη γραμμική εξέλιξη, οι ροές κυριαρχούνται από μοναχικά κύματα είτε είναι περιοδικά επιβαλλόμενες από δύναμη ή όχι. Αυτό το παράξενο χαρακτηριστικό υπονοεί πως μια θεωρία κατανοητής δομής των χαωδών δυναμικών των ροών υμένων ίσως πλεονεκτεί.

Το θεωρητικό μοντέλο των ροών υμένα επικεντρώθηκε σε γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις πριν το 1980. Από τότε, οι ερευνητές έχουν κάνει σταδιακή βελτίωση στην μη γραμμική συμπεριφορά, π.χ. η εξέλιξη των μοναχικών κυμάτων χρησιμοποιώντας θεωρία δυναμικών συστημάτων και αριθμητικές προσομοιώσεις. Μια εξίσωση εξέλιξης που μπορεί να κατακτήσει τα περισσότερα από τα μη γραμμικά φαινόμενα δεν είναι διαθέσιμη. Όμως, μια συστηματική επέκταση μακρών κυμάτων αποδίδει μια πασίγνωστη εξίσωση σύμφωνα με τον Benney που είναι έγκυρο για μια τιμή του Re κοντά στην κρίσιμη τιμή Re_c . Έχει επιτύχει στην περιγραφή της αρχικής εξέλιξης των μη γραμμικών κυμάτων, όμως, παράγει μοναδικότητες σε περιορισμένο χρόνο και είναι περιορισμένης εφαρμογής. Αντίθετα, η εξίσωση των Kuramoto – Sivashilsky (KS) για ροές υμένων δεν έχει μοναδικότητες. Και η εφαρμογή της είναι περιορισμένη στο Re πολύ κοντά στο Re_c . Η παραπάνω μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο σημείο εκκίνησης για θεωρητικές μελέτες των ροών υμένων.

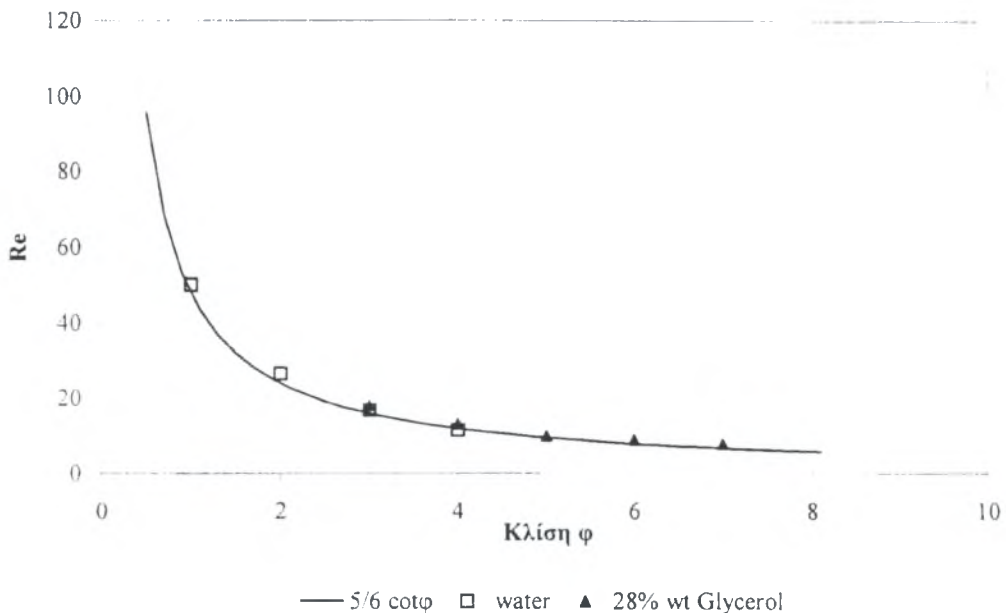
Μία άλλη πειραματική εργασία στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό διεκπεραιώθηκε από την ίδια ομάδα με στόχο τον προσδιορισμό των κριτηρίων που ορίζουν την ευσταθή περιοχή του υμένα. Οι πειραματικές μετρήσεις είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δυο καμπυλών ευστάθειας:

Στην πρώτη παρουσιάζεται ο κρίσιμος αριθμός Re (το όριο της ευσταθούς περιοχής) σα συνάρτηση της γωνίας κλίσης του καναλιού ϕ (σε μοίρες). Παρόμοια

αποτελέσματα της ευστάθειας του υμένα συναρτήσει του αριθμού Re και της γωνίας κλίσης φ προέκυψαν και από τα πειραματικά αποτελέσματα του Βλαχογιάννη [3]. Αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2. Τα τετραγωνάκια αντιστοιχούν σε πειραματικά αποτελέσματα της ροής καθαρού νερού, ενώ τα τρίγωνα σε αποτελέσματα της ροής διαλύματος νερού-γλυκερίνης (28% κ.β.). Η καμπύλη παριστάνει την εξίσωση:

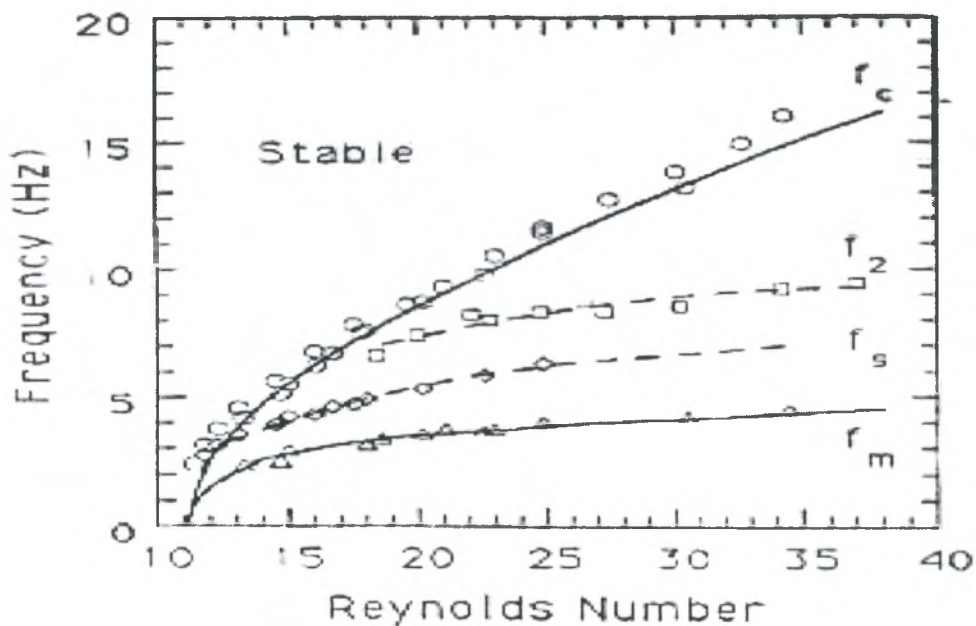
$$Re_c = \frac{5}{6} \cdot \cot \varphi, \quad (2.19)$$

η οποία προκύπτει από την ανάλυση γραμμικής ευστάθειας.



Σχήμα 2.2: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re.

Στη δεύτερη, παρουσιάζεται ο κρίσιμος αριθμός Re σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης συχνότητας f . Αυτή η απεικόνιση φαίνεται στο σχήμα 2.3. Τα πειραματικά δεδομένα αναφέρονται σε σταθερή γωνία κλίσης $\varphi=6.4^\circ$ και υδατικό διάλυμα γλυκερίνης (54% κ.β.). Έτσι, οι κύκλοι παριστάνουν τις πειραματικές μετρήσεις για την καμπύλη ευστάθειας και η συνεχής γραμμή f_c την πρόβλεψη από τη θεωρία γραμμικής ευστάθειας. Τα τρίγωνα παριστάνουν τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συχνότητα μεγίστου πλάτους και η συνεχής γραμμή f_m είναι επίσης η πρόβλεψη από τη θεωρία γραμμικής ευστάθειας. Από το διάγραμμα καθίσταται προφανές ότι η γραμμική θεωρία ευστάθειας δίνει αρκετά σωστές προβλέψεις.



Σχήμα 2.3: Ο κρίσιμος αριθμός Re συναρτήσει της επιβαλλόμενης συχνότητας f .

Επιπρόσθετα, απεικονίζονται τα πειραματικά προσδιοριζόμενα όρια των διαφόρων ασταθειών. Παράμετροι του πειράματος: $\varphi=6.4^\circ$, υδατικό διάλυμα γλυκερίνης 54% κ.β.

Η γραμμή f_s είναι το όριο μεταξύ δύο περιοχών μη-γραμμικής εξέλιξης, ενώ οι ρόμβοι αντιστοιχούν σε ανάλογες πειραματικές μετρήσεις. Στην περιοχή μεταξύ των γραμμών f_c και f_s υπάρχουν κορεσμένα, πεπερασμένου πλάτους κύματα, με μόνο ένα μέγιστο ανά περίοδο. Κάτω από τη γραμμή f_s τα κύματα εξελίσσονται σε σχηματισμούς με πολλές κορυφές και σε μοναχικά κύματα, μέσω ισχυρών μη-γραμμικών μηχανισμών. Επίσης, κάτω από την καμπύλη f_m η δομή των μοναχικών κυμάτων οδηγεί τελικά σε χαοτική δομή (spatiotemporal chaos). Τέλος, η γραμμή f_2 είναι το διαχωριστικό όριο για τα δύο είδη δευτερευόντων ασταθειών. Πάνω από την f_2 κυριαρχεί η πλευρική αστάθεια, ενώ κάτω από αυτή η υποαρμονική.

Μια άλλη εργασία στην οποία θα γίνει αναφορά είναι αυτή των N. A. Μαλαματάρη, M. Βλαχογιάννη και Β. Μποντόζογλου[4], η οποία ασχολείται με μη γραμμική εξέλιξη και λεπτομερή δομή των ροών υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο. Οι παραπάνω κύριοι μελέτησαν αριθμητικά την εξέλιξη των διαταραχών κατά μήκος της ροής που εισάγεται στη αρχή ενός υγρού υμένα που ρέει κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου λύνοντας την εξίσωση Navier Stokes ανεξαρτήτως χρόνου μαζί με τη μέθοδο Galerkin. Υπολογιστικά αποτελέσματα δοκιμάζονται ποσοτικά έναντι προβλέψεων της ανάλυσης με γραμμική ευστάθεια και έναντι λεπτομερών δεδομένων

ολόκληρης της διαδικασίας της εξέλιξης. Το αποτέλεσμα της συχνότητας επιβολής των διαταραχών εξετάζεται συστηματικά και ο μηχανισμός για γένεση μη γραμμικών κυμάτων αναγνωρίζεται σε συχνότητες χαμηλών διαταραχών. Η δομή του πεδίου ροής αναλύεται λεπτομερώς και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν υποθέσεις που συχνά συμπεριλαμβάνονται στη θεωρητική μελέτη της ροής υμένα. Το πιο ενδιαφέρον εύρημα είναι ότι τα μοναχικά κύματα παρουσιάζουν μη παραβολικά προφίλ ταχυτήτων μπροστά από την κύρια κύρτωση συμπεριλαμβανομένου ενός ισχυρού πεδίου της ροής που βρίσκεται πίσω.

Αναλυτικότερα πια, μπορεί να ειπωθεί πως η εξέλιξη του κύματος σε έναν κεκλιμένο ή κάθετο υμένα είναι μια υδροδυναμική αστάθεια που έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών. Το πρόβλημα υπήρχε, αλλά συνεχίζει να παρουσιάζει ενδιαφέρον και έχει πολλές μηχανικές εφαρμογές σε βιομηχανικές διαδικασίες. Έχει πλέον καθιερωθεί πως τα κύματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε ροές υμένα προάγουν ρυθμούς θερμότητας και μαζικής μεταφοράς σε εξοπλισμούς όπως συμπυκνωτές, εξατμιστήρες, απορρόφηση σε στήλες και αντιδραστήρες διασπαστικής ροής. Από την άλλη πλευρά, ο σχηματισμός των κυμάτων στην επιφάνεια επιστρωμένων υμένων καταλήγει σε υποβιβασμό των ιδιοτήτων του και είναι ανεπιθύμητος.

Οι περισσότερες χρήσιμες για το πρόβλημα πληροφορίες στηρίζονται σε πειράματα. Μια τεχνική που εισήχθη στην αρχική εργασία των Karitza και Karitza[2] και προφανώς υιοθετήθηκε από πολλούς ερευνητές είναι η διευκόλυνση των παρατηρήσεων κατά την ανάπτυξη του κύματος με την εφαρμογή στην είσοδο συνεχούς συχνότητας διαταραχής. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται «κανονικά» κύματα, των οποίων η μορφή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα της διαταραχής. Αυτές οι μελέτες έχουν αποδείξει ότι κορεσμένα περιοδικά κύματα είναι αποτέλεσμα υψηλής συχνότητας διαταραχών, όπου οι διαταραχές χαμηλής συχνότητας εκτυλίσσονται στα μοναχικά κύματα. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από κυρτώματα, με απότομες προσόψεις και πλάγιες καταλήξεις, που προηγούνται από κάποιες ρυτιδώσεις.

Όλα τα πειράματα επιβεβαιώνουν ότι η ανάπτυξη μιας ροής υμένα περιλαμβάνει μια μεταφερόμενη αστάθεια. Γι' αυτό και οι διαταραχές εισόδου ενισχύονται ενώ κινούνται κατά μήκος της ροής και οι χωρο – χρονικές δυναμικές είναι ένα σημαντικό συστατικό του φαινομένου. Η προαναφερθείς εξάρτηση των

τελικών γεγονότων στη συχνότητα των επιβαλλόμενων δυνάμεων είναι μιας άλλης επίδειξη της μεταφορικής φύσης του συστήματος, που δρα ως ενισχυτής θορύβου.

Έτσι, μετά από συγκέντρωση των θεωρητικών προσπαθειών στη μελέτη μακρών κυμάτων χρησιμοποιώντας μορφές της εξίσωσης Navier – Stokes, απευθείας αριθμητικές προσομοιώσεις έγιναν σε αυτήν, κατά τις οποίες παρατηρήθηκε καλή συμφωνία με τα δεδομένα των μη γραμμικών σχηματισμών κυμάτων. Η πιο γνωστή υπολογιστή μορφή είναι η χρήση περιοδικών οριακών συνθηκών στην είσοδο και την έξοδο του πεδίου ροής. Αυτή η μορφή ξεπερνά την οριακή συνθήκη της εξωτερικής ροής αλλά αποκλείει εξ ορισμού μη περιοδικά φαινόμενα. Μια άλλη εναλλακτική είναι η αριθμητική ολοκλήρωση των χρονικά ανεξάρτητων εξισώσεων, γιατί μπορεί να περιγράψουν τη μη γραμμική εξέλιξη της μεταφερόμενης αστάθειας και είναι για το λόγο αυτό υπαγόμενη στην απευθείας σύγκριση με τα πειράματα. Η μόνη αριθμητική μελέτη που υιοθετεί τέτοια προσέγγιση είναι η εργασία των Ramaswamy et al.[5]- η οποία σχετίζεται με αυτήν των N. A. Μαλαματάρη, Μ. Βλαχογιάννη και Β. Μποντόζογλου[4]-, οι οποίοι παρουσιάζουν αποτελέσματα σταθερότητας με ένα σύστημα μεταφοράς το οποίο χαρακτηρίζεται από ημι – περιοδικούς σχηματισμούς κυμάτων και υπολογίζουν τη χωρο – χρονική εξέλιξη σαν πρόβλημα αρχικής τιμής και συγκρίνουν τα προβλεπόμενα προφίλ ελεύθερης επιφάνειας με αυτά των Liu και Gollub[1].

Η εργασία των N. A. Μαλαματάρη, Μ. Βλαχογιάννη και Β. Μποντόζογλου[4] καινοτόμησε. Η καινοτομία της έγκειται στη μελέτη της δομής του πεδίου ροής, ειδικά σε σχέση με διαταραχές χαμηλής συχνότητας που καταλήγουν σε μοναχικά κύματα, όπου ανακαλύπτονται νέα χαρακτηριστικά. Οι εξισώσεις Navier – Stokes λύνονται σαν πρόβλημα αρχικής τιμής με τη μέθοδο Galerkin, και η ελεύθερη συνοριακή συνθήκη της ροής χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώσει ομαλή έξοδο των μη γραμμικών κυμάτων από την υπολογιστική περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η Πειραματική Μεθοδολογία

Στο τμήμα αυτό της εργασίας παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της ροής υγρού υμένα στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του πειράματος. Η διάταξη - η οποία κατασκευάστηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής - αποτελείται από το σύστημα ροής και το σύστημα συλλογής και επεξεργασίας εικόνων. Γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των ρευστών και των σωματιδίων ανίχνευσης και αναλύονται οι παράμετροι του πειράματος.

3.1 Το σύστημα ροής (κανάλι)

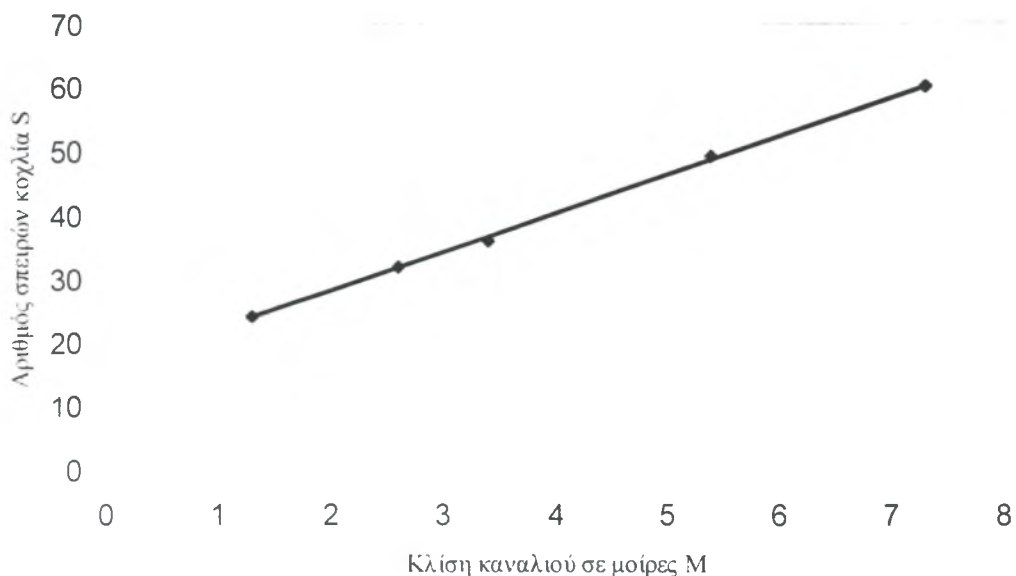
Για τη μελέτη της ροής του υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα χρησιμοποιήθηκε ειδική συσκευή. τα τμήματα της οποίας είναι κατασκευασμένα από Plexiglas. Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού είναι αναγκαία, γιατί δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης της ροής και επομένως την εφαρμογή των πειραματικών μεθόδων με σκοπο τις μετρήσεις πεδίου ταχυτήτων στη ροή του υγρού υμένα. Το κανάλι έχει πλάτος 25 cm και μήκος 80 cm. Το επίπεδο τοίχωμα από Plexiglass, το οποίο είναι προσαρμοσμένο στο κανάλι, έχει μήκος 50 cm και πλάτος 25 cm και μέσα σε αυτό γίνονται οι διάφορες οπτικές παρατηρήσεις . Με τη βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία δημιουργείται η επιθυμητή γωνία κλίσης στο κανάλι. Η μέγιστη γωνία που μπορεί να επιτευχθεί είναι 67° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Για τη μέτρηση της γωνίας κλίσης του καναλιού έγινε βαθμονόμηση του κοχλία, δηλαδή μετρήθηκαν οι σπείρες που αντιστοιχούν σε γνωστές γωνίες κλίσης και εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προέκυψε η παρακάτω γραμμική σχέση:

$$S=6.03M+16,1$$

όπου: S: αριθμός σπειρών και

M: γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.1) απεικονίζεται η σχέση του αριθμού σπειρών του κοχλία συναρτήσει της κλίσης του καναλιού σε μοίρες.



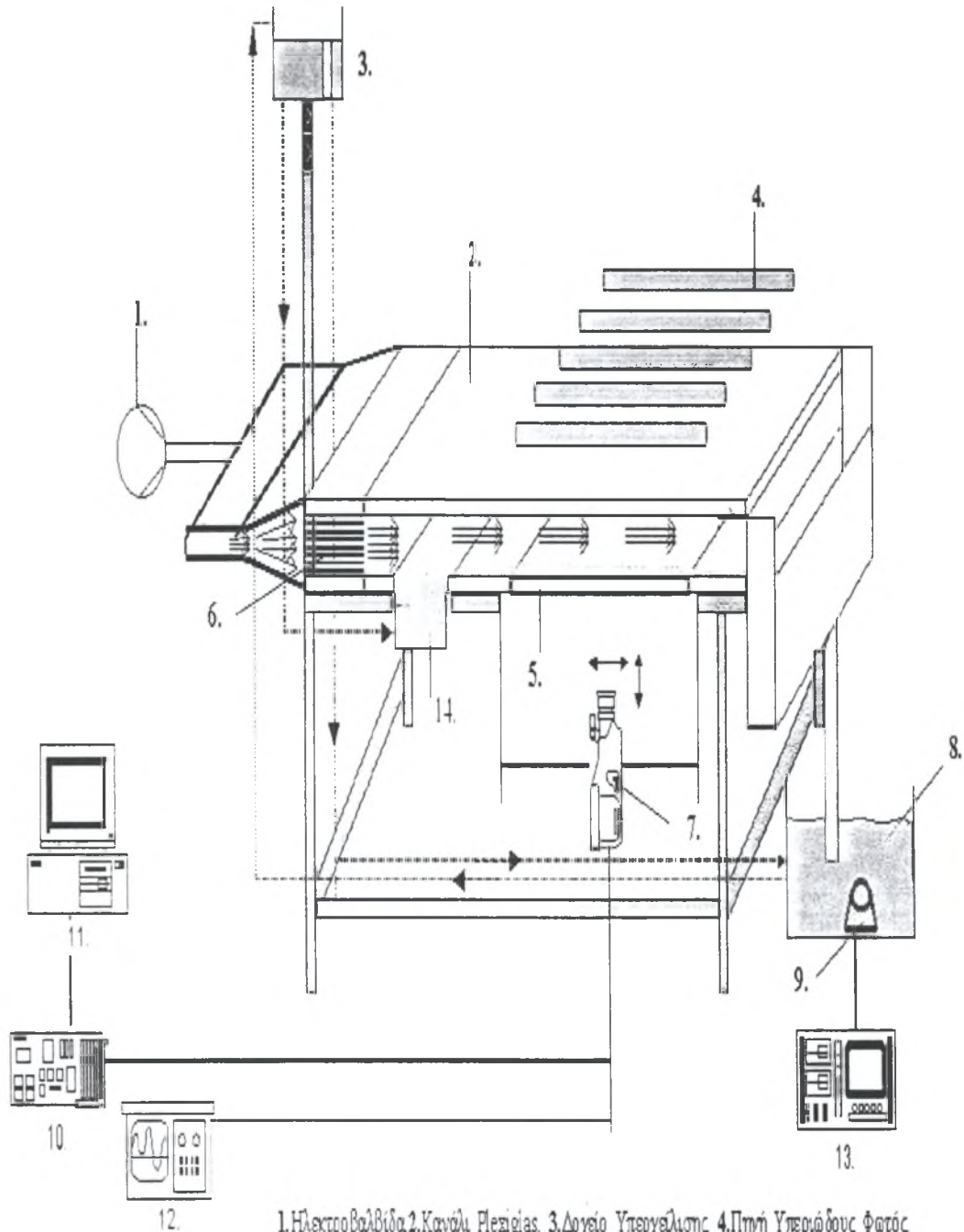
Σχήμα 3.1: Σχέση του αριθμού σπειρών του κοχλία συναρτήσει της κλίσης του καναλιού σε μοίρες, όπου: $S = 6.03M + 16.1$ και $R^2 = 0,9993$

Η συσκευή λειτουργεί ως εξής:

Με τη χρησιμοποίηση μιας εμβαπτιζόμενη αντλία το ρευστό οδηγείται από το δοχείο συλλογής (8) στο δοχείο υπερχειλίσσης (3). Η χρήση τέτοιου είδους αντλίας είναι αναγκαία, γιατί βοηθά στη μείωση των ταλαντώσεων, οι οποίες απορροφώνται από το ρευστό. Στη συνέχεια το ρευστό ρέει στο δοχείο κατανομής (14) -λόγω υψομετρικής διαφοράς- από όπου υπερχειλίζει και έτσι ρέει ομοιόμορφα στο επίπεδο τοίχωμα (5), στο οποίο κάνουμε τις μετρήσεις μας. Κάτω από το επίπεδο τοίχωμα υπάρχει ειδική ψηφιακή κάμερα (7) για την καταγραφή των μετρήσεων του πεδίου ταχύτητας. Τέλος, το ρευστό κλείνει τον κύκλο ροής του καταλήγοντας στο δοχείο συλλογής.

Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 3.1. Η παροχή του ρευστού στο κανάλι καθορίζεται από μια χειροκίνητη βαλβίδα, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στο δοχείο κατανομής και στο δοχείο υπερχειλίσσης. Η μέτρηση της παροχής πραγματοποιείται με τη μέτρηση του βάρους του ρευστού, το οποίο συλλέγεται σε βαθμονομημένο δοχείο, στην είσοδο του δοχείου συλλογής ανά μονάδα χρόνου. Πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί με το σταθερό ύψος του ρευστού στο δοχείο υπερχειλίσσης κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, γιατί σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli, αν αλλάξει η υψομετρική διαφορά θα αλλάξει και η παροχή του ρευστού

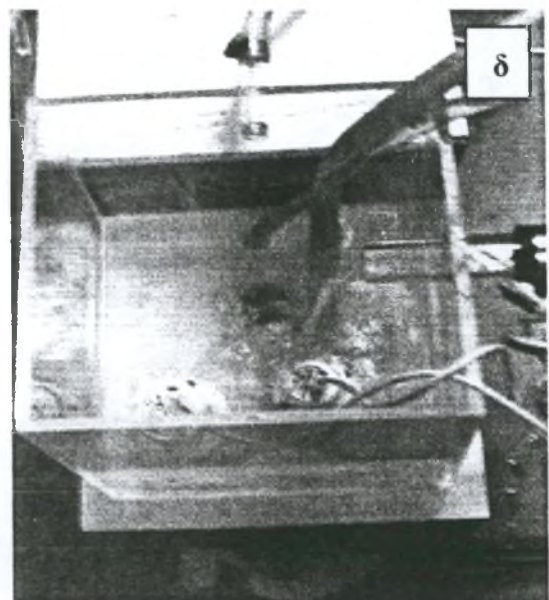
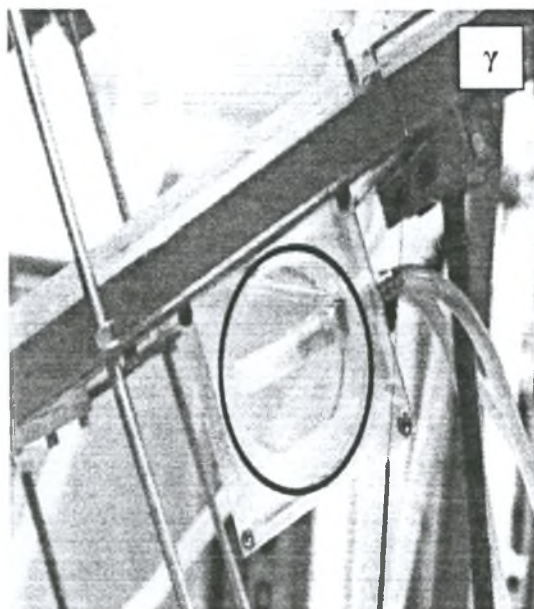
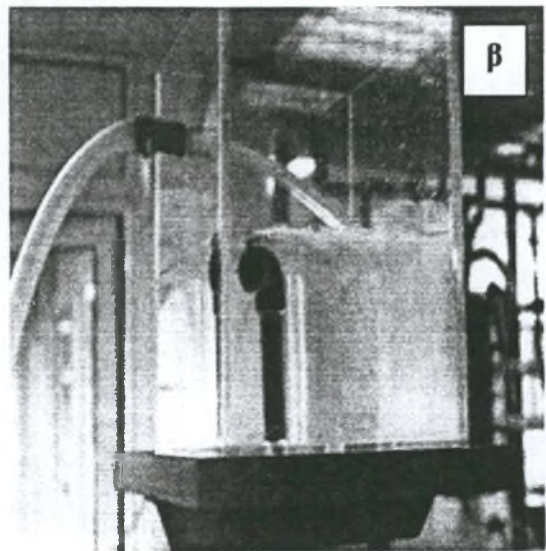
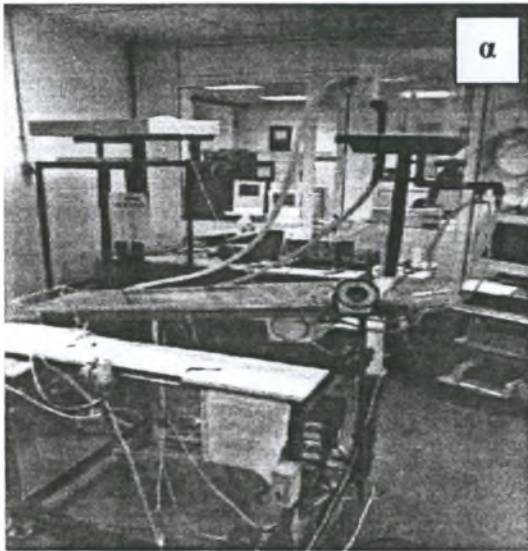
και επομένως και ο αριθμός Reynolds. Ακόμη, για την αποφυγή των ταλαντώσεων του περιβάλλοντος χώρου, η διάταξη είναι τοποθετημένη πάνω σε



1. Ηλεκτροβαλβίδα, 2. Κανάλι Ρεζιζίας, 3. Δοχείο Υπερχείλισης, 4. Πηγή Υπερώδους Φωτός
 5. Επίπεδο Τοίχιωμα, 6. Ομαλοποιητής της Ροής της αέριας φάσης, 7. Ψηφιακή Κάμερα CCD, 8. Δοχείο Συλλογής και ανάμειξης με την Χρωστική ουσία, 9. Αντλία, 10. DT3155 Κάρτα Συλλογής Εικόνων (Frame Grabber Board), 11. Compaq 166MMx, 12. Πάλμογράφος, 13. Τροφοδοτικό μεταβαλλόμενης έντασης ρεύματος και τάσης, 14. Δοχείο Κυτταρίου

Εικόνα 3.1: Η Πειραματική Διάταξη

ελαστικά ελάσματα (καουτσούκ). Τέλος, υπάρχουν φίλτρα σε κάποια συγκεκριμένα σημεία της συσκευής για να κατακρατούνται διάφορες ακαθαρσίες του ρευστού οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία της αντλίας, τις μετρήσεις, ακόμη και τη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας. Στην εικόνα 3.2 απεικονίζονται τα περισσότερα τμήματα της διάταξης.



Εικόνα 3.2: Τμήματα της πειραματικής διάταξης: α) Το κανάλι ροής β) Το δοχείο υπερχείλισης γ) Το δοχείο κατανομής δ) Το δοχείο συλλογής

3.2 Ιδιότητες των ρευστών, του υδρογόνου και των σωματιδίων ανίχνευσης

Στην πρώτη σειρά πειραμάτων που διεξάχθηκε, επειδή το κοινό νερό του δικτύου δεν είναι αρκετά ηλεκτρολυτικό, χρειάστηκε προσθήκη κάποιου άλατος που θα του αύξαινε την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα χλωριούχου νάτριου 1% κατά βάρος. Προέκυψε πως οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος που είναι βασικά νερό στους 10° C είναι:

Πυκνότητα : 1007,07 Kg/m³

Κινηματικό ιξώδες : 1*10⁻⁶ m²/sec

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως $Re = \frac{q}{\nu} = \frac{\langle u \rangle \cdot h_N}{\nu}$, όπου :

q: ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους,

h_N: πάχος υμένα κατά Nusselt και

<u>: μέση ταχύτητα του ρευστού.

Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων που διεξάχθηκε χρησιμοποιήθηκε καθαρό νερό με προσθήκη συγκεκριμένης συγκέντρωσης μικροσωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά είναι στερεά σωματίδια ανίχνευσης πολυαμιδίου 12 που παράγονται από διαδικασίες πολυμερισμού και έχουν τις παρακάτω ιδιότητες :

Μέση διάμετρο : 20 μm

Διακύμανση μεγέθους : 5-35 μm

Σχήμα : όχι σφαιρικό αλλά κυκλικό

Πυκνότητα : 1.03 g/cm³

Σημείο τήξης : 175 ° C

Προέκυψε πως οι φυσικές ιδιότητες του διαλύματος στους 15° C είναι:

Πυκνότητα : 1000 Kg/m³

Κινηματικό ιξώδες : 1*10⁻⁶ m²/sec

Το πρόβλημα που συναντάμε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι η διάσπαση του υμένα, λόγω κακής διαβροχής, η οποία επιλύεται με την επάλειψη του καναλιού με το κολλοειδές ρευστό Sodium Silicate, το οποίο δεν έχει επιπτώσεις στις πειραματικές μετρήσεις. Τέλος, για τον καθαρισμό της συσκευής χρησιμοποιείται υπεροξείδιο του υδρογόνου (Peridrol), το οποίο δεν επηρεάζει το υλικό κατασκευής (Plexiglas).

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων παρατηρήθηκε συσσώρευση και επικάλυψη σωματιδίων σε διάφορα τμήματα της πειραματικής διάταξης και ιδιαίτερα στα δοχεία υπερχειλίσης, κατανομής και συλλογής. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού

τοποθετήθηκε στο δοχείο υπερχειλίσσης –γιατί μόνο εκεί ήταν εφικτό- κατάλληλη διάταξη στην οποία προσαρμόστηκε ειδικός αναδευτήρας χαμηλής ισχύος. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω διάταξη είχαμε καλύτερη ανάμιξη του νερού με τα σωματίδια και συνεχή κίνηση των σωματιδίων σε ολόκληρη την πειραματική διάταξη, αποφεύγοντας έτσι την επικάθεισή τους στα τοιχώματα του δοχείου υπερχειλίσσης.

3.3 Μέθοδος απεικόνισης και δειγματοληψίας

Για την οπτική παρακολούθηση των πειραματικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν δύο προβολείς φωτός τύπου CY-78A,230V και 50Hz και μέγιστη ισχύ ο ένας 150W και ο άλλος 50W. Οι προβολείς είναι τοποθετημένοι συμμετρικά ως προς τις άκρες του καναλιού σε συγκεκριμένη απόσταση από το επίπεδο τοίχωμα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερη κατανομή της έντασης του φωτός. Η ένταση εκπομπής του φωτός είναι ανάλογη της απόστασης των προβολέων και του επιπέδου τοιχώματος. Επομένως, οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης των προβολέων επηρεάζει ανάλογα το αποτέλεσμα. Γι' αυτό το λόγο, εφόσον γίνει η βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου, το είδος των προβολέων που χρησιμοποιούνται και η απόστασή τους από το επίπεδο τοίχωμα θα πρέπει να διατηρούνται σταθερά.

Για τη συλλογή εικόνων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό σύστημα καταγραφής εικόνας με υψηλή ταχύτητα καταγραφής (Redlake MotionScope PSI). Η κάμερα, που τοποθετείται κάτω από το κανάλι ροής, έχει δυνατότητα καταγραφής μέχρι και 1000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο (frames/sec) και η ταχύτητα του διαφράγματος κυμαίνεται από 1/50 ως 1/1000 sec. Με το κατάλληλο υπολογιστικό πακέτο, μπορούμε να επεξεργαστούμε την εικόνα, την οποία παίρνουμε από την κάμερα στην οθόνη του υπολογιστή και να εξάγουμε τα συμπεράσματά μας σχετικά με τις μεθόδους οπτικοποίησης ροών που παρατηρούμε.

Η κάμερα εστιάζει προς το τέλος του καναλιού, ούτως ώστε η ροή να έχει εξελιχθεί πλήρως και να έχει σταθεροποιηθεί στην μόνιμη μορφή της.

Το υπολογιστικό πακέτο μας δίνει επιπλέον την δυνατότητα να επεξεργαστούμε τις εικόνες που παίρνουμε, καθώς και να καταγράψουμε την ροή σε βίντεο μικρής διάρκειας (περίπου 4 sec). Από τα βίντεο αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε το πάχος υμένα (h_N) και την ταχύτητα των φυσαλίδων (U).

3.4 Παράμετροι του πειράματος

Η εκτέλεση των πρώτων πειραματικών μετρήσεων έγινε σε επίπεδο τοίχωμα και σε κλίση $3,4^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η θερμοκρασία ήταν 10°C και οι φυσικές ιδιότητες αναφέρονται σε αυτή τη θερμοκρασία.

Ο αριθμός Reynolds, ο οποίος ορίζεται ως το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους, υπολογίζεται με βάση τη μέτρηση της ογκομετρικής παροχής ανά μονάδα πλάτους του τοιχώματος. Στην περίπτωση μας, το εύρος των αριθμών Reynolds κυμάνθηκε από 20 ως 62.

Σ' αυτόν τον κύκλο πειραμάτων η θέση της ιδιοκατασκευής στήριξης του πλατινένιου σύρματος σε σχήμα Π παρέμενε σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Επίσης, ίδιοι παρέμεναν και ο χρόνος στον οποίο γινόταν η ηλεκτρόλυση και επομένως γειννούνταν φυσαλίδες υδρογόνου και ο χρόνος στον οποίο είχαμε παύση ανάμεσα σε περιόδους ηλεκτρόλυσης και είχε σταματήσει η γένεση φυσαλίδων.

Η εκτέλεση των δεύτερων πειραματικών μετρήσεων έγινε σε επίπεδο τοίχωμα και σε κλίση $0,65^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, διαφορετική από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της προηγούμενης μεθόδου. Η παραπάνω αλλαγή στην κλίση του καναλιού και η μείωσή της σε $0,65^\circ$ κρίθηκε αναγκαία και απαραίτητη, γιατί ήταν αδύνατη η μελέτη της κίνησης των μικροσωματιδίων ανίχνευσης λόγω της πολύ γρήγορης κίνησής τους. Η θερμοκρασία ήταν 15°C και οι φυσικές ιδιότητες αναφέρονται σε αυτή τη θερμοκρασία.

Στην περίπτωση αυτή, το εύρος των αριθμών Reynolds κυμάνθηκε από 16 ως 102.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αποτελέσματα

4.1 Βαθμονόμηση και έλεγχος καλής λειτουργίας των πειραματικών μεθόδων

Για συγκεκριμένο εύρος αριθμών Reynolds και γωνιών κλίσης του τοιχώματος, ο υμένας είναι ευσταθής και επίπεδος, ενώ παράλληλα το πάχος του δίνεται από τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, που, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασίζεται στην αναλυτική επίλυση του προβλήματος της δισδιάστατης μόνιμης ροής σε κεκλιμένο επίπεδο με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.

Σε προηγούμενη εργασία, ο Βλαχογιάννης [6] έλεγξε τόσο την επιπεδότητα του υμένα, όσο και την ισότητα του πάχους του με αυτή που προκύπτει από τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt. Ο έλεγχος έγινε με τη βοήθεια ενός μικρομέτρου μετατόπισης Micrometer series 229. Επειδή τόσο το διάλυμα όσο και το υλικό κατασκευής του μικρομέτρου είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα, αν μετακινήσουμε την ακίδα του μικρομέτρου και αυτή έρθει σε επαφή με τον υμένα τότε το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει και το βολτόμετρο που είναι συνδεδεμένο παράλληλα αποκτά μια ένδειξη. Η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει να μετρήσουμε το πάχος του υμένα με ακρίβεια της τάξης των 10μm.

Η επιπεδότητα του υμένα και η ισότητα του πάχους του στην ευσταθή περιοχή με τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, μας επιτρέπει την άμεση βαθμονόμηση της πειραματικής μεθόδου. Συγκεκριμένα, μετρώντας τη μαζική παροχή $Q \left(\frac{Kg}{min} \right)$ στην έξοδο από το κανάλι ροής βρίσκουμε από τη σχέση 4.1 σε ποιον αριθμό Re αντιστοιχεί η ροή και επιδιώκουμε αυτός να βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή.

$$Re = \frac{q}{\nu} = \frac{\langle u \rangle \cdot h_N}{\nu} = \frac{Q_0 \left(\frac{Kg}{min} \right)}{60 \cdot a(m) \cdot \nu \left(\frac{m^2}{sec} \right) \cdot \rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right)} \quad (4.1)$$

όπου : $a=0.25$ m το πλάτος του καναλιού.

Έπειτα, από τη σχέση 4.2 βρίσκουμε το θεωρητικό πάχος του υμένα κατά Nusselt.

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \nu \cdot g \cdot \text{Re}}{g \cdot \sin \phi}} \quad (4.2)$$

όπου: ϕ : η κλίση του καναλιού σε μοίρες,

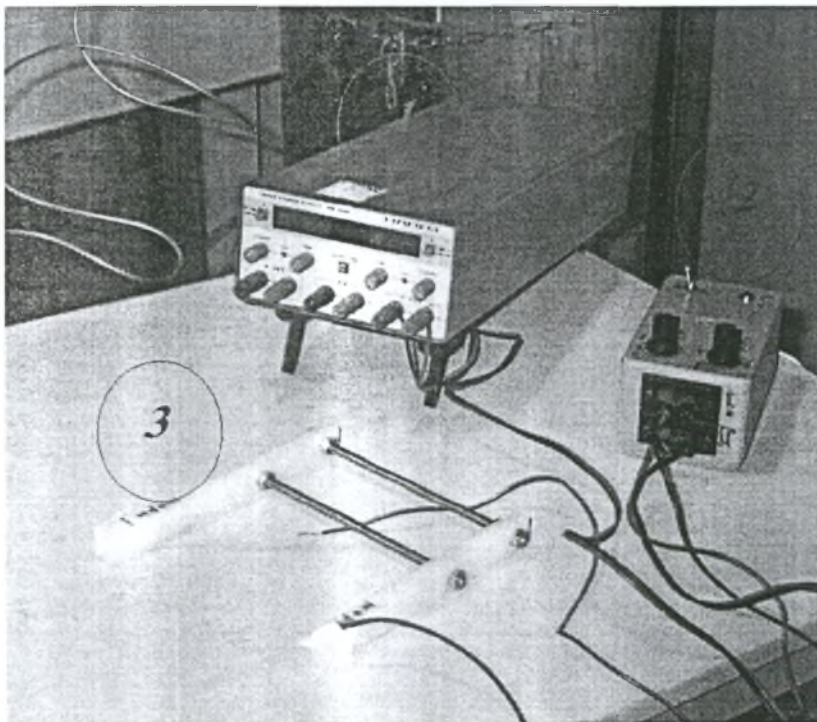
ν : το κινηματικό ιξώδες (m^2/sec),

g : 9.81 η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2/sec) και

h_N : πάχος υμένα (μm)

4.2 Ροή φυσαλίδων υδρογόνου

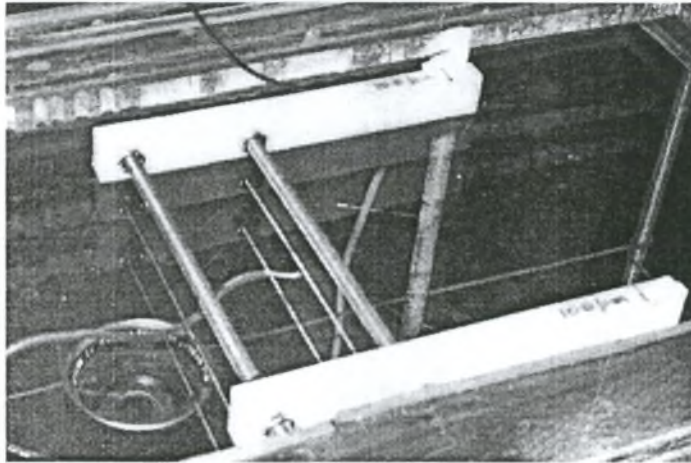
Για την διεκπεραίωση του πρώτου κύκλου πειραμάτων χρησιμοποιώντας την τεχνική οπτικοποίησης της ροής με φυσαλίδες υδρογόνου, είναι αναγκαίες οι συσκευές που διακρίνονται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 : Τμήματα της πειραματικής διάταξης (1): τριπλό τροφοδοτικό, (2): συσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού, (3) : ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π

Οι συσκευές που χρησιμοποιούμε για την διεκπεραίωση του πειράματος είναι ένα τριπλό τροφοδοτικό, μια συσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού και μια ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π.

Μέσα στο κανάλι τοποθετήθηκε ιδιοκατασκευή σε σχήμα Π. Λεπτό επίμηκες μεταλλικό σύρμα από πλατίνα διαμέτρου 0,025 mm και καθαρότητας 99,9% τοποθετείται εγκάρσια προς τη μέση ροή για να παριστάνει την κάθοδο ηλεκτρικού κυκλώματος dc(εικόνα 4.2).

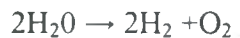


Εικόνα 4.2 : Ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π

Η άνοδος (βυθιζόμενη επίσης), η οποία αποτελείται από κάποιο κατάλληλο αγώγιμο υλικό, τοποθετείται κοντά. Προμηθεύουμε το κανάλι με κοινό νερό δικτύου όγκου 30 lt και με διαλυμένο χλωριούχο νάτριο 330 gr. Σχηματίζεται έτσι διάλυμα με χλωριούχο νάτριο 1% κατά βάρος. Τοποθετούμε την ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π σε κάποια απόσταση από την αρχή του καναλιού μέσα σε αυτό, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της ροής. Στην ίδια θέση, αλλά κάτω από το κανάλι τοποθετείται η κάμερα. Έπειτα θέτουμε το κανάλι σε λειτουργία και ανοίγουμε και την κάμερα. Το ηλεκτρικό κύκλωμα που υπάρχει κλείνει περιοδικά. Αυτό καθορίζεται από την ύπαρξη ενός δίθυρου στοιχείου μέσα στη συσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού. Το δίθυρο αυτό στοιχείο το αποτελεί ένα ρελέ, το οποίο ανάλογα με την τάση που δέχεται, καθορίζει το κλείσιμο του κυκλώματος. Την τάση εισόδου του ρελέ την καθορίζει μια γεννήτρια, η οποία παράγει σήματα διαφόρων μορφών όπως ημιτονοειδών, πριονωτών και τετραγωνικών και με αρκετά μεγάλο εύρος μάλιστα στα πλάτη και τις συχνότητες. Για να

διαπιστώσουμε τη σωστή λειτουργία του ρελέ και την τάση που ελέγχει το κλείσιμο του κυκλώματος, χρησιμοποιείται ένας παλμογράφος. Η δε συχνότητα με την οποία γεννούνται φυσαλίδες, καθορίζεται από την συχνότητα που δίνει η γεννήτρια.

Αρχικά, δίνοντας ηλεκτρική τάση στο κύκλωμα (μια συγκεκριμένη διαφορά δυναμικού), προκαλείται απελευθέρωση υδρογόνου στην κάθοδο διαμέσου ηλεκτρόλυσης με οξυγόνο να απελευθερώνεται στην άνοδο. Η αντίδραση που γίνεται κατά την ηλεκτρόλυση είναι η αποσύνθεση του νερού σύμφωνα με την



Εφόσον οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες υδρογόνου είναι περισσότερες από τις φυσαλίδες οξυγόνου, καλύτερη οπτικοποίηση ροής παρατηρείται χρησιμοποιώντας την κάθοδο. Έτσι, οι φυσαλίδες υδρογόνου που σχηματίζονται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου παρασύρονται από την ροή για να σχηματίσουν ένα συνεχές ρεύμα.

Το ηλεκτρόδιο της καθόδου, όμως, είναι ένα ευθύ σύρμα. Αν η διαφορά δυναμικού παρέχεται με τετραγωνικό παλμό, τότε παράγονται ξεχωριστές γραμμές φυσαλίδων. Στη συσκευή παροχής συχνοτήτων υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των «σειρών» φυσαλίδων που σχηματίζονται. Έτσι, μπορεί να ρυθμιστεί ο χρόνος στον οποίο γίνεται η ηλεκτρόλυση και επομένως γεννούνται φυσαλίδες υδρογόνου και ο χρόνος στον οποίο έχουμε παύση ανάμεσα σε περιόδους ηλεκτρόλυσης και έχει σταματήσει η γενεση φυσαλίδων. Ο πρώτος χρόνος t_1 κυμαίνεται από 1 msec ως 85 msec ενώ ο δεύτερος χρόνος t_2 από 100 msec ως 1sec. Οι χρόνοι που διαπιστώθηκε πως έδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα είναι ο μιν πρώτος 45 msec, ο δε δεύτερος 400msec περίπου.

Επομένως, σχηματίζονται ροές φυσαλίδων που άγονται στην κατεύθυνση του ρεύματος. Με κάθε ηλεκτρικό παλμό σχηματίζεται μια σειρά φυσαλίδων, το μέτωπο των οποίων απεικονίζει τη διανομή ταχύτητας. Το μέγεθος των φυσαλίδων είναι κατά το δυνατόν μικρό, ώστε να είναι μικρή και η ανοδική τους κίνηση λόγω της άνωσης, η οποία εξαρτάται κυρίως από την διάμετρο του ηλεκτροδίου. Εκτός από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, το μέγεθός τους εξαρτάται από την αγωγιμότητα του υγρού, την εφαρμοσμένη διαφορά δυναμικού και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος.

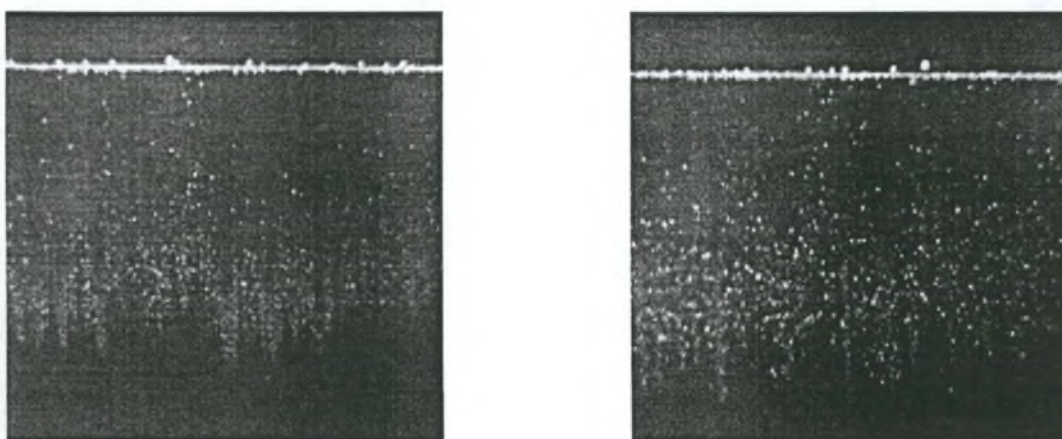
Η ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π έχει στις πλευρές της εγκοπές βάθους τριών διαστάσεων, στις οποίες προσαρμόζεται το πλατινένιο σύρμα. Αυτό δεν εφάπτεται στον πυθμένα του καναλιού όπως και το υπόλοιπο τμήμα στήριξής του, αλλά βρίσκεται σε απόσταση 100, 200 και 350 μm

από τον πυθμένα αντίστοιχα. Την απόσταση αυτή θα τη χρησιμοποιήσουμε στην πειραματική μας μελέτη και θα αναφερόμαστε σε αυτή ως απόσταση από τον πυθμένα του καναλιού.

4.2.1 Ποιοτικά αποτελέσματα φυσαλίδων υδρογόνου

Η μορφή των εικόνων που συλλέγονται από την πειραματική διαδικασία είναι της μορφής Windows Bitmaps 24 bit. Η μέθοδος απεικόνισης και δειγματοληψίας είναι αυτή που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.3.

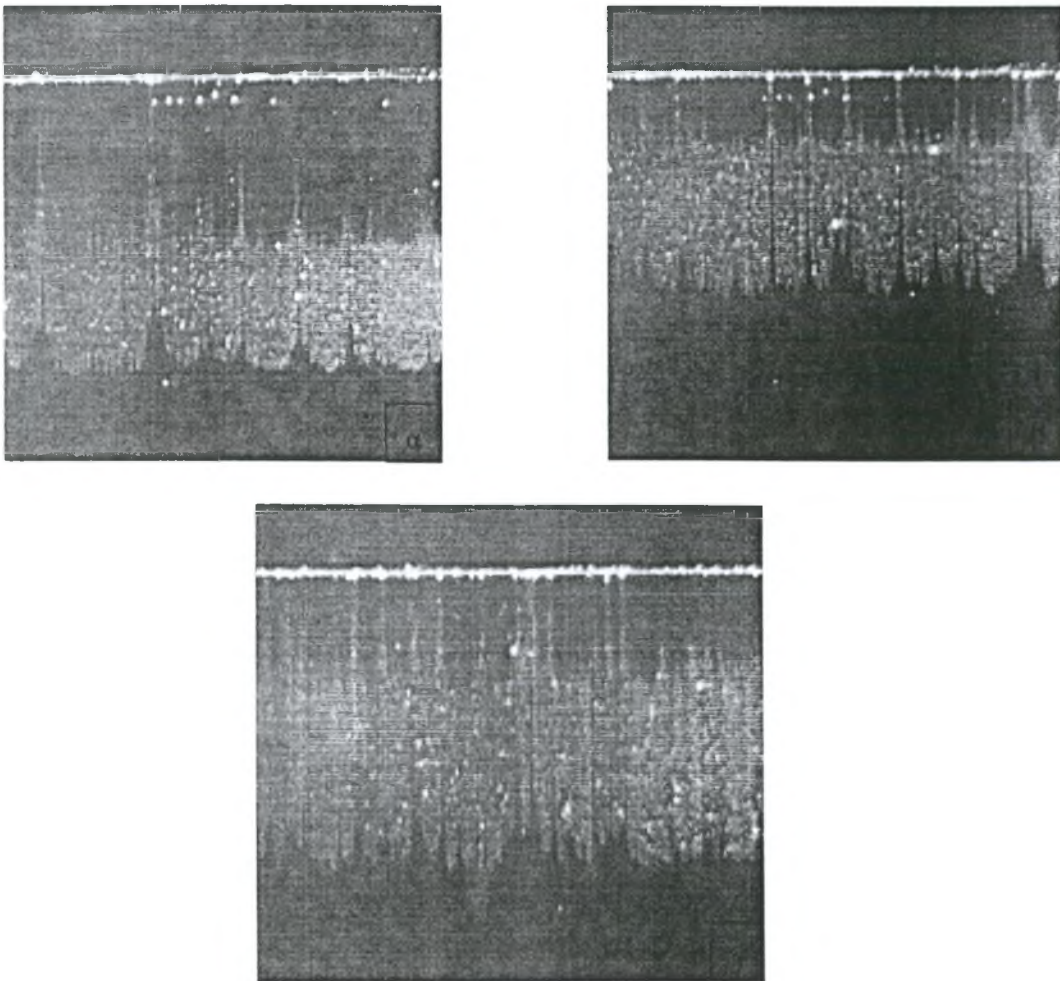
Στην εικόνα 4.3(α) παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία κατά την οποία φαίνεται η ροή φυσαλίδων υδρογόνου με απόσταση 100 μm από τον πυθμένα του καναλιού και αριθμό Reynolds 21, ενώ στην εικόνα 4.3(β) αλλάζει ο αριθμός Reynolds, ο οποίος αυξάνει και γίνεται 42. Στις παρακάτω εικόνες ο χρόνος στον οποίο γειννούνται φυσαλίδες υδρογόνου είναι 45 msec ενώ ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο παλμών φυσαλίδων υδρογόνου είναι 400 msec. Στην εικόνα 4.3(α) παρατηρούμε πως η ροή των φυσαλίδων δεν είναι συμμετρική ως προς τα άκρα της, αλλά και η πυκνότητα των φυσαλίδων παρουσιάζει διακυμάνσεις. Δηλαδή σχηματίζει στα άκρα της πολλές κορυφές και κοιλάδες και είναι αραιή. Αυτό μάλλον συμβαίνει, διότι στο μεταλλικό σύρμα το οποίο γεννά τις φυσαλίδες, βρίσκονται φυσαλίδες



Εικόνα 4.3: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των φυσαλίδων υδρογόνου με απόσταση 100 μm από τον πυθμένα του καναλιού, $t_1=45$ msec και $t_2=400$ msec: α : $Re = 21$, β : $Re = 42$

διαφόρων μεγεθών προσκολλημένες σε αυτό, οι οποίες σε αυτά τα σημεία που βρίσκονται, δεν επιτρέπουν τη διέλευση της ροής νερού. Όσον αφορά στην εικόνα 4.3(β) η ροή των φυσαλίδων υδρογόνου είναι πιο έντονη και κάπως συμμετρική. Υπάρχουν βέβαια και εδώ κορυφές και κοιλάδες, όμως, φαίνεται η ροή των φυσαλίδων υδρογόνου να είναι πιο ομοιογενής. Είναι πυκνότερη βέβαια σε φυσαλίδες από την εικόνα 4.3(α).

Στις εικόνες 4.4(α), 4.4(β) και 4.4(γ) παρατηρούμε ροές φυσαλίδων υδρογόνου να σχηματίζονται σε διπλάσια απόσταση από τον πυθμένα, δηλαδή 200 μm με ίδιους χρόνους ηλεκτρόλυσης και παύσης. Στην εικόνα 4.4(α) παρατηρούμε μια πυκνή ροή φυσαλίδων πλούσια σε κορυφές και κοιλάδες, πιο ομοιογενής, όμως, αυτή τη φορά με αρκετές μεγάλες φυσαλίδες. Ο αριθμός Reynolds εδώ έχει τιμή ίση με 23. Στην εικόνα 4.4(β) ο αριθμός Reynolds αυξάνεται και γίνεται ίσος με 31. Η ροή φυσαλίδων εδώ είναι πιο συμμετρική από την προηγούμενη και πιο ομοιογενής.



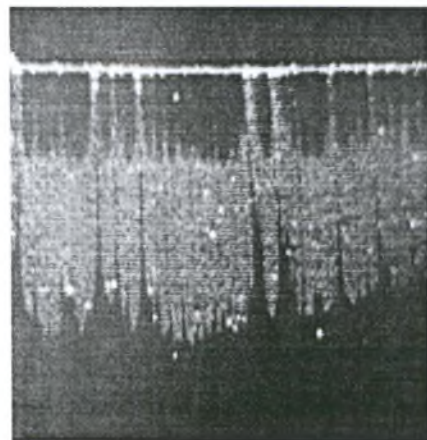
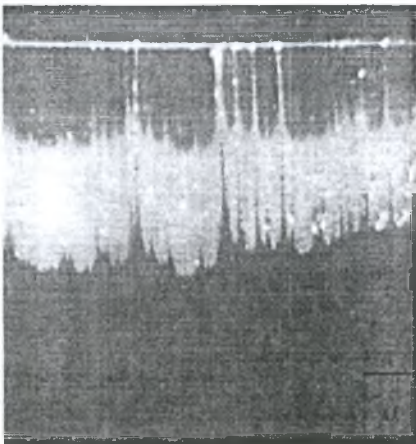
Εικόνα 4.4: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των φυσαλίδων υδρογόνου με

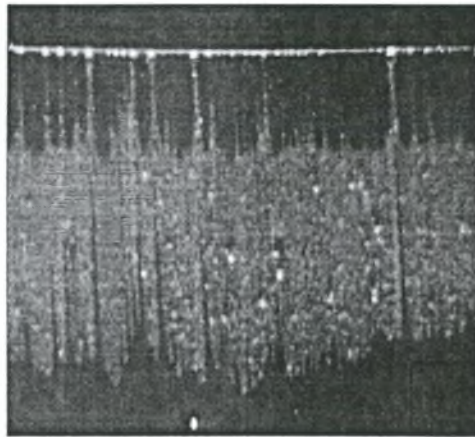
απόσταση 200 μm από τον πυθμένα του καναλιού, $t_1=45$ msec και

$t_2=400$ msec: α : $Re = 23$, β : $Re = 31$, γ : $Re = 62$

Στην εικόνα 4.4(γ) ο παλμός των φυσαλίδων κινείται έχοντας αριθμό Reynolds 62. Η ροή είναι σαφώς καλύτερη από τις δύο προηγούμενες. Αυτό μπορεί να ειπωθεί, διότι η ροή εδώ παρουσιάζεται πιο γεμάτη, δηλαδή πιο πλούσια σε φυσαλίδες, πιο πυκνή χωρίς μεγάλες αυξομειώσεις στις κορυφές και κοιλάδες και όχι τόσο ομοιογενής λόγω των πολλών μεγάλων φυσαλίδων που παρατηρούνται. Κι σ' αυτήν την περίπτωση οι φυσαλίδες που βρίσκονται πάνω στο μεταλλικό σύρμα είναι αρκετές, όμως το μικρό μέγεθός τους δημιουργεί μια συμμετρία στο κάτω και πάνω όριο του παλμού των φυσαλίδων, λόγω του ότι εμποδίζει μικρότερη ποσότητα ροής νερού να περάσει προς ηλεκτρόλυση για τη δημιουργία φυσαλίδων.

Στις εικόνες που ακολουθούν όπως οι 4.5(α), 4.5(β) και 4.5(γ) η απόσταση του μεταλλικού σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού έχει φτάσει στα 350 μm με ίδιους χρόνους κι αυτή τη φορά ηλεκτρόλυσης και παύσης. Στην προκειμένη περίπτωση οι φυσαλίδες που γεννούνται κινούνται με διαφορετική ταχύτητα κάθε φορά που αλλάζουμε την ογκομετρική παροχή. Έτσι, στην εικόνα 4.5(α) η ροή με αριθμό Reynolds 21 παρατηρούμε ότι είναι πολύ ακανόνιστη. Είναι μεν πολύ πυκνή, αλλά παρουσιάζονται πολλές αυξομειώσεις στα άκρα της. Η ροή εδώ είναι πιο ομοιογενής, δηλαδή φαίνεται να υπάρχει συμμετρία φυσαλίδων ως προς το μέγεθος. Υπάρχουν λίγες μεγάλες φυσαλίδες μέσα στο κύμα της ροής που δημιουργείται, το οποίο δεν είναι και του ίδιου πάχους σε όλα τα σημεία του. Στην εικόνα 4.5(β)





Εικόνα 4.5: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των φυσαλίδων υδρογόνου με απόσταση 350 μm από τον πυθμένα του καναλιού. $t_1=45$ msec και $t_2=400$ msec: **α :** $Re = 21$. **β :** $Re = 38$. **γ :** $Re = 51$

παρουσιάζεται κάτι ανάλογο με την προηγούμενη περίπτωση, με τη μόνη διαφορά πως το κύμα είναι πλουσιότερο σε φυσαλίδες, λόγω αύξησης του αριθμού Reynolds στα 38. Κι εδώ παρατηρούνται περισσότερες μεγάλες φυσαλίδες από πριν.

Στην εικόνα 4.5(γ), που είναι και η τελευταία, ο αριθμός Reynolds έχει γίνει 51. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από το πάχος του κύματος. Η ροή παρουσιάζεται καλύτερη από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Δηλαδή είναι πυκνή, γεμάτη με φυσαλίδες διαφόρων μεγεθών και πιο συμμετρική στα άκρα της. Διαθέτει βέβαια αποτομές μεταβολές στα όριά της, όμως, είναι λιγότερες και υπάρχει ομοιομορφία ακόμη και σε αυτές.

4.2.2 Ποσοτικά αποτελέσματα φυσαλίδων υδρογόνου

Σ' αυτό το τμήμα απεικονίζονται γραφικά τα μεγέθη που προκύπτουν από τη ροή των φυσαλίδων και τη γέννησή τους, όπως η μέση θεωρητική ταχύτητά τους, η πειραματική που προέκυψε από τις μετρήσεις, οι αποστάσεις του μεταλλικού σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού, ο αριθμός Reynolds και κάποιοι αδιάστατοι αριθμοί που θα τους αναφέρουμε και θα τους αναλύσουμε παρακάτω.

Η πειραματική αυτή ταχύτητα που προαναφέρεται, βρίσκεται εφαρμόζοντας και χρησιμοποιώντας κατάλληλα και σωστά το υπολογιστικό πακέτο MotionScope

PCI. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζουμε παραδείγματος χάρη την απόσταση που διανύει μια φυσαλίδα υδρογόνου ξεκινώντας από κάποιο σημείο αναφοράς για κάποιο χρονικό διάστημα, την απόσταση μεταξύ δύο φυσαλίδων υδρογόνου, την ταχύτητα που μπορεί να έχει η φυσαλίδα σε κάποιο σημείο ή την ταχύτητα που αποκτά εφόσον έχει διανύσει κάποια συγκεκριμένη απόσταση. Για την διεξαγωγή της πειραματικής μας μελέτης, μελετήθηκε η πορεία κάποιων φυσαλίδων υδρογόνου κατά τη διάρκεια του ηλεκτρικού παλμού και χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος αριθμός φυσαλίδων που κυμαίνονταν από επτά έως δέκα, ανάλογα με την ευκρίνεια του παλμού. Αυτές οι φυσαλίδες υδρογόνου που τέθηκαν προς μελέτη δεν ήταν συγκεντρωμένες σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του παλμού, αλλά βρίσκονταν κατανεμημένες σε διάφορα σημεία κατά μήκος αυτού. Ειδικότερα, έστω ότι παρατηρούσαμε μια φυσαλίδα υδρογόνου, η οποία βρίσκονταν στο αριστερό μέρος του παλμού και στο κάτω όριό του- το οποίο λαμβάναμε και ως σημείο αναφοράς. Υπολογίζαμε την ταχύτητα της φυσαλίδας σε δύο και σε πέντε αριθμούς λήψεως (δηλαδή σε δύο και σε πέντε frames) και ομοίως κάναμε και με τις υπόλοιπες φυσαλίδες κατά μήκος του παλμού. Αυτό γινόταν όχι μόνο στον προκείμενο παλμο, αλλά και στον αμεσως επόμενο. Έτσι, είχαμε μια μέση πειραματική ταχύτητα των φυσαλίδων υδρογόνου από τον πρώτο παλμό, μια μέση πειραματική ταχύτητα από τον δεύτερο παλμό –η οποία ήταν σχεδόν ίση με αυτήν του πρώτου- και τελικώς βγάξαμε ως τελική πειραματική ταχύτητα των μέσο όρο αυτών.

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων όπως επίσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων και την εφαρμογή των τύπων 4.1, 4.2 και 2.17.

Απόσταση από τον πυθμένα του καναλιού [$=\mu m$]	Επιτάχυνση της βαρύτητας $g[=m^2/sec]$	Κινηματικό ιξώδες $\nu[=m^2/sec]$	Γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες $\varphi=3.4*3.14/180$	Πυκνότητα $\rho[=Kg/m^3]$	Μαζική παροχή $Qo[=kg/min]$
	9,81	0,000001	0,05931111	1007,07	
100					0,3133
100					0,52995
100					0,64
200					0,35333
200					0,47333
200					0,9333
350					0,323
350					0,57
350					0,77

Πίνακας 4.1: Δεδομένα για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. όπως η απόσταση από τον πυθμένα του καναλιού. η επιτάχυνση της βαρύτητας. το κινηματικό ιξώδες. η γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες. η πυκνότητα και η μαζική παροχή στην έξοδο του καναλιού.

Ογκομετρική παροχή $q[=m^2/sec]$	Πάχος υμένα κατά Nusselt $Hn[=m]$	Πάχος υμένα κατά Nusselt $Hn[=\mu m]$	Αριθμός Reynolds	Αριθμός Reynolds που προέκυψε πειραματικά
2.074E-05	0,000475	474,745	20,74003	21
3.5082E-05	0,000566	565,655	35,08197	35
4.23671E-05	0,000602	602,375	42,36713	42

2,339E-05	0,000494	494,159	23,38997	23
3,13338E-05	0,000545	544,747	31,3338	31
6,17832E-05	0,000683	683,094	61,78319	62
2,13822E-05	0,00048	479,594	21,38216	21
3,77332E-05	0,00058	579,56	37,73323	38
5,0973E-05	0.000641	640,674	50,97295	51

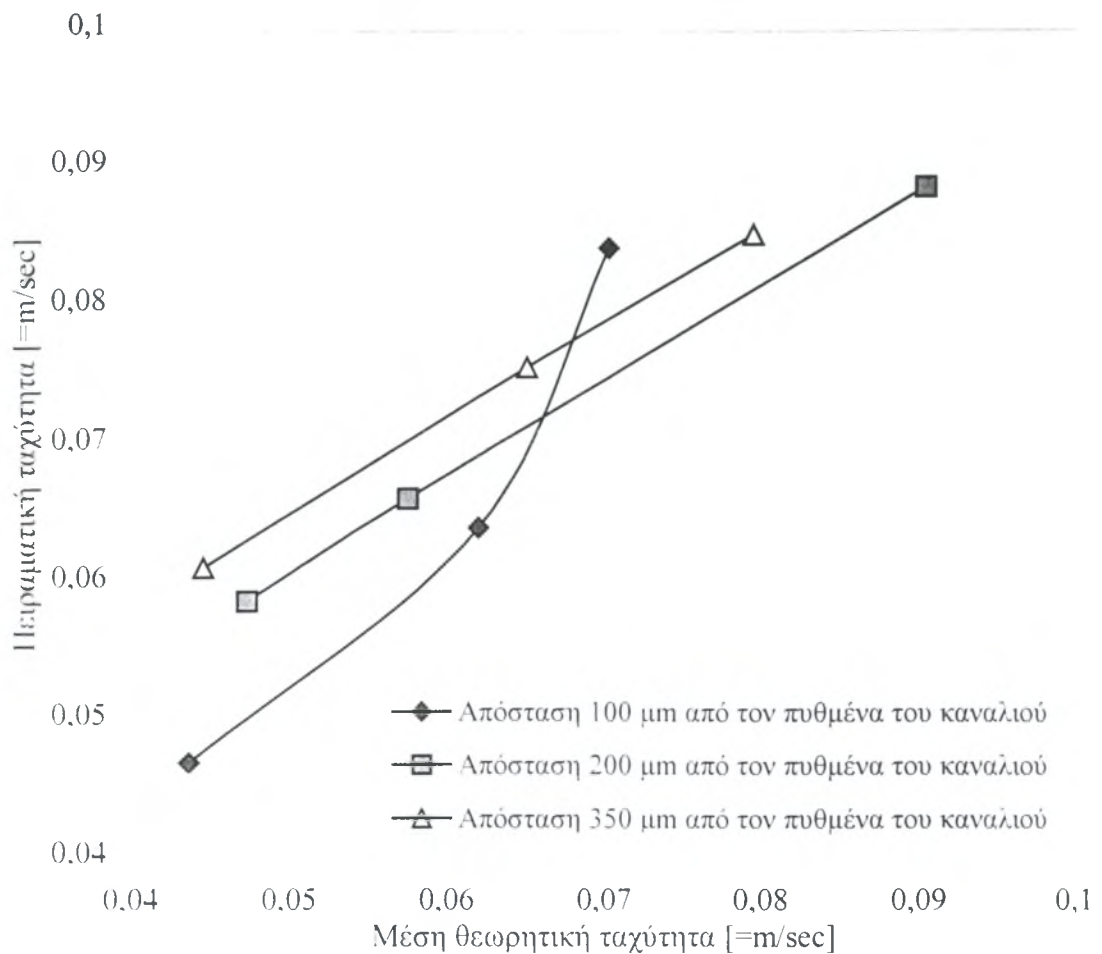
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η ογκομετρική παροχή, το πάχος υμένα κατά Nusselt, ο αριθμός Reynolds και ο αριθμός Reynolds που προέκυψε πειραματικά.

<i>Μέση θεωρητική ταχύτητα</i> $U_{meso} [=m/sec]$	<i>Πειραματική ταχύτητα</i> $U [=m/sec]$
0,043686713	0,047024
0,062020087	0,064027
0,070333531	0,084235
0,047332864	0,058756
0,057519945	0,066142
0,090446122	0,088677
0,044583838	0,061127
0,065106699	0,075625
0,079561493	0,085209

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η μέση θεωρητική ταχύτητα και η πειραματική ταχύτητα.

Στο σχήμα 4.1 δίνεται η μέση θεωρητική ταχύτητα των φυσαλίδων σύμφωνα με τη σχέση 2.17, που προκύπτει από τη μελέτη του δισδιάστατου προβλήματος της ροής υγρού υμένα κατά μήκος ενός επίπεδου κεκλιμένου τοιχώματος, συναρτήσει της ταχύτητας των φυσαλίδων που διαπιστώθηκε ότι αποκτούν κατά τη διαδικασία των πειραμάτων με βάση τις αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού.

Έτσι, παρατηρούμε πως αρχικά και για τις τρεις αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού η μέση θεωρητική ταχύτητα των φυσαλίδων αυξάνεται σταδιακά και γραμμικά με την πειραματική ταχύτητα αυτών μέχρι κάποιο μέσο αριθμό Reynolds (τιμή ανάλογη με τις δικές μας μετρήσεις). Μετά την τιμή αυτή και για αποστάσεις 200 μm και 350 μm από τον πυθμένα του καναλιού, η μέση θεωρητική ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά και ανάλογα με την πειραματική ταχύτητα των φυσαλίδων και ο ρυθμός αύξησης είναι σχεδόν σταθερός. Ενώ, από την τιμή αυτή και έπειτα, και μόνο για απόσταση από τον πυθμένα 100 μm , η μέση θεωρητική ταχύτητα αυξάνεται ανάλογα με την πειραματική ταχύτητα, με πολύ διαφορετικό όμως ρυθμό - που αυξάνει - από ότι στις άλλες δύο αποστάσεις από τον πυθμένα. Κάτι τέτοιο ισχύει όπως είναι γνωστό και από το προφίλ ταχυτήτων σε ροή υγρού υμένα, όπου σε περιοχές πολύ κοντά στον πυθμένα η ταχύτητα μεταβάλλεται με πολύ γρήγορο ρυθμό από ότι σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού.

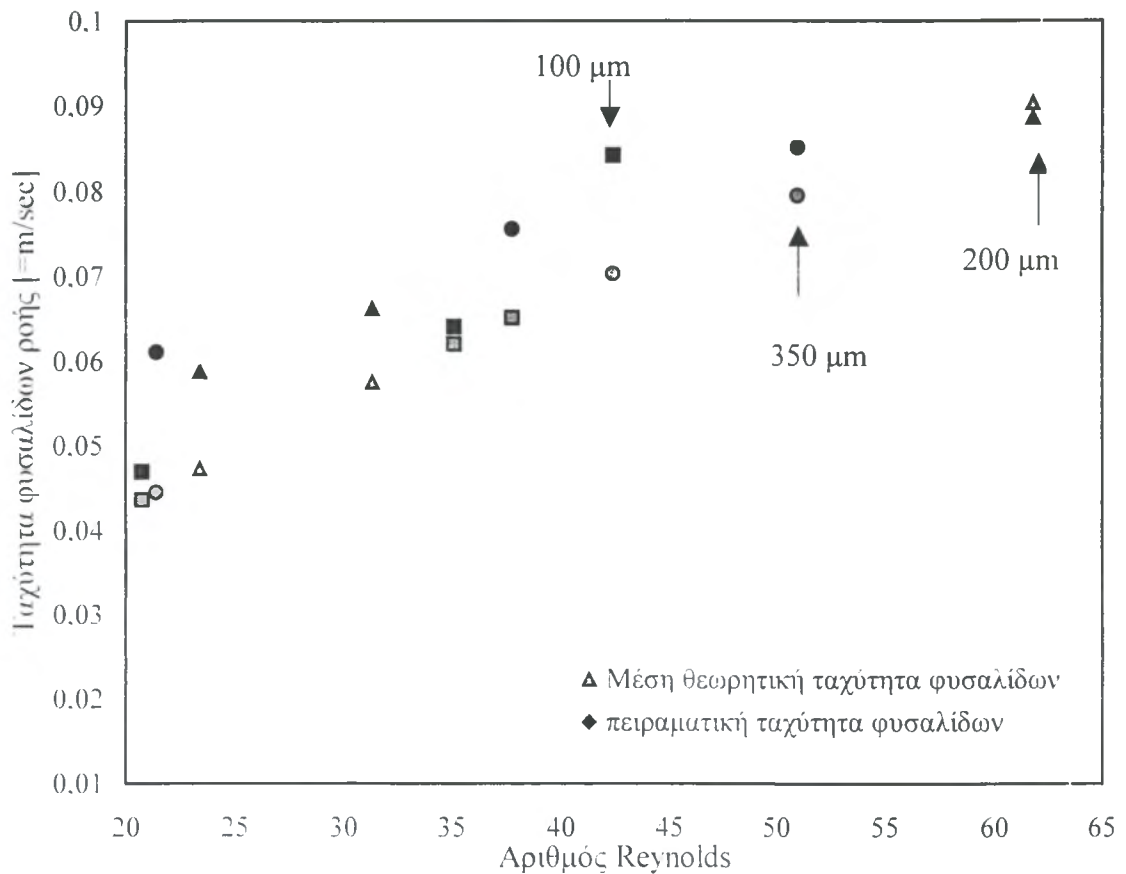


Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση της μέσης θεωρητικής ταχύτητας των φυσαλίδων συναρτήσει της πειραματικής ταχύτητας των φυσαλίδων με βάση τις αποστάσεις του μεταλλικού σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού.

Στο σχήμα 4.2 παριστάνεται γραφικά η μέση θεωρητική ταχύτητα που προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση 2.17 και η πειραματική των φυσαλίδων υδρογόνου που προκύπτει από τις μετρήσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται ο αριθμός Reynolds αυξάνεται σταδιακά η μέση ταχύτητα της ροής που προκύπτει από τη θεωρητική ανάλυση των εξισώσεων σε επίπεδο κεκλιμένο υμένα. Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση του αριθμού Reynolds η πειραματική ταχύτητα των φυσαλίδων της ροής που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με κάποια όμως διασπορά στις τιμές. Στο σχήμα 4.2 με τετράγωνα παριστάνεται η απόσταση

100 μm από τον πυθμένα του καναλιού, με τρίγωνα η απόσταση 200 μm , ενώ με κύκλους η απόσταση των 350 μm .



Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση της ταχύτητας των φυσαλίδων ροής, δηλαδή της μέσης θεωρητικής ταχύτητας των φυσαλίδων και της πειραματικής ταχύτητας συναρτήσει του αριθμού Reynolds για όλες τις αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού.

Διαπιστώνουμε από το παραπάνω σχήμα πως για πολύ μικρές αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού (100 μm), αρχικά οι δύο ταχύτητες συγκλίνουν η μία στην άλλη μέχρι κάποιον μέσο αριθμό Reynolds, ενώ μετά από αυτή την τιμή, αποκλίνουν. Για απόσταση 200 μm από τον πυθμένα, η απόκλιση των τιμών ξεκινά από την αρχή, για αριθμό Reynolds 23 και φθίνει σιγά σιγά σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds (μέχρι 62). Τέλος, για απόσταση 350 μm από τον πυθμένα, κι εδώ η απόκλιση των τιμών ξεκινά από την αρχή για αριθμό Reynolds 21 και μειώνεται με μικρό όμως

ρυθμό μέχρι τον Reynolds 51. Δηλαδή, η διαφορά στις αποκλίσεις των τιμών της μέσης θεωρητικής ταχύτητας από την πειραματική στην τελευταία περίπτωση είναι σχεδόν ίδια σε όλους τους αριθμούς Reynolds.

Για την καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας ροής και της απόστασης από τον πυθμένα του καναλιού γίνεται αδιαστατοποίηση κάποιων μεγεθών. Έτσι, αδιαστατοποιούμε δύο μεγέθη:

A) Το λόγο y/H_n , που εκφράζει την απόσταση του μεταλλικού σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού προς το θεωρητικό πάχος υμένα κατά Nusselt και

B) το λόγο U/U_{meso} , που εκφράζει την ταχύτητα στην κατεύθυνση της ροής προς τη μέση ταχύτητα της ροής του υμένα.

Τροποποιώντας τη σχέση 2.16 παίρνουμε την παρακάτω :

$$U = \frac{g_x}{\nu} \cdot H_n^2 \cdot \left[\left(\frac{y}{H_n} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{H_n} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

Η μέση ταχύτητα δίνεται από τη σχέση 2.17.

Προκύπτει πως αν διαιρέσουμε την 4.3 με την 2.17 παίρνουμε τον λόγο:

$$\frac{U}{U_{meso}} = 3 \cdot \left[\left(\frac{y}{H_n} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{H_n} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

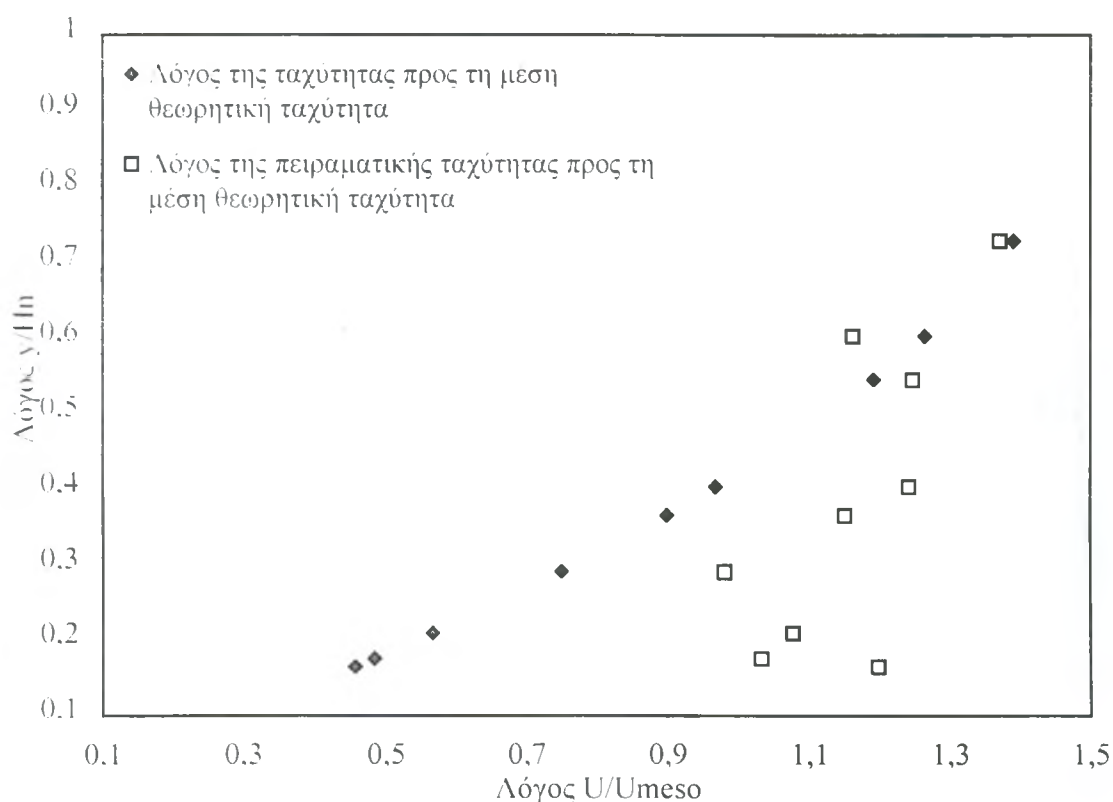
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές αδιαστατοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στο σχήμα 4.3

<i>Απόσταση του μεταλλικού σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού προς το θεωρητικό πάχος υμένα κατά Nusselt</i>	<i>Λόγος της ταχύτητας προς τη μέση θεωρητική ταχύτητα</i>	<i>Λόγος της πειραματικής ταχύτητας προς τη μέση θεωρητική ταχύτητα</i>
0,21063954	0,565365091	1,07639135
0,17678621	0,483478591	1,032359081
0,16600966	0,456690175	1,197650659
0,40472794	0,968476755	1,241336256

0,36714308	0,899238172	1,149896792
0,29278552	0,749771524	0,980440046
0,72978326	1,390474367	1,371057369
0,60390661	1,26466504	1,161554818
0,54629995	1,191234396	1,070982921

Πίνακας 4.4: Αδιάστατοι λόγοι ταχυτήτων και αποστάσεων για την καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας ροής και της απόστασης από τον πυθμένα του καναλιού.

Θέτοντας τα παραπάνω δεδομένα λαμβάνουμε το παρακάτω διάγραμμα :



Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση του λόγου U/U_{meso} , που εκφράζει την ταχύτητα στην κατεύθυνση της ροής προς τη μέση ταχύτητα της ροής του υμένα συναρτήσει του λόγου y/H_m , που εκφράζει την απόσταση του πλατινένιου σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού προς το θεωρητικό

Στο σχήμα 4.3 παρατηρούμε πως και οι δύο λόγοι ταχυτήτων των φυσαλίδων που έχουμε λάβει υπόψη κατά την μελέτη μας, είναι ομαδοποιημένοι και χωρισμένοι σε τρεις αυτοσχέδιες ομάδες, ανάλογα με την απόσταση από τον πυθμένα του καναλιού. Οι λόγοι ταχυτήτων που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και αντιστοιχούν σε απόσταση 350 μm από τον πυθμένα του καναλιού, συμπίπτουν με τις τιμές των λόγων των ταχυτήτων των φυσαλίδων (της ροής) που προκύπτουν από τη θεωρία, ενώ αυτοί οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση 200 μm από τον πυθμένα, συγκλίνουν στις τιμές τις ανάλογες που προκύπτουν από τη θεωρία, όμως δεν συμπίπτουν με αυτές. Οι δε λόγοι ταχυτήτων σε απόσταση 100 μm από τον πυθμένα του καναλιού, είναι απομακρυσμένοι από τις τιμές των λόγων ταχυτήτων των φυσαλίδων (της ροής) που προκύπτουν από τη θεωρία και βρίσκονται συγκεντρωμένοι σε μια άλλη περιοχή τιμών που έχει όμως ίδιο αδιάστατο αριθμό γHn .

Στην πειραματική μελέτη που διεξάγαμε, παρατηρείται ότι υπάρχει μια απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από αυτά της θεωρίας, κυρίως για πολύ μικρές αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού. Το σφάλμα αυτό στη λήψη τέτοιου είδους αποτελεσμάτων μπορεί να οφείλεται αρχικά στην ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος σε σχήμα Π, στην οποία το μεταλλικό σύρμα τοποθετείται και δένεται προσεκτικά. Η χαλάρωση του πλατινένιου σύρματος μπορεί να δώσει παλμό φυσαλίδων που να μην ανταποκρίνεται στα αναμενόμενα αποτελέσματα, συνεπώς τα αποτελέσματα που θα πάρουμε από τις μετρήσεις δεν θα συμβαδίζουν με τη θεωρία. Κάτι άλλο που θα μπορούσε να δημιουργήσει το παραπάνω σφάλμα, είναι η εικόνα που λαμβάνουμε από την κάμερα και η ανταπόκρισή της με την πραγματικότητα. Όπως είναι γνωστό, η κάμερα επικεντρώνεται σε κάποιο βάθος πεδίου, από το οποίο παίρνουμε και την αντίστοιχη εικόνα για τη ροή και τα δρώμενα σ' αυτήν. Αυτό μπορεί να μεταβληθεί κινώντας τη στήριξη της κάμερας, η οποία βασίζεται σε ατέρμονες κοχλίες – κάτι δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Μια μελλοντική βάση για την κάμερα κατασκευασμένη από αλουμίνιο και ρυθμιζόμενη κατάλληλα να μετακινείται αξονικά γρήγορα και εύκολα, θα συντελέσει στην διεξαγωγή πιο αξιόπιστων πειραμάτων και σίγουρα αποτελεσμάτων.

4.3 Ροή με στερεά σωματίδια ανίχνευσης

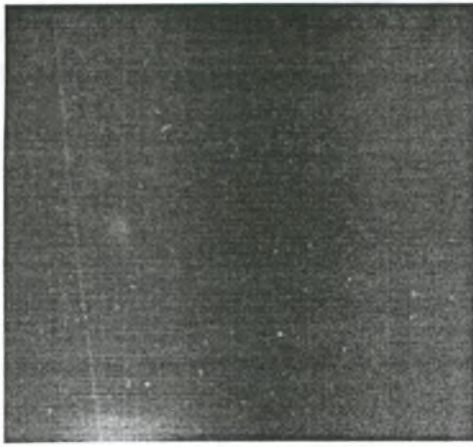
Για τη διεκπεραίωση του δευτέρου κύκλου πειραμάτων χρησιμοποιούμε την τεχνική οπτικοποίησης της ροής με στερεά σωματίδια ανίχνευσης πολυαμιδίου 12, των οποίων η προμήθεια έγινε από την εταιρεία DANTEC Dynamics. Τα μικροσωματίδια αυτά με μέση διάμετρο 20 μm , μέγεθος από 5 έως 35 μm και σχήμα κυκλικό αποτέλεσαν βάσιμο υλικό για τη μελέτη του προβλήματος με το οποίο ασχολούμαστε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ξεκινώντας τις διαδικασίες του πειράματος, προμηθεύουμε το κανάλι με κοινό νερό δικτύου όγκου 20 lt και με διαλυμένα σωματίδια πολυαμιδίου συγκέντρωσης 10 ppm (200mg/lt), 20 ppm (400 mg/lt) και 30 ppm (600 mg/lt) στα αντίστοιχα 20 λίτρα. Μετά θέτουμε το κανάλι σε λειτουργία και ανοίγουμε και την κάμερα.

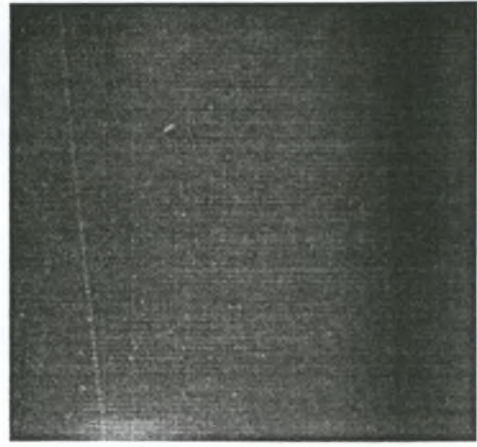
4.3.1 Ποιοτικά αποτελέσματα ροής με στερεά σωματίδια

Η μορφή των εικόνων που συλλέγονται από την πειραματική διαδικασία είναι της μορφής Windows Bitmaps 24 bit. Η μέθοδος απεικόνισης και δειγματοληψίας είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη σειρά πειραμάτων με χρήση φυσαλίδων υδρογόνου, η οποία περιγράφηκε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.3. Οι πειραματικές μετρήσεις αυτής της σειράς πειραμάτων γίνονται σε διαφορετική κλίση του καναλιού από ότι στην προηγούμενη περίπτωση. Η μείωσή της κλίσης σε 0.65° κρίθηκε αναγκαία και απαραίτητη, γιατί ήταν αδύνατη η μελέτη της κίνησης των μικροσωματιδίων ανίχνευσης λόγω της πολύ γρήγορης κίνησής τους σε κλίση καναλιού 3.4° .

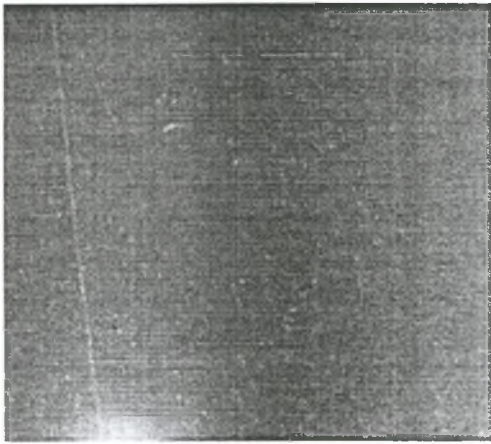
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία κατά την οποία φαίνεται η ροή των στερεών σωματιδίων με αρχική συγκέντρωση 10 ppm και αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από 16-102. Στην εικόνα 4.6(α) παρουσιάζεται η ροή εμπλουτισμένη με στερεά σωματίδια και αριθμό Reynolds 16, ενώ στην εικόνα 4.6(β) παρουσιάζεται η ροή με αριθμό Reynolds 34. Αντίστοιχα στην εικόνα 4.6(γ) παρουσιάζεται η ροή για αριθμό Reynolds 54 και στην εικόνα 4.6(δ) παρουσιάζεται η ροή με αριθμό Reynolds 102.



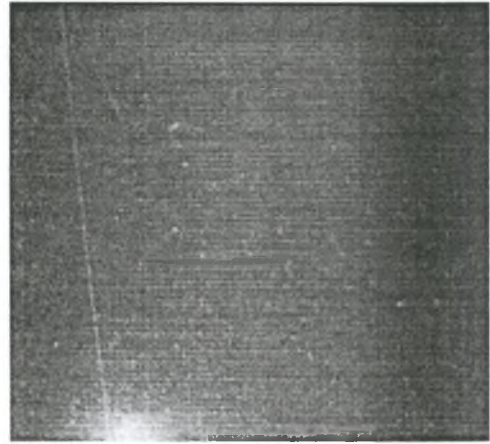
(α)



(β)



(γ)



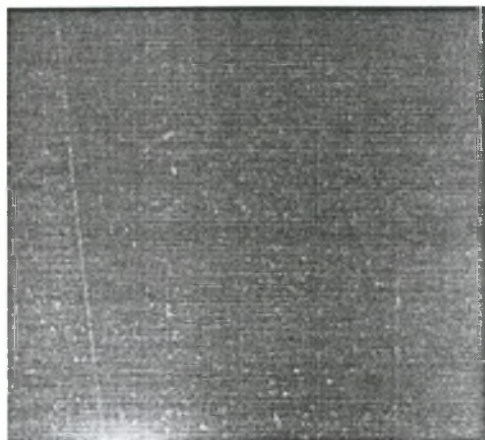
(δ)

Εικόνα 4.6: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των στερεών σωματιδίων με αρχική συγκέντρωση 10 ppm και αριθμούς Reynolds **α:** $Re = 16$, **β:** $Re = 34$, **γ:** $Re = 54$, **δ:** $Re = 102$

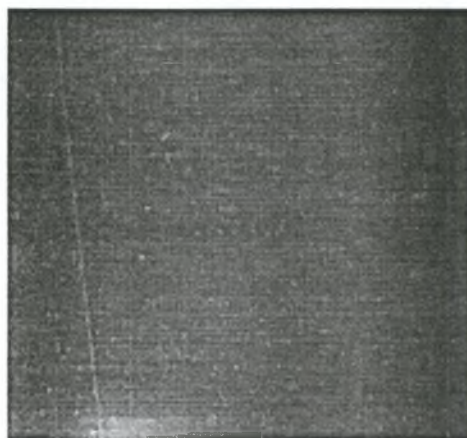
Και στις τέσσερις φωτογραφίες παρατηρούμε διαφορά στο μέγεθος των σωματιδίων, το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό Reynolds που έχουμε κάθε φορά. Σε κάθε φωτογραφία υπάρχει μια πληθώρα σωματιδίων με ένα συγκεκριμένο μέγεθος και κάποια άλλα σωματίδια πιο μεγάλα. Τα τελευταία είναι συσσωματώματα σωματιδίων που έχουν προκύψει από τη διαφορά ταχυτήτων ανάμεσα στα σωματίδια που κινούνται το ένα μετά το άλλο. Ακόμη, παρατηρείται το

γεγονός πως κάποια σωματίδια διακρίνονται καθαρότερα από κάποια άλλα που φαίνονται θαμπά.

Αλλάζοντας τη συγκέντρωση των σωματιδίων σε 20 ppm, προκύπτουν πειραματικά τέσσερις άλλες φωτογραφίες διαφορετικών αριθμών Reynolds. Έτσι, στην εικόνα 4.7(α) παρουσιάζεται η ροή εμπλουτισμένη με στερεά σωματίδια και αριθμό Reynolds 17, ενώ στην 4.7(β) παρουσιάζεται η ροή με αριθμό Reynolds 36. Αντίστοιχα στην εικόνα 4.7(γ) παρουσιάζεται η ροή για αριθμό Reynolds 55 και στην 4.7(δ) παρουσιάζεται η ροή με αριθμό Reynolds 102.



(α)



(β)



(γ)

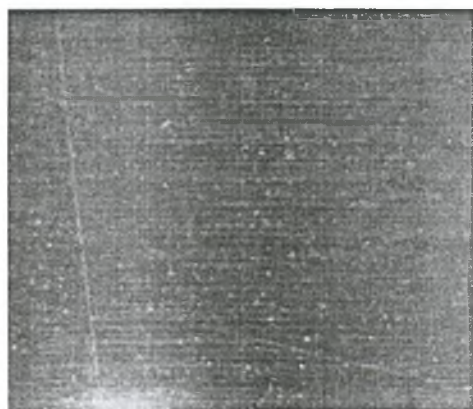


(δ)

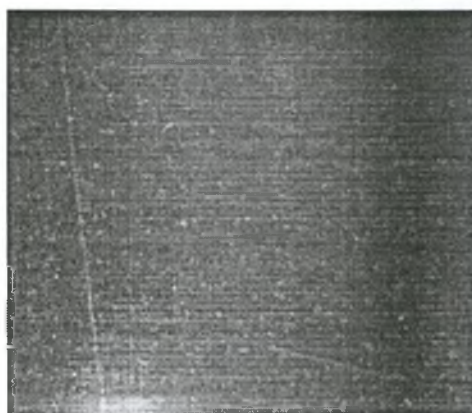
Εικόνα 4.7: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των στερεών σωματιδίων με αρχική συγκέντρωση 20 ppm και αριθμό Reynolds :**α:** $Re = 17$,
β: $Re = 36$, **γ:** $Re = 55$, **δ:** $Re = 102$

Στις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται πως έχει αυξηθεί η πυκνότητα των σωματιδίων στη ροή. Διακρίνεται ένα πυκνό κύμα σωματιδίων να ρέει ανάλογα με το n αριθμό Reynolds την κάθε φορά. Παρατηρούμε διαφορά στο μέγεθος των σωματιδίων όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, όπου είχαμε συγκέντρωση σωματιδίων 10 ppm. Δηλαδή, διακρίνονται σωματίδια μεγάλα, τα οποία είναι συσσωματώματα σωματιδίων που ενώθηκαν καθώς σωματίδια ταχύτερα παρέσυραν στο πέρασμά τους άλλα που είχαν μικρότερη ταχύτητα από αυτά. Ακόμη, υπάρχει διαφορά όσον αφορά στην ευκρίνειά τους.

Αλλάζοντας για άλλη μια φορά τη συγκέντρωση των σε 30 ppm αυτή τη φορά, συλλέγουμε πειραματικά τέσσερις άλλες φωτογραφίες διαφορετικών αριθμών Reynolds. Έτσι, στην εικόνα 4.8(α) παρουσιάζεται η ροή εμπλουτισμένη με στερεά σωματίδια με αριθμό Reynolds 17 και στην 4.8(β) παρουσιάζεται η ροή με αριθμό Reynolds 36. Αντίστοιχα, στην εικόνα 4.8(γ) παρουσιάζεται η ροή για αριθμό Reynolds 58, ενώ στην 4.8(δ) παρουσιάζεται η ροή με αριθμό Reynolds 101.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 4.8: Χαρακτηριστικές εικόνες από τη ροή των στερεών σωματιδίων με

αρχική συγκέντρωση 30 ppm και αριθμό Reynolds: **α:** $Re = 17$,

β: $Re = 36$, **γ:** $Re = 58$, **δ:** $Re = 101$

Κι εδώ οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν στις παραπάνω φωτογραφίες είναι ανάλογες με τις προηγούμενες. Έτσι, διαπιστώνεται αύξηση της πυκνότητας των σωματιδίων λόγω αύξησης φυσικά της συγκέντρωσης των πολυαμιδίων. Το κύμα σωματιδίων που ρέει διακρίνεται πολύ πυκνό. Κι εδώ παρατηρείται διαφορά στο μέγεθος των σωματιδίων όπως και στην ευκρίνειά τους, κάτι που έγινε αντιληπτό και ισχύει και στις προηγούμενες φωτογραφίες.

4.3.2 Ποσοτικά αποτελέσματα ροής με στερεά σωματίδια

Σ' αυτό το τμήμα απεικονίζονται γραφικά τα μεγέθη που προκύπτουν από τη ροή των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης πολυαμιδίου, όπως η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα των σωματιδίων, η μέση θεωρητική ταχύτητά τους και η πειραματική που προέκυψε από τις μετρήσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

Η πειραματική αυτή ταχύτητα που προαναφέρεται, βρίσκεται εφαρμόζοντας και χρησιμοποιώντας κατάλληλα και σωστά το υπολογιστικό πακέτο MotionScope PCI. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίζουμε – όπως κάναμε και στην πρώτη σειρά πειραμάτων- την απόσταση που διανύει ένα σωματίδιο ανίχνευσης ξεκινώντας από κάποιο σημείο αναφοράς για κάποιο χρονικό διάστημα, την απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων, την ταχύτητα που μπορεί να έχει το σωματίδιο ανίχνευσης σε κάποιο σημείο ή την ταχύτητα που αποκτά εφόσον έχει διανύσει κάποια συγκεκριμένη απόσταση. Κατά την διεξαγωγή του πειράματος, έγινε μελέτη πάνω στην πορεία κάποιων μικροσωματιδίων κατά τη ροή τους στο κανάλι και χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος αυτών, που κυμαίνονταν από οκτώ έως δέκα, ανάλογα κάθε φορά με την ευκρίνεια της εικόνας. Τα σωματίδια ανίχνευσης πολυαμιδίου που μελετήθηκαν δεν βρίσκονταν σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο της ροής, αλλά ήταν κατανεμημένα σε διάφορα σημεία κατά μήκος της ροής και σε ορισμένη απόσταση από το κάτω όριο της ροής που εμείς θεωρούσαμε, λόγω των ορίων της εικόνας.

Συγκεκριμένα, έστω ότι παρατηρούσαμε ένα μικροσωματίδιο ανίχνευσης, το οποίο βρίσκονταν στο αριστερό μέρος της ροής- το οποίο λαμβάναμε και ως σημείο αναφοράς. Υπολογίζαμε πάλι με τον ίδιο τρόπο όπως και στις φυσαλίδες υδρογόνου την ταχύτητά του σε δύο και σε πέντε αριθμούς λήψεως (δηλαδή σε δύο και σε πέντε frames) και ομοίως κάναμε και με τα υπόλοιπα κατά μήκος της ροής. Έτσι, λαμβάναμε μια μέση πειραματική ταχύτητα των σωματιδίων ανίχνευσης. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως τα σωματίδια ανίχνευσης που λαμβάναμε προς μελέτη ήταν όλα της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους και ευκρίνειας.

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων όπως επίσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων και την εφαρμογή των τύπων 4.1, 4.2 και 2.17.

Συγκέντρωση της στερεών σωματιδίων ανίχνευσης (rpm)	Επιτάχυνση της βαρύτητας $g [=m^2/sec]$	Κινηματικό ιξώδες $\nu [=m^2/sec]$	Γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες $\varphi = 0,65^*$ 3,14/180	Πυκνότητα $\rho [=Kg/m^3]$	Μαζική παροχή $Q_0 [=kg/min]$
	9,81	0,000001	0,01133889	1000	
10					0,245
10					0,51
10					0,84
10					1,535
20					0,26
20					0,545
20					0,83
20					1,535
30					0,26
30					0,545
30					0,875

30					1,525
----	--	--	--	--	-------

Πίνακας 4.5: Δεδομένα για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, όπως η Συγκέντρωση στερεών σωματιδίων ανίχνευσης, η επιτάχυνση της βαρύτητας, το κινηματικό ιξώδες, η γωνία κλίσης του καναλιού σε μοίρες, η πυκνότητα και η μαζική παροχή στην έξοδο του καναλιού.

Ογκομετρική παροχή $q [=m^2/sec]$	Πάχος υμένα κατά Nusselt $Hn [=m]$	Πάχος υμένα κατά Nusselt $Hn [=μm]$	Αριθμός Reynolds
1.63333E-05	0.00076089	760,890146	16,333
0,000034	0,000971531	971,5309871	34
0,000056	0,001147342	1147,342357	56
0.000102333	0,001402715	1402,71484	102,33
1.73333E-05	0,000776112	776,1119688	17,33
3.63333E-05	0,000993266	993,2656862	36,33
5.53333E-05	0,001142771	1142,771224	55,33
0.000102333	0.001402715	1402.71484	102.33
1.73333E-05	0,000776112	776,1119688	17,33
3.63333E-05	0,000993266	993.2656862	36,33
5.83333E-05	0,001163061	1163.061329	58,33
0.000101667	0,001399662	1399,662132	101.67

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η ογκομετρική παροχή, το πάχος υμένα κατά Nusselt, και ο αριθμός Reynolds.

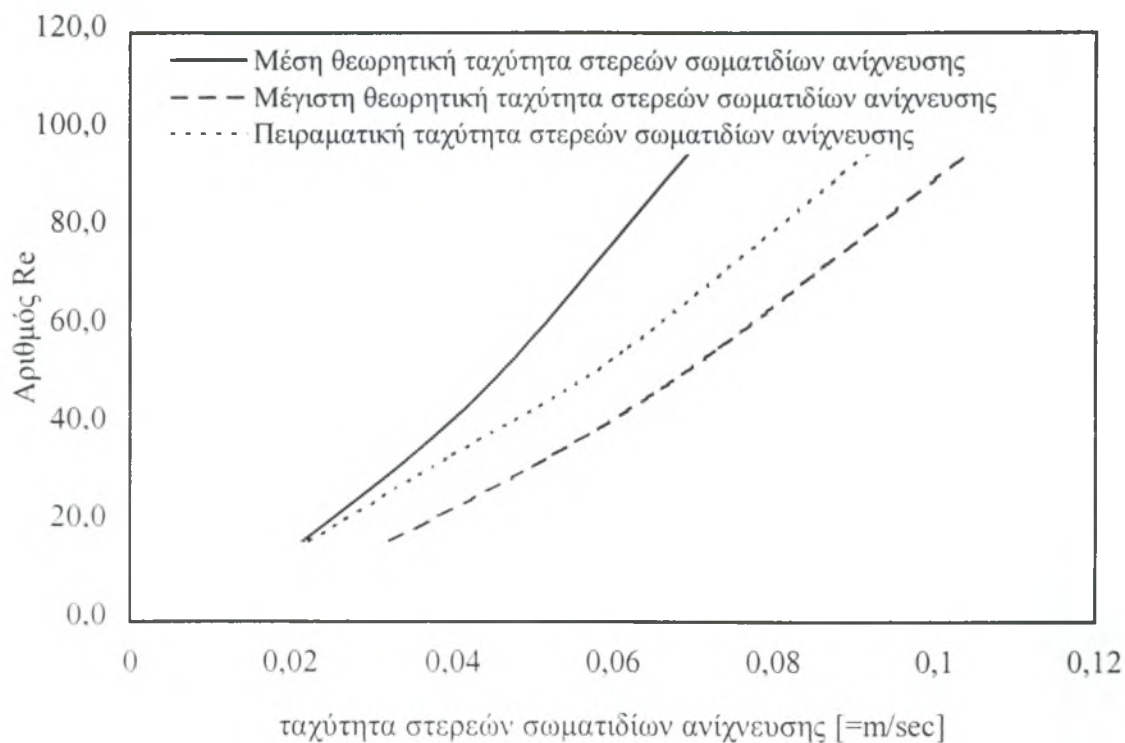
<i>Μέση θεωρητική ταχύτητα U_{meso} [=m/sec]</i>	<i>Μέγιστη θεωρητική ταχύτητα U_{max} [=m/sec]</i>	<i>Πειραματική ταχύτητα U [=m/sec]</i>
0,02146609	0,03219913	0,02223686
0,03499631	0,05249447	0,03996517
0,04880845	0,07321267	0,06186892
0,07295377	0,10943065	0,096683583
0,02233355	0,03350032	0,0231236
0,03657967	0,05486951	0,04630675
0,04842031	0,07263046	0,068173
0,07295377	0,10943065	0,10619425
0,02233355	0,03350032	0,02563817
0,03657967	0,05486951	0,04972075
0,05015499	0,07523249	0,06730679
0,07263658	0,10895487	0,09755983

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, όπως η

μέση θεωρητική ταχύτητα, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα και η πειραματική ταχύτητα.

Στο σχήμα 4.4 παρατηρούμε τη μεταβολή του αριθμού Reynolds συναρτήσει της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων πολυαμιδίου, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις 2.17 και 2.18 αντίστοιχα, καθώς και της ταχύτητας που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις μέσω του υπολογιστικού πακέτου σε συγκέντρωση 10 rpm. Διαπιστώνουμε πως όσο αυξάνει ο αριθμός Reynolds, τόσο αυξάνουν ανάλογα και γραμμικά και οι τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με τα σωματίδια πολυαμιδίου. Αυτό που είναι άξιο προσοχής είναι ότι για αριθμό Reynolds 17.33, η μέση θεωρητική ταχύτητα των στερεών σωματιδίων

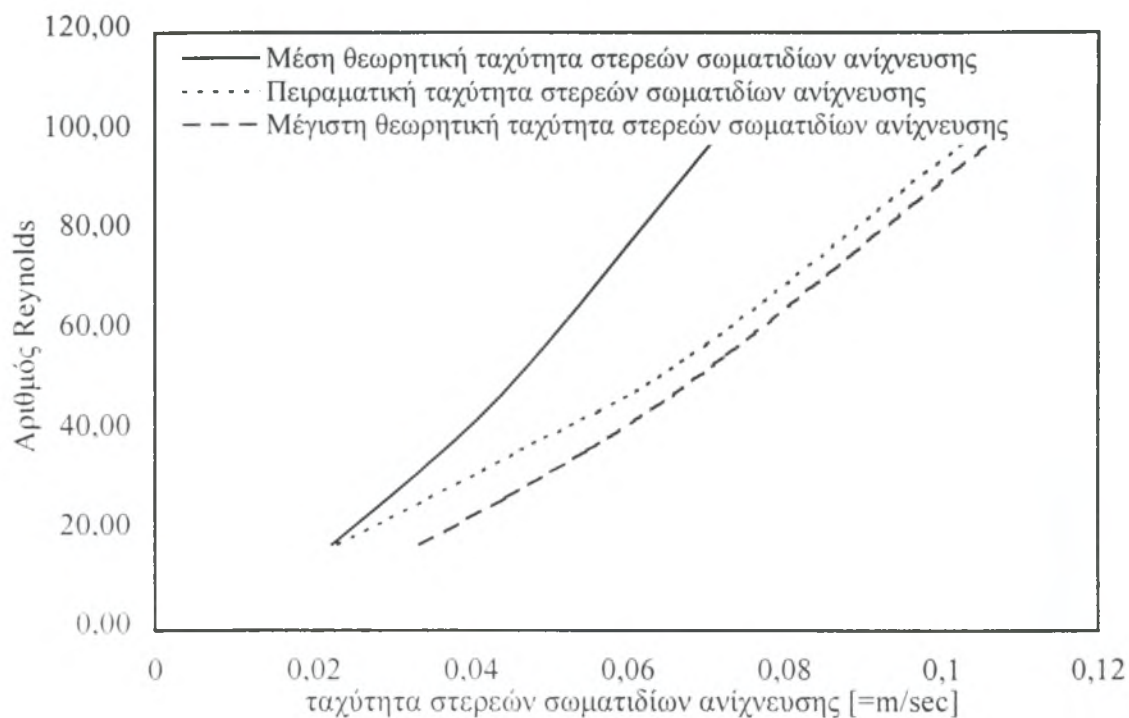
ταυτίζεται με την πειραματική, ενώ γενικά η ταχύτητα που προέκυψε από τα πειράματα τείνει στην μέγιστη ταχύτητα.



Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση της ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης, δηλαδή της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης καθώς και της ταχύτητας που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 10 ppm.

Στο σχήμα 4.5 παρατηρούμε τη μεταβολή του αριθμού Reynolds συναρτήσει της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων πολυαμιδίου, καθώς και της πειραματικής ταχύτητας για συγκέντρωση 20 ppm. Η διαπίστωση που προκύπτει από το παρακάτω σχήμα είναι πως όσο αυξάνει ο αριθμός Reynolds, τόσο αυξάνουν σχεδόν ανάλογα και οι τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με τα σωματίδια πολυαμιδίου. Σ' αυτή την περίπτωση των 20 ppm συγκέντρωσης, παρατηρούμε πως για αριθμό Reynolds 16,33 η πειραματική ταχύτητα που προκύπτει, σχεδόν ταυτίζεται με τη μέση θεωρητική ταχύτητα αυτών των στερεών σωματιδίων πολυαμιδίου και συνεχίζει έπειτα να αυξάνεται γραμμικά,

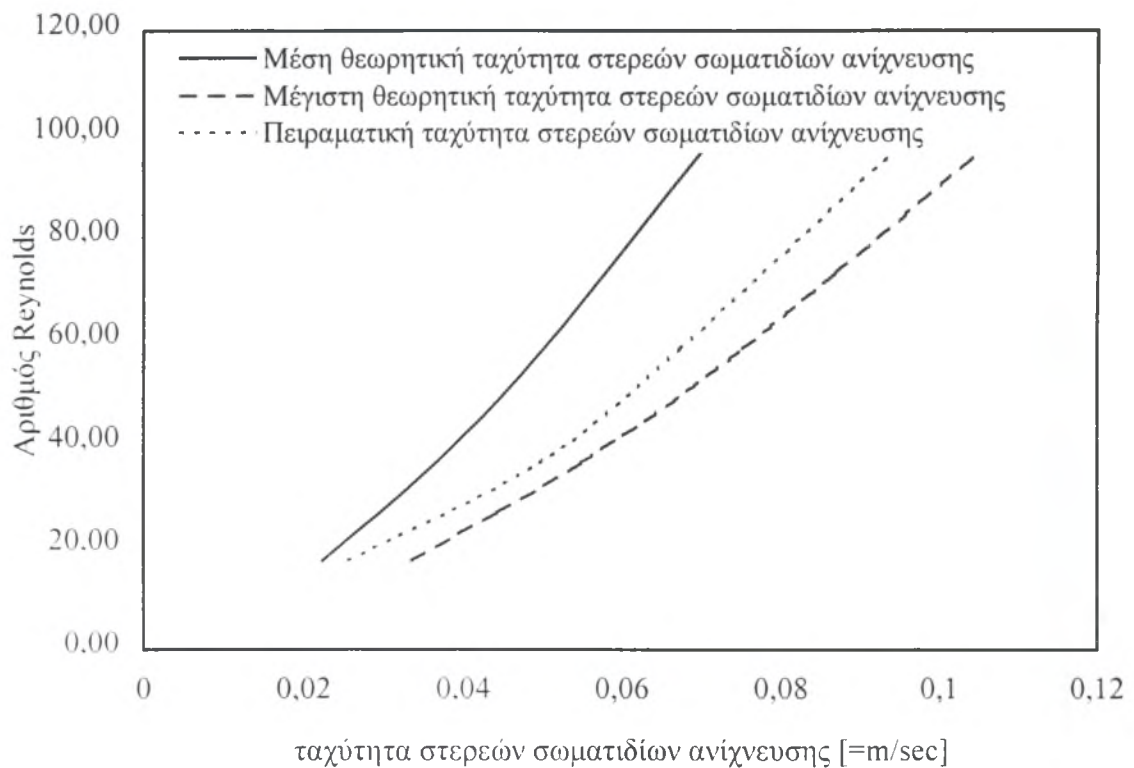
ενώ από κάποιον αριθμό Reynolds και μετά, η πειραματική ταχύτητα πλησιάζει πολύ κοντά στη μέγιστη ταχύτητα αυτών.



Σχήμα 4.5: Γραφική παράσταση της ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης .δηλαδή της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης καθώς και της ταχύτητας που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις συναρτήσει του αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 20 ppm.

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στο σχήμα 4.6, στο οποίο παρατηρούμε τη μεταβολή του αριθμού Reynolds συναρτήσει της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων πολυαμιδίου, καθώς και της πειραματικής για συγκέντρωση 30 ppm. Αυτό που παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα είναι κάτι ανάλογο με τις παρατηρήσεις μας στις προηγούμενες περιπτώσεις συγκεντρώσεων των δύο παραπάνω σχημάτων, δηλαδή όσο αυξάνει ο αριθμός Reynolds, τόσο αυξάνουν σχεδόν ανάλογα και οι τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με τα σωματίδια ανίχνευσης. Διαπιστώνουμε πως μετά από κάποιον μέσο αριθμό Reynolds η πειραματική ταχύτητα είναι πιο κοντά στη μέγιστη ταχύτητα των στερεών

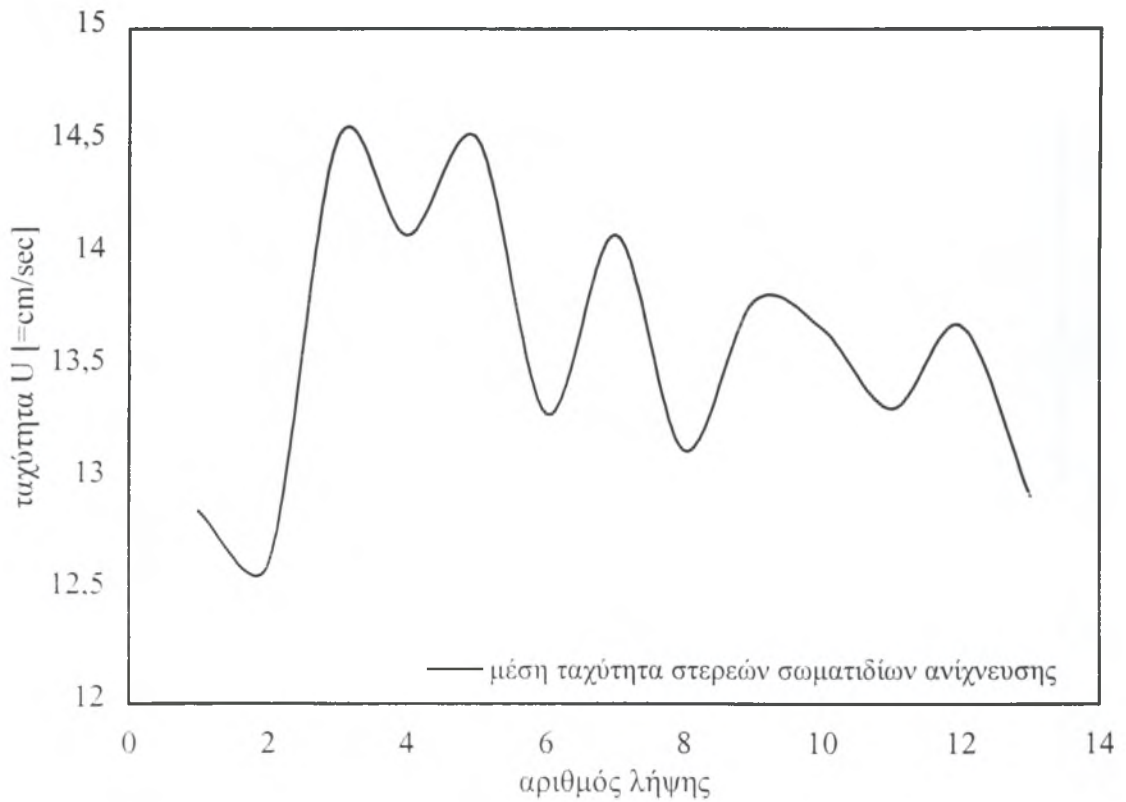
σωματιδίων, ενώ για αριθμούς Reynolds μέχρι 17,33 η πειραματική ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά.



Σχήμα 4.6: Γραφική παράσταση της μέσης θεωρητικής και της μέγιστης θεωρητικής ταχύτητας των στερεών σωματιδίων ανίχνευσης καθώς και της πειραματικής συναρτήσεως του αριθμού Reynolds για συγκέντρωση 30 ppm.

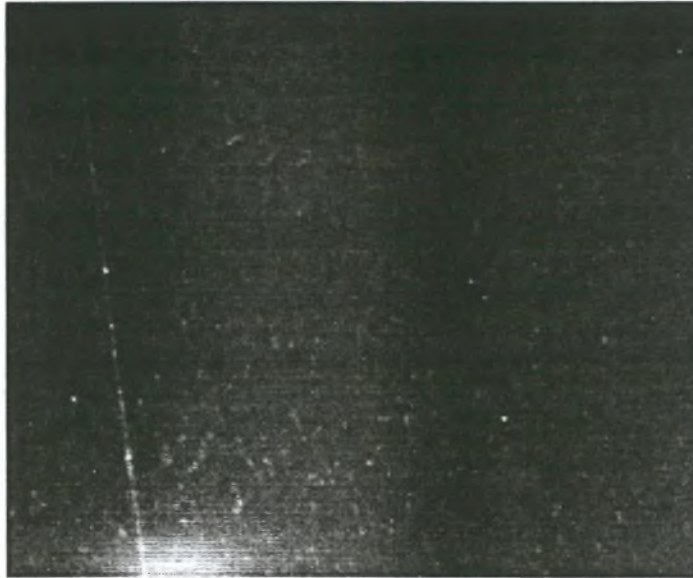
Στις παραπάνω εικόνες που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία οπτικοποίησης της ροής με στερεά σωματίδια ανίχνευσης παρατηρήσαμε κάποια σωματίδια φωτεινά και κάποια θαμπά. Έστω, παραδείγματος χάρι ότι παρατηρούμε το video με σωματίδια συγκέντρωσης 20ppm και αριθμό Reynolds 102. Επικεντρώνουμε την προσοχή μας σε ένα φωτεινό σωματίδιο στην αρχή της εικόνας το οποίο κινείται αργά και παρακολουθούμε την πορεία του κατά μήκος της οθόνης του ηλεκτρονικού υπολογιστή μέχρι να το χάσουμε από το οπτικό μας πεδίο. Το σωματίδιο αυτό κινείται αργά σε σχέση με τα άλλα σωματίδια στον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds και βρίσκεται σε απόσταση 2,917 mm από την αρχή της εισόδου του στο πεδίο της camera. Το σωματίδιο διανύει απόσταση 10,583 mm με ταχύτητα που μεταβάλλεται συναρτήσεως του χρόνου και του αριθμού λήψης της τιμής της

ταχύτητας που λαμβάνεται η κάθε φωτογραφία. Αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 4.7.



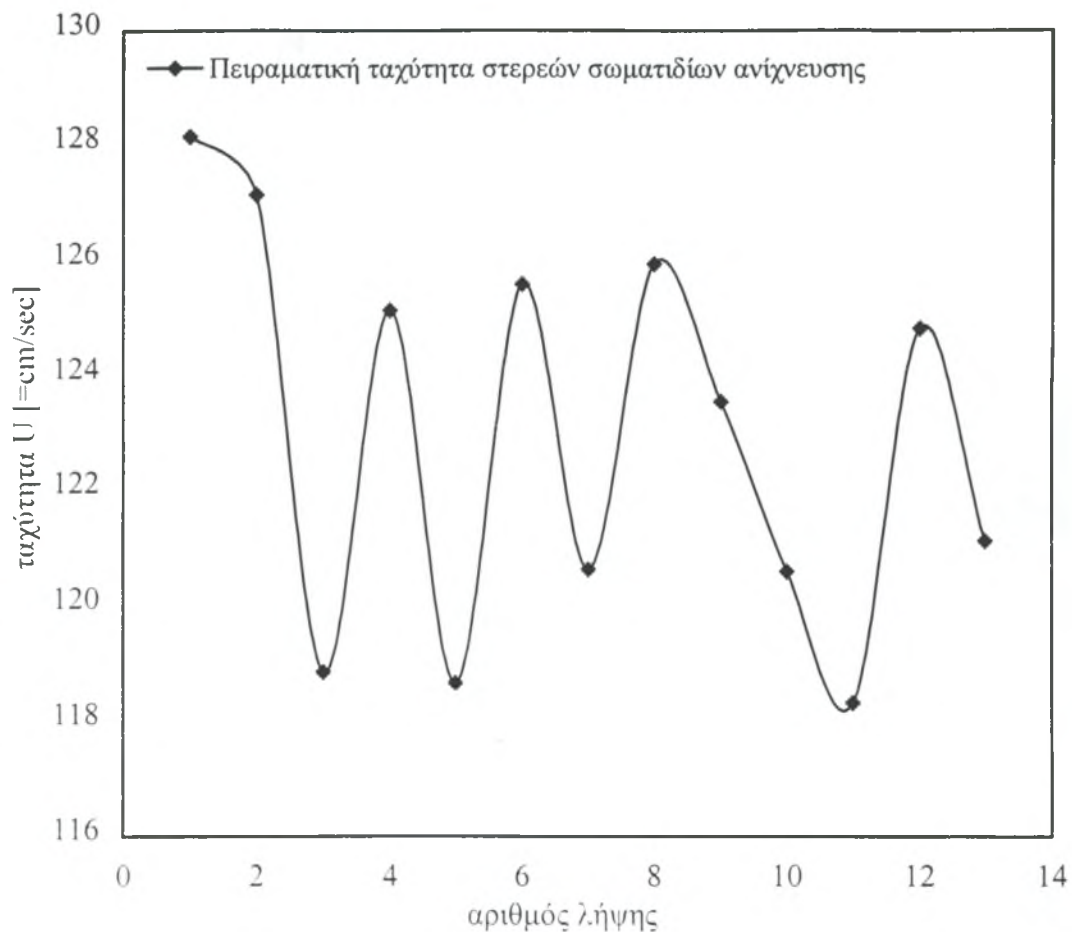
Σχήμα 4.7: Γραφική παράσταση της μέσης ταχύτητας ενός φωτεινού σωματιδίου ανίχνευσης συναρτήσει του αριθμού λήψης της κάθε φωτογραφίας του στην περίπτωση συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων 20 ppm και αριθμού Reynolds 102.

Το φωτεινό σωματίδιο κινείται με μικρή ταχύτητα στο πεδίο ροής και αποκλίνει από την κάθετη πορεία του. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 4.9.



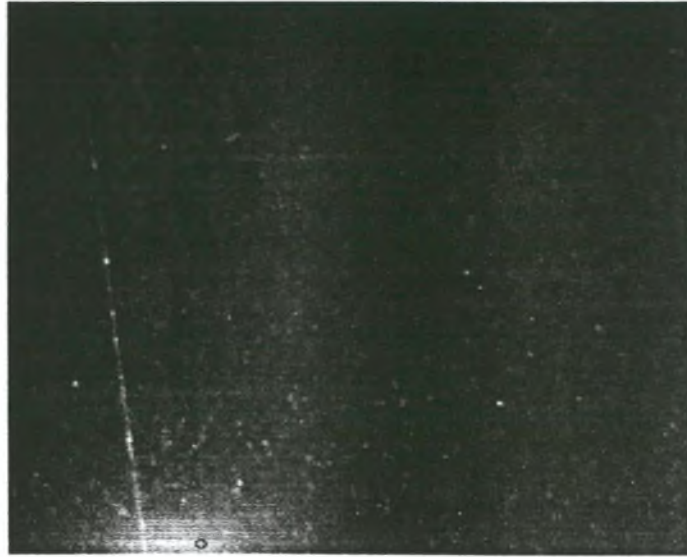
Εικόνα 4.9: Χαρακτηριστική εικόνα από την κίνηση φωτεινού σωματιδίου από πολυαμίδιο στο κανάλι ροής με αριθμό Reynolds 102 και συγκέντρωση σωματιδίων πολυαμιδίου 20 ppm

Το ίδιο γίνεται και με ένα άλλο σωματίδιο που δεν διακρίνεται καλά στην κάμερα. Το σωματίδιο αυτό είναι θαμπό και κινείται γρήγορα σε σχέση με τα άλλα σωματίδια στον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds και βρίσκεται σε απόσταση 1,157 mm από την αρχή της εισόδου του στο πεδίο της camera. Παρακολουθούμε την πορεία του κατά μήκος της οθόνης του ηλεκτρονικού υπολογιστή μέχρι να το χάσουμε από το οπτικό μας πεδίο. Το σωματίδιο διανύει απόσταση 12,343 mm με ταχύτητα που μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου και αριθμού λήψης της τιμής της ταχύτητας που λαμβάνεται η κάθε φωτογραφία. Αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 4.8.



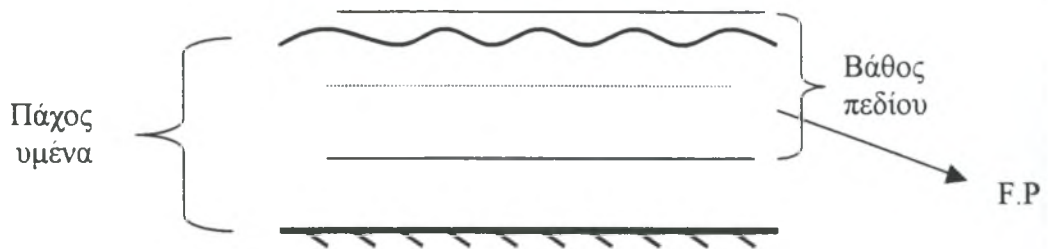
Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση της μέσης ταχύτητας ενός θαμπό σωματιδίου ανίχνευσης συναρτήσει του αριθμού λήψης της κάθε φωτογραφίας στην περίπτωση συγκέντρωσης στερεών σωματιδίων 20 ppm και αριθμού Reynolds 102.

Το θαμπό σωματίδιο κινείται με μεγάλη ταχύτητα στο πεδίο ροής και αποκλίνει από την κάθετη πορεία του. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10:Χαρακτηριστική εικόνα από την κίνηση θαμπού σωματιδίου από πολυαμίδιο στο κανάλι ροής με αριθμό Reynolds 102 και συγκέντρωση σωματιδίων πολυαμιδίου 20 ppm

Στο συγκεκριμένο πεδίο παρατηρούνται και φωτεινά και θαμπά σωματίδια. Το οπτικό μας πεδίο είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα 4.11.

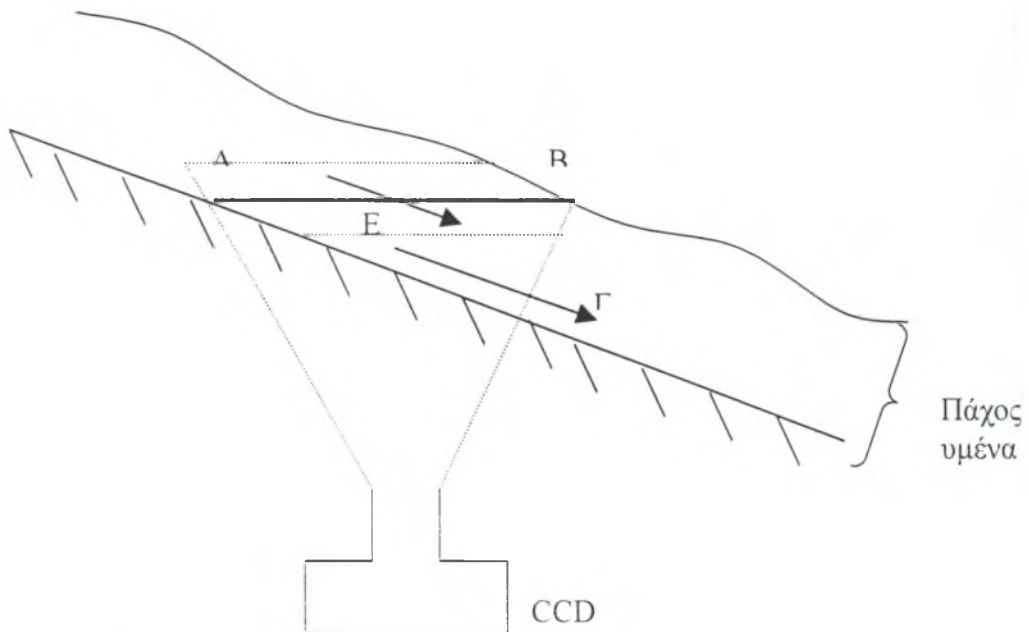


Εικόνα 4.11 :Σχεδιασμός οπτικού πεδίου

Το σημείο εστίασης ορίζεται ως focal point (F.P). Σωματίδια παρατηρούνται όχι μόνο πάνω στο F.P αλλά και εκατέρωθεν αυτού, πάντα όμως μεταξύ κάποιων ορίων. Τα σωματίδια αυτά που είναι φωτεινά βρίσκονται σε μικρό βάθος στην αρχή του υμένα. Αντιθέτως, τα θαμπά σωματίδια είναι αυτά που βρίσκονται εκατέρωθεν του σημείου εστίασης με μεγάλο βάθος πεδίου. Αυτά είναι που φαίνεται να κινούνται και με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds. Αν αλλάξει η εστίαση, δηλαδή θεωρήσουμε ως σημείο εστίασης κάποιο

άλλο και όχι αυτό που υπήρχε έως τώρα, τότε ίσως αυτά που πριν ήταν θολά και ισχνά να διακρίνονται τώρα έντονα, ενώ εκείνα που πριν διακρινόταν έντονα και διαυγή τώρα να φαίνονται θολά.

Στις πειραματικές μας μετρήσεις, λόγω της κλίσης του καναλιού, υιοθετήθηκε η παρακάτω διάταξη της εικόνας 4.12, η οποία δείχνει το τρίγωνο εστίασης που σχηματίζεται από την κάμερα CCD και αποτελεί και την αιτία στρέβλωσης των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.12 : Αιτία στρέβλωσης των αποτελεσμάτων

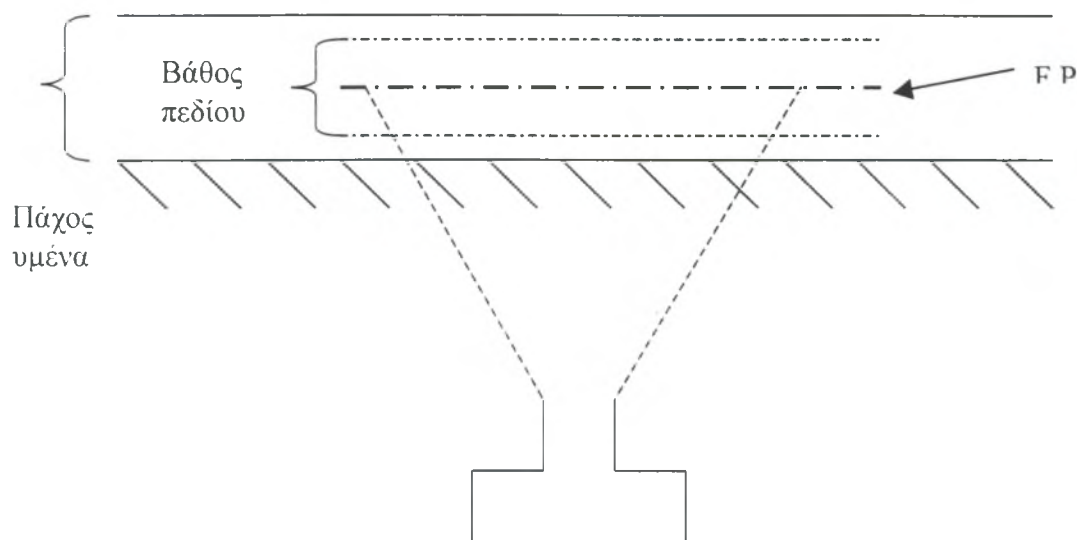
Λόγω του ότι το κανάλι έχει κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, **το οπτικό πεδίο δεν είναι παράλληλο προς το πεδίο ροής**. Το οπτικό πεδίο που δίνεται από την κάμερα είναι από το Α έως το Β και το Γ. Δηλαδή εμείς παρατηρούμε όλα τα στερεά σωματίδια πολυαμιδίου που βρίσκονται μέσα σε αυτό το νοητό τρίγωνο και διακρίνονται οι κινήσεις διαφόρων από αυτά. Έτσι, παραδείγματος χάρη, ένα σωματίδιο που μπαίνει στο οπτικό πεδίο στο σημείο Α κινείται ως το Γ και εξέρχεται από το οπτικό πεδίο συνεχίζοντας την κίνησή του στο κανάλι. Υπάρχει περίπτωση στο σημείο Ε να δούμε ένα νέο σωματίδιο το οποίο μπαίνει στο οπτικό μας πεδίο και έτσι το παρακολουθούμε έως την έξοδό του από αυτό κάπου ανάμεσα στα σημεία Β και Γ. Με αυτήν τη διάταξη διαπιστώνεται η παρακολούθηση ενός σωματιδίου που

βρίσκεται μόνο μέσα στο οπτικό πεδίο. Το σωματίδιο είναι διακριτό με έντονη μορφή και κινείται με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα στο πεδίο ροής.

Παρόλα αυτά, παρατηρούνται συνεχώς και σωματίδια θολά, ισχνά που κινούνται και αυτά με κάποια άλλη ταχύτητα. Τα σωματίδια αυτά βρίσκονται εκτός του οπτικού μας πεδίου σε διαφορετικό βάθος πεδίου και γι' αυτό το λόγο δεν διακρίνονται καλά.

Για να βρεθεί το κατάλληλο βάθος πεδίου στο οποίο είμαστε, απαιτείται «ανεβοκατέβασμα» της camera, ανοιγοκλείσιμο του διαφράγματος, τοποθέτηση κατάλληλων φακών (π.χ φακός μικροσκοπίου), κ.ά.

Για την επίλυση του προβλήματος των «θαμπών» σωματιδίων απαιτείται η δημιουργία κατάλληλης διάταξης όπως της εικόνας 4.13, στην οποία το οπτικό πεδίο να είναι παράλληλο με το πεδίο ροής.



Εικόνα 4.13 :Σχεδιασμός οπτικού πεδίου παράλληλο με το πεδίο ροής .

Έτσι, σύμφωνα με την εικόνα 4.13, επειδή το οπτικό πεδίο της κάμερας και συνεπώς και το δικό μας είναι παράλληλο στο πεδίο ροής των μικροσωματιδίων ανίχνευσης, είναι δυνατό τα σωματίδια που κινούνται σύμφωνα με τη ροή να έχουν όλα τον ίδιο βαθμό ευκρίνειας. Δηλαδή, με τον τρόπο αυτό, τα στερεά σωματίδια θα έχουν όλα την ίδια φωτεινότητα ή «θαμπάδα».

Αν δεν υπάρχουν εμφανή κύματα στη ροή των μικροσωματιδίων, τότε αυτή χαρακτηρίζεται ευσταθής και η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα θεωρείται επίπεδη. Αντίθετα, αν υπάρχουν κύματα στη ροή μέσα στο κανάλι, τότε είναι εμφανές το

φαινόμενο της αστάθειας και η ελεύθερη επιφάνεια του υμένα χαρακτηρίζεται κυματοειδής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία. Μελετήθηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι οπτικοποίησης της ροής υγρού υμένα, γι' αυτό το λόγο θα δοθούν συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να πραγματοποιηθούν μετρήσεις ταχύτητας της ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα, όταν χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι μέθοδοι ποσοτικής οπτικοποίησης της ροής, όπως η χρήση φυσαλίδων υδρογόνου και μικροσωματιδίων.

Συμπεράσματα οπτικοποίησης της ροής υγρού υμένα με χρήση φυσαλίδων υδρογόνου

⊕ Χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα πειραματική συσκευή (κανάλι) και κατασκευάστηκε ιδιοκατασκευή στήριξης μεταλλικού σύρματος (πλατίνα) σε σχήμα Π και συσκευή χρονισμού του ηλεκτρικού παλμού. Η μέθοδος απεικόνισης στηρίζεται στην ύπαρξη κατάλληλων προβολέων φωτός, ενώ η μέθοδος δειγματοληψίας σε ένα ψηφιακό σύστημα καταγραφής εικόνας με υψηλή ταχύτητα καταγραφής.

⊕ Οι προκύπτουσες μετρήσεις έγιναν σε επίπεδο τοίχωμα με δεδομένη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η θερμοκρασία, ο χρόνος ηλεκτρόλυσης, ο χρόνος παύσης ανάμεσα σε περιόδους ηλεκτρόλυσης και οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Η θέση της ιδιοκατασκευής σύρματος σε σχήμα Π, που ουσιαστικά αποτελεί το σημείο έναρξης δημιουργίας φυσαλίδων, παρέμενε σε ένα σταθερό σημείο ως προς το χώρο.

⊕ Διαπιστώνεται πως η δημιουργία των φυσαλίδων στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η ίδια, παραμένει σταθερή και ανάλογη του ηλεκτρικού παλμού που προσδίδεται εξωτερικά. Η απόκριση του συνολικού συστήματος δημιουργίας φυσαλίδων αντανακλάται πλήρως στη δημιουργούμενη εικόνα. Η πυκνότητα των φυσαλίδων ποικίλλει σε πολλές περιπτώσεις κατά μήκος του παλμού. Αλλού είναι

αραιή, αλλού πυκνή και αλλού παρατηρείται ομοιογένεια. Στο μεταλλικό σύρμα, το οποίο γεννά τις φυσαλίδες, διαφόρων μεγεθών φυσαλίδες βρίσκονται προσκολλημένες σε αυτό και δεν επιτρέπουν τη διέλευση της ροής νερού στα σημεία προσκόλλησης. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία κορυφών και κοιλάδων στο μέτωπο γένεσης των φυσαλίδων, με αποτέλεσμα τη διαφορά πυκνοτήτων εγκάρσια ως προς τη ροή.

⚡ Από την ποσοτική μελέτη και εξέταση της ροής με φυσαλίδες υδρογόνου προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για όλες τις αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού. Ειδικότερα, προκύπτει πως η πειραματική ταχύτητα των φυσαλίδων υδρογόνου είναι ανάλογη της μέσης θεωρητικής ταχύτητας- η οποία δίνεται από τη σχέση 2.17- για αποστάσεις 200 μm και 350 μm από τον πυθμένα. Για μικρότερη απόσταση από τον πυθμένα παρατηρείται αναλογία μεταξύ των δύο ταχυτήτων, η οποία από κάποιον αριθμό Reynolds και μετά παύει να ισχύει.

⚡ Ακόμη, με την αύξηση του αριθμού Reynolds, παρατηρείται ανάλογη αύξηση και στην ταχύτητα των φυσαλίδων υδρογόνου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σύγκλιση της πειραματικής ταχύτητας των φυσαλίδων με τη μέση θεωρητική ταχύτητα της ροής, με κάποια μικρή διασπορά. Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω γίνεται αδιαστατοποίηση κάποιων μεγεθών και προκύπτει πως όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση του πλατινένιου σύρματος από τον πυθμένα του καναλιού, τόσο καλύτερα συγκλίνουν οι λόγοι των ταχυτήτων που προέρχονται από τα πειραματικά δεδομένα με τους λόγους των ταχυτήτων των φυσαλίδων ροής που προκύπτουν από τη θεωρία.

Συμπεράσματα οπτικοποίησης της ροής υγρού υμένα με χρήση μικροσωματιδίων

✚ Χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα πειραματική συσκευή (κανάλι) όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Η μέθοδος απεικόνισης στηρίζεται στην ύπαρξη κατάλληλων προβολέων, ενώ η μέθοδος δειγματοληψίας σε ένα ψηφιακό σύστημα καταγραφής εικόνας με υψηλή ταχύτητα καταγραφής.

✚ Οι προκύπτουσες μετρήσεις έγιναν σε επίπεδο τοίχωμα με δεδομένη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, διαφορετική από την κλίση στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα προηγούμενα πειράματα. Η θερμοκρασία και οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

✚ Το μεγαλύτερο ποσοστό των σωματιδίων διαθέτει ένα συγκεκριμένο μέγεθος, ενώ ένα χαμηλό ποσοστό αυτών είναι μεγαλύτερου μεγέθους. Τα τελευταία είναι συσσωματώματα σωματιδίων που προκύπτουν από τη διαφορά ταχυτήτων ανάμεσα στα σωματίδια που κινούνται το ένα μετά το άλλο. Δηλαδή ταχύτερα σωματίδια παρασέρνουν στο πέρασμά τους άλλα που έχουν μικρότερη ταχύτητα από αυτά. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διαφορά μεγέθους που παρουσιάζουν τα σωματίδια κι έτσι μικροσωματίδια διαφορετικών μεγεθών ή συσσωματώσεις σωματιδίων διαφόρων μεγεθών παρουσιάζουν διαφορές στις ταχύτητές τους. Ακόμη, διαπιστώνεται διαφορά όσον αφορά στην ευκρίνεια των μικροσωματιδίων ανίχνευσης. Μία από τις γενεσιουργές αιτίες αυτού του προβλήματος ευκρίνειας είναι η θέση του σημείου εστίασης και η παραλληλότητα (καθετότητα) της κάμερας με το επίπεδο του υμένα ροής.

✚ Από την ποσοτική μελέτη και εξέταση της ροής με στερεά σωματίδια ανίχνευσης προκύπτουν κάποια συμπεράσματα, τα οποία είναι σχεδόν ίδια για όλες τις περιπτώσεις συγκεντρώσεων. Έτσι, με την αύξηση του αριθμού Reynolds, παρατηρείται ανάλογη αύξηση και στην ταχύτητα των μικροσωματιδίων. Συγκεκριμένα, η πειραματική ταχύτητα με την οποία κινούνται τα μικροσωματίδια τείνει στην μέγιστη θεωρητική ταχύτητα αυτών, η οποία δίνεται από τη σχέση 2.18. Διαπιστώνεται επ' αυτού ότι τα μικροσωματίδια, τα οποία γίνονται ορατά από την κάμερα και μελετάται η κίνηση τους στον υμένα, βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του τελευταίου.

Συμπερασματικά και για τις δύο παραπάνω μεθόδους μπορεί να ειπωθεί το εξής: Η μέθοδος φυσαλίδων υδρογόνου αποδείχτηκε μερικά επιτυχής, γιατί οι μετρήσεις που έγιναν πειραματικά είναι σε συμφωνία με θεωρητικές προβλέψεις μακριά από το τοίχωμα, ενώ κοντά σ' αυτό παρατηρείται απόκλιση. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος μικροσωματιδίων έδωσε περισσότερο ομοιόμορφα αποτελέσματα, αλλά προς το παρόν περιορίζεται στον υπολογισμό μέσης ταχύτητας για ολόκληρο το βάθος του υμένα. Με κατάλληλες βελτιώσεις που προτείνονται παρακάτω και οι δύο τεχνικές έχουν τη δυνατότητα παραγωγής αξιόπιστων τοπικών μετρήσεων ταχύτητας.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

✚ Μια άλλη μελέτη που μπορεί να γίνει και να δώσει ίσως πιο αξιόπιστα αποτελέσματα πάνω στη μέτρηση της ταχύτητας του υγρού υμένα πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα, είναι η χρησιμοποίηση κι αυτή τη φορά στερεών σωματιδίων ανίχνευσης με χρήση όμως φθορίζουσας μεθόδου ταχυμετρίας εικόνων (FPIV). Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί μελλοντικά στο εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών με πολύ όμως προσοχή και αφού προηγηθεί μελέτη των αντίστοιχων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεκπεραίωση του πειράματος.

Συγκεκριμένα η παραπάνω μέθοδος στηρίζεται στον εμβαπτισμό των μικροσωματιδίων πολυαμιδίου σε χρωστική ουσία – στην προκειμένη περίπτωση σε ουρανίνη – και στην μετέπειτα απόσταξή τους, έχοντας ως σκοπό τη δημιουργία σωματιδίων που να φθορίζουν. Η επιλεγθείσα χρωστική ουσία σε υπεριώδεις ακτίνες φωτός εκπέμπει πρασινοκίτρινο φως σε συγκεκριμένα μήκη κύματος (525- 580 nm). Οι ιδιότητες του ρευστού και οι παράμετροι του πειράματος διατηρούνται ίδιες, όπως και με τη δεύτερη σειρά πειραμάτων που αναλύθηκε και μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη της χρωστικής ουσίας. Λαμπτήρες υψηλής έντασης τίθενται ως πηγές υπεριώδους φωτός. Η κάμερα που θα χρησιμοποιηθεί και το υπολογιστικό πακέτο είναι κατάλληλα για τη μελέτη της τεχνικής FPIV. Η διεξαγωγή του πειράματος θα στηριχθεί στην μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό, η οποία είναι μια πειραματική τεχνική μέτρησης του στιγμιαίου πάχους του υμένα χωροχρονικά.

Έτσι, το πείραμα τίθεται σε εφαρμογή. Η μόνη διαφορά από την τεχνική οπτικοποίησης με στερεά σωματίδια ανίχνευσης είναι πως αυτή τη φορά στο κανάλι θα ρέουν φθορίζοντα μικροσωματίδια. Με τη χρήση υπεριώδους φωτός τα εμποτισμένα με χρωστική ουσία σωματίδια θα φθορίσουν, δηλαδή θα εκπέμπουν φως σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Με τη μέθοδο απεικόνισης με φθορισμό επιτυγχάνεται η συλλογή εικόνων, οι οποίες δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από τον υμένα. Η ένταση του φωτός επηρεάζεται ανάλογα από την απόσταση στην οποία βρίσκεται το υπεριώδες φως σε σχέση με τον υμένα. Στόχος είναι η απομόνωση του συγκεκριμένου φωτός, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας εικόνας με εξαιρετικά φθορίζοντα σωματίδια.

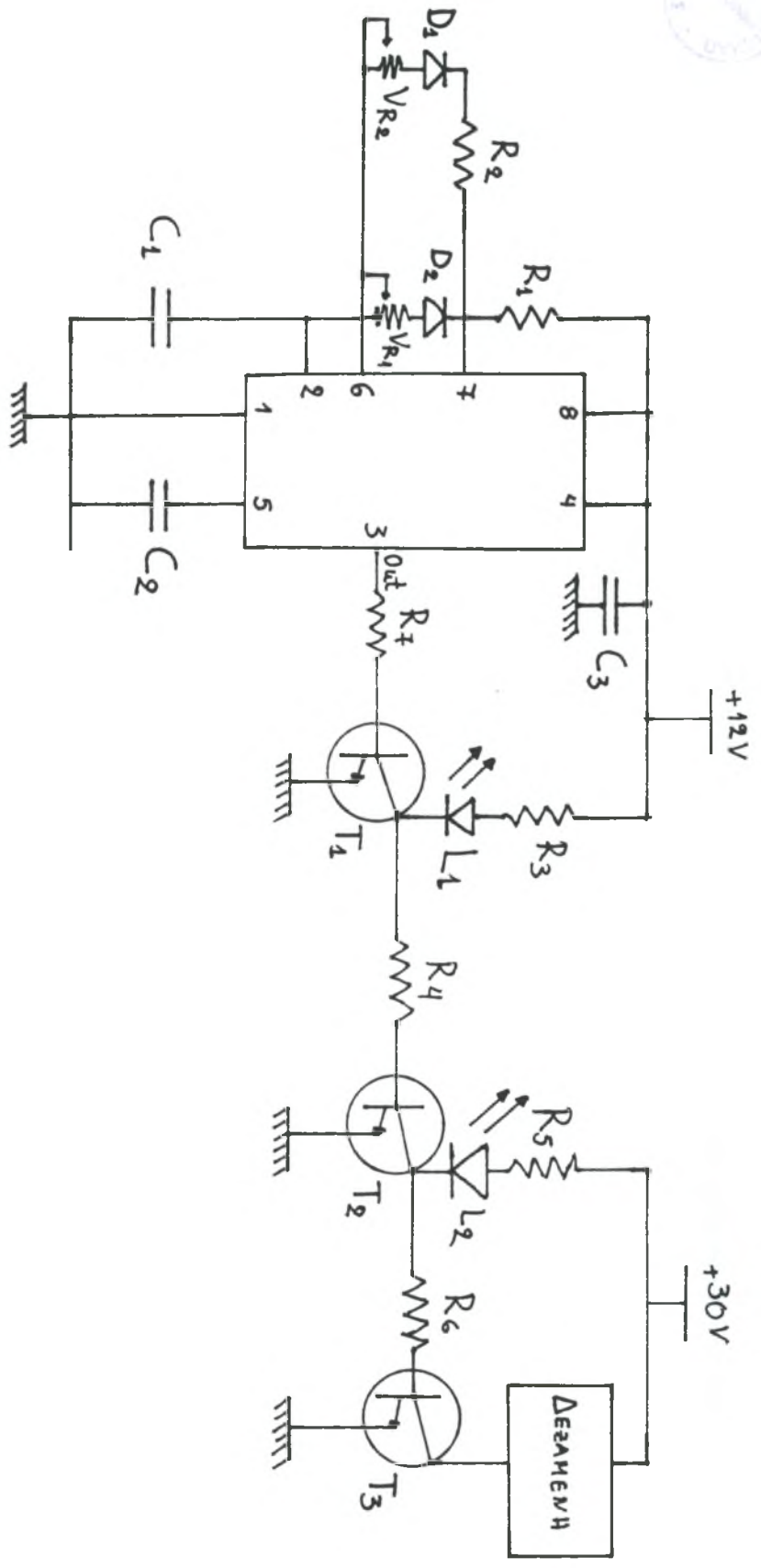
✚ Κατά την πρώτη πειραματική μελέτη, παρατηρείται μια απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από αυτά της θεωρίας, κυρίως για πολύ μικρές αποστάσεις από τον πυθμένα του καναλιού. Το σφάλμα αυτό στη λήψη τέτοιου είδους αποτελεσμάτων μπορεί να οφείλεται στη χαλάρωση του πλατινένιου σύρματος και στην εικόνα που λαμβάνουμε από την κάμερα και την ανταπόκρισή της με την πραγματικότητα. Όπως είναι γνωστό, η κάμερα επικεντρώνεται σε κάποιο βάθος πεδίου, από το οποίο παίρνουμε και την αντίστοιχη εικόνα για τη ροή και τα δρώμενα σ' αυτήν. Αυτό μπορεί να μεταβληθεί κινώντας τη στήριξη της κάμερας, η οποία βασίζεται σε ατέρμονες κοχλίες – κάτι δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Για την διόρθωση των αποτελεσμάτων καλό θα ήταν στο μέλλον να δημιουργηθεί κατάλληλη πειραματική διάταξη για την όσο το δυνατόν καλύτερη στήριξη της πλατίνης. Μια μελλοντική βάση για την κάμερα κατασκευασμένη από αλουμίνιο και ρυθμιζόμενη κατάλληλα να μετακινείται αξονικά γρήγορα και εύκολα, θα συντελέσει στην διεξαγωγή πιο αξιόπιστων πειραμάτων και σίγουρα αποτελεσμάτων.

✚ Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ευκρίνειας στη δεύτερη σειρά πειραμάτων καλό είναι να βρεθεί το κατάλληλο βάθος πεδίου στο οποίο βρίσκονται τα υπό παρατήρηση μικροσωματίδια. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται δημιουργία κατάλληλης διάταξης στην οποία το οπτικό πεδίο να είναι παράλληλο με το πεδίο ροής. Ακόμη με «ανεβοκατέβασμα» της camera, ανοιγοκλείσιμο του διαφράγματος, τοποθέτηση κατάλληλων φακών (π.χ φακός μικροσκοπίου), κ.ά είναι δυνατή η διεξαγωγή αξιόπιστων πειραμάτων και ορθών αποτελεσμάτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. **Liu, J. & Gollub, J.P., (1994):** Solitary wave dynamics of film flows. *Phys. Fluids* **6**, 1702-1712.
2. **Kapitza, P.L., Kapitza, S.P., (1949):** Wave flow of thin fluid layers of liquid. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **19**, 105; also in collected works of L. P. Kapitza, ed. D. Ter Haar. Oxford: Pergamon (1965).
3. **Βλαχογιάννης, Μ.Α., (2000):** Πειραματική Μελέτη της Ροής Υγρού Υμένα πάνω σε Επίπεδο και σε Κυματοειδές Τοίχωμα. *διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*
4. **N. A. Malamataris, M. Vlachogiannis & V. Bontozoglou (2002):** Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions. *Phys. Fluids*, **14**, 1082-1094.
5. **Παππά. Ι.Γ., (2001):** Πιστοποίηση συστήματος PIV για τη μελέτη φυσικής συναγωγής σε υαλομάζα. *διπλωματική εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*
6. **Μπεργελές, Γ., Παπαντώνης, Δ., Τσαγγάρης, Σ., (Αθήνα 1998):** Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστομηχανικών Μεγεθών.
7. **Iritani, Y., Kasagi, N., Hirata, M., (1983):** Technical Notes: Direct Velocity Measurement in Low-Speed Water Flows by Double-wire hydrogen-bubble Technique. *Experiment in Fluids* **1**, 111-112.
8. **McMahon, H., Jagoda, J., Komerath, N., Seitzman, J.,** Flow Visualization (1999-2002). Georgia Tech. College of Engineering, School Of Aerospace Engineering-*Internet Marketing Assignment.*
9. **Kaveh, A.,** Visualization of flows in electronic systems. (May 2001), *Internet Marketing Assignment* www.electronics-cooling.com .
10. **Gerhart, P.M., Gross, R.J.,Hochstein, J. I., (1993):** Fundamentals of Fluid Mechanics. Addison- Wesley Publishing Company.
11. **White, F.M., (1994):** Fluid Mechanics. McGraw- Hill, Inc.
12. **Yang, W.-J., (1989):** Handbook of Flow Visualization, Hemisphere Publishing Corporation.
13. **Τσιγκλιφής, Κ., (2002):** Πειραματική Μελέτη Ροής Υγρού Υμένα σε Επίπεδο Κεκλιμένο Τοίχωμα με Εξωτερική Διαταραχή. *διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



$$T_{om} = 0,693 (R_1 + V_{R1}) \cdot C_1$$

$$T_{off} = 0,693 (R_2 + V_{R2}) \cdot C_1$$