



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

Αριθ. Εισ.: 1851/1
Ημερ. Εισ.: 18-06-2004
Δωρεά: Συγγραφέως
Ταξιδετικός Κωδικός: Δ
620.106
ΣΠΗ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Θέμα:

**"Παρατηρήσεις μη γραμμικών φαινομένων
και τρισδιάστατων κοπυθειών υγρού υμένω"**

Σπήλιος Δημήτριος

Επιβλέπων: Δρ. Μποντόζογλου Β.
Αναπληρωτής Καθηγητής

Βόλος, Ιανουάριος 2000



αρ. εισ.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000047034

Στις τρεις γυναίκες της ζωής μου.....

.....στη Γεωργία

στην Εύη και

στη Χριστίνα.....

Ευχαριστίες

Το αν η μεταπτυχιακή μου εργασία ήταν ένα δύσκολο έργο ή όχι, μόνο ένας μπορεί να το κρίνει. Πρόκειται για τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας, τον κ. Μποντόζογλου Βασίλειο, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που όχι μόνο με ανέχτηκε όλο αυτό το διάστημα, αλλά με στήριξε και με βοήθησε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Η αμέριστη συμπαράστασή του και το ενδιαφέρον του έκαναν το διάστημα της διαμονής μου στο εργαστήριο φυσικών και χημικών διεργασιών μια αξέχαστη εμπειρία.

Στους κυρίους Βλάχο Ν. – Καθηγητή του τμήματος, Βαλουγεώργη Δ. – Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος, Παπαπολυμέρου Γ. – Διδάσκων ΠΔ 407/80 και Λεκάκη Ι. – Διδάσκων ΠΔ 407/80, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ. Όχι μόνο γιατί δέχτηκαν να είναι εξεταστές της μεταπτυχιακής μου εργασίας, αλλά γιατί πιστεύω ότι η συνεργασία μου μαζί τους ήταν επικερδής.

Δεν θα μπορούσε να λείπει από τον ευχαριστήριο κατάλογο αυτό ο Βλαχογιάννης Μιχάλης, Υποψήφιος διδάκτορας του τμήματος. Σαν πραγματικός φίλος που είναι, με στήριξε όλο αυτό το διάστημα και κέρδισε αξία την απέραντη ευγνωμοσύνη μου.

Έκπληξη αποτέλεσε για μένα η συνεργασία μου με ένα νέο μέλος των μηχανολόγων μηχανικών του Π.Θ., τη Χριστίνα Εδιππίδη. Ένας χρόνος καθημερινής συνεργασίας μαζί της ήταν αρκετός για να καταλάβω ότι πρόκειται για πολύ μεγάλο παλικάρι. Δεν ήταν λίγες οι φορές που ενώ εγώ δεν μπορούσα να αντεπεξέλθω στις απαιτήσεις των καταστάσεων, η δύναμη της ενέπνευσε και τους δύο μας. Την ευχαριστώ εκ βάθους καρδιάς.

Επίσης ευχαριστώ την οικογένειά μου για την άφθονη συναισθηματική, ψυχολογική και βεβαίως βεβαίως υλική βοήθεια που μου προσέφερε.

Τέλος, ένα ευχαριστώ στους φίλους μου. Σε αυτούς που βρέθηκαν κοντά μου όλο αυτό το διάστημα, αλλά και σε αυτούς που δεν ήταν εκεί. Ξέρω ότι ήθελαν και ότι αν μπορούσαν θα με στήριζαν. Γι' αυτό εξάλλου είναι και φίλοι μου.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιβολή εξωτερικών διαταραχών κατά τη ροή λεπτού υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα οδηγεί στη δημιουργία κυμάτων. Η κατανόηση των μηχανισμών και των φαινομένων που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα, ήταν ο στόχος της παρούσας εργασίας.

Οι παράμετροι του προβλήματος είναι η γωνία κλίσης του καναλιού, ο μέσος αριθμός Reynolds, το είδος της διαταραχής (frequency, amplitude), το ιξώδες του διαλύματος (διάλυμα καθαρού νερού ή νερού γλυκερίνης). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον ακριβή προσδιορισμό του πάχους του υμένα ήταν η μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method). Εννοείται ότι, για τον φθορισμό του υμένα, είναι απαραίτητη η εισαγωγή κατάλληλης χρωστικής ουσίας και η χρήση πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας. Το πάχος του υμένα προκύπτει από τη μέτρηση της έντασης του ορατού φωτός που εκπέμπεται από αυτόν.

Την παρούσα εργασία απασχόλησαν κυρίως οι τρισδιάστατες αστάθειες που παρατηρούνται υπό ορισμένες πειραματικές συνθήκες. Παρόλα αυτά, παρατίθενται και δεδομένα από τη διδιάστατη εξέλιξη των κυμάτων, για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων. Για τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται και ποσοτικές συσχετίσεις των παραμέτρων του προβλήματος.

Πίνακας περιεχομένων

| | Σελίδα |
|--|--------|
| 1. Εισαγωγή..... | 6 |
| 2. Θεωρητική ανάλυση..... | 8 |
| 2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... | 8 |
| 2.2 Ανάλυση του προβλήματος της ροής λεπτού υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο..... | 24 |
| 2.3 Θεωρία ευστάθειας..... | 29 |
| 3. Πειραματική διαδικασία..... | 32 |
| 3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης..... | 32 |
| 3.2 Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό..... | 38 |
| 3.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας..... | 41 |
| 3.3.1 Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων..... | 41 |
| 3.3.2 Διαδικασία συλλογής-αποθήκευσης δεδομένων | 42 |
| 3.3.3 Επεξεργασία εικόνας..... | 43 |
| 4. Ποιοτικές παρατηρήσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων..... | 46 |
| 4.1 Πειράματα σε κλίση μια μοίρα..... | 46 |
| 4.2 Πειράματα σε κλίση δύο μοίρες..... | 51 |
| 4.3 Πειράματα σε κλίση τρεις μοίρες..... | 55 |
| 4.4 Πειράματα σε κλίση πέντε μοίρες..... | 63 |
| 4.5 Πειράματα σε κλίση επτά μοίρες..... | 80 |
| 4.6 Σύνοψη των ποιοτικών παρατηρήσεων..... | 96 |
| 5. Επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων..... | 98 |
| 5.1 Καμπύλη ευστάθειας-χρονική εξέλιξη των κυμάτων.... | 98 |
| 5.2 Φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων..... | 103 |
| 5.3 Μήκος κύματος των «βαθουλωμάτων»..... | 107 |
| 6. Συμπεράσματα..... | 109 |
| 7. Βιβλιογραφία..... | 111 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε παγκόσμια κλίμακα έχουν γίνει ποικίλες θεωρητικές προσεγγίσεις για τη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο τοίχωμα. Ο λόγος στον οποίο οφείλεται το μεγάλο ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο φαινόμενο, είναι ότι πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο παρουσιάζεται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Συσκευές όπως συμπυκνωτές, εξατμιστήρες και στήλες απορρόφησης με δομημένα πληρωτικά υλικά είναι μερικά από τα παραδείγματα εμφάνισης της εν λόγω ροής [1], [2].

Έχει παρατηρηθεί ότι η επιβολή εξωτερικών διαταραχών προκαλεί την δημιουργία κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο θεωρητικό ενδιαφέρον, ενώ ταυτόχρονα βρίσκει και μεγάλη πρακτική εφαρμογή. Η επιρροή των κυματισμών θεωρείται καθοριστική για τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας τα οποία λαμβάνουν χώρα σε βιομηχανικές συσκευές διεργασιών [1], [2].

Η πειραματική αλλά και θεωρητική δουλειά σε παγκόσμιο επίπεδο, όπως αυτή αναλύεται στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, αποτέλεσε τον οδηγό για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Πρόκειται γενικά για ένα πρόβλημα αρκετά δύσκολο. Στην απλούστερη του μορφή είναι δυνατό να επιλυθεί αναλυτικά. Η επίλυση αυτή καθώς και οι βασικές αρχές της θεωρίας ευστάθειας παρατίθενται πάλι στο κεφάλαιο της θεωρητικής ανάλυσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης και τα διάφορα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Δίνεται μια ιδιαίτερη βαρύτητα στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του πάχους του υμένα. Πρόκειται για τη μέθοδο απεικόνισης με

φθορισμό, η οποία αποτέλεσε το κύριο εργαλείο για τις ποσοτικές μετρήσεις αλλά και για τις ποιοτικές παρατηρήσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και η ποιοτική ανάλυση αυτών. Τα αποτελέσματα έχουν ομαδοποιηθεί με βάση την εκάστοτε κλίση του καναλιού. Με τον τρόπο αυτό είναι ευκολότερη η παρακολούθηση αυτών. Επακόλουθα γίνεται ευκολότερη και η κατανόηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος πάνω στο υπό εξέταση φαινόμενο. Κλείνοντας το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

Βέβαια, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ελήφθησαν δεδομένα και για τη διδιάστατη εξέλιξη των κυμάτων. Για τα δεδομένα αυτά είναι εφικτή η δημιουργία γραφικών παραστάσεων από τα οποία προκύπτουν ποσοτικές συσχετίσεις για τα διάφορα εμπλεκόμενα μεγέθη. Οι παραστάσεις αυτές παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο. Μαζί με αυτές τις παραστάσεις παρατίθενται και στοιχεία για την εξέλιξη των κυμάτων και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους, πάντα για την περίπτωση διδιάστατης ροής. Στα πειράματα όπου κατά τη ροή του υμένα παρουσιάστηκαν τρισδιάστατες αστάθειες δεν κατέστη εφικτή η παραγωγή αντίστοιχων διαγραμμάτων. Η ίδια η τρισδιάστατη δομή καθιστά αδύνατη τη δημιουργία γραφημάτων αντίστοιχα καλής ποιότητας.

Μετά από την – ποιοτική κυρίως – ανάλυση των τρισδιάστατων ασταθειών που παρουσιάζονται κατά τη ροή του λεπτού υγρού υμένα, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο εν λόγω πεδίο (κεφάλαιο 6). Με την αναφορά στα βιβλιογραφικά βοηθήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την θεωρητική αλλά και πειραματική προσέγγιση του προβλήματος τελειώνει η εργασία αυτή.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

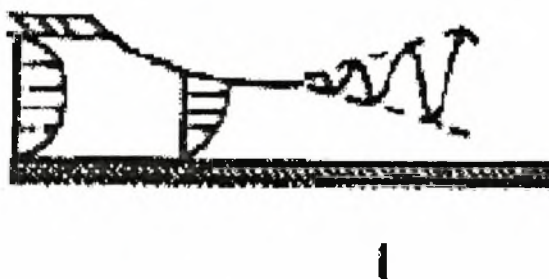
2.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Οι φυσικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε διάφορες βιομηχανικές συσκευές, είναι ένα από τα κύρια αντικείμενα μελέτης και έρευνας για αυτούς οι οποίοι ασχολούνται με τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Η βελτιστοποίηση διεργασιών όπως η εξάτμιση, η συμπύκνωση και πολλές άλλες, αποτελεί ένα πρόβλημα του οποίου η λύση συνίσταται στην κατανόηση της συμπεριφοράς ενός λεπτού υμένα υγρού, ο οποίος ρέει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η δημιουργία διαταραχών στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα μπορεί να οδηγήσει σε εντατικοποίηση του ρυθμού μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Η σημασία του προβλήματος αυτού είναι τεράστια καθώς η πρακτική εφαρμογή είναι άμεση.

Η αναζήτηση στην διεθνή βιβλιογραφία για την πρόοδο που έχει γίνει στο συγκεκριμένο πεδίο ήταν ένα δύσκολο έργο. Παρόλο που το θέμα αυτό θεωρήθηκε εξαιρετικού ενδιαφέροντος από πολύ παλιά (Kapitza & Kapitza [3]), μόνο τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια φαίνεται πως γίνεται παγκοσμίως αντιληπτή η ανάγκη για την σε βάθος κατανόηση των φαινομένων που διέπουν το πρόβλημα αυτό. Στα χρόνια αυτά πάντως, έγιναν σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση αυτή.

Η ροή ενός λεπτού υμένα υγρού πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο είναι ένα πρόβλημα αρκετά πολύπλοκο. Φυσικές διαταραχές (ambient noise) στην επιφάνεια αυτού του υμένα έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση και ανάπτυξη κυμάτων. Από την μελέτη των κυμάτων αυτών, φαίνεται να ξεχωρίζουν τέσσερις διαφορετικές περιοχές [4]. Κριτήριο για τον διαχωρισμό αυτό, είναι ο μηχανισμός που καθορίζει τη μορφή των κυμάτων. Σύθεση των περιοχών αυτών δίνει την πορεία μέσα από την οποία γεννιούνται και αναπτύσσονται τα κύματα.

Η πρώτη από τις περιοχές αυτές είναι η γραμμική περιοχή «σύλληψης» του κύματος (inception region). Οι φυσικές διαταραχές είναι μικρές στην είσοδο, μεγαλώνουν όμως καθώς κινούνται στην κατεύθυνση της ροής (convective instability). Στο τέλος της περιοχής αυτής έχει ήδη δημιουργηθεί ένα μονοχρωματικό κύμα, το πλάτος του οποίου αυξάνεται εκθετικά, καθώς αυτό κινείται στην περιοχή αυτή. Πρόκειται για ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των διεργασιών που διεγείρονται γραμμικά, σε συστήματα στα οποία παρατηρείται η συγκεκριμένη αστάθεια (convective). Στην περιοχή αυτή πάντως δεν παρατηρούνται εγκάρσιες διαταραχές.



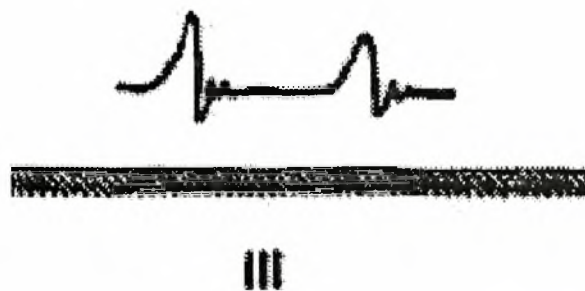
Σχήμα 2.1.1: Σχηματική παράσταση κύματος στην περιοχή δημιουργίας του (inception region).

Στην δεύτερη περιοχή παρουσιάζονται μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω εκθετική ανάπτυξη του κύματος. Έτσι το πλάτος αυτού αποκτά μια ορισμένη τιμή, η οποία είναι συνάρτηση του κυματαριθμού, του αριθμού Reynolds (Re) και της επιφανειακής τάσης. Ουσιαστικά παρατηρείται μια επιβράδυνση των κυμάτων, λόγω μη γραμμικών μηχανισμών. Τα μη γραμμικά φαινόμενα επηρεάζουν και τον κυματαριθμό του περιοδικού κύματος, ο οποίος είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο του μονοχρωματικού κύματος. Σημαντικό στοιχείο είναι ότι τα περιοδικά αυτά κύματα, άσχετα με το αν προκύπτουν από τον υπάρχον θόρυβο ή οφείλονται σε εξωτερική επιβαλλόμενη διαταραχή, ταξιδεύουν μία μεγάλη απόσταση (περίπου δέκα μήκη κύματος) χωρίς να μεταβάλλονται.



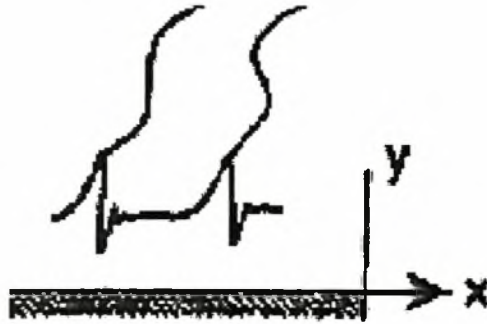
Σχήμα 2.1.2: Σχηματική παράσταση κύματος στην δεύτερη περιοχή ανάπτυξης.

Η μορφή των κυμάτων στην τρίτη περιοχή είναι αποτέλεσμα των δύο κυρίαρχων μορφών αστάθειας που παρατηρούνται. Το πρώτο ενδεχόμενο είναι η συνένωση δύο γειτονικών κυμάτων (τα οποία έχουν πεπερασμένο πλάτος) λόγω της υποαρμονικής αστάθειας (subharmonic instabilities). Δεύτερη πιθανή εξέλιξη είναι ο σχηματισμός μεγάλων κυμάτων (long wave modulation), εξαιτίας πλευρικών ασταθειών (sideband instabilities). Αποτέλεσμα πάντως και των δύο ασταθειών είναι τελικά η δημιουργία μεγάλων μοναχικών (solitary) κυμάτων. Το μέτωπο αυτών είναι απότομο και χαρακτηρίζεται από μια σειρά κυμάτων που κινούνται μπροστά από αυτό. Τα κύματα αυτά είναι τα λεγόμενα bow waves, τα οποία έχουν μήκος κύματος ανάλογο των αντίστοιχων μονοχρωματικών κυμάτων.



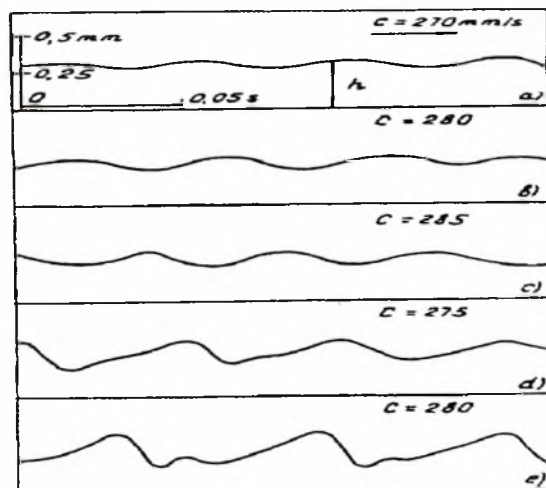
Σχήμα 2.1.3: Σχηματική παράσταση δημιουργίας μοναχικών κυμάτων στην τρίτη περιοχή εξέλιξης.

Το στοιχείο που χαρακτηρίζει τη δομή των κυμάτων στην τέταρτη περιοχή, είναι οι εγκάρσιες μεταβολές που παρατηρούνται στο πλάτος των κορυφών των μοναχικών κυμάτων. Μπορεί το ύψος των κυμάτων να μη μεταβάλλεται σημαντικά, αλλά η διάσταση παράλληλα στην κατεύθυνση κίνησης λαμβάνει τέτοιες τιμές που μπορεί, σε διάφορα σημεία, να οδηγήσει σε συνένωση συνεχόμενων κορυφών.

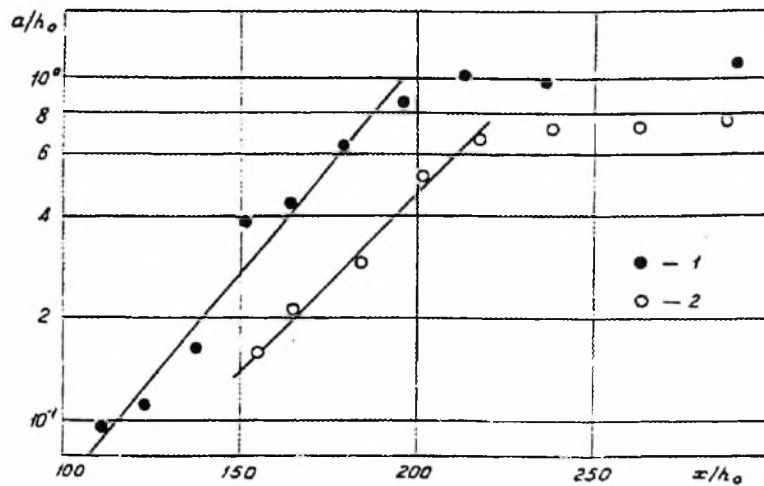


Σχήμα 2.1.4: Η κατάληξη του κύματος στην τέταρτη περιοχή σηματοδοτεί την παρουσία εγκάρσιων μεταβολών.

Όσα προαναφέρθηκαν είναι συμπεράσματα αποδεκτά από όλους τους ερευνητές. Τα παρακάτω δύο σχήματα είναι η απόδειξη της ορθότητας αυτών. Πρόκειται για αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική ανάλυση αλλά και τη θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος του σχηματισμού κυμάτων, κατά την κατακόρυφη ροή υγρού υμένα με φυσική διέγερση [5].

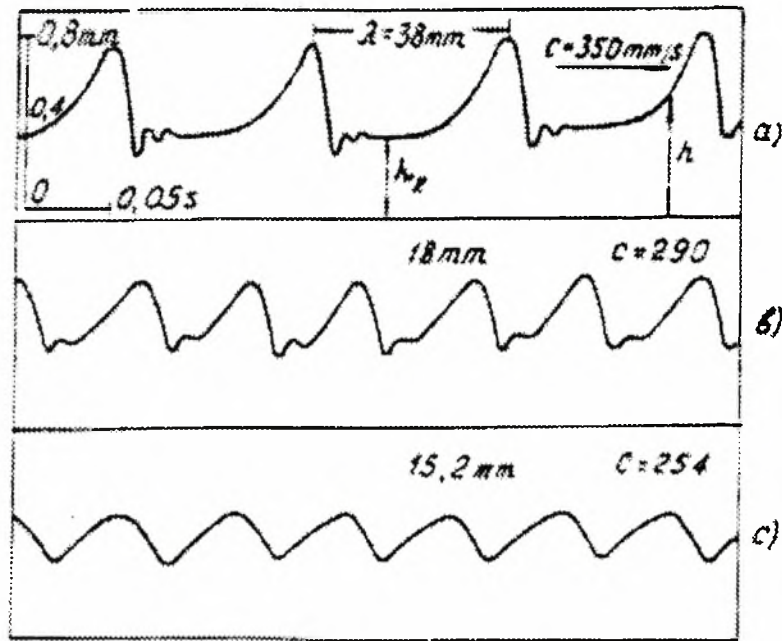


Σχήμα 2.1.5: Οι τέσσερις περιοχές εξέλιξης του δημιουργούμενου κύματος στην κατακόρυφη ροή υγρού υμένα.



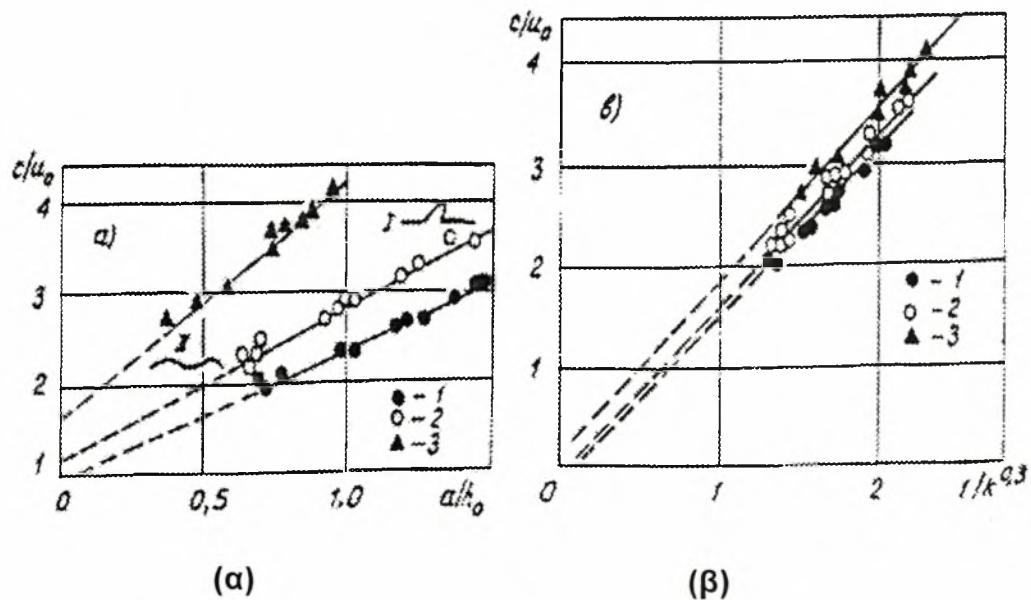
Σχήμα 2.1.6: Το μέγεθος (amplitude) του κύματος στην πρώτη περιοχή αυξάνεται εκθετικά. Από ένα σημείο και μετά φαίνεται ότι η τιμή αυτού σταθεροποιείται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι περιοχές αυτές εκφράζουν τη συμπεριφορά του υμένα σε περιπτώσεις όπου η διέγερση είναι φυσική. Όταν στο σύστημα επιβάλλεται εξωτερική διαταραχή, η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής είναι η πιο σημαντική παράμετρος του προβλήματος. Μεταβάλλοντας την τιμή αυτής, είναι εφικτή η οδήγηση του εξεταζόμενου συστήματος στην επιθυμητή κατά περίπτωση περιοχή και επικέντρωση της προσοχής στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα εκεί. Στο σχήμα που ακολουθεί, αποτυπώνεται η πειραματική επαλήθευση του γεγονότος αυτού, πάλι στην περίπτωση της ροής υμένα σε κατακόρυφο τοίχωμα [5].



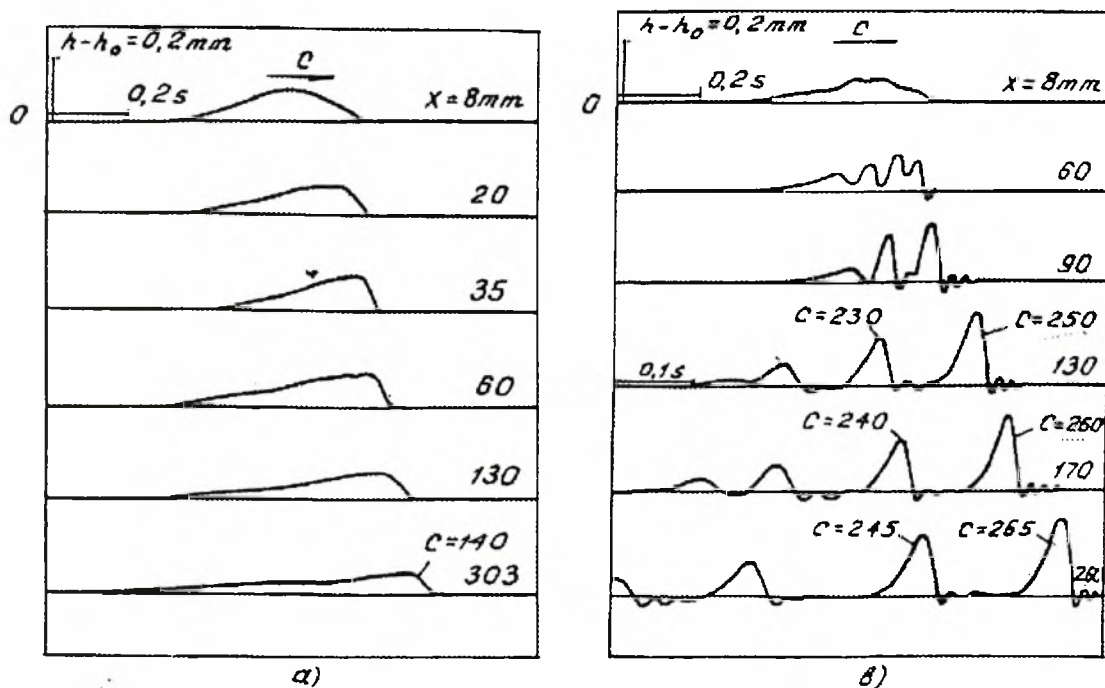
Σχήμα 2.1.7: Η επιβολή διαταραχής διαφορετικών συχνοτήτων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κυματισμών διαφορετικής μορφής. Μεγάλη τιμή της συχνότητας οδηγεί το σύστημα στη δημιουργία κορεσμένων περιοδικών κυμάτων. Στην αντίθετη περίπτωση (μικρές τιμές της συχνότητας) ευνοείται η δημιουργία μοναχικών κυμάτων.

Η περαιτέρω πειραματική δουλειά στο συγκεκριμένο πεδίο, οδήγησε στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων για την μορφή αλλά και για τις ιδιότητες των δημιουργούμενων κυμάτων (ταχύτητες, κυματαριθμοί, ρυθμοί ανάπτυξης), στην περιοχή εμφάνισης αυτών (inception region). Στα σχήματα που ακολουθούν, παρατίθενται γραφικές παραστάσεις, οι οποίες απεικονίζουν την εξάρτηση της ταχύτητας των κυμάτων (stationary periodic waves) από τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης στη ροή διαταραχής (πλάτος και κυματαριθμός διαταραχής).



Σχήμα 2.1.8: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της ταχύτητας του κύματος: (α) σαν συνάρτηση του πλάτους (amplitude) και (β) σαν συνάρτηση του κυματαριθμού.

Η ανάπτυξη της αρχικής επιβαλλόμενης διαταραχής θεωρήθηκε σημείο κλειδί για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών δημιουργίας των κυμάτων. Η εξέλιξη αυτών με την απόσταση σαν συνάρτηση του αριθμού Re φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε πολύ μικρές τιμές του Re δεν παρατηρείται δημιουργία μοναχικών κυμάτων. Το κύμα, καθώς προχωράει, αποκτά απότομο μέτωπο. Όσο η απόσταση μεγαλώνει το μέν πλάτος του κύματος μικραίνει, το δε μήκος του αυξάνεται. Αντίθετα, όταν ο αριθμός Re λάβει μεγάλες τιμές, η αρχική διαταραχή φαίνεται ότι σταδιακά σπάει. Έτσι, σε ορισμένη απόσταση από το σημείο δημιουργίας της διαταραχής, παρατηρείται μια ακολουθία μοναχικών κυμάτων (solitary waves). Ο τρόπος με τον οποίο αυτά αναπτύσσονται είναι παρόμοιος με τον αντίστοιχο σε αδιατάρακτη ροή.



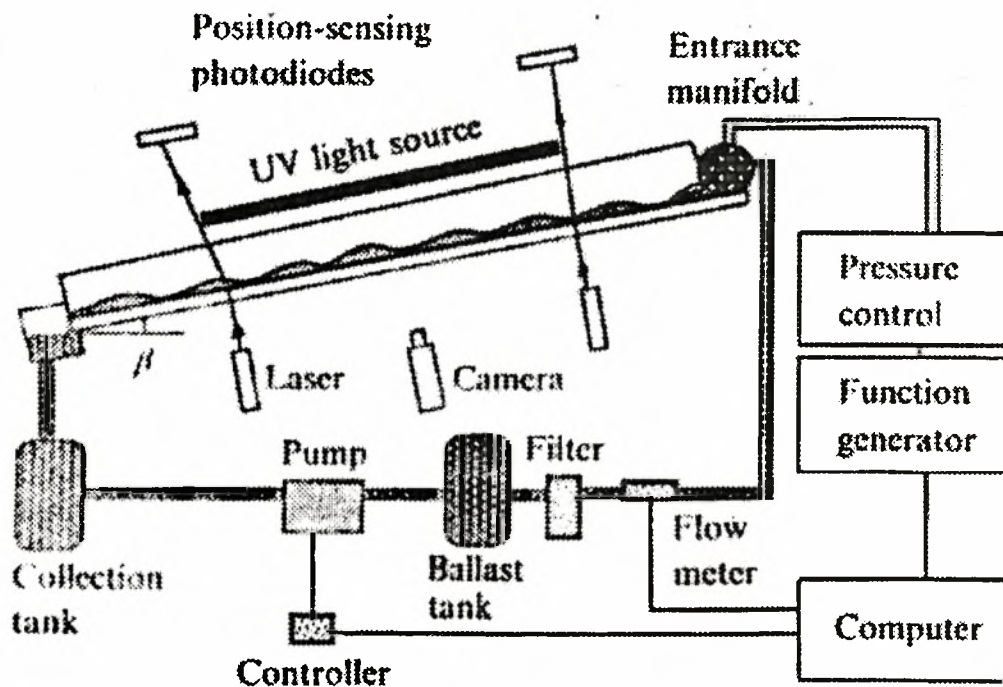
Σχήμα 2.1.9: Η ανάπτυξη της αρχικής διαταραχής για μικρές (α) και μεγάλες (β) τιμές του αριθμού Re.

Σε θεωρητικό – υπολογιστικό επίπεδο και πάντα στην περίπτωση κατακόρυφης ροής υμένα, αξίζει να γίνει αναφορά στην επιτυχημένη προσπάθεια, για την εξαγωγή μιας μη γραμμικής two wave εξίσωσης για μεγάλα κύματα [5]. Η εξίσωση (εξίσωση I) αυτή είναι έγκυρη για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών του αριθμού Re και σε ορισμένες περιπτώσεις μεταπίπτει σε άλλες γνωστές εξισώσεις. Με την βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων ελέγχθηκε η εγκυρότητα των θεωρητικών προβλέψεων, των στηριζόμενων στην εξαγχθείσα εξίσωση. Ενδεικτικά παρατίθεται αμέσως μετά η αδιάστατη μορφή της εξίσωσης αυτής:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + 3 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot H + 6 \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{2}{15} \cdot \text{Re} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(H \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \frac{\text{Re}}{3} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + 1,69 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + 0,71 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot H + \text{We} \cdot \frac{\partial^4 H}{\partial x^4} = 0 \quad (I)$$

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την ανάλυση και ερμηνεία της ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο. Για το λόγο αυτό διεξήχθη ιδιαίτερη

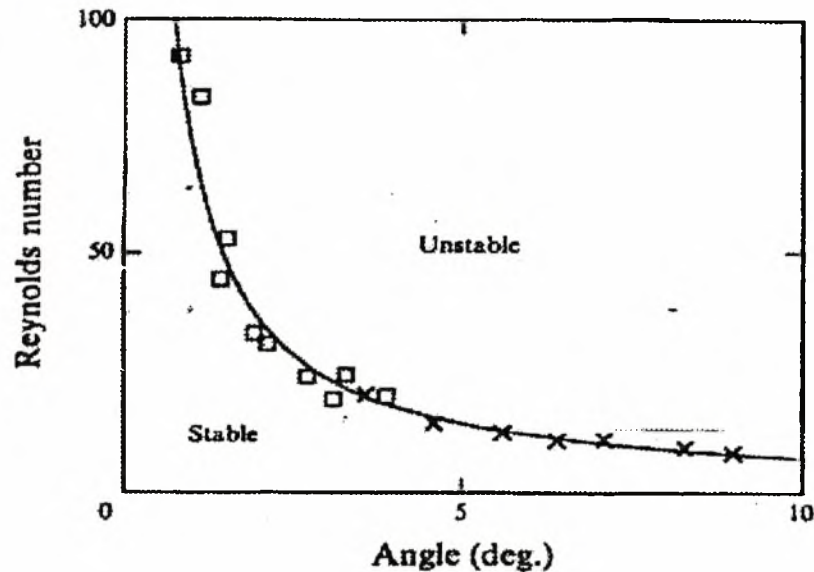
βιβλιογραφική έρευνα στις πρόσφατες ανά τον κόσμο εξελίξεις, στο συγκεκριμένο ζήτημα. Η πιο αντιπροσωπευτική πειραματική δουλειά στο αντικείμενο αυτό είναι αυτή της ομάδας των Liu et al. Στη δουλειά αυτή γίνεται εκτενέστερη αναφορά από το σημείο αυτό και κάτω. Οι πειραματικές μετρήσεις αυτών έγιναν στη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Αρχικά δόθηκε, όπως φαίνεται, βαρύτητα στο θέμα της μέτρησης των πρωταρχικών ασταθειών (primary instabilities) σε ένα λεπτό υμένα υγρού, ο οποίος ρέει υπό γωνία σε επίπεδο τοίχωμα [6], [9]. Έχουν γίνει σημαντικές ποιοτικές παρατηρήσεις, αλλά και ποσοτικές συσχετίσεις των παραμέτρων του προβλήματος.



Σχήμα 2.1.10: Η πειραματική διάταξη της ομάδας των Liu et al.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι σημαντικά, αφού κατέστη εφικτή η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ του κρίσιμου για την εμφάνιση αστάθειας αριθμού Re_c και της γωνίας β του καναλιού, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί [6]. Η χαρτογράφηση των περιοχών στις οποίες ο υμένας είναι ευσταθής αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο. Το σημαντικότερο σημείο ήταν

αναμφίβολα η συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα θεωρητικά για το ρυθμό ανάπτυξης αλλά και την ταχύτητα των κυμάτων, τα οποία προκύπτουν από τη θεωρία ευστάθειας (stability theory).

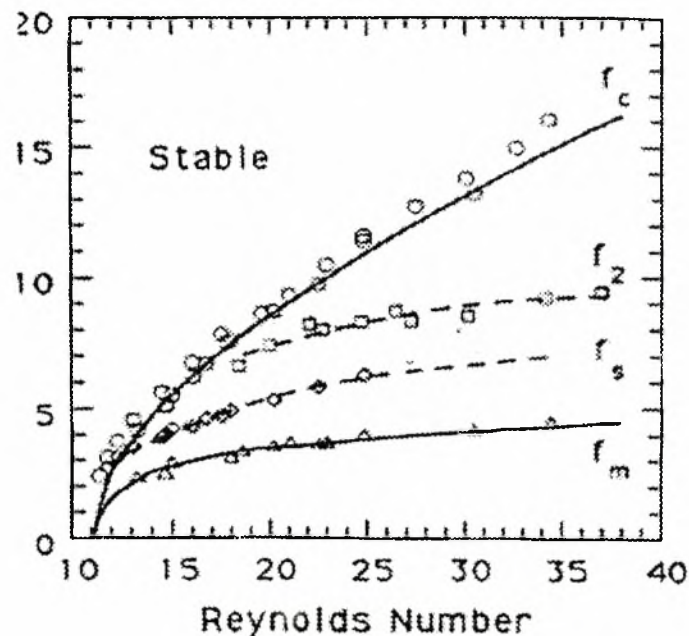


Σχήμα 2.1.11: Διαχωρισμός των περιοχών ευστάθειας και αστάθειας του υμένα που ρέει για διάφορες τιμές του αριθμού Re και της γωνίας του τοιχώματος.

Θεωρώντας τιμές του αριθμού Re στις οποίες ο υμένας είναι ασταθής, αποδεικνύεται πειραματικά ότι η αρχική αστάθεια μετακινείται στην κατεύθυνση της ροής και συνεχώς μεγαλώνει (convective instability). Η συχνότητα της διαταραχής (ο αρχικός κυματαριθμός), είτε αυτή είναι φυσική ή επιβαλλόμενη, επηρεάζει τη μη γραμμική ανάπτυξη των κυμάτων. Έτσι, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, το μέγεθος και η μορφή δηλαδή αυτών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα. Η ιδιότητα αυτή της ροής καθιστά τα περιοδικά κύματα ασταθή για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η επιβολή μιας τέτοιας συχνότητας οδηγεί στην εμφάνιση άτακτων διδιάστατων κυμάτων [7], [9].

Η προσπάθεια διαχωρισμού των διαφόρων περιοχών αστάθειας του ρέοντος υμένα συναρτήσεως της συχνότητας της επιβαλλόμενης διαταραχής έχει ως αποτέλεσμα γραφικές παραστάσεις, όπως αυτή που ακολουθεί. Στο γράφημα αυτό, το οποίο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες πειραματικές μετρήσεις,

συσσωρεύονται πληροφορίες όπως τα είδη των ασταθειών και των κυμάτων που εμφανίζονται, όπως αυτά αναφέρθηκαν πιο πάνω.



Σχήμα 2.1.12: Καθορισμός των κύριων μορφών των κυμάτων ανάλογα με την επιβαλλόμενη συχνότητα και τον αριθμό Re .

Η καμπύλη που χαρακτηρίζεται ως f_c διαχωρίζει την ευσταθή από την ασταθή περιοχή του υμένα. Μεταξύ αυτής και της καμπύλης f_2 παρατηρείται πλευρική αστάθεια, ενώ η υποαρμονική αστάθεια είναι αυτή που χαρακτηρίζει την περιοχή μεταξύ των καμπυλών f_2 και f_s . Στις δύο αυτές περιοχές παρατηρούνται κορεσμένα κύματα, τα οποία έχουν πεπερασμένο μέγεθος. Μεταξύ των γραμμών f_s και f_m παρατηρούνται τα μοναχικά κύματα και κάτω από την καμπύλη f_m παρατηρείται χαοτική κατάσταση (spatiotemporal chaos).

Αν εξαιρεθεί η τελευταία περιοχή όπου τα φαινόμενα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα, το σημείο στο οποίο έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση είναι η δυναμική των μοναχικών (solitary) κυμάτων και η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών. Τα μοναχικά κύματα μπορούν να δημιουργηθούν με διάφορους τρόπους [7], [9]:

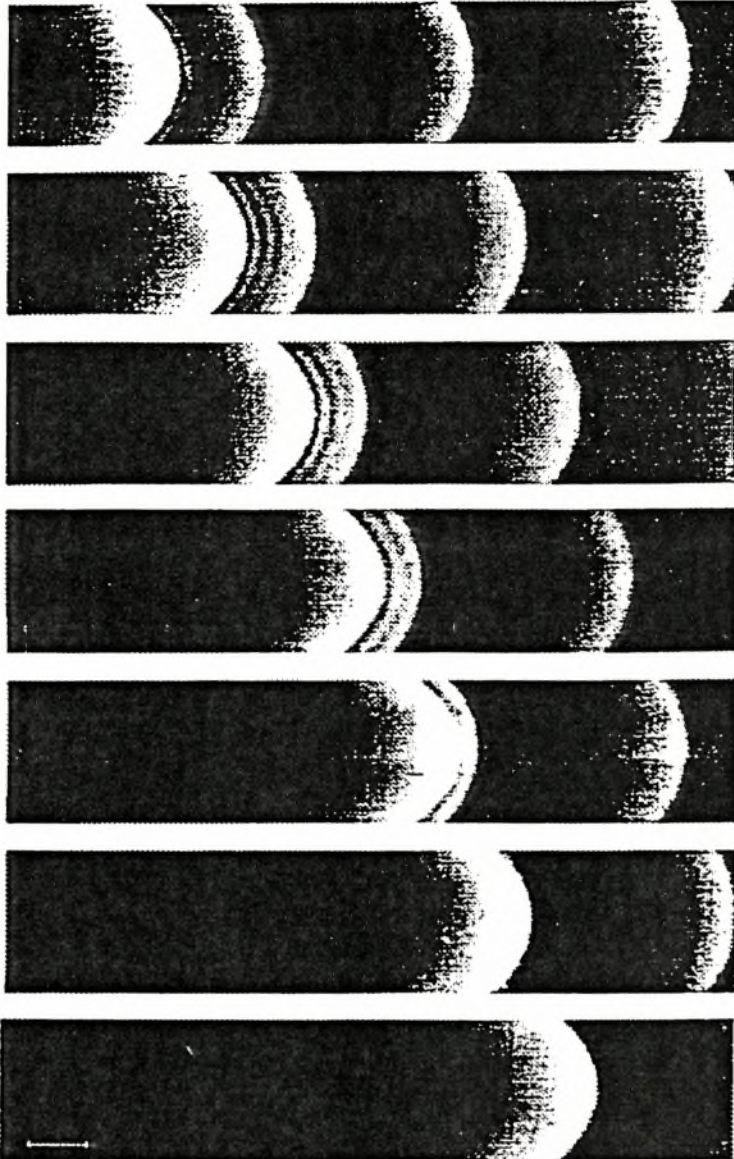
► Επιβάλλοντας διαταραχή χαμηλής συχνότητας. Στις περιπτώσεις αυτές η αιτία δημιουργίας των κυμάτων είναι η μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ των συχνοτήτων αυτών και των αρμονικών των.

‣ Δημιουργώντας περιοδικά κύματα μεγάλης συχνότητας. Η τυχαία αλληλεπίδραση αυτών αλλά και οι συνενώσεις αυτών οδηγούν στη δημιουργία solitary waves. Αιτία της αλληλεπίδρασης των περιοδικών κυμάτων είναι οι δευτερεύουσες αστάθειες, οι οποίες οδηγούν σε μεταβολές του μήκους κύματος αυτών.

‣ Επιβάλλοντας τεχνητές μεταβολές στο μήκος κύματος των κυμάτων, μέσω εφαρμογής πολλαπλών διαταραχών, διαφορετικής συχνότητας.

‣ Με τη μη γραμμική ανάπτυξη των φυσικών κυμάτων, όπου οι μεταβολές στο μήκος κύματος οφείλονται στον υπάρχον θόρυβο.

Από την επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει πως η ταχύτητα των κυμάτων αυτών είναι ισχυρή εξάρτηση τόσο της συχνότητας, όσο και του αρχικού τους μεγέθους. Πάλι η συμφωνία των πειραματικών δεδομένων με τους θεωρητικούς υπολογισμούς ήταν μεγάλη. Η εξάρτηση αυτή (μεταξύ της ταχύτητας και των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης διαταραχής) είναι ο κύριος λόγος της εμφάνισης των φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων (wave interaction phenomena). Τα φαινόμενα αυτά είναι αυστηρά ανελαστικά. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο κύμα κινείται γρήγορα και απορροφάει το μικρότερο που βρίσκεται μπροστά του, αφήνοντας πίσω του μια μεγάλου μήκους πλατιά επιφάνεια. Στην περίπτωση όπου το μήκος του καναλιού είναι αρκετά μεγάλο, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν ακολουθίες αλληλεπιδράσεων. Το παρακάτω σχήμα αποτελεί κλασικό παράδειγμα αλληλεπίδρασης [7].

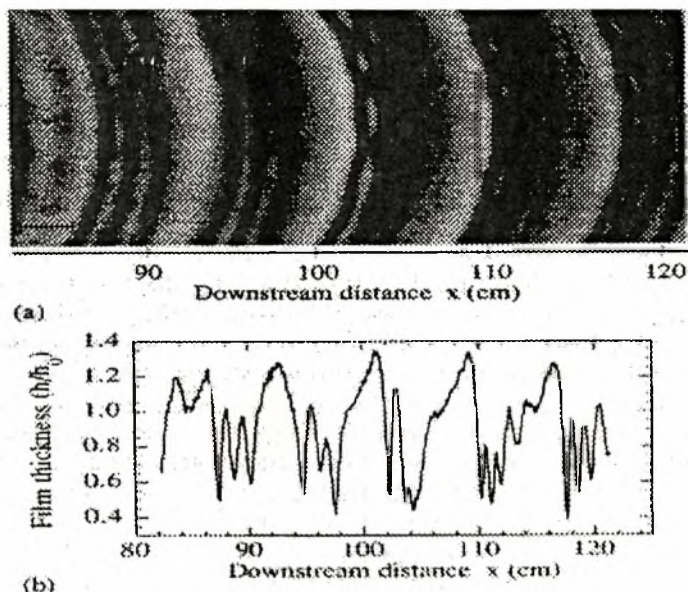


Σχήμα 2.1.13: Παρατηρείται η αλληλεπίδραση ενός μεγάλου μοναχικού κύματος με μικρότερα τα οποία κινούνται με μικρότερη ταχύτητα μπροστά από αυτό.

Ο λόγος για τον οποίο στις εργασίες αυτές παρατηρήθηκε πλήρως διδιάστατη δομή του υμένα, είναι το γεγονός ότι η κλίση του καναλιού, η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής και ο αριθμός Re είχαν κατάλληλες τιμές. Προφανώς, αυτή είναι η απλούστερη μορφή του προβλήματος. Είναι δυνατόν, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, να γίνει μετάβαση από διδιάστατη δομή σε τρισδιάστατη. Γενικά, πλήρως ανεπτυγμένοι κυματοειδείς

υμένες μπορεί να είναι τρισδιάστατοι, παρόλο που τα αρχικά κύματα είναι πλήρως διδιάστατα, στο σημείο εμφάνισής των.

Έχουν παρατηρηθεί δύο σαφέστατα διαφορετικές μορφές αστάθειας, ανάλογα με το συνδυασμό τιμών των δύο προαναφερθέντων παραμέτρων, δηλαδή του αριθμού Re και της συχνότητας f της διαταραχής. Η πρώτη από αυτές είναι η συγχρονισμένη αστάθεια (synchronous instability) η οποία και εμφανίζεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η δεύτερη παρατηρούμενη αστάθεια είναι η τρισδιάστατη υποαρμονική (3-D subharmonic instability). Αυτή οδηγεί σε δομές που ομοιάζουν με ψαροκόκαλο (herringbone patterns), εμφανίζεται δε σε τιμές της συχνότητας κοντά στην ουδέτερη καμπύλη $f_c(R)$ [8], [9].

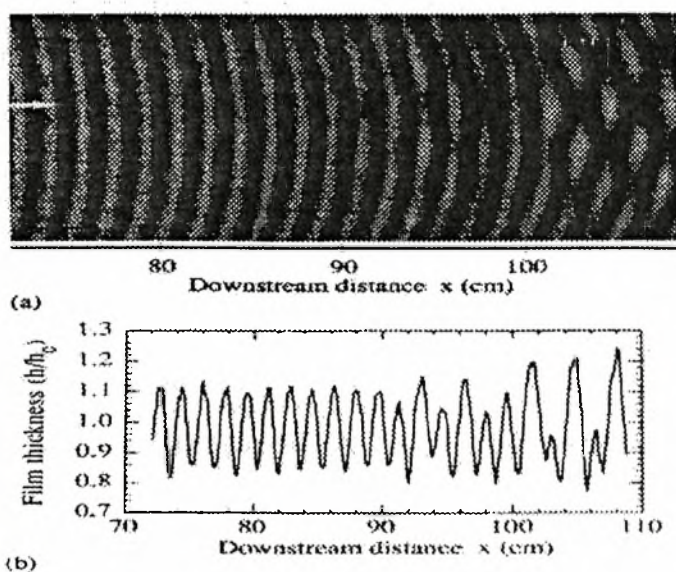


Σχήμα 2.1.14: Εγκάρσιοι σχηματισμοί λόγω συγχρονισμένης αστάθειας.

Οι συγχρονισμένοι εγκάρσιοι σχηματισμοί διατηρούν την περιοδικότητα που έχουν τα διδιάστατα κύματα στην κατεύθυνση της ροής. Παρατηρούνται κυρίως στο μέτωπο αλλά και στην κορυφή των αρχικών διδιάστατων κυμάτων. Το μήκος κύματος κάθετα στην κατεύθυνση ροής είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πάχος του υμένα. Το αντίστοιχο μήκος κύματος στην κατεύθυνση της ροής, ειδικότερα για μικρές σχετικά τιμές του αριθμού Re , είναι συγκρίσιμο με αυτό στην κάθετη κατεύθυνση. Γενικά, η συγκεκριμένη αστάθεια περιλαμβάνει πολλές αρμονικές, υψηλότερες από αυτές των

βασικών κυμάτων. Τελικά, οι τρισδιάστατοι σχηματισμοί προκαλούν το σπάσιμο των μετώπων των κυμάτων και τη δημιουργία μεμονωμένων βαθουλωμάτων. Στο σχήμα της προηγούμενης σελίδας [8], φαίνονται σε μια φωτογραφία μερικά μοναχικά κύματα. Μπροστά από αυτά έχουν ήδη δημιουργηθεί οι εγκάρσιοι σχηματισμοί.

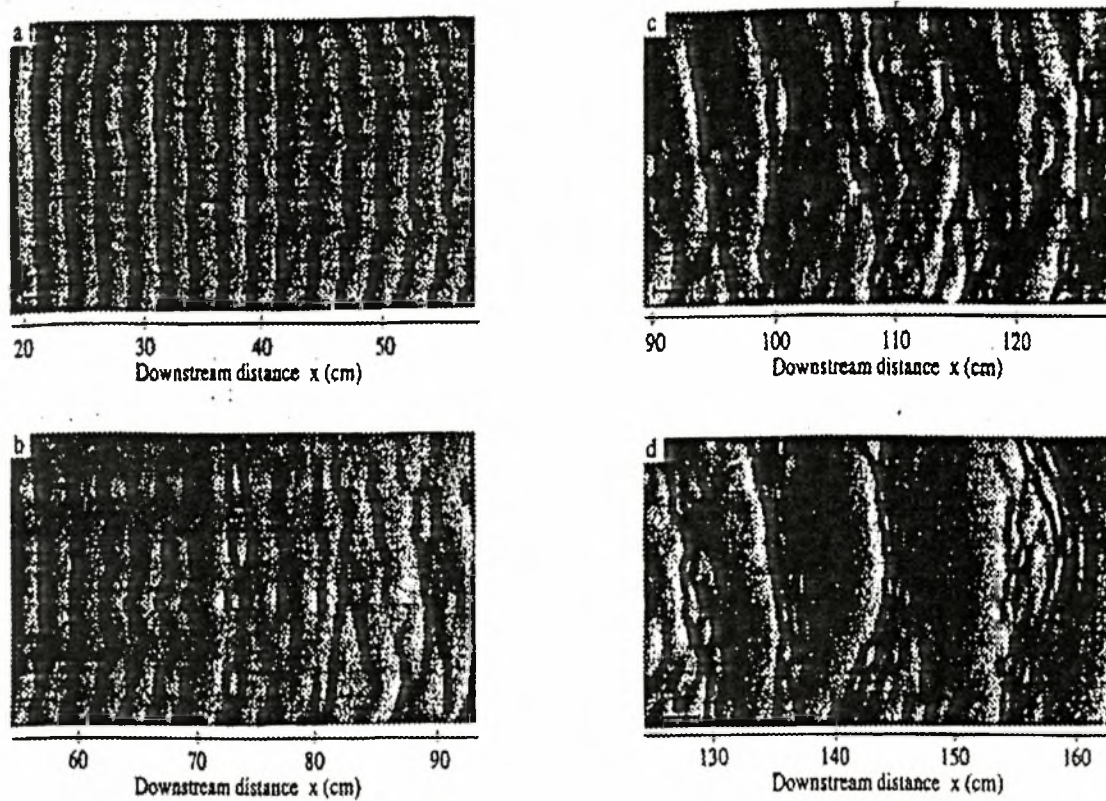
Στην άλλη περίπτωση όπου και παρατηρούνται σχηματισμοί ψαροκόκαλου, παρατηρείται διπλασιασμός της περιόδου των διδιάστατων κυμάτων, ενώ η φάση των εγκάρσιων σχηματισμών διαφέρει κατά π για συνεχόμενα μέτωπα κυμάτων. Στο ακόλουθο σχήμα [8] φαίνεται ο σχηματισμός της συγκεκριμένης δομής στο δεξί μέρος της φωτογραφίας.



Σχήμα 2.1.15: Η τρισδιάστατη υποαρμονική αστάθεια οδηγεί στη δημιουργία δομών «ψαροκόκαλου».

Αιτία δημιουργίας των δομών αυτών είναι το ευρύ φάσμα υποαρμονικών συντονισμών (είναι πιο εύκολο να φανταστεί κανείς τη δομή αυτή σαν συντονισμό δύο λοξών κυμάτων με τα βασικά διδιάστατα κύματα. Πάντως, η εμφάνιση άτακτων τρισδιάστατων μοναχικών (solitary) κυμάτων κυριαρχεί σε μεγάλες αποστάσεις και κοντά στο τέλος του καναλιού (σχήμα 2.1.16). Η συμπεριφορά αυτή είναι ανεξάρτητη από το ποια είναι η αστάθεια η οποία σε αρχικό στάδιο προκαλεί την πολυπλοκότητα. Αυτό το φαινόμενο

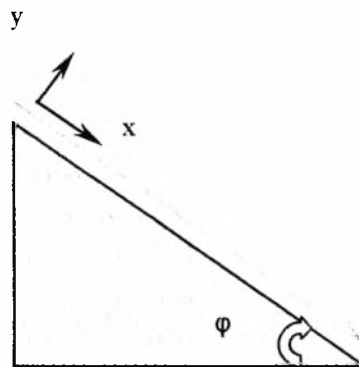
παρατηρείται για ένα μεγάλο εύρος τιμών των υπό εξέταση παραμέτρων [8], [9].



Σχήμα 2.1.16: Η δομή του υμένα και η μορφή των κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις από το σημείο δημιουργίας τους.

2.2. Ανάλυση του προβλήματος της ροής λεπτού υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο.

Το πρόβλημα της ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο έχει επιλυθεί αναλυτικά. Εννοείται βέβαια ότι, για να επιλυθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα, έγιναν οι απαραίτητες παραδοχές. Παρατίθενται στην ενότητα αυτή οι εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα αυτό, αν θεωρηθεί διδιάστατη ροή κατά μήκος ενός κεκλιμένου τοιχώματος [10]. Το τοίχωμα σχηματίζει με την κατακόρυφη διεύθυνση γωνία φ . Χρησιμοποιείται σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων, όπου ο άξονας x είναι στην κατεύθυνση της ροής και ο άξονας y είναι κάθετος στην επιφάνεια του τοιχώματος.



Σχήμα 2.2.1: Το πρόβλημα της διδιάστατης ροής υγρού υμένα σε κεκλιμένο επίπεδο.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα αυτό είναι οι ακόλουθες:

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

$$\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

Πρόκειται για την εξίσωση της συνέχειας (2.1) και τις εξισώσεις Navier – Stokes {εξισώσεις (2.2), (2.3)}. Είναι προφανές ότι έχει γίνει η παραδοχή

της ασυμπίεστης ροής ρευστού με σταθερό ιξώδες. Θεωρώντας επιπλέον μόνιμες συνθήκες και σε συνδυασμό με το ότι η ροή είναι διδιάστατη, οι εξισώσεις (2.2), (2.3) παίρνουν την παρακάτω μορφή:

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

$$\rho \left(U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

Για τον πλήρη ορισμό του προβλήματος πρέπει να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες, αυτές δηλαδή που ισχύουν στα τοιχώματα ή στην ελεύθερη επιφάνεια του υμένα.

➤ Η ταχύτητα στην επιφάνεια του τοιχώματος είναι μηδενική (συνθήκη μη –ολίσθησης). Η συνθήκη αυτή με τη μορφή σχέσεων γράφεται ως εξής:

$$y=0 \Rightarrow U_x=U_y=0 \quad (2.6)$$

➤ Στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού υμένα η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας είναι μηδέν, δηλαδή:

$$y = h \rightarrow \underline{u} \cdot \underline{n} = \underline{0} \quad (2.7)$$

➤ Εξετάζοντας την ισορροπία των δυνάμεων στην επιφάνεια του υγρού υμένα και στην εφαπτομενική κατεύθυνση θα έχουμε:

$$\Sigma F_t = 0 \rightarrow \sigma_{ij} n_i t_j = 0 \quad \text{ή} \quad (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{t} = 0 \quad (2.8)$$

➤ Στην κάθετη κατεύθυνση, η ανάλυση της ισορροπίας των δυνάμεων δίνει σαν αποτέλεσμα την παρακάτω σχέση:

$$\sigma^{(2)}_{ij} n_i n_j - \sigma^{(1)}_{ij} n_i n_j = T \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.9)$$

Όπου,

$\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}$: η δύναμη που ασκείται στην ελεύθερη επιφάνεια,

$(\underline{\sigma} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{t}$: η συνιστώσα της δύναμης στην t-κατεύθυνση (εφαπτομενική),

$(\underline{\sigma} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{n}$: η συνιστώσα της δύναμης στην κατεύθυνση κάθετα στη ροή.

Εφαρμόζοντας τις παραδοχές και τις οριακές συνθήκες στις βασικές εξισώσεις, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} = 0 \quad (2.10)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} = 0 \quad (2.11)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y = 0 \quad (2.12)$$

Από την διπλή ολοκλήρωση της σχέσης (11), προκύπτει η κατανομή της ταχύτητας, κατά τη διεύθυνση του άξονα y.

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

Με την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, όπως αυτές περιγράφηκαν προηγουμένως, θα προκύψουν οι τιμές των σταθερών C_1 , C_2 :

$$\text{Για } y=h \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial U_x}{\partial y} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{g_x}{\nu} \quad (2.14)$$

$$\text{και για } y=0 \quad \Rightarrow \quad U_x(y=0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (2.15)$$

$$\text{Οπότε προκύπτει: } U_x(y) = \frac{g_x}{\nu} \cdot \left(y \cdot h - \frac{y^2}{2} \right) \quad (2.16)$$

Η μέση τιμή της ταχύτητας προκύπτει με ολοκλήρωση:

$$\bar{U} = \frac{g_x \cdot h^2}{3 \cdot \nu} \quad (2.17)$$

και η μέγιστη τιμή θέτοντας $y=h$:

$$U_o = \frac{g_x \cdot h^2}{2 \cdot \nu} \quad (2.18)$$

Το συγκεκριμένο πρόβλημα δύναται, ως είθισται, να περιγραφεί με την βοήθεια αδιάστατων αριθμών. Οι μαθηματικές εκφράσεις των αριθμών Reynolds και Kapitza δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$Re = \frac{\bar{U} \cdot h}{\nu} \quad (2.19)$$

$$\gamma = T/\rho \cdot \nu^{4/3} \cdot g^{1/3} \quad (2.20)$$

όπου

\bar{U} : η μέση ταχύτητα,

h : το πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt,

ρ : η πυκνότητα του ρευστού,

T : η επιφανειακή τάση και

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Το γινόμενο ($\bar{U} \cdot h$) είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα πλάτους. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο αριθμός Weber ($We = T/\rho \cdot \bar{U}^2 \cdot h$), αντί του αριθμού Kapitza.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes (4), (5), μπορούν γενικά να πάρουν την παρακάτω μορφή [εξισώσεις (22), (23)]. Για να είναι εφικτή η μετατροπή αυτή, παραγωγίζεται η (4) ως προς y και η (5) ως προς x . Κατόπιν εισάγεται η ροϊκή συνάρτηση Ψ , βασική ιδιότητα της οποίας είναι ότι ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας.

$$U_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}, U_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y \partial x} + \nu \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial^3 \Psi}{\partial y \partial x^2} + \frac{\partial^3 \Psi}{\partial y^3} \right] \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial \Psi}{\partial y} \left(-\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial x} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[-\frac{\partial^3 \Psi}{\partial y^2 \partial x} - \frac{\partial^3 \Psi}{\partial x^3} \right] \quad (2.23)$$

Η αφαίρεση των εξισώσεων (12) και (11) κατά μέλη οδηγεί στην εξίσωση, η οποία περιγράφει την διδιάστατη ροή, συναρτήσει της ροϊκής συνάρτησης. Η αδιαστατοποίηση της εξίσωσης δίνει την εξίσωση:

$$\frac{\partial \Psi'}{\partial y'} \cdot \frac{\partial (\nabla^2 \Psi')}{\partial x'} - \frac{\partial \Psi'}{\partial x'} \frac{\partial (\nabla^2 \Psi')}{\partial y'} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 (\nabla^2 \Psi') \quad (2.24)$$

Οι αδιάστατες παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία αδιαστατοποίησης ήταν οι: $\Psi' = \Psi/q$, $x' = x/h$, $y' = y/h$. Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν μια συνήθης πρακτική για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής των Ρευστών.

2.3. Θεωρία ευστάθειας

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια προσπάθεια να δοθούν με τον απλούστερο δυνατό τρόπο οι γενικές αρχές της θεωρίας ευστάθειας (stability theory) [11]. Κατά τη ροή ενός ρευστού, η ύπαρξη διαταραχών είναι αναπόφευκτη. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να οφείλονται σε φυσικά αίτια (ακουστικός θόρυβος, ταλαντώσεις κ.τ.λ.). Μπορεί όμως να οφείλονται και στην ίδια τη ροή. Τα χαρακτηριστικά των διαταραχών είναι η συχνότητα, το μήκος κύματος και η περιοδικότητα.

Γενικά, μια ροή χαρακτηρίζεται ευσταθής όταν οι διαταραχές αποσβένονται, άσχετα με το λόγο εμφάνισής τους. Αντιθέτως η ροή χαρακτηρίζεται ασταθής όταν, έστω και μία από τις προκύπτουσες διαταραχές ενισχύεται. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η ροή νευτωνικού ρευστού μέσα σε σωλήνα. Για τιμή του αριθμού $Re > 2000$, η ροή από στρωτή γίνεται τυρβώδης. Ακόμη όμως και για αριθμούς $Re < 2000$, το παραβολικό πεδίο ταχυτήτων δεν ισχύει, διότι η ροή γίνεται ασταθής λόγω των διαταραχών.

Θα γίνει τώρα μια προσπάθεια ανάλυσης των βασικών εξισώσεων. Θεωρώντας ότι το πεδίο ταχυτήτων της βασικής ροής είναι $\bar{U}(\bar{x})$, τότε το πεδίο ταχυτήτων και πιέσεων για την ασταθή ροή θα είναι:

$$\bar{u}(\bar{x}, t) = \bar{U}(\bar{x}) + \bar{u}'(\bar{x}, t) \quad (2.25)$$

$$P = P(\bar{x}) + p(\bar{x}, t) \quad (2.26)$$

Η βασική ροή ικανοποιεί τις εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes).

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0 \quad (2.27)$$

$$\bar{U} \cdot \nabla \bar{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \bar{U} \quad (2.28)$$

$$\text{Οπότε:} \quad \bar{\nabla}(\bar{U} + \bar{u}') = 0 \Rightarrow \bar{\nabla} \bar{u}' = 0 \quad (2.29)$$

Τελικά προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \bar{u}'}{\partial t} + \bar{u}' \cdot \nabla \bar{U} + \bar{U} \cdot \nabla \bar{u}' = \frac{1}{\rho} \nabla \rho' + \nu \cdot \nabla^2 \bar{u}' \quad (2.30)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής έχει σταθερούς συντελεστές ως προς το χρόνο. Δηλαδή θα έχει την μορφή:

$$\bar{u}' = \tilde{u}(x) e^{-i\sigma t} \Rightarrow \bar{u}' = (u_R + iU_i) e^{+i\sigma_R} \cdot e^{\sigma_I t} \quad (2.31)$$

Όπου $e^{-i\sigma_R}$: Όρος περιοδικότητας

$e^{\sigma_I t}$: Όρος ενίσχυσης ή απόσβεσης.

Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι η ροή είναι ευσταθής όταν $\sigma_I > 0$. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή $\sigma_I < 0$, η ροή είναι ασταθής.

Στην περίπτωση που η ροή είναι διδιάστατη και πλήρως ανεπτυγμένη, μπορεί να εισαχθεί η ροϊκή συνάρτηση (η οποία ικανοποιεί εξ' ορισμού την εξίσωση της συνέχειας). Μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών απαλείφεται η πίεση και προκύπτει μια εξίσωση ως προς Ψ' . Τελικά προκύπτει:

$$\Psi'(\bar{x}, t) = \tilde{\Psi}(x, y) e^{i\sigma t} = f(y) e^{i k \cdot x} e^{-i\sigma t} = f(y) e^{i(kx - \sigma_R t)} e^{\sigma_I t} \quad (2.32)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο όρος $e^{i(kx - \sigma_R t)}$ αναπαριστά κύμα. Το μήκος κύματος αυτού είναι $L = \frac{2\pi}{k}$ και η ταχύτητά του $c = \frac{\sigma_R}{k}$. Αν k πραγματικός και σ μιγαδικός προκύπτει χρονική αστάθεια, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η αστάθεια είναι χωρική. Για παράδειγμα, αν το k είναι μιγαδικός προκύπτει :

$$\Psi(x,t) = f(y) e^{i(k_R x - \sigma t)} e^{-k_I x} \quad (2.33)$$

Αν το μιγαδικό μέρος του k (k_I) < 0 , η αστάθεια ενισχύεται με την απόσταση ενώ αν το $k_I > 0$, η αστάθεια αποσβένει με την απόσταση. Η τελική εξίσωση που προκύπτει (με τη βοήθεια της ροϊκής συνάρτησης) είναι η εξίσωση Orr - Sommerfeld:

$$f'''' - 2k^2 f'' + k^4 f = \frac{ik}{v} [(U - c)(f'' - k^2 f) - U'' f] \quad (2.34)$$

Η εξίσωση Orr - Sommerfeld μπορεί να γίνει ομογενής, αν καθοριστεί η παράμετρος $\mathbf{k} = 2\pi/L$. Επίσης, ομογενείς είναι και οι οριακές συνθήκες της εξίσωσης αυτής. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα πρόβλημα ιδιοτιμής. Από την ανάλυση της εξίσωσης αυτής προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα. Όταν το μήκος κύματος της διαταραχής είναι εξαιρετικά μεγάλο (δηλαδή ο κυματαριθμός είναι πολύ μικρός), οι βαρυτικές δυνάμεις είναι αυτές που καθορίζουν αν η αρχική διαταραχή θα αναπτυχθεί. Όταν όμως το μήκος κύματος της διαταραχής είναι πάρα πολύ μικρό, σημαντικότερο ρόλο παίζει η επιφανειακή τάση, η οποία σταθεροποιεί τις δημιουργούμενες «ρυτιδώσεις» (ripples).

Το πρότυπο Kelvin-Helmholz αποτελεί μια ακόμη περίπτωση εξέτασης της ευστάθειας. Αντικείμενο αυτού είναι η αστάθεια στην επιφάνεια δύο ρευστών τα οποία θεωρούνται ότι έχουν μηδενικό ιξώδες. Η θεώρηση μηδενικού ιξώδους απλοποιεί την επίλυση των εξισώσεων, με βασική παραδοχή ότι το πλάτος της διαταραχής είναι πάρα πολύ μικρό [11].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1. Περιγραφή πειραματικής διάταξης.

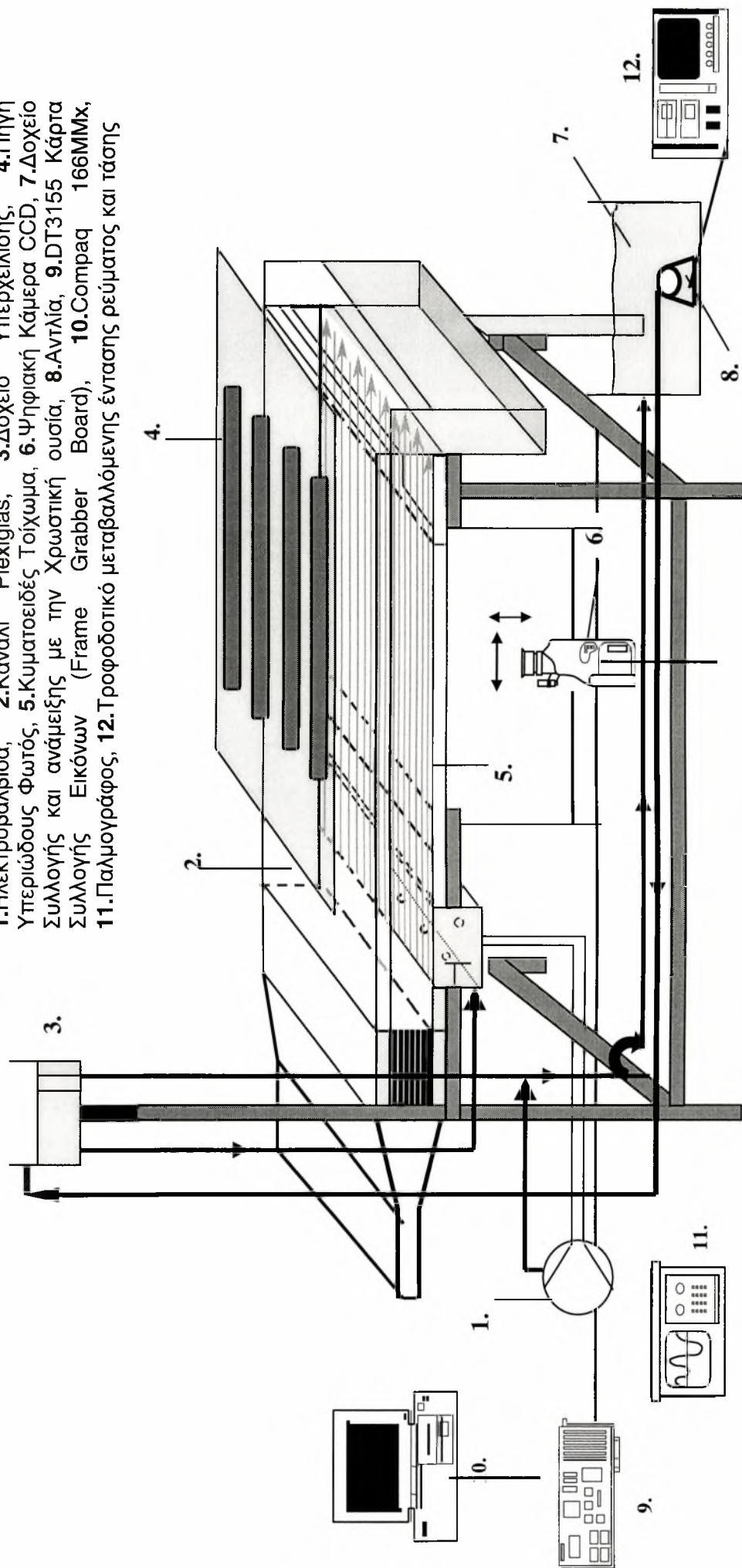
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη των αναγκών της διπλωματικής εργασίας περιγράφεται αναλυτικά στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 3.1.2). Οδηγός για την κατασκευή της συσκευής αυτής ήταν η αντίστοιχη της ομάδας των Liu et al [6], όπως αυτή παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Το σημαντικότερο κομμάτι της συσκευής είναι το επίπεδο κανάλι στο οποίο γίνεται η ροή του υγρού υμένα. Αυτό είναι εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από plexiglas. Ο λόγος για την κατασκευή αυτή ήταν αφενός η ελαχιστοποίηση της απορρόφησης ορατού φωτός, αφετέρου η καλύτερη οπτική παρακολούθηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Από εμπειρικούς κανόνες επιλέχθηκαν το μήκος, πλάτος και ύψος του καναλιού να είναι 100, 25 και 3 cm αντίστοιχα. Για να είναι εφικτή η μεταβολή της γωνίας κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε ένας ατέρμονας κοχλίας. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η επίτευξη γωνίας έως και 67° .



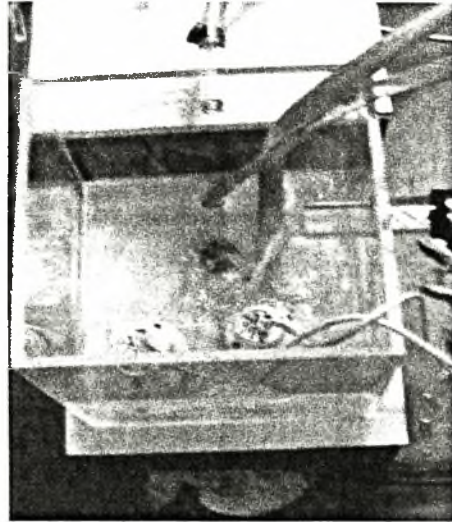
Σχήμα 3.1.1: Το επίπεδο κανάλι ροής που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη.

1. Ηλεκτροβαλβίδα, 2. Κανάλι Plexiglas, 3. Δοχείο Υπερχείλισης, 4. Πηγή Υπεριώδους Φωτός, 5. Κυματοειδές Τοίχωμα, 6. Ψηφιακή Κάμερα CCD, 7. Δοχείο Συλλογής και ανάμιξης με την Χρωστική ουσία, 8. Αντλία, 9. DT3155 Κάρτα Συλλογής Εικόνων (Frame Grabber Board), 10. Compaq 166MMx, 11. Παλμογράφος, 12. Τροφοδοτικό μεταβαλλόμενης έντασης ρεύματος και τάσης



Σχήμα 3.1.1 : Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

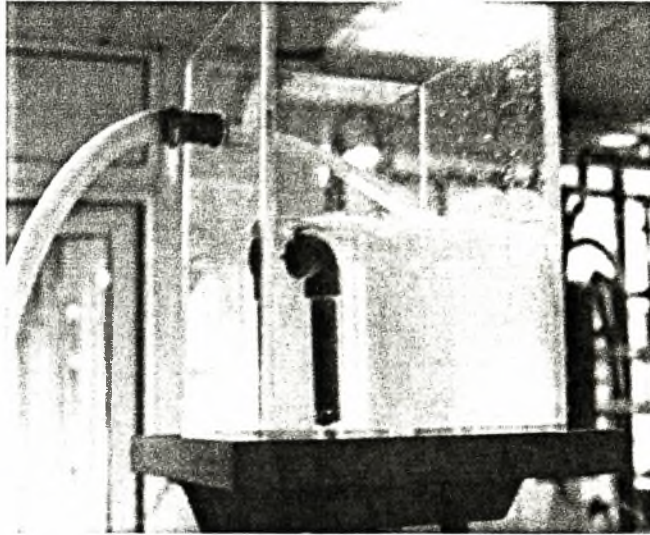
Το plexiglas ήταν το που υλικό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και της δεξαμενής συλλογής του ρευστού. Η δεξαμενή αυτή αποτελεί την αρχή στον κύκλο ροής του ρευστού. Ταυτόχρονα όμως αποτελεί και το δοχείο στο οποίο καταλήγει το ρευστό, μετά το τέλος του πειράματος. Ουσιαστικά η δεξαμενή αυτή χρησιμοποιήθηκε και ως χώρος προετοιμασίας του ρευστού.



Σχήμα 3.1.2: Η δεξαμενή συλλογής της πειραματικής διάταξης.

Για να επιτευχθεί ροή του ρευστού από τη δεξαμενή συλλογής στα υπόλοιπα μέρη της συσκευής χρησιμοποιείται μία αντλία. Αυτή είναι συνδεδεμένη με τροφοδοτικό μεταβαλλόμενης έντασης και τάσης για την επίτευξη βέλτιστης παροχής. Κριτήριο για την επιλογή της παροχής είναι η αποφυγή των ταλαντώσεων.

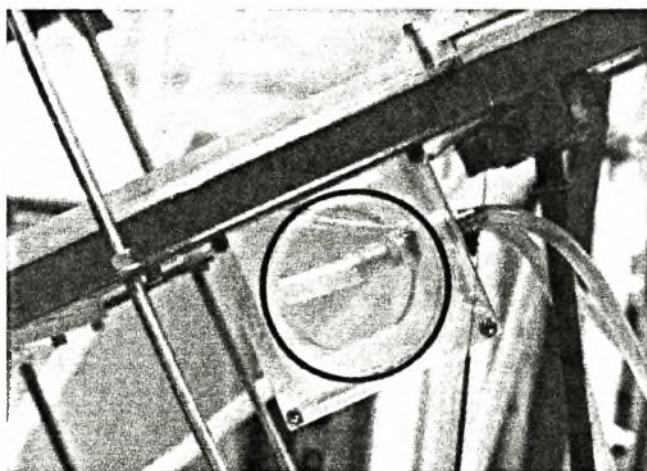
Ένας πρόσθετος λόγος είναι ότι το ρευστό μετά τη δεξαμενή συλλογής κατευθύνεται στο δοχείο υπερχειλίσης όπου και πρέπει να αποφεύγεται η δημιουργία φυσαλίδων (ομαλοποίηση της ροής του ρευστού). Το δοχείο αυτό τοποθετείται σε σημείο που βρίσκεται αρκετά υψηλότερα από το κανάλι ροής. Δημιουργείται με τον τρόπο αυτό η υψομετρική διαφορά που απαιτείται για την ροή του υμένα σε μόνιμες συνθήκες.



Σχήμα 3.1.3: Το πρωτεύον δοχείο υπερχείλισης.

Μεταξύ του δοχείου υπερχείλισης και του καναλιού παρεμβάλλεται το τμήμα της διάταξης, στο οποίο συντελείται η δημιουργία του υμένου, ο οποίος ρέει στο κανάλι. Πρόκειται για ένα δευτερεύον δοχείο υπερχείλισης, ειδικά διαμορφωμένο και τοποθετημένο κάθετα στην κατεύθυνση ροής. Είναι και αυτό φτιαγμένο από plexiglas και βρίσκεται ακριβώς πριν από το κανάλι ροής. Για την ρύθμιση της παροχής και την επίτευξη ομοιόμορφου πάχους του υμένου, έγινε χρήση κατάλληλης βάνας. Αυτή παρεμβάλλεται μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος δοχείου και συνδέεται με τα δύο δοχεία με τη βοήθεια ελαστικών σωλήνων. Τελικά το ρευστό, μέσω ακροφυσίων, καταλήγει στο δευτερεύον δοχείο υπερχείλισης. Το πάχος του υμένου που ρέει στο κανάλι (μόλις υπερχειλίσει το δευτερεύον δοχείο), είναι συνάρτηση της παροχής του ρευστού.

Για την επιβολή εξωτερικών διαταραχών χρησιμοποιήθηκε μια ηλεκτροβαλβίδα. Αυτή συνδέεται μέσω ελαστικών σωλήνων με το δευτερεύον δοχείο. Είναι εξοπλισμένη με χρονοδιακόπτη, ο οποίος ρυθμίζει την αυξομείωση της παροχής, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πειράματος.



Σχήμα 3.1.4: Το δευτερεύον δοχείο υπερχειλίσης.

Πάνω στο κανάλι ροής του υμένα είναι στερεωμένη η πηγή φθορισμού αλλά και το σύστημα λήψης δεδομένων. Η πηγή φθορισμού αποτελείται από λαμπτήρες μαύρου φωτός. Για την επίτευξη ελάχιστων ταλαντώσεων στην ένταση του υπεριώδους φωτός, χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα τροφοδοσίας (ballast, starter). Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετήθηκαν στην πειραματική διάταξη (παράλληλα με τη ροή, συμμετρικά τοποθετημένοι), οφείλεται στην προσπάθεια για επίτευξη βέλτιστης κατανομής της έντασης του υπεριώδους φωτός. Προϋπόθεση για την επιτυχημένη διεξαγωγή του πειράματος, είναι η μέγιστη ένταση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι λαμπτήρες TLK 40W, οι οποίοι εκπέμπουν ακτινοβολία που διαπερνά την πλάκα plexiglas (απαίτηση για την λήψη δεδομένων).

Το σύστημα λήψης δεδομένων αποτελείται από μια ψηφιακή κάμερα, τον εικονολήπτη και τον παλμογράφο. Η ψηφιακή κάμερα CCD είναι υψηλής ανάλυσης. Μέσω αυτής λαμβάνονται οι εικόνες, των οποίων η φωτεινότητα μετρείται σε LUX. Η συγκεκριμένη κάμερα (Sony XC – 77/77CE) έχει πολύ καλή ευαισθησία στο φως (0,5 lux) και πολύ καλή αναλογία σήματος – θορύβου (50 dB). Μπορεί να λάβει πενήντα εικόνες το δευτερόλεπτο. Ο εικονολήπτης (DT3155 Frame Grabber Board - Data Translation), αφού μετατρέψει το σήμα που λαμβάνει από την κάμερα σε ηλεκτρικό (mV), εκτελεί την διακριτοποίηση

αυτού σε 255 διακριτές τιμές (μέσω του A/D converter). Η κάρτα αυτή μπορεί να μεταφέρει μεγάλο αριθμό εικόνων (τριάντα και είκοσι πέντε εικόνες ανά δευτερόλεπτο για συχνότητα εξήντα και πενήντα Hz, αντίστοιχα). Με τον παλμογράφο ελέγχεται τόσο το σήμα της κάμερας, όσο και η συχνότητα δειγματοληψίας.

Το σύστημα αποθήκευσης και περαιτέρω επεξεργασίας των δεδομένων είναι ο ηλεκτρονικός υπολογιστής [12]. Εννοείται ότι αυτός είναι εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό που επιτρέπει την αποθήκευση των εικόνων (HL IMAGE TOOL 98++) και το πρόγραμμα για την επεξεργασία αυτών (matlab). Η πηγή φθορισμού και το σύστημα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων, συνθέτουν τον απαιτούμενο εξοπλισμό για την εφαρμογή της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό. Για την εν λόγω μέθοδο γίνεται αναφορά στην επόμενη θεματική ενότητα.

3.2. Μέθοδος απεικόνισης με φθορισμό.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη μία λεπτομερής ανάλυση της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό (fluorescence imaging method). Η μέθοδος αυτή είναι το βασικό εργαλείο για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας, που δεν είναι άλλος από την κατανόηση της συμπεριφοράς υγρού υμένα ο οποίος ρέει υπό γωνία πάνω σε επίπεδο τοίχωμα. Επιτρέπει μετρήσεις του πάχους του υμένα με ακρίβεια μικρομέτρων.

Για να είναι εφικτή η χρήση της μεθόδου είναι απαραίτητα τα παρακάτω στοιχεία – όργανα:

- ✓ Πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας.
- ✓ Κατάλληλη χρωστική ουσία για τον φθορισμό του υμένα.
- ✓ Ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης (CCD).
- ✓ Κατάλληλο εικονολήπτη.
- ✓ Λογισμικό ικανό να επεξεργαστεί τα δεδομένα και να δώσει ποσοτικά αποτελέσματα, για τα διάφορα χαρακτηριστικά του υμένα.

Η σημασία των λαμπτήρων υπεριώδους φωτός είναι μεγάλη. Παράγουν την απαραίτητη ακτινοβολία, με τη βοήθεια της οποίας γίνεται εφικτή η μέτρηση της έντασης του ηλιακού φωτός, που εκπέμπει ο φθορίζων υμένας. Βέβαια, πρέπει η χρωστική ουσία να επιλέγεται προσεκτικά, αφού υπάρχουν ουσίες που απορροφούν υπεριώδες και εκπέμπουν ορατό φως σε διαφορετικές περιοχές μήκους κύματος. Γενικά η διαδικασία επιλογής λαμπτήρων, χρωστικής ουσίας και οπτικών φίλτρων (θα γίνει αναφορά σε αυτά αργότερα) είναι άμεσα συνδεδεμένες.

Το υγρό και η χρωστική ουσία απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπει η πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Το υπόλοιπο μέρος αυτής διαπερνάει τον υμένα. Η ένταση του φωτός που απορροφάται, όταν η ακτινοβολία διέρχεται μέσα από τον υμένα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I(l) = I_0 \exp(-K \nu l) \quad (3.1)$$

Στη σχέση αυτή, με K_n συμβολίζεται ο συντελεστής απορρόφησης, ο οποίος στην περίπτωση του νερού είναι αρκετά μικρός. Μπορεί επομένως να γίνει η παραδοχή σταθερής έντασης φωτός. Η μορφή που παίρνει η παραπάνω εξίσωση είναι η εξής [6]:

$$I(x, y, t) = K \cdot I_0(x, y) \cdot h(x, y, t) \quad (3.2)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη που εμφανίζονται στις δύο εξισώσεις είναι:

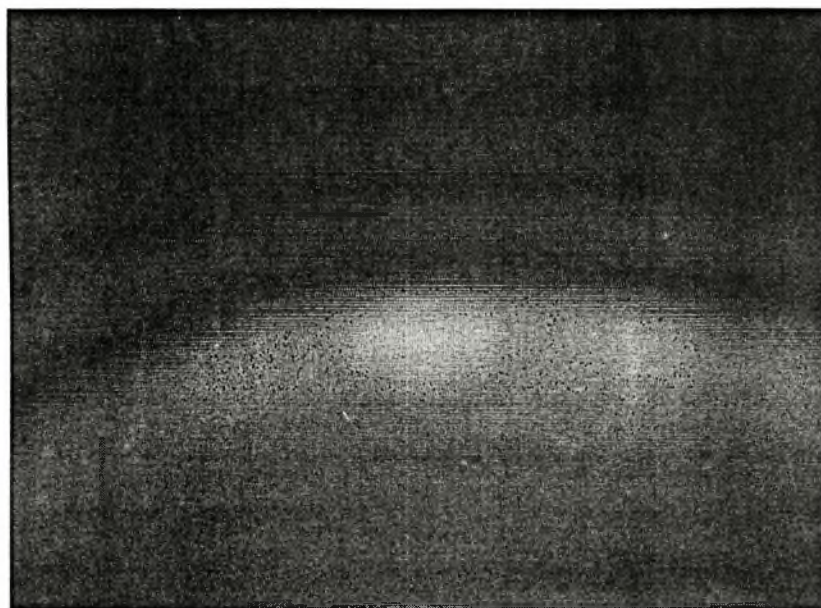
- ☞ $I_0(x, y)$: εξαρτάται από τον τοπικό φωτισμό, μετράται δε κατά την βαθμονόμηση της συσκευής,
- ☞ l : η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία στο εσωτερικό του υμένα,
- ☞ $I(x, y, t)$: η ένταση του φωτός,
- ☞ $h(x, y, t)$: το τοπικό πάχος του υμένα και
- ☞ K μια σταθερά.

Το ορατό φως που εκπέμπεται από τον φθορισμό του υμένα, αποτελεί το σήμα που λαμβάνει η ψηφιακή κάμερα (CCD). Πρέπει βέβαια η κάμερα να είναι εφοδιασμένη με τα κατάλληλα οπτικά φίλτρα. Η χρήση τους είναι απαραίτητη, αφού επιβάλλεται το φιλτράρισμα του φωτός που εκπέμπει ο φθορίζων υμένας, πριν αυτό εισέλθει στην κάμερα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των μετρήσεων. Γνωρίζοντας το είδος των λαμπτήρων και τη χρωστική ουσία που χρησιμοποιείται, είναι εφικτή η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού φίλτρων [12].

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι λαμπτήρες TLK 40W, αφού όπως αναφέρθηκε και κατά την περιγραφή της πειραματικής διάταξης παρουσιάζουν μέγιστη ένταση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Για την τελική επιλογή χρωστικής ουσίας, έγιναν πειράματα τόσο με το είδος αυτής όσο και με την συγκέντρωση αυτής στο διάλυμα, με σκοπό την επίτευξη βέλτιστου φθορισμού. Τελικά επελέγη η ουρανίνη ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$), η οποία εκπέμπει πρασινοκίτρινο φως σε μήκος κύματος 510 – 550 nm, όταν απορροφά υπεριώδη ακτινοβολία. Μικρή συγκέντρωση αυτής (100 – 300 ppm) στο νερό είναι αρκετή για τον πλήρη φθορισμό του διαλύματος. Επιπλέον, λόγω

ακριβώς της μικρής τιμής της συγκέντρωσης, δεν επηρεάζονται οι ιδιότητες του ρευστού. Για την επιλογή φίλτρων εξετάστηκαν διάφορα φίλτρα. Τα στοιχεία που υπήρχαν γι' αυτά, ήταν τα διαγράμματα φασματικών κατανομών των προμηθευτριών εταιριών. Πειραματικά αποδείχτηκε ότι, στην προκειμένη περίπτωση, ο συνδυασμός των φίλτρων yellow subtractive και green corrector είναι ο βέλτιστος.

Οι εικόνες τελικά συλλέγονται και αποθηκεύονται με τη χρήση κατάλληλης κάρτας συλλογής εικόνων (εικονολήπτης, frame grabber board) και κατάλληλου λογισμικού. Από την επεξεργασία αυτών των δεδομένων είναι εφικτή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά του υμένα. Η μορφή των εικόνων, όπως αυτές αποθηκεύονται, παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.2.1: Η μορφή των φωτογραφιών που συλλέγονται κατά την πειραματική διαδικασία.

3.3. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.

Σε ένα αρχικό στάδιο θα μπορούσε να διαχωριστεί η πειραματική διαδικασία σε δύο κατηγορίες. Στη καθαυτή διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων και σε αυτή της συλλογής και αποθήκευσης των πειραματικών δεδομένων. Το θέμα της επεξεργασίας της εικόνας, αντιμετωπίζεται σε ξεχωριστή θεματική ενότητα λόγω της σημασίας του στην ανάλυση των αποτελεσμάτων.

3.3.1. Διαδικασία πειραματικών μετρήσεων.

Τα βήματα που συνθέτουν τον κύκλο ροής του ρευστού στην πειραματική διάταξη είναι τα εξής:

- ♦ Προετοιμασία διαλύματος (είτε καθαρού νερού ή νερού – γλυκερίνης καθορισμένης σύστασης). Η διαδικασία αυτή γίνεται συνήθως στο δοχείο συλλογής, όπου και λαμβάνει χώρα η ανάμιξη του διαλύματος.
- ♦ Χρήση των αντλιών για την μεταφορά του διαλύματος στο πρωτεύον δοχείο υπερχειλίσης.
- ♦ Κίνηση του ρευστού, λόγω υψομετρικής διαφοράς προς το δευτερεύον δοχείο υπερχειλίσης. Η βάνα που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο δοχείων καθορίζει την παροχή (επομένως και τον αριθμό Re • υπολογισμός του τοπικού πάχους του υμένα) του ρευστού.
- ♦ Το ρευστό ρέει πάνω στην επίπεδη πλάκα του καναλιού και τελικά καταλήγει στο δοχείο συλλογής.

Με την ενεργοποίηση της πηγής υπεριώδους ακτινοβολίας και της ψηφιακής κάμερας ξεκινάει η διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος. Η κατηγοριοποίηση των πειραμάτων υποβοηθάει τον καλύτερο χειρισμό και την περαιτέρω επεξεργασία αυτών. Για το λόγο αυτό έγινε διαχωρισμός των πειραμάτων, με βάση τη χρήση ή όχι της ηλεκτροβαλβίδας. Προέκυψαν έτσι δύο κύριες ομάδες πειραμάτων. Στην πρώτη από αυτές ο υμένας επηρεαζόταν μόνο

από φυσικές διεγέρσεις (κλειστή ηλεκτροβαλβίδα), ενώ στη δεύτερη ομάδα επιβλήθηκε στον υμένα εξωτερική διαταραχή.

Σε κάθε μια από τις ομάδες αυτές έγινε περαιτέρω ομαδοποίηση των πειραμάτων. Κριτήριο για την ομαδοποίηση αυτή ήταν οι σημαντικές παράμετροι του υπό εξέταση προβλήματος: η χρήση ή όχι γλυκερίνης στο διάλυμα του ρευστού, η απόσταση από το σημείο υπερχείλισης, η γωνία κλίσης του καναλιού, ο μέσος αριθμός Re .

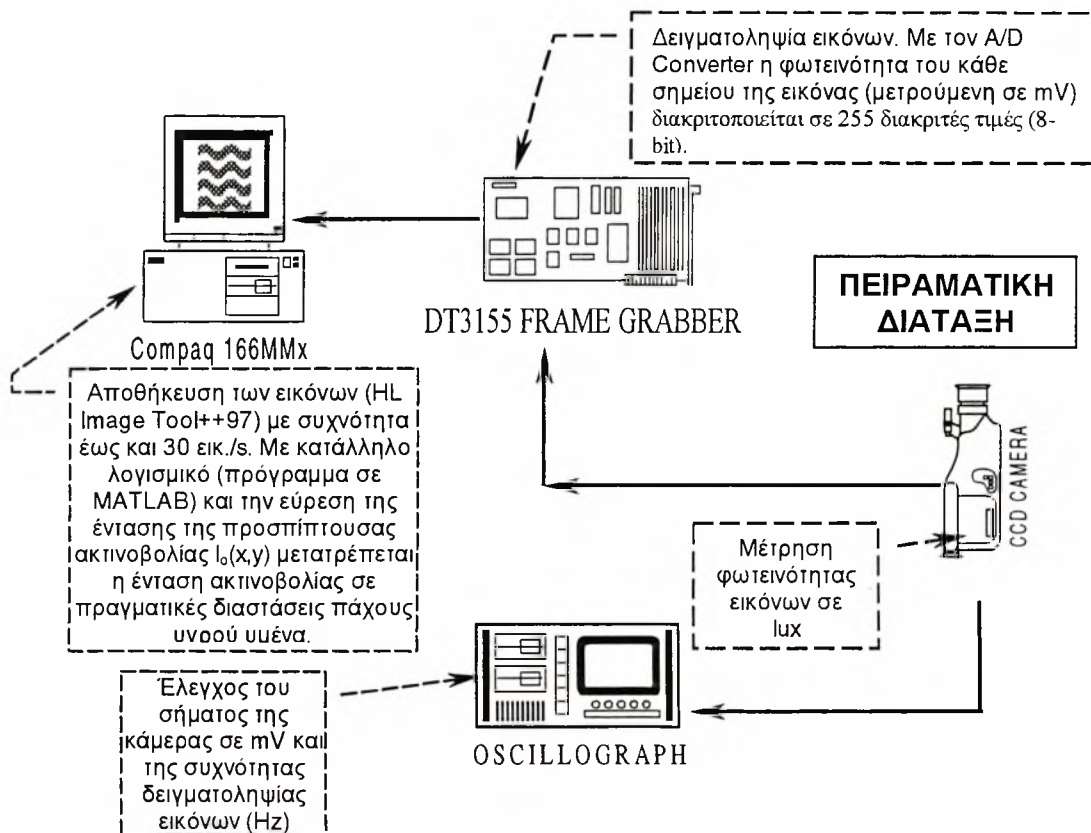
3.3.2. Διαδικασία συλλογής – αποθήκευσης δεδομένων.

Η διάταξη με την οποία επιτυγχάνεται η συλλογή των εικόνων περιγράφηκε στην ενότητα της πειραματικής διάταξης. Για κάθε μια από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν λίγο πριν, η διαδικασία συλλογής είναι η ίδια. Για ένα συγκεκριμένο πείραμα λαμβάνονται εικόνες σε τρεις διαφορετικές θέσεις:

- ☞ Θέση A: Αμέσως μετά το δοχείο υπερχείλισης.
- ☞ Θέση B: Σε απόσταση 252 mm από το δοχείο υπερχείλισης.
- ☞ Θέση C: Σε απόσταση 522 mm από το δοχείο υπερχείλισης.

Ο εικονολήπτης λαμβάνει τις φωτογραφίες που παίρνει η κάμερα, μετατρέπει το σήμα σε ηλεκτρικό και το διακριτοποιεί (A/D converter) σε 255 διακριτές τιμές. Όλο το διάστημα αυτό ο παλμογράφος ελέγχει το σήμα και τη συχνότητα δειγματοληψίας. Η αποθήκευση των δεδομένων και η επεξεργασία αυτών γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Εννοείται ότι είναι εξοπλισμένος με τα κατάλληλα λογισμικά πακέτα δηλαδή το HL Image tool 98++ και το Matlab. Το πρώτο από αυτά καθορίζει την ποιότητα της εικόνας, αφού καθορίζει τα επίπεδα μαύρου και λευκού επιπέδου της ψηφιακοποίησης. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η περιοχή διακριτοποίησης, βελτιστοποιώντας έτσι την ανάλυση της εικόνας [12]. Η τελική αποθήκευση γίνεται με ρυθμό δέκα εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Με τη χρήση του Matlab γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων, μια διαδικασία που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Στο σχήμα

που ακολουθεί, περιγράφεται σχηματικά η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη συλλογή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.3.2.1: Σύστημα συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων.

3. Επεξεργασία εικόνας.

Με τη χρήση τώρα του Matlab είναι δυνατή η μετατροπή των ληφθέντων εικόνων σε πίνακες διακριτών τιμών. Αυτή είναι η βασική αρχή επεξεργασίας των δεδομένων. Μια εικόνα διαστάσεων 576x768 pixels μπορεί να μετατραπεί σε ένα πίνακα, ο οποίος θα έχει 576 γραμμές και 768 στήλες ($\Pi_{(ij)} = \Pi_{(576 \times 768)}$). Η τιμή κάθε στοιχείου του πίνακα αντιστοιχεί στην διακριτοποιημένη τιμή της έντασης του φωτός, στο αντίστοιχο σημείο της εικόνας.

Αφού πλέον αποθηκεύονται οι εικόνες και δημιουργούνται οι αντίστοιχοι πίνακες, πρέπει να δημιουργηθεί ο πίνακας θορύβου. Παρόλες τις προσπάθειες για την αποφυγή θορύβου, είναι αδύνατον αυτός να μηδενιστεί (offset, θερμικός). Ο πίνακας δημιουργείται από μια σειρά εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται με τις ελάχιστες δυνατές τιμές των επιπέδων ψηφιακοποίησης. Η βασική εξίσωση στην οποία στηρίζεται η διαδικασία επεξεργασίας, είναι η εξίσωση (2), όπως αυτή περιγράφηκε στην ενότητα της ανάλυσης της μεθόδου απεικόνισης με φθορισμό:

$$I(x, y, t) = K \cdot I_0(x, y) \cdot h(x, y, t) \quad (3.2)$$

Σημαντικό σημείο της διαδικασίας επεξεργασίας των εικόνων είναι η εύρεση της σταθεράς $K \cdot I_0$. Η ποσότητα I_0 αντιπροσωπεύει την ένταση που εκπέμπει ο υμένας, όταν είναι ευσταθής και αδιατάρακτος. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι πρόκειται για την βάση σύγκρισης των αποτελεσμάτων (baseline). Ο τελικός πίνακας που θα αντιπροσωπεύει την ένταση του επιπέδου και ευσταθή υμένα, προκύπτει από τη διαδικασία του frame averaging όλων των εικόνων που έχουν ληφθεί. Εννοείται βέβαια πως πρέπει από την ένταση αυτή να αφαιρεθεί ο υπάρχον θόρυβος. Η παρακάτω σχέση δίνει την τελική μορφή του πίνακα I_0 :

$$I_0^{new}(i, j) = I_0(i, j) - \text{noise}(i, j), \forall i, j \quad (3.3)$$

Η εξίσωση (2) μπορεί να γραφεί απλούστερα ως εξής:

$$I = K \cdot I_0 \cdot h \quad (3.4)$$

Ακόμα ισχύει ότι $I_0 = K \cdot I_0 \cdot h_0$ (3.5)

Τελικά προκύπτει ότι

$$I / I_0 = h / h_0 \quad (3.6)$$

Όπου:

h : το τοπικό πάχος του υμένα,

h_0 : το πάχος του ευσταθούς υμένα και

I, I_0 : οι αντίστοιχες εντάσεις του υπεριώδους φωτός

Εφόσον η κάθε εικόνα μετατρέπεται μέσω του Matlab σε έναν πίνακα, η παραπάνω σχέση μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$h/h_0 = \Pi(i, j) / I_0 \text{ new}(i, j) \quad (3.7)$$

Στην αρχή της διαδικασίας έγινε η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος (q) σε διακριτές τιμές. Με παρόμοιο τρόπο γίνεται η αντίστροφη μετατροπή, με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$q = (\text{λευκό επίπεδο}) - (\text{μαύρο επίπεδο}) / 255 \quad (3.8)$$

Με την μετατροπή αυτή και τη βοήθεια των προηγούμενων σχέσεων, είναι δυνατή η έκφραση της εξίσωσης (3) σε όρους πινάκων:

$$\Pi \text{ new}(i, j) = \Pi(i, j) \times q + BL(i, j) - \text{noise} \quad (3.9)$$

4. Ποιοτικές παρατηρήσεις

Διεξήχθησαν διάφορες σειρές πειραμάτων σε κάθε μία από τις οποίες η μία από τις παραμέτρους του προβλήματος ήταν σταθερή. Έτσι ήταν εφικτή η παρακολούθηση της επίδρασης (α) των υπολοίπων παραμέτρων στην εξέλιξη του λεπτού υμένα και (β) η σύγκριση των αποτελεσμάτων (ποιοτικά πάντα) για διάφορες τιμές αυτών. Η ομαδοποίηση των πειραμάτων, η οποία έγινε με βάση την κλίση του καναλιού, διευκόλυνε την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων. Οι άλλες παράμετροι των οποίων η επίδραση θεωρήθηκε σημαντική στο υπό εξέταση θέμα είναι η συχνότητα της διαταραχής και ο αριθμός Re . Στα πειράματα που αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιήθηκε διάλυμα καθαρού νερού.

Όσον αφορά την συχνότητα της διαταραχής, μεταβάλλοντας το χρονικό διάστημα ανοίγματος - κλεισίματος της ηλεκτροβαλβίδας ήταν εφικτή η αλλαγή του πλάτους της διαταραχής (κλείσιμο) και του μήκους κύματος αυτής (συχνότητα). Ο υπολογισμός του αριθμού Re έγινε με βάση την μέση ταχύτητα του υμένα και όχι τη μέγιστη τιμή αυτής. Και οι δύο τιμές της ταχύτητας υπολογίζονται από την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το απλοποιημένο πρόβλημα του αδιατάρακτου υμένα (Navier - Stokes).

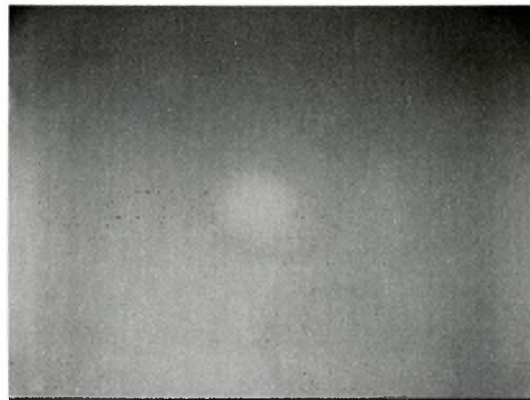
4.1. Πειράματα σε κλίση μια μοίρα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει τόσο η χωρική, όσο και η χρονική εξέλιξη των κυμάτων. Το κύμα προκαλείται από το υδραυλικό άλμα, που δημιουργείται από το κλείσιμο – άνοιγμα της ηλεκτροβαλβίδας. Ουσιαστικά πρόκειται για μία

περιοδική αυξομείωση στην παροχή με συχνότητα $\nu = 0,166 \text{ Hz}$ (5,5 sec άνοιγμα – 0,5 sec κλείσιμο).

Από τις εικόνες που ελήφθησαν για μέσο αριθμό Re ίσο με 23, φαίνεται ότι η διαταραχή, η οποία επιβάλλεται στη ροή, συνεχώς μικραίνει και στη C θέση αποσβένεται πλήρως. Αυτό σημαίνει ότι στις συγκεκριμένες συνθήκες ο υμένας είναι ευσταθής (stable).

Στη θέση B, η αυξομείωση της παροχής έχει πλέον δημιουργήσει ένα roll wave. Αυτό έχει πλήρως διδιάστατη δομή, ενώ είναι εμφανές ότι στο μέτωπο αυτού έχουν σχηματιστεί μερικές ρυτιδώσεις (ripples, bow waves). Συγκεκριμένα, παρατηρούνται δύο ρυτιδώσεις οι οποίες έχουν διδιάστατη δομή. Το ότι τελικά ο υμένας είναι ευσταθής, αποσβένεται δηλαδή η διαταραχή, μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα που έπεται.

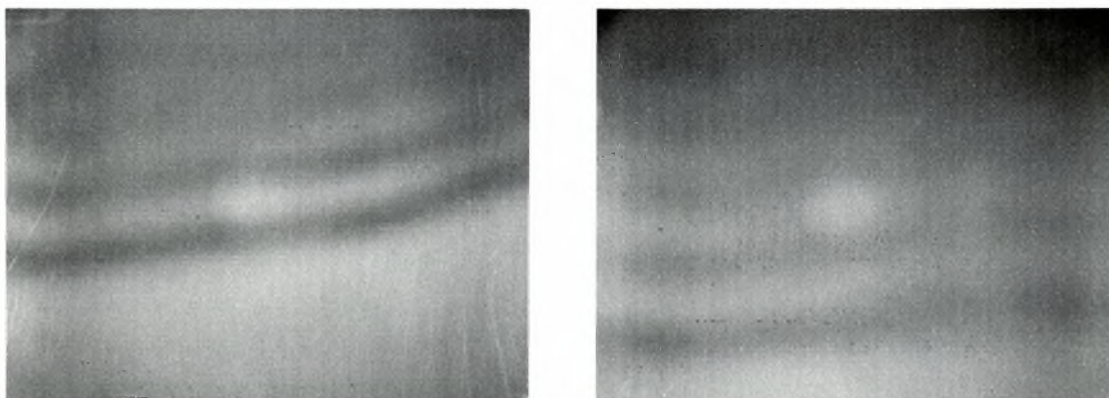


Σχήμα 4.1.1: Φωτογραφία στην τρίτη θέση και σε μέσο αριθμό $Re = 23$.

Ανεβάζοντας τον αριθμό Re σε τιμή 47 φαίνεται στη θέση A ότι δημιουργείται το υδραυλικό άλμα, όπως ακριβώς περιγράφηκε παραπάνω. Στη θέση B το άλμα αυτό έχει μετατραπεί σε solitary (ή roll) wave (μοναχικό κύμα), το οποίο έχει τρεις ρυτιδώσεις (ripples, bow waves) μπροστά από το μέτωπό του. Με τον όρο ρυτιδωση χαρακτηρίζουμε τα μικρότερου πλάτους κύματα που προηγούνται του roll wave.

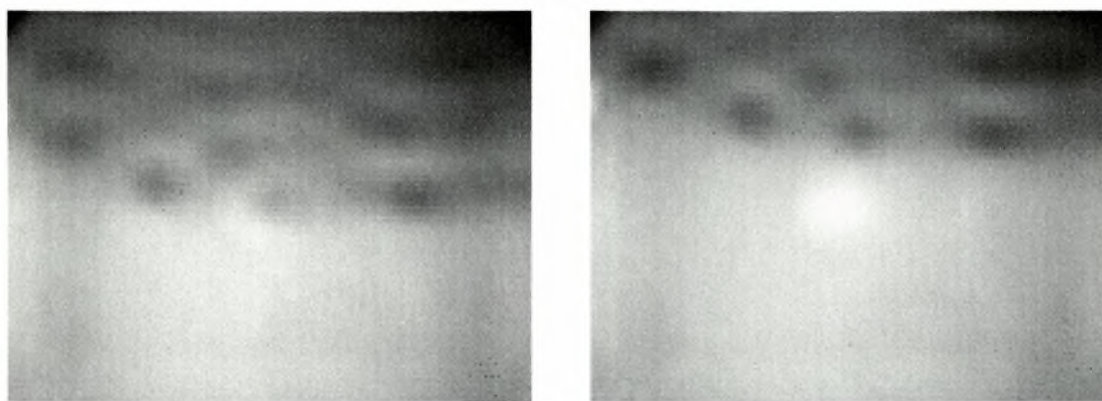
Στο τέλος του καναλιού (θέση C) το κύμα έχει 4 ρυτιδώσεις (εικόνα 1v016#0555re47c51). Η διαφορά αυτή στον αριθμό των ρυτιδώσεων αλλά και στη γενικότερη μορφή του κύματος μεταξύ των θέσεων B και C, υποδηλώνει ότι το κύμα δεν λαμβάνει την τελική του μορφή αμέσως. Η μεταβολή της μορφής του γίνεται σταδιακά, καθώς ο υμένας ρέει, και ενδεχομένως να μην

είναι αρκετό το μήκος του συγκεκριμένου καναλιού, για να λάβει το κύμα την τελική του μορφή. Πάντως μετά την πάροδο του κύματος ο υμένας παραμένει επίπεδος μέχρι να εμφανιστεί η επόμενη διαταραχή.



Σχήμα 4.1.2: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 47$ και στις θέσεις B και C αντίστοιχα.

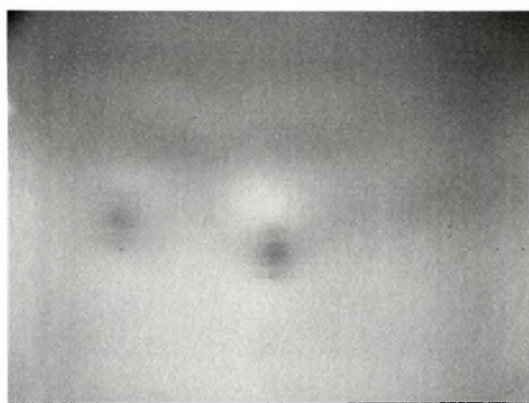
Αυξάνοντας την παροχή, στις θέσεις A και B δεν παρατηρείται κάτι διαφορετικό οπότε και οι περαιτέρω παρατηρήσεις εστιάζονται στο τέλος του καναλιού (θέση C). Έτσι σε αριθμούς Re 80 και 140 φαίνεται το solitary wave με τρεις και δύο ρυτιδώσεις αντίστοιχα. Το σημαντικό σημείο είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται «σπάσιμο» του κύματος (προφανώς κάποια μορφή τρισδιάστατης αστάθειας) με αποτέλεσμα τη μορφή που φαίνεται στις αντίστοιχες εικόνες. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν, αποτυπώνονται τα φαινόμενα τα οποία μόλις αναφέρθηκαν. Οι πρώτες από αυτές αντιστοιχούν σε μέσο αριθμό Re ίσο με 80.



Σχήμα 4.1.3: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 80$, στην τρίτη θέση λήψης εικόνων.

Το φαινόμενο το οποίο αναφέρθηκε σαν σπάσιμο του κύματος, σχετίζεται αποκλειστικά με το μέτωπο του roll wave. Παρουσιάζονται αυξομειώσεις στο πάχος του μετώπου του κύματος, αλλά και αλλοίωση της αρχικής μορφής αυτού (μορφή τόξου). Με λίγα λόγια, η δομή των ρυτιδώσεων που προηγούνται του κύματος είναι τρισδιάστατη. Όπως φαίνεται, η εμφάνιση της παρατηρηθείσας δομής για δεδομένη κλίση του καναλιού, εξαρτάται από τον αριθμό Re . Αναμένεται ότι, αυξανόμενης της τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου, το φαινόμενο αυτό θα ξεκινάει συνεχώς σε αποστάσεις μικρότερες από το σημείο υπερχείλισης.

Η μεταβολή του πάχους του υμένα στα συγκεκριμένα σημεία παρουσιάζει μια κανονικότητα. Αυτή εκφράζεται με την εμφάνιση βαθουλωμάτων τα οποία και σχεδόν ισαπέχουν μεταξύ τους. Στις συγκεκριμένες συνθήκες ο αριθμός των βαθουλωμάτων αυτών είναι τέσσερα. Δεδομένου του πλάτους της εικόνας (12 cm), μπορεί να γίνει λόγος για μήκος κύματος των βαθουλωμάτων αυτών ίσο με 3 cm. Πάλι στο διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών διαταραχών ο υμένας παρουσιάζεται επίπεδος.



Σχήμα 4.1.4: Φωτογραφία σε αριθμό $Re = 140$ – θέση C

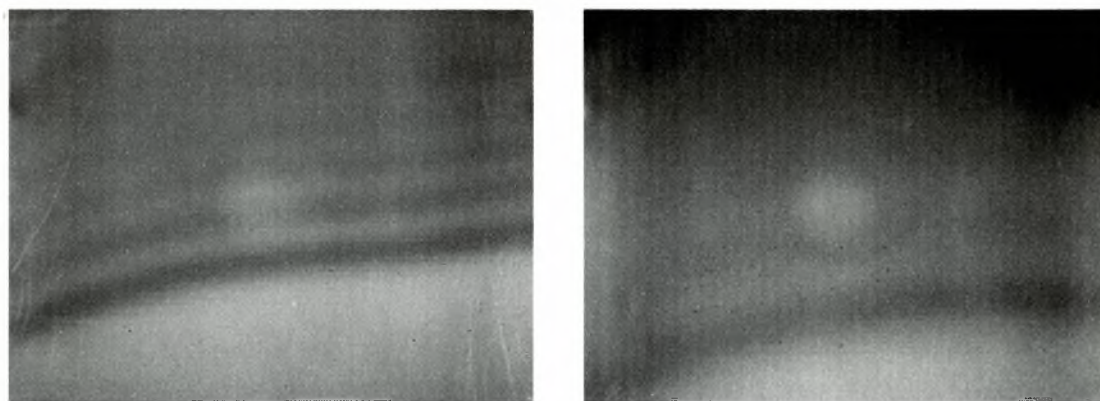
Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της περαιτέρω αύξησης του αριθμού Reynolds ($Re = 140$). Βρέθηκε ότι οι παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω, σχετικά με την εξέλιξη του κύματος, ισχύουν και στην περίπτωση αυτή. Στην παραπάνω φωτογραφία φαίνονται καθαρά δύο από αυτά τα βαθουλώματα. Εκ πρώτης όψεως δείχνουν να είναι μεγαλύτερα από τα

αντίστοιχα σε $Re = 80$, αλλά και να απέχουν περισσότερο το ένα από το άλλο (μεγαλύτερο μήκος κύματος). Σε ένα αρχικό στάδιο επομένως θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η μεγάλη αύξηση του αριθμού Re οδηγεί σε ελάττωση του αριθμού των βαθουλωμάτων.

4.2. Πειράματα σε κλίση δύο μοίρες.

Και πάλι τα πειράματα έγιναν στις τρεις θέσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη θεματική ενότητα (A, B, C) για την ίδια συχνότητα επιβαλλόμενης διαταραχής. Μάλιστα διατηρήθηκε ίδιο το άνοιγμα – κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας και εξετάστηκαν περίπου οι ίδιοι αριθμοί Re (ίδια τάξη μεγέθους).

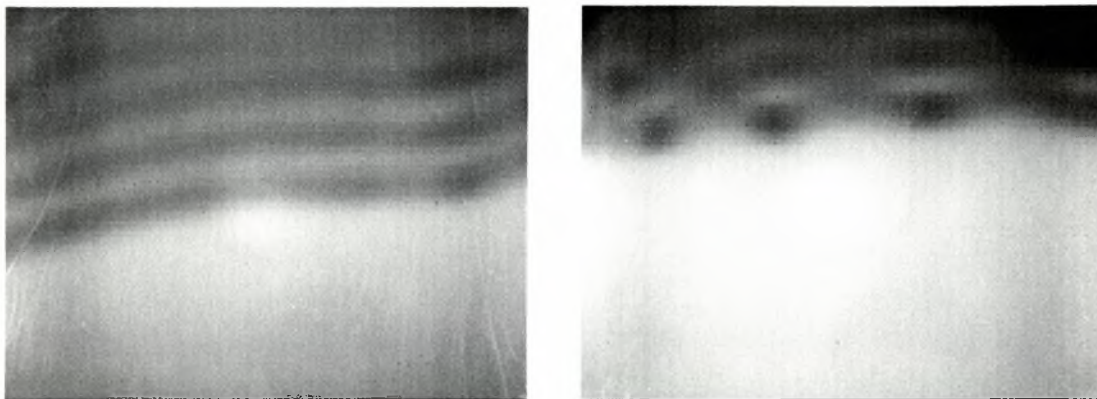
Για την πρώτη περίπτωση όπου ο μέσος αριθμός Re ήταν 28, παρατηρείται στη πρώτη θέση το υδραυλικό άλμα, που δημιουργείται από την στιγμιαία αύξηση της παροχής. Στη θέση B φαίνεται το κύμα (roll wave) το οποίο έχει τέσσερις ρυτιδώσεις. Το κύμα προχωρά προς το τέλος του καναλιού και εξέρχεται από αυτό χωρίς να παρουσιάσει κάποια σημαντική αλλαγή. Μετά την πάροδο του κύματος και μέχρι την εμφάνιση της επόμενης διαταραχής ο υμένας παραμένει επίπεδος. Γενικά, τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στις υπό εξέταση συνθήκες, είναι παρόμοια με αυτά σε κλίση μία μοίρα και σε αντίστοιχο αριθμό Re , όπως φαίνεται και στις ακόλουθες φωτογραφίες.



Σχήμα 4.2.1: Εικόνες που ελήφθησαν σε αριθμό Re ίσο με 28 και στις θέσεις B, C αντίστοιχα.

Αυξάνοντας την τιμή του αριθμού Re σε 53, η συμπεριφορά του υμένα δεν μεταβάλλεται στις δύο πρώτες θέσεις (σε σχέση πάντα με τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις). Στη θέση A ειδικότερα η πάροδος του

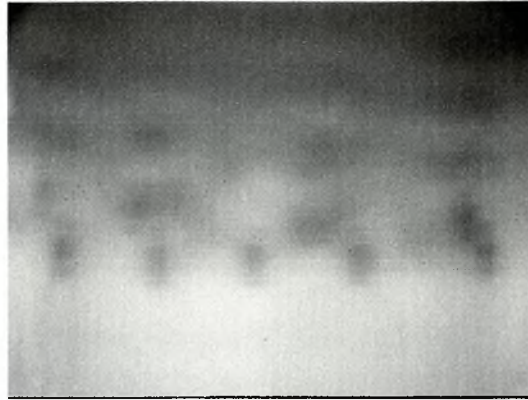
κύματος γίνεται αισθητή από την μεταβολή της φωτεινότητας στην εικόνα. Έτσι, ενδεικτικά παρατίθεται η παρακάτω εικόνα που αντιστοιχεί στη δεύτερη θέση λήψης φωτογραφιών, για τη συγκεκριμένη παροχή.



Σχήμα 4.2.2: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 53$ και στις θέσεις B και C αντίστοιχα.

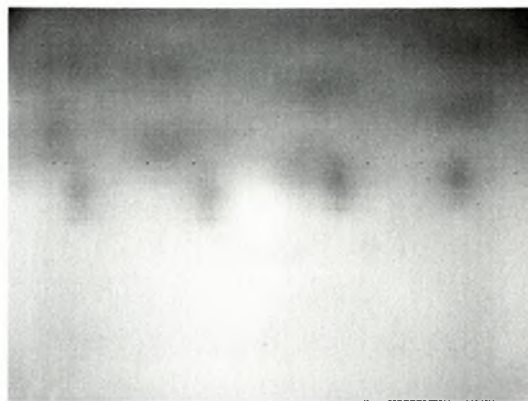
Στη θέση C, όπως φαίνεται και στην αντίστοιχη εικόνα, μπροστά ακριβώς από το roll wave παρατηρείται «σπάσιμο» των ripples, δίνοντας μια αίσθηση τρισδιάστατης δομής. Αμέσως εξάγεται το συμπέρασμα ότι αυξανόμενη της κλίσης του καναλιού (από μία σε δύο μοίρες), η συμπεριφορά αυτή πρωτοεμφανίζεται σε μικρότερες τιμές του αριθμού Re . Βέβαια, το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές σε ακόμα μεγαλύτερους αριθμούς Re . Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (δεξιά), το μέγεθος που ορίστηκε (στην προηγούμενη θεματική ενότητα) σαν μήκος κύματος των βαθουλωμάτων, λαμβάνει τιμή ίση περίπου με 2,25 cm.

Στις εικόνες που αντιστοιχούν σε $Re = 87$ και 136 (στην τρίτη θέση λήψης φωτογραφιών), τα φαινόμενα εντατικοποιούνται μπροστά από το μέτωπο του κύματος. Στην πρώτη από τις περιπτώσεις αυτές φαίνονται καθαρά έξι βαθουλώματα (μήκος κύματος ίσο με 1,9 cm), τα οποία χαρακτηρίζουν τη δομή στο μέτωπο του κύματος. Οι ρυτιδώσεις (ripples) έχουν τρισδιάστατη δομή.



Σχήμα 4.2.3: Φωτογραφία σε αριθμό $Re = 87$ – θέση C.

Στην τελευταία σειρά μετρήσεων ($Re_m = 136$), στην οποία αντιστοιχούν και οι παρακάτω φωτογραφίες, φαίνεται πως το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων είναι μεγαλύτερο συγκρινόμενο με το αντίστοιχο στην προηγούμενη περίπτωση (2,83 cm). Γενικεύοντας την μέχρι τώρα συμπεριφορά του υμένα, μπορεί να ειπωθεί ότι η μέγιστη πυκνότητα των βαθουλωμάτων παρατηρήθηκε σε μέσες τιμές της παροχής. Περαιτέρω αύξηση του μέσου αριθμού Re οδηγεί σε αύξηση του μήκους κύματος αυτών.



Σχήμα 4.2.4: Φωτογραφία σε αριθμό $Re = 136$ – θέση C.

Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την τελευταία ($Re_m = 136$) ο υμένας μεταξύ δύο διαδοχικών διαταραχών παραμένει επίπεδος. Στην τελευταία σειρά μετρήσεων παρουσιάζονται μερικά περιοδικά κύματα μεταξύ δύο

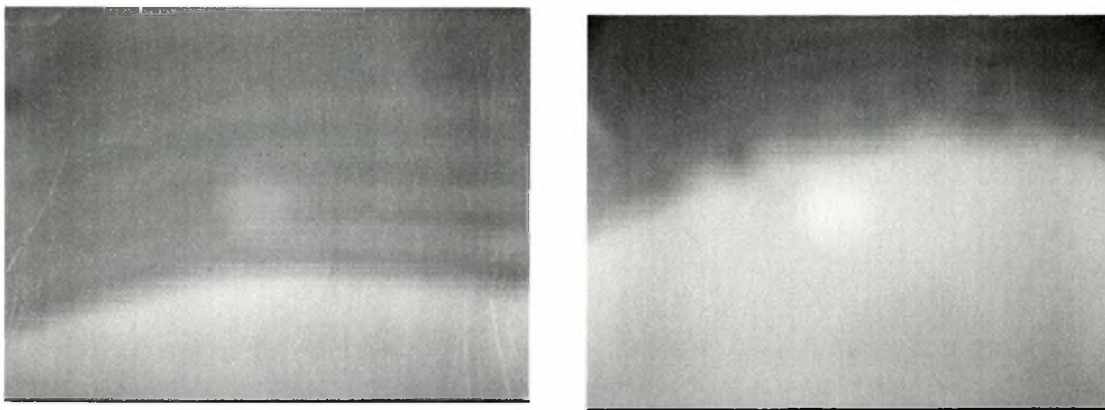
συνεχόμενων διαταραχών. Αυτά ενδεχομένως είναι αστάθειες που οφείλονται όχι στην επιβαλλόμενη διαταραχή αλλά στην ίδια την ροή (periodic or unforced waves). Στα μέχρι τώρα πειράματα δεν παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα λόγω του ότι η κλίση του καναλιού ήταν μικρή. Όπως φάνηκε η συμπεριφορά του υμένα ήταν η ίδια στις διάφορες περιπτώσεις, ακόμα και σε σχετικά μεγάλες παροχές.

4.3. Πειράματα σε κλίση τρεις μοίρες.

Στην κλίση αυτή εκτός από τις διαφορετικές παροχές μελετήθηκαν και διαφορετικοί συνδυασμοί ανοίγματος και κλεισίματος της ηλεκτροβαλβίδας. Ήταν με τον τρόπο αυτό εφικτή η πραγματοποίηση διαταραχών με την ίδια συχνότητα, με διαφορετικό όμως πλάτος διαταραχής. Έγινε προσπάθεια επίτευξης παρόμοιων αριθμών Re για να είναι εφικτή και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διάφορων υποκατηγοριών πειραμάτων.

α) Πειράματα σε κλίση 3^0 σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5.5 sec – 0.5 sec.

Αρχικά ελήφθησαν δεδομένα σε σχετικά χαμηλό αριθμό Re (περίπου 50). Από τις εικόνες που αντιστοιχούν σε λήψη φωτογραφιών στη θέση A, φαίνεται η δημιουργία του κύματος καθώς αυτό φεύγει από το δοχείο υπερχειλίσης. Στη δεύτερη θέση λήψης φωτογραφιών το κύμα φαίνεται καθαρά ότι μπροστά έχει αρκετές (πέντε πιθανόν) ρυτιδώσεις. Λίγο πριν το κύμα φύγει από την εικόνα, παρατηρείται «σπάσιμο» αυτού. Πίσω από αυτό ακολουθούν μερικά μικρά περιοδικά κύματα.

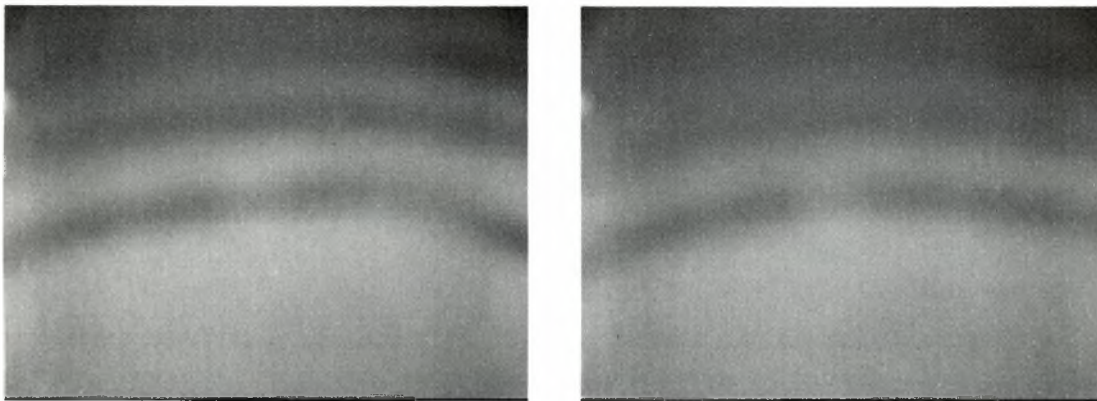


Σχήμα 4.3.1: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 49$, στις θέσεις B, C.

Όταν το roll wave φτάνει στην τρίτη θέση, φαίνεται ότι μπροστά από αυτό η δομή μεταπίπτει από διδιάστατη σε τρισδιάστατη. Παρουσιάζονται δηλαδή τα βαθουλώματα στο μέτωπο του κύματος, τα οποία παρατηρήθηκαν

και στις προηγούμενες σειρές πειραμάτων. Το μήκος κύματος αυτών είναι περίπου 1,5 cm (1,473 cm, επτά ή οκτώ βαθουλώματα). Το ίδιο μέγεθος ήταν σαφέστατα μεγαλύτερο στα πειράματα που διεξήχθησαν σε κλίση δύο μοιρών και στον ίδιο αριθμό Re. Επομένως μπορεί, αν κανείς θέλει, να γενικεύσει τις παρατηρήσεις που αφορούν το φαινόμενο αυτό, αφού είναι εμφανές πως η αύξηση της κλίσης επιδρά αυξητικά στον αριθμό των βαθουλωμάτων.

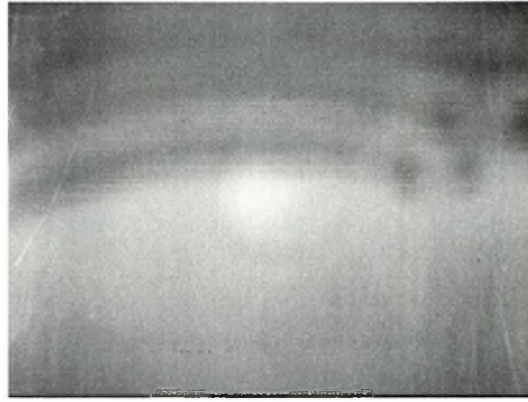
Αμέσως μετά το πρώτο κύμα έρχονται τρία ακόμη roll waves. Το πρώτο από αυτά είναι μικρότερο από το αρχικό και μεγαλύτερο από τα επόμενα δύο, ενώ παρουσιάζει τρεις ρυτιδώσεις. Το δεύτερο από αυτά έχει δύο ripples και το τελευταίο που είναι και το μικρότερο από όλα έχει μόνο ένα.



Σχήμα 4.3.2: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 49$, στις θέσεις B, C. Πρόκειται για τα μοναχικά κύματα που ακολουθούν το αρχικό.

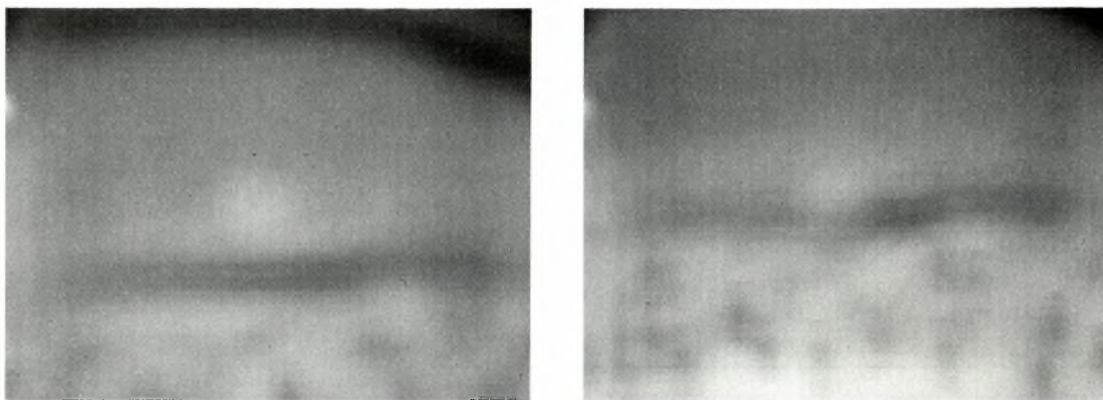
Ένα ακόμα σχόλιο που μπορεί να γίνει, έχει σχέση με τον αριθμό και την απόσταση των ρυτιδώσεων που παρατηρούνται μπροστά από τα κύματα. Όσο πιο μεγάλο είναι το κύμα, τόσο πιο πολλά είναι τα ripples και εμφανίζονται κοντά το ένα στο άλλο. Τα κύματα που έπονται του πρώτου roll wave έχουν μορφή που μοιάζει περισσότερο με αυτή που παρατηρήθηκε στα πειράματα που διεξήχθησαν σε μικρότερες μοίρες (μορφή τόξου). Μετά τη διέλευση του τελευταίου κύματος και μέχρι την επόμενη διαταραχή ο υμένας παραμένει επίπεδος.

Στη συνέχεια έγινε αύξηση του μέσου αριθμού Re στην τιμή 99. Έτσι στη θέση A ο υμένας κινείται γρήγορα και η μόνη ένδειξη του υδραυλικού άλματος είναι η αύξηση της έντασης της φωτεινότητας των φωτογραφιών. Στη θέση B το roll wave έχει μερικές ρυτιδώσεις (δύο ή τρεις) μπροστά του και καθώς φεύγει από την εικόνα αρχίζει να «σπάει».

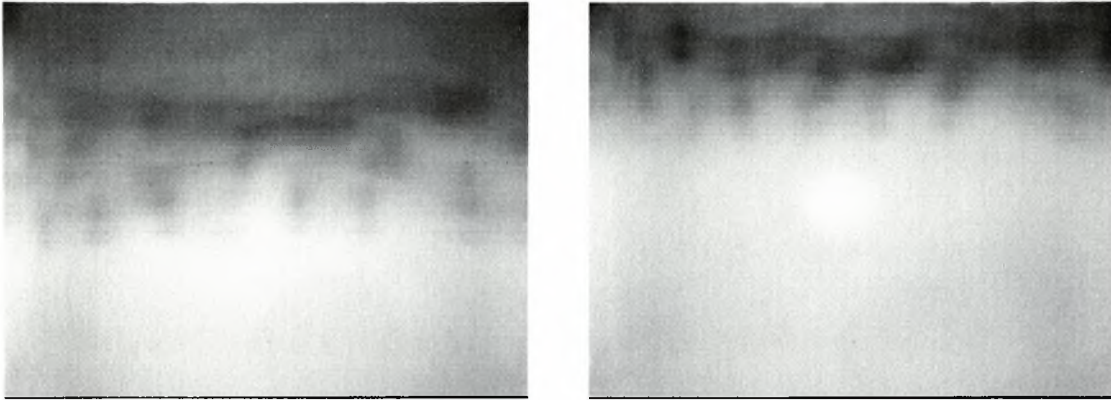


Σχήμα 4.3.3: Φωτογραφία σε αριθμό $Re = 99$ – θέση B.

Στη θέση C παρατηρούνται φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων: φαίνονται στην εικόνα ότι υπάρχουν περιοδικά κύματα τα οποία και παρασύρονται από το roll wave το οποίο και κινείται πιο γρήγορα από αυτά. Η δομή ακριβώς μπροστά από το roll wave είναι τρισδιάστατη. Στο μέτωπο δηλαδή του κύματος εμφανίζονται, όπως και στις προηγούμενες σειρές μετρήσεων, βαθουλώματα τα οποία στην περίπτωση αυτή έχουν μήκος κύματος 1,43 cm (οκτώ βαθουλώματα).

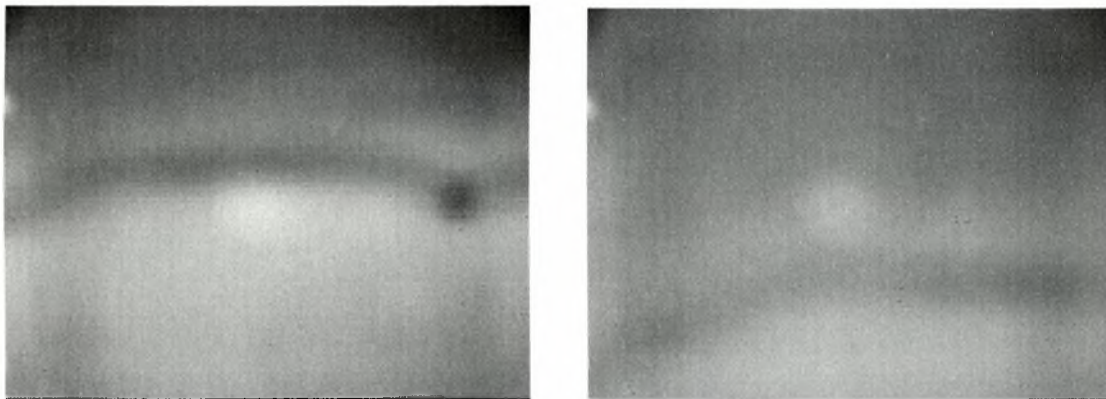


Σχήμα 4.3.4: Φωτογραφίες του κύματος σε αριθμό $Re = 99$ – θέση C.



Σχήμα 4.3.5: Φωτογραφίες του αρχικού κύματος σε αριθμό $Re = 99$ και στη θέση C.

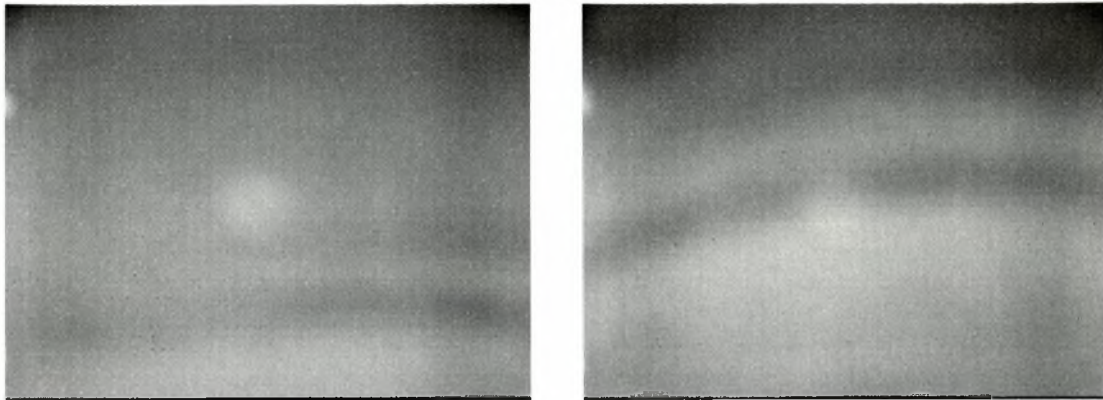
Σημαντικό είναι το στοιχείο ότι, παρόλο που το roll wave παρασύρει το μικρό περιοδικό κύμα που συναντά, η δομή του μετώπου του κύματος δε φαίνεται να μεταβάλλεται. Μετά από αυτό το κύμα ακολουθούν πέντε ακόμη solitary waves τα οποία έχουν ελάχιστα (ένα ή δύο) ripples και διδιάστατη δομή.



Σχήμα 4.3.6: Δύο από τα μοναχικά κύματα που ακολουθούν το αρχικό solitary κύμα.

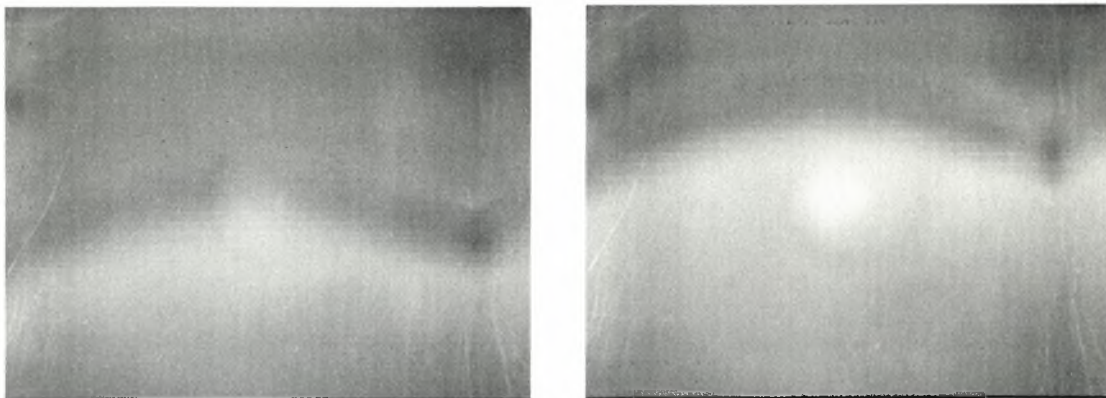
Από τις αντίστοιχες φωτογραφίες φαίνεται ότι το πρώτο από αυτά παρουσιάζει μέτωπο που χαρακτηρίζεται από διδιάστατη δομή, αλλά έχει εμφανή την τάση να σπάσει και να δημιουργήσει βαθουλώματα. Προφανώς αν το μήκος του καναλιού ήταν μεγαλύτερο, σε κάποιο σημείο και το κύμα αυτό θα παρουσίαζε τη δομή που έχει και το αρχικό. Ένα άλλο

χαρακτηριστικό είναι ότι η απόσταση που έχει το δεύτερο κύμα από το πρώτο είναι μικρότερη από αυτή μεταξύ του δεύτερου με το τρίτο κ.τ.λ.



Σχήμα 4.3.7: Δύο ακόμη φωτογραφίες κυμάτων που έπονται του αρχικού κύματος.

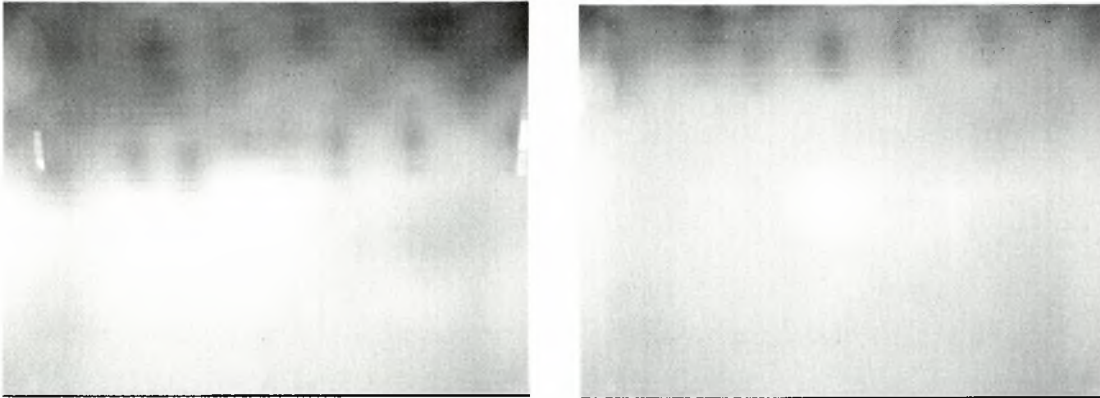
Τα φαινόμενα εντατικοποιούνται όσο αυξάνεται ο μέσος αριθμός Re . Στη θέση Β και σε αριθμό Re 148 το κύμα κινείται πολύ γρήγορα. Στις δύο φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνεται η δομή του υμένα στη θέση αυτή. Δεν είναι εύκολο να παρατηρηθεί η ύπαρξη και ο αριθμός των ripples, διαφαίνεται πάντως μια τάση για μετάβαση στην τρισδιάστατη ροή (παρουσία σπασίματος της μορφής του μετώπου του κύματος).



Σχήμα 4.3.8: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 148$ – θέση Β.

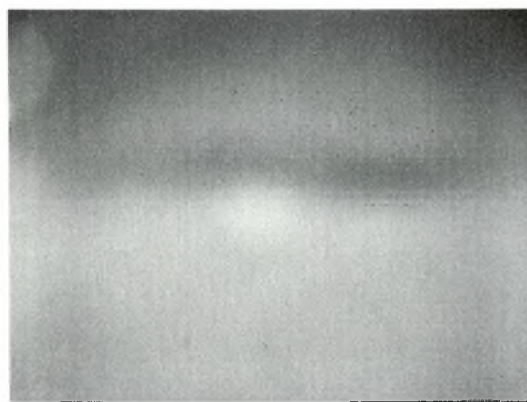
Στη θέση C η δομή μπροστά από το solitary wave είναι τρισδιάστατη. Και εδώ παρατηρείται η αλληλεπίδραση μεταξύ των κυμάτων, αφού το solitary

wave παρασέρνει τα κύματα που προηγούνται αυτού. Στα πειράματα πάντως που έγιναν σε κλίση τριών μοιρών παρατηρήθηκε μια σταθερότητα όσον αφορά την πυκνότητα των βαθουλωμάτων στο μέτωπο του κύματος. Ο αριθμός αυτών ήταν σε όλες τις περιπτώσεις οκτώ, δηλαδή ήταν ανεξάρτητος από την σταδιακή αύξηση του μέσου αριθμού Re (από 50 σε 100 και σε 150). Ενδεχομένως η παράμετρος αυτή σε κλίση μεγαλύτερη από δύο μοίρες να μην παίζει ουσιαστικό ρόλο στην περαιτέρω εξέλιξη του συγκεκριμένου φαινομένου.



Σχήμα 4.3.9: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 148$ – θέση C.

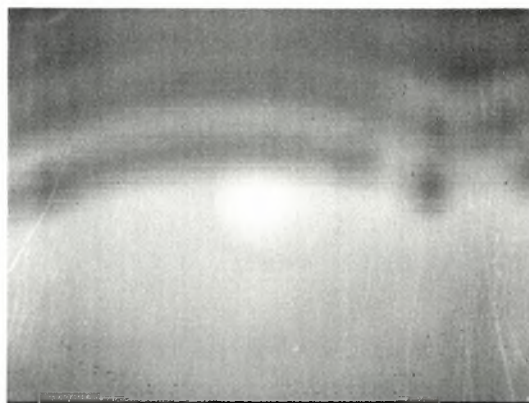
Μετά το πέρασμα του πρώτου κύματος δεν παρατηρούνται άλλα roll waves. Παρατηρούνται μερικά περιοδικά (periodic) κύματα (σχήμα 4.3.10) και μετά η δομή παίρνει μορφή αντίστοιχη της αδιατάρακτης στις ίδιες συνθήκες, μέχρι την επιβολή της επόμενης διαταραχής.



Σχήμα 4.3.10: Φωτογραφία του περιοδικού κύματος που χαρακτηρίζει τη δομή του υμένα μετά το πέρασμα των roll waves.

β) Πειράματα σε κλίση 3^0 σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5 sec – 1 sec.

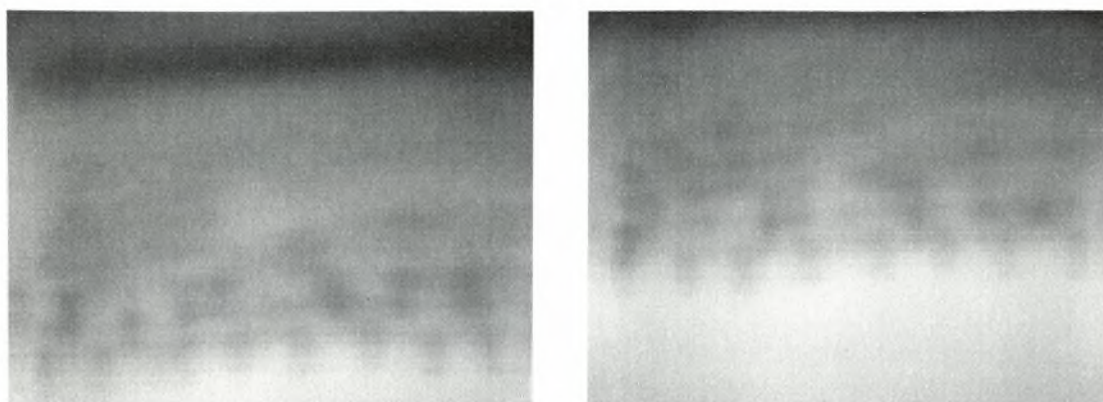
Παρατίθενται οι παρατηρήσεις που έγιναν σε μεγαλύτερους αριθμούς Re αφού εκεί εμφανίζονται πιο ενδιαφέροντα φαινόμενα. Έτσι σε Re 101 και στη θέση A η αυξομείωση στη φωτεινότητα είναι η ένδειξη της διέλευσης του υδραυλικού άλματος. Στη θέση B το κύμα με δύο ρυτιδώσεις περνά από την εικόνα. Στις πρώτες φωτογραφίες φαίνεται ότι το κύμα εμφανίζει σπασίματα. Στις τελευταίες εικόνες παρατηρείται η τάση για μετάβαση σε τρισδιάστατη δομή στο μέτωπο του κύματος.



Σχήμα 4.3.11: Φωτογραφία της ροής σε αριθμό $Re=101$, θέση B

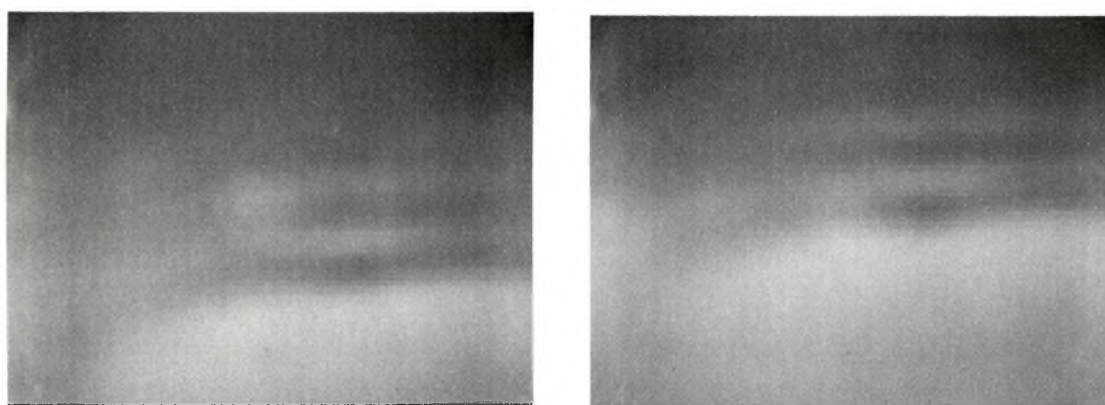
Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει την εμφάνιση των χαρακτηριστικών βαθουλωμάτων στην τρίτη θέση λήψης δεδομένων. Μεταξύ δύο διαδοχικών διαταραχών εμφανίζονται περιοδικά κύματα από τα οποία μερικά οφείλονται στη διαταραχή και τα άλλα είναι χαρακτηριστικά της αδιατάρακτης ροής.

Στη θέση C όντως το roll wave έχει πλήρως τρισδιάστατη δομή στο μέτωπό του. Τα βαθουλώματα είναι πολλά και μικρά, σε μικρή απόσταση το ένα από το άλλο. Διακρίνονται καθαρά οκτώ βαθουλώματα και επομένως μιλάμε για ένα μήκος κύματος αυτών ίσο με 1,4 cm. Και στην περίπτωση αυτή το roll wave κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή των περιοδικών κυμάτων της αδιατάρακτης ροής. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται και πάλι φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων (wave interaction phenomena).



Σχήμα 4.3.12: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 101$, θέση C

Ακολουθούν τρία μικρότερα κύματα με ελάχιστα ripples και επίπεδο υμένα μεταξύ αυτών. Στη συνέχεια έρχονται μερικά περιοδικά κύματα πίσω από τα οποία ακολουθούν δύο roll waves με λίγα ripples. Αυτά τα κύματα ενδεχομένως να μην οφείλονται στην επιβαλλόμενη διαταραχή αλλά να είναι χαρακτηριστικά της αδιατάρακτης ροής στις ίδιες συνθήκες.



Σχήμα 4.3.13: Δύο από τα κύματα που ακολουθούν το πρώτο roll wave.

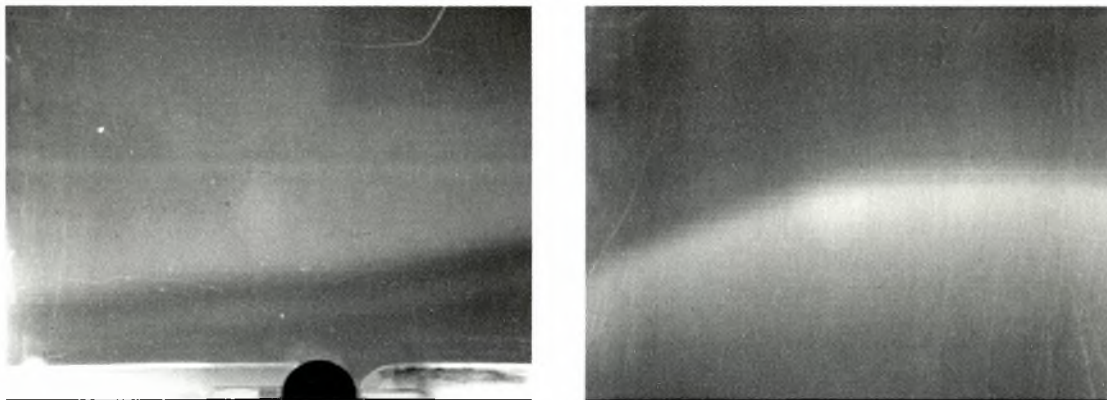
Όπως φαίνεται στις παραπάνω φωτογραφίες η δομή του μετώπου των κυμάτων είναι διδιάστατη μεν, εμφανίζει δε κάποια σπασίματα, αποκλίνοντας έτσι από την κανονική μορφή των roll waves.

4.4. Πειράματα σε κλίση πέντε μοίρες.

Και στην περίπτωση αυτή μελετήθηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί στο άνοιγμα και κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας. Επιβλήθηκαν έτσι διαταραχές με την ίδια συχνότητα και διαφορετικό πλάτος. Όσον αφορά τις παροχές στις διάφορες σειρές μετρήσεων, έγινε προσπάθεια να είναι αυτές παρόμοιες για να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και διαπίστωση της επίδρασης των υπολοίπων παραμέτρων στο υπό εξέταση πρόβλημα.

α) Πειράματα σε κλίση 5° σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5,8 sec – 0,2 sec.

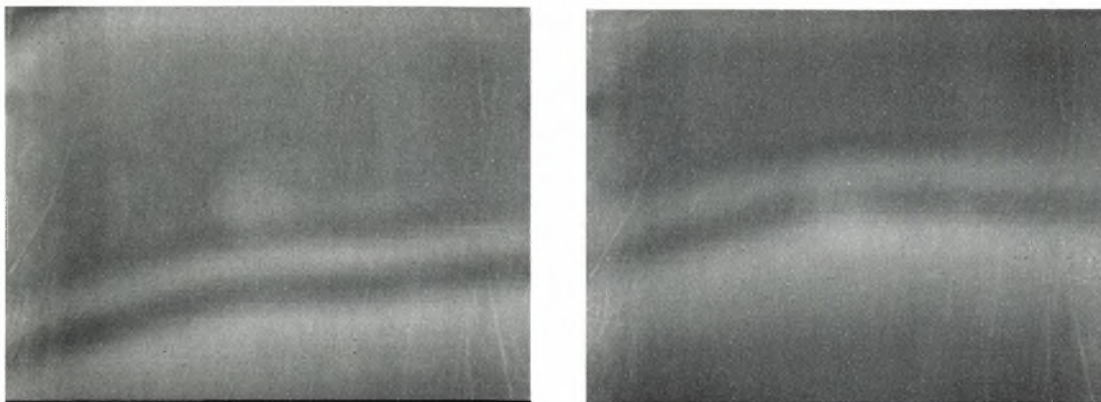
Με το συγκεκριμένο επιβαλλόμενο κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας ουσιαστικά επετεύχθη πολύ μικρό πλάτος διαταραχής. Σε αριθμό Re 27 και στην αρχή του καναλιού φαίνεται το κύμα το οποίο δημιουργείται από το υδραυλικό άλμα λόγω αυξομείωσης στην παροχή. Λίγο πριν το κύμα φύγει από το οπτικό πεδίο της κάμερας φαίνεται ότι έχει ήδη σχηματιστεί μία ρυτίδωση μπροστά από αυτό.



Σχήμα 4.4.1: Φωτογραφία της ροής σε αριθμό $Re = 27$ – θέση A, καθώς και το πρώτο κύμα καθώς αυτό περνάει από τη θέση B.

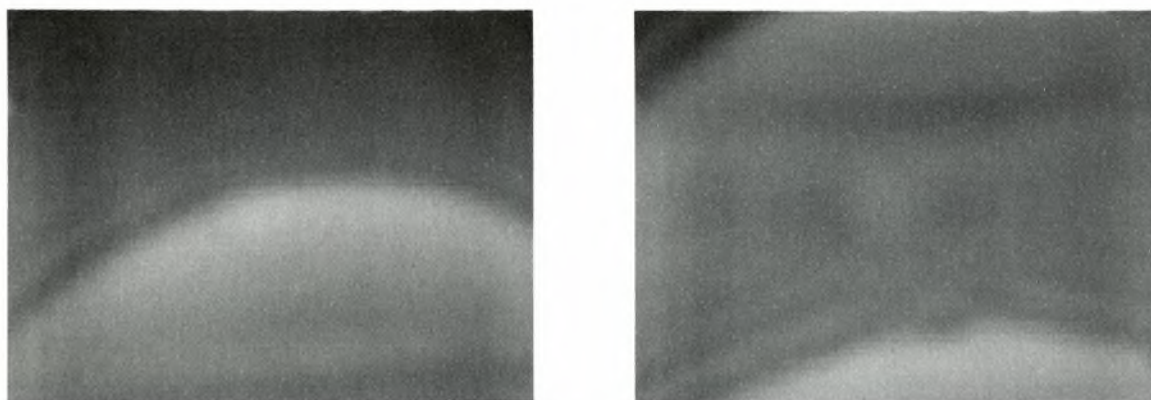
Στην θέση B και καθώς το κύμα περνά φαίνεται ότι στο μέτωπο αυτού δεν υπάρχουν ρυτιδώσεις. Το αρχικό solitary wave φαίνεται ότι ακολουθούν τρία μικρότερα roll waves με ελάχιστα ripples και μερικά περιοδικά κύματα. Μετά από αυτά ο υμένας παραμένει επίπεδος μέχρι την επόμενη διαταραχή.

Δεν παρατηρούνται βαθουλώματα στο μέτωπο των κυμάτων αυτών, παρά μόνο μία μικρή αλλοίωση της μορφής του πρώτου από αυτά (ένα σπάσιμο). Τα επόμενα δύο κύματα έχουν πλήρη διδιάστατη δομή.



Σχήμα 4.4.2: Τα κύματα που έπονται του αρχικού, στη δεύτερη θέση λήψης φωτογραφιών.

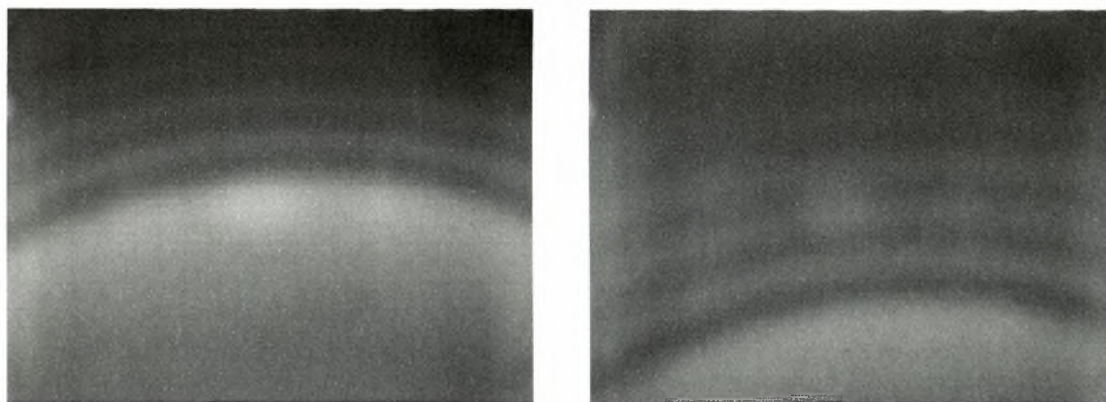
Στην θέση C φαίνεται ότι το κύμα έχει τρία ripples και πλήρως διδιάστατη δομή τόσο μπροστά όσο και πίσω του. Ειδικότερα όσον αφορά τη δομή ακριβώς πίσω από αυτό, αυτή χαρακτηρίζεται από δύο μικρά διδιάστατα αυλάκια τα οποία κινούνται με τη ροή χωρίς να μεταβάλλονται. Πρόκειται για απόδειξη του γεγονότος ότι το κύμα έχει περισσότερες από μία κορυφές (τρεις στην συγκεκριμένη περίπτωση).



Σχήμα 4.4.3: Το πρώτο και το δεύτερο κύμα, όπως αυτά παρατηρούνται στο συγκεκριμένο πείραμα.

Το αμέσως επόμενο κύμα είναι και αυτό roll wave. Η δομή του είναι διδιάστατη, παρατηρείται όμως ένα «σπάσιμο» αυτού, όπως φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα, το οποίο γίνεται πιο έντονο στις τελευταίες εικόνες (όταν το κύμα φεύγει από το κανάλι). Αυτό συμβαίνει προφανώς επειδή το κύμα δεν έχει λάβει την τελική του μορφή. Καθώς αυτό το κύμα φεύγει από το οπτικό πεδίο φαίνεται πως πλέον η δομή μπροστά από αυτό έχει γίνει πλήρως διδιάστατη. Φαίνεται τελικά πως η μετάβαση σε τρισδιάστατη δομή είναι συνάρτηση του ύψους του μοναχικού κύματος.

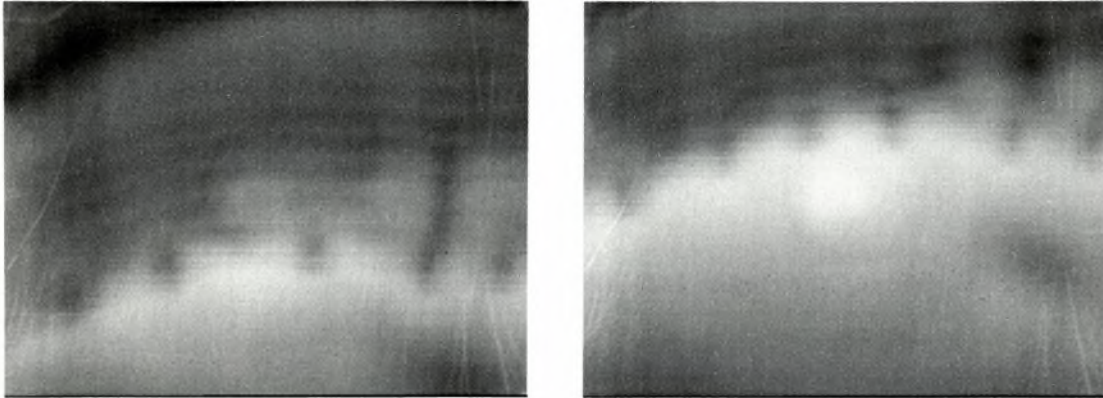
Πίσω από αυτό το κύμα έρχονται τέσσερα ακόμα roll waves τα οποία είναι πλήρως διδιάστατα. Από αυτά, το πρώτο έχει 6 ripples, το δεύτερο 4, το τρίτο 3 και το τελευταίο ένα. Είναι προφανές πως το μεγαλύτερο από αυτά είναι το πρώτο, το δεύτερο είναι μεγαλύτερο από τα υπόλοιπα, κ.τ.λ. Ο υμένας μέχρι την επόμενη διαταραχή παραμένει επίπεδος.



Σχήμα 4.4.4: Μοναχικά κύματα που ακολουθούν το αρχικό.

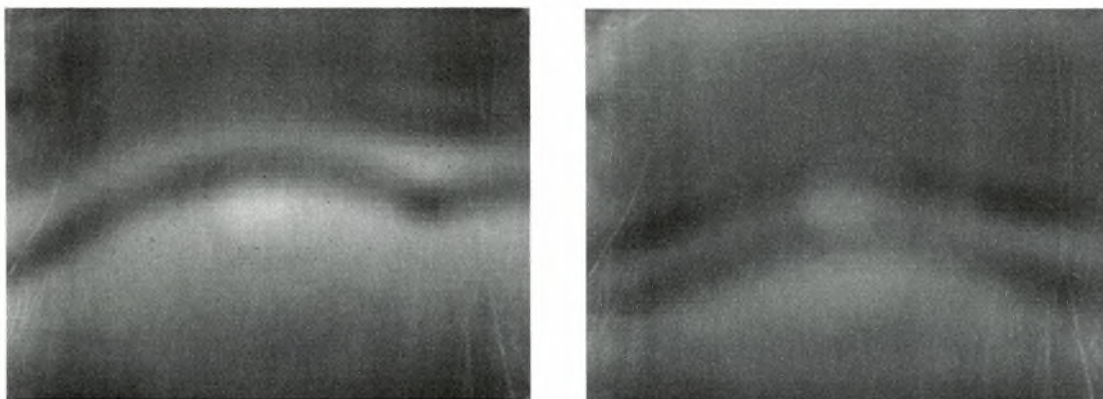
Αυξάνοντας την παροχή τόσο όσο χρειαζόταν για την επίτευξη μέσου αριθμού $Re = 50$ και με την ίδια διαταραχή, φαίνεται στη θέση A η δημιουργία του υδραυλικού άλματος. Στη δεύτερη θέση λήψης δεδομένων το κύμα έχει αρκετά ripples αλλά και τρισδιάστατη δομή μπροστά από αυτό. Από την πρώτη στιγμή που το κύμα εισέρχεται στο οπτικό πεδίο της κάμερας, φαίνονται τα βαθουλώματα που χαρακτηρίζουν τη δομή του μετώπου του. Ενισχύεται έτσι η υπόθεση, πως η εν λόγω δομή, αυξανομένης της κλίσης και για μεγάλες τιμές του μέσου αριθμού Re , ξεκινά πιο κοντά στο δοχείο υπερχειλίσης. Το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων είναι 1,98 cm. Πίσω από

το κύμα τώρα, είναι η πρώτη φορά που παρατηρείται ελαφρώς τρισδιάστατη δομή στη συγκεκριμένη θέση.



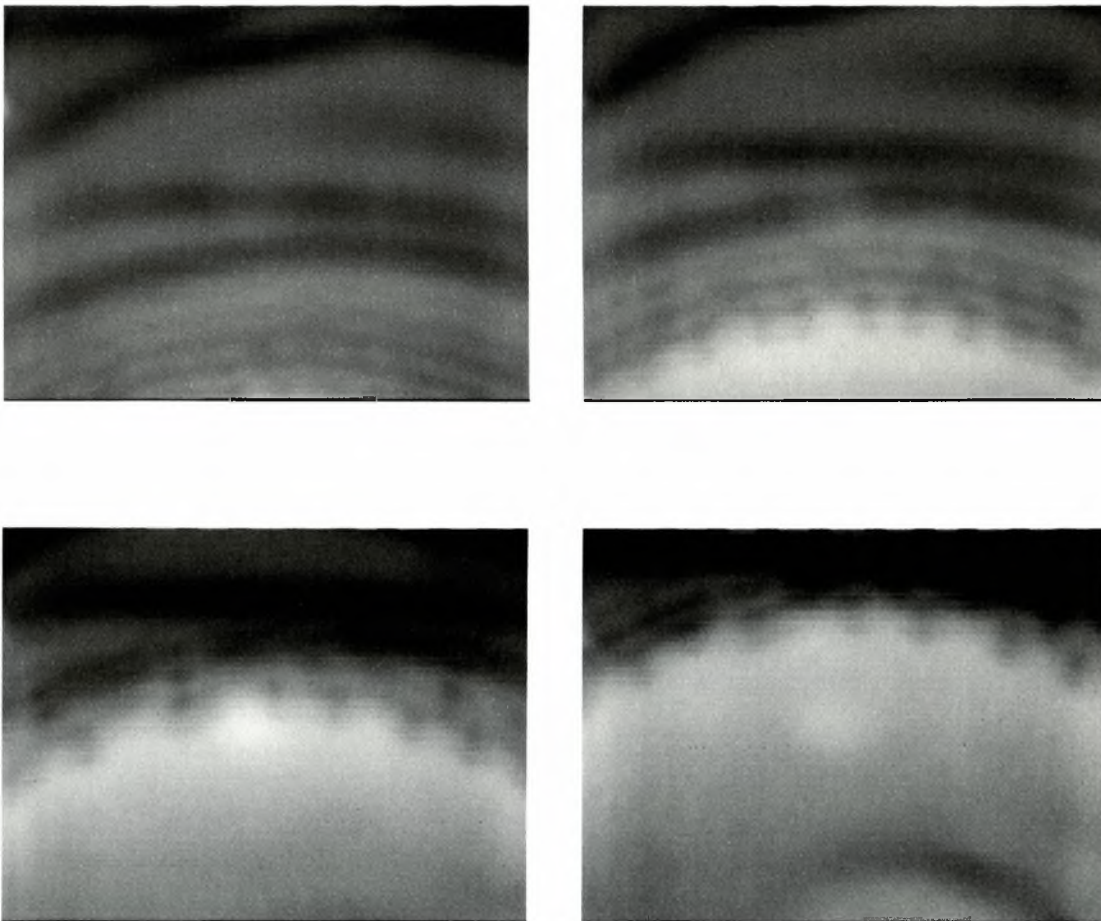
Σχήμα 4.4.5: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 50$ – θέση B

Από τα roll waves που ακολουθούν το πρώτο έχει δύο ripples και εμφανίζει ένα σπάσιμο. Τα επόμενα τρία κύματα είναι πλήρως διδιάστατα και έχουν δύο ripples μπροστά τους. Ο υμένας μετά από τα κύματα αυτά παρουσιάζει μικρές αστάθειες (περιοδικά κύματα) που οφείλονται αποκλειστικά στην αδιατάρακτη ροή.



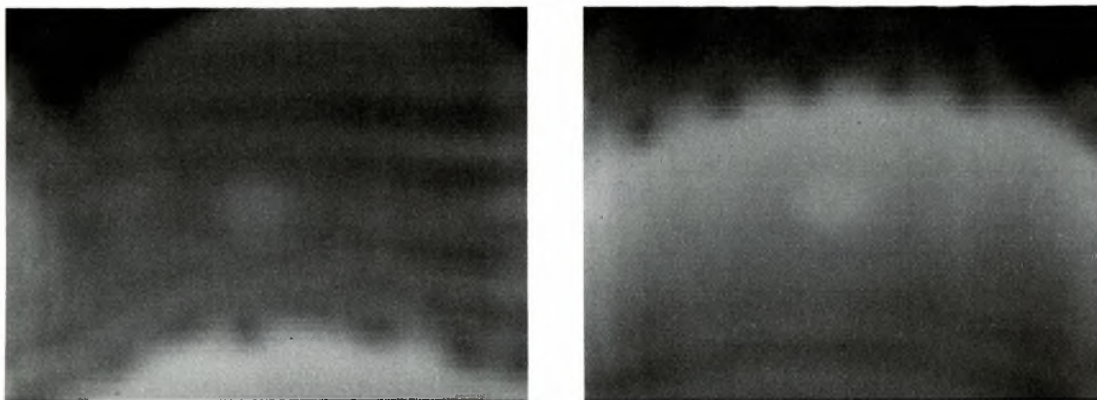
Σχήμα 4.4.6: Δύο από τα κύματα που έπονται του αρχικού, στο συγκεκριμένο πείραμα.

Στην τρίτη θέση πάλι τα φαινόμενα είναι πιο έντονα. Το roll wave έχει αρκετά ripples και τρισδιάστατη δομή μπροστά του, κινείται δε με μεγάλη ταχύτητα και παρασέρνει μαζί του τις διδιάστατες διαταραχές του υμένα (wave interaction). Πίσω από αυτό έρχεται τρισδιάστατη δομή που κινείται «παγωμένη», δηλαδή κινείται με τη ροή και δε μεταβάλλεται. Είναι η πρώτη φορά που παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό. Η ακολουθία φωτογραφιών που παρατίθεται στην επόμενη σελίδα, είναι πραγματικά σημαντική, αφού μπορεί κανείς να παρατηρήσει τόσο τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων, όσο και τη δομή που έπεται του solitary wave. Παρατηρούνται ακόμη και τα βαθουλώματα στο μέτωπο και την κορυφή του κύματος. Η πυκνότητα των βαθουλωμάτων είναι πάλι σχετικά μεγάλη (μήκος κύματος περίπου ίσο με 1,5 cm).



Σχήμα 4.4.7: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 50$ και στη θέση C.

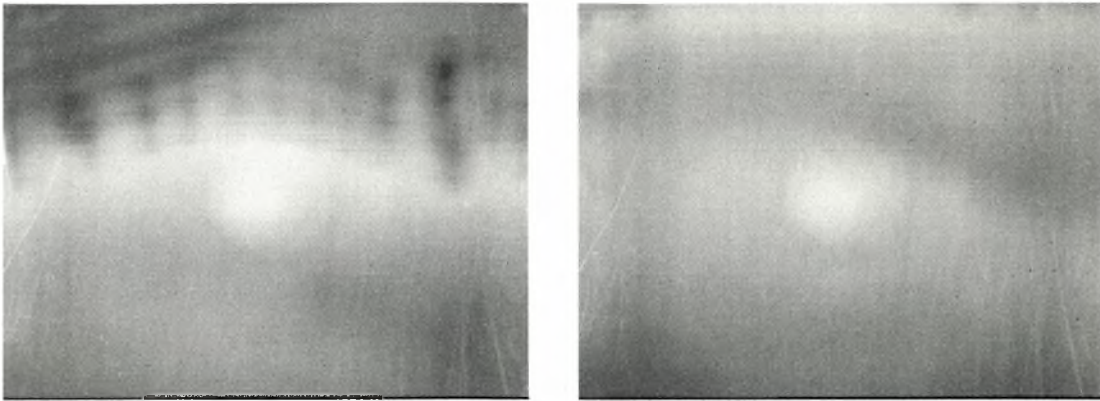
Το αμέσως επόμενο κύμα έχει δομή στο μέτωπό του παρόμοια με αυτή του αρχικού roll wave. Βέβαια ο αριθμός των εμφανιζόμενων βαθουλωμάτων είναι μικρότερος, αφού φαίνονται μόνο έξι από αυτά. Επίσης δεν εμφανίζεται χαρακτηριστική τρισδιάστατη δομή πίσω από αυτό, όπως συνέβη στο πρώτο κύμα.



Σχήμα 4.4.8: Το δεύτερο κύμα έχει τη μορφή του πρώτου, εμφανίζει δε λιγότερα βαθουλώματα στο μέτωπό του.

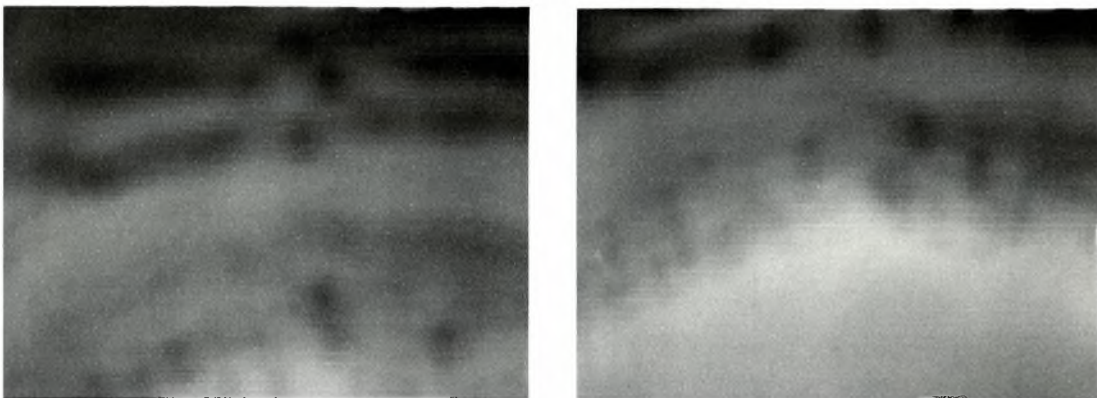
Έπονται πέντε ακόμη διδιάστατα roll waves μεταξύ των οποίων ο υμένας δεν είναι σταθερός, αλλά παρουσιάζει περιοδικά κύματα. Μετά από αυτά παρατηρούνται συνέχεια περιοδικά κύματα, τα οποία είναι χαρακτηριστικά της αδιατάρακτης ροής στις ίδιες συνθήκες.

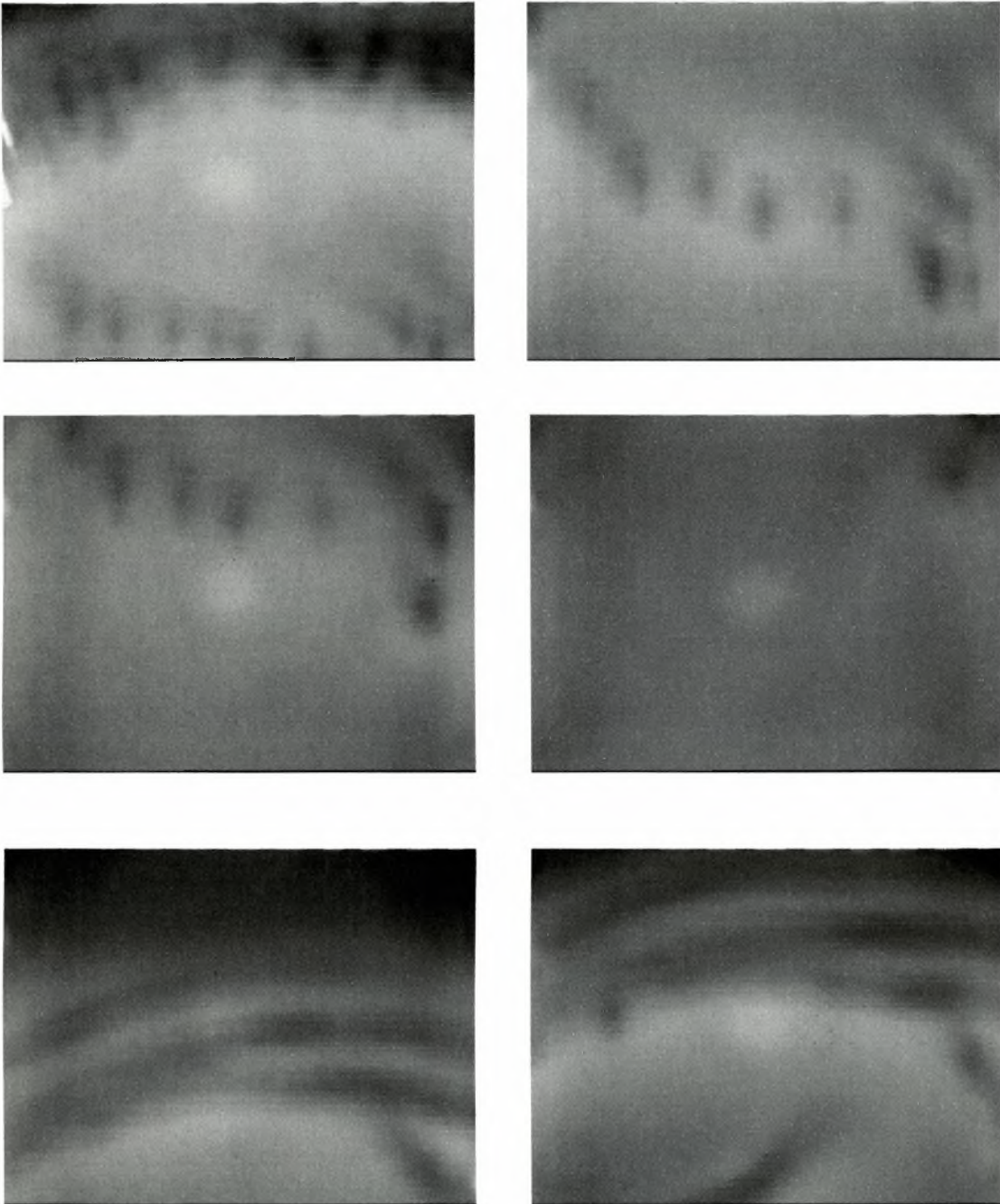
Στην θέση A πάλι, για μέσο αριθμό Re 100 αυτή τη φορά, η φωτεινότητα ορισμένων φωτογραφιών είναι η ένδειξη της διέλευσης του κύματος. Στη θέση B το κύμα έχει αρκετά ripples, τρισδιάστατη δομή μπροστά του (δώδεκα περίπου βαθουλώματα, μήκος κύματος 0,98 cm περίπου) και κινείται γρήγορα. Έτσι προλαβαίνει τις διαταραχές που προπορεύονται και ενώνεται με αυτές. Πίσω από αυτό υπάρχει ελαφρώς τρισδιάστατη δομή. Μετά από το κύμα αυτό παρουσιάζονται αρκετά periodic waves. Τελικά η δομή του υμένα παίρνει μορφή αντίστοιχη με αυτή της αδιατάρακτης ροής.



Σχήμα 4.4.9: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 100$ – θέση B.

Στο τέλος του καναλιού το κύμα έχει μπροστά του πλήρως τρισδιάστατη μορφή. Όπως και στη θέση B έτσι και εδώ εμφανίζονται δώδεκα βαθουλώματα. Τρισδιάστατη δομή πάντως διακρίνεται και ακριβώς μετά το κύμα. Όπως και πριν η δομή αυτή εμφανίζεται να κινείται με τη ροή χωρίς βέβαια να μεταβάλλεται. Ακολουθεί ένα ακόμη roll wave το οποίο είναι πλήρως διδιάστατο και έχει λίγα ripples. Μετά από αυτό η δομή είναι πλήρως τρισδιάστατη (ομοιάζει με τη δομή του υμένα στην αδιατάρακτη ροή σε αντίστοιχες συνθήκες). Όλα όσα αναφέρθησαν στην παράγραφο αυτή φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



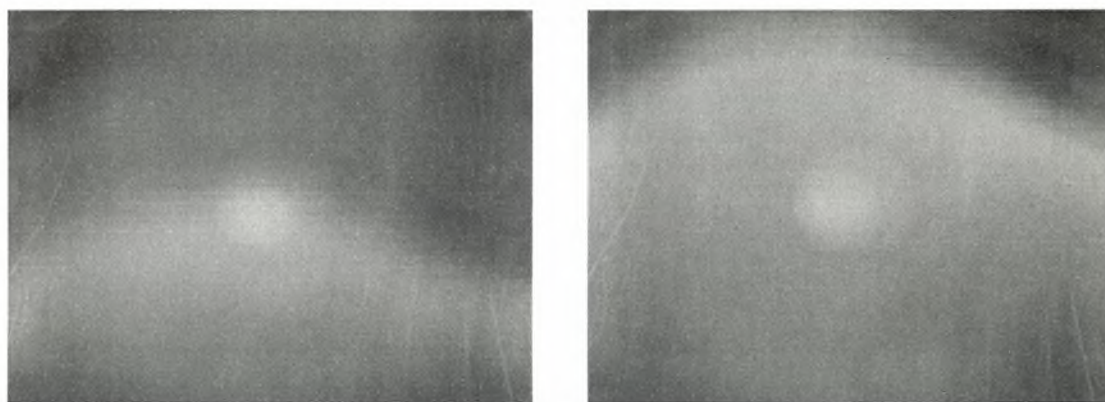


Σχήμα 4.4.10: Φωτογραφίες του υμένα, σε αριθμό $Re = 100$ και στη θέση C.

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει μία πρώτη παρατήρηση στο φαινόμενο της εμφάνισης τρισδιάστατης δομής η οποία ακολουθεί το roll wave και κινείται με τη ροή αμετάβλητη. Φαίνεται πως όταν ο αριθμός Re είναι σχετικά μικρός (μεγάλος αρκετά ώστε να σχηματιστεί η δομή αυτή), η τρισδιάστατη δομή πίσω από το κύμα είναι πολύ έντονη. Αντίθετα για μεγάλες τιμές του αριθμού Re η δομή αυτή δεν φαίνεται να είναι έντονη.

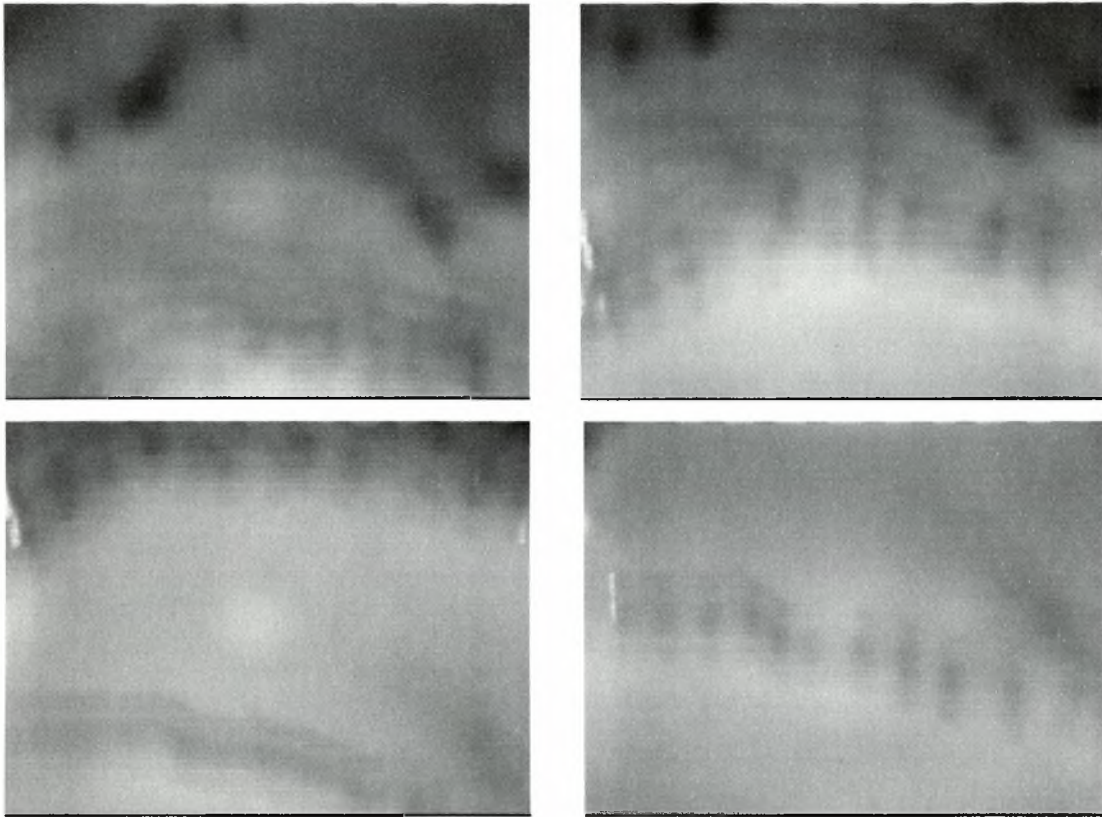
β) Πειράματα σε κλίση 5° σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5,5 sec – 0,5 sec.

Σε αριθμό Re ίσο με 148 και στη θέση B το κύμα δε φαίνεται να έχει ripples, παρουσιάζει όμως ελαφρώς τρισδιάστατη δομή μπροστά του. Τα μόνα φαινόμενα που εκδηλώνονται μέχρι την επόμενη διαταραχή είναι αρκετές διδιάστατες διαταραχές (periodic waves) με μικρό πλάτος. Μερικές από αυτές οφείλονται στην επιβαλλόμενη διαταραχή, ενώ οι υπόλοιπες αποκλειστικά στις συνθήκες ροής. Με την ταχύτητα που κινείται ο υμένας δεν είναι εύκολο να καθοριστεί το σημείο μετάβασης.



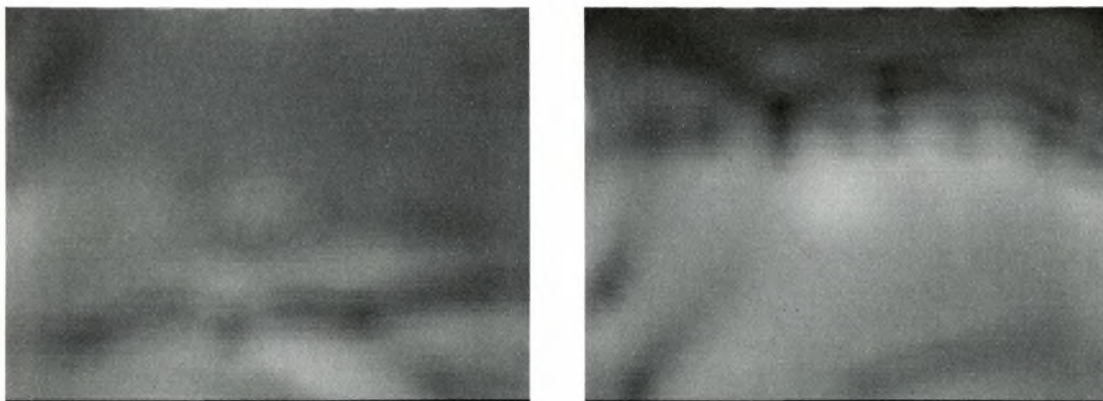
Σχήμα 4.4.11: Φωτογραφίες σε αριθμό Re =148 – θέση B.

Στο τέλος του καναλιού εμφανίζονται πολλά ripples και έντονα τρισδιάστατη δομή μπροστά αλλά και πίσω από το roll wave. Και στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται η χαρακτηριστική δομή στο μέτωπο του κύματος, όπως αυτή αναλύθηκε στις προηγούμενες σειρές μετρήσεων. Υπάρχουν πάρα πολλά βαθουλώματα τα οποία είναι πολύ μικρά (μήκος κύματος αυτών ίσο με ένα cm). Το κύμα κινείται γρηγορότερα από τις τρισδιάστατες αστάθειες που οφείλονται αποκλειστικά στη αδιατάρακτη ροή του υμένα, με αποτέλεσμα να τις παρασέρνει (wave interaction). Η τρισδιάστατη δομή που ακολουθεί πίσω από το κύμα, έχει μορφή ανάλογη με αυτή ακριβώς μπροστά από το κύμα.



Σχήμα 4.4.12: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 148$ – θέση C.

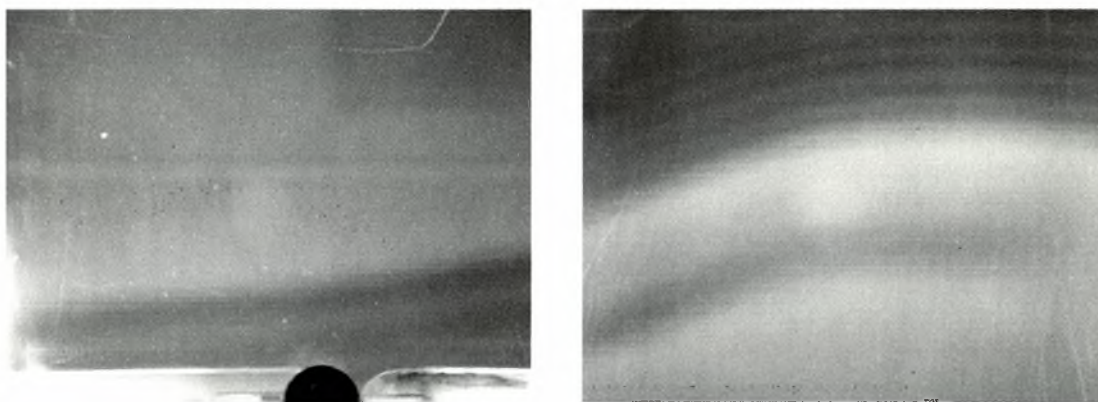
Ακολουθούν αρκετά ακόμα goll waves (επτά ή οκτώ), τα οποία, όπως και το αρχικό, έχουν τρισδιάστατη δομή μπροστά αλλά και πίσω τους. Μετά από αυτά και μέχρι την επόμενη διαταραχή παρουσιάζονται και πάλι 3D κύματα που κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρατίθενται ενδεικτικά δύο φωτογραφίες, στις οποίες φαίνονται καθαρά δύο από τα κύματα που έπονται της αρχικής διαταραχής.



Σχήμα 4.4.13: Δύο από τα κύματα που ακολουθούν. Είναι εμφανής η τρισδιάστατη δομή πίσω από αυτά, αλλά και στο μέτωπό τους.

γ) Πειράματα σε κλίση 5° σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5 sec – 1 sec.

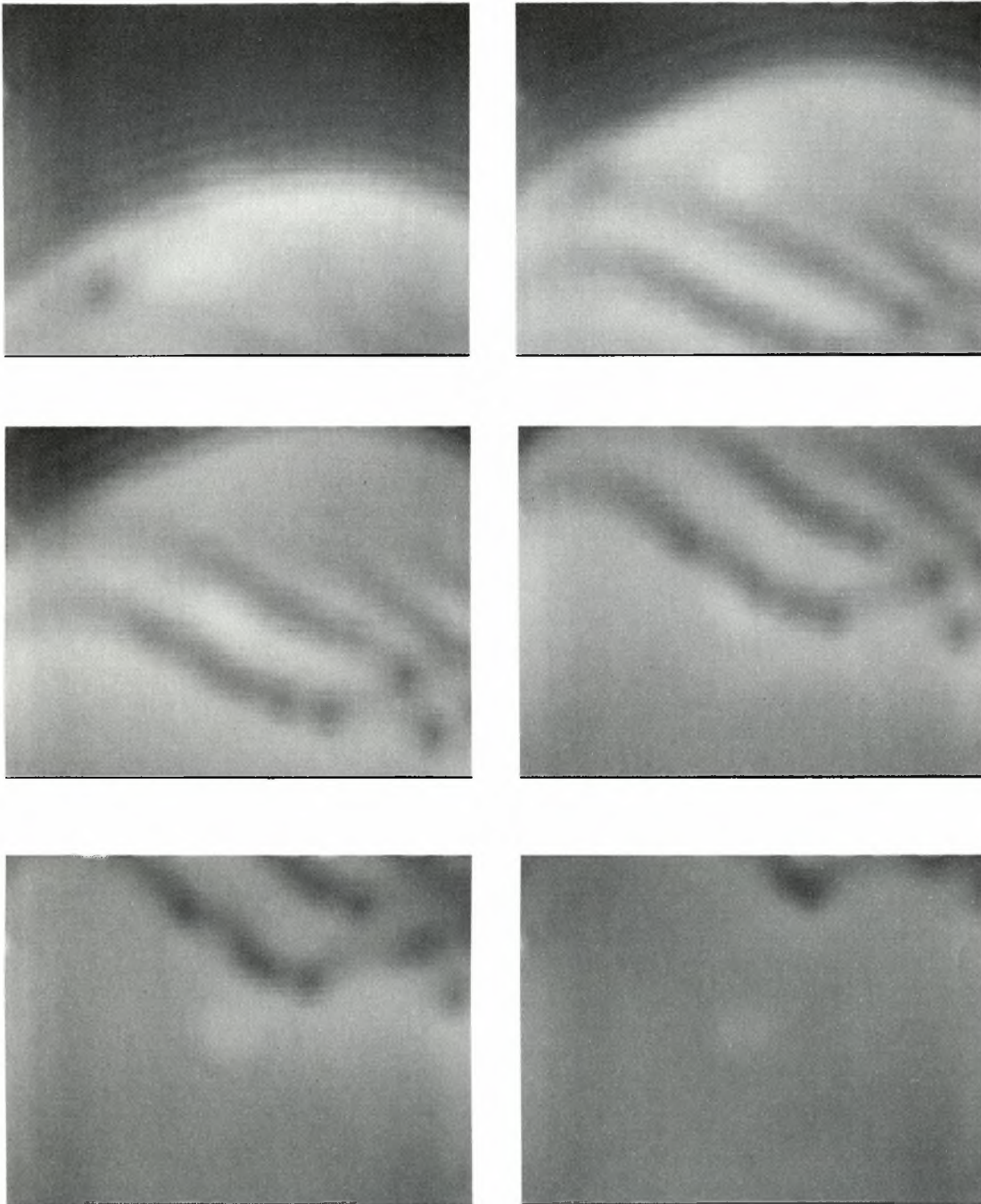
Σε χαμηλές παροχές έγιναν μετρήσεις σε μέσο αριθμό Re 37 και 49. Στην πρώτη περίπτωση και στην A θέση, το υδραυλικό κύμα που επιβάλλεται από την ηλεκτροβαλβίδα φαίνεται στις αντίστοιχες φωτογραφίες. Καθώς το κύμα φεύγει από το πεδίο λήψης φωτογραφιών για τη θέση αυτή φαίνεται να έχει ήδη ένα ripple.



Σχήμα 4.4.14: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 37$ – θέση A και B αντίστοιχα.

Στην B θέση το κύμα έχει καθαρά διδιάστατη δομή και πάρα πολλά ripples (έξι) μπροστά από αυτό, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Πίσω ακριβώς από αυτό είναι εμφανές ένα μεγάλο βαθούλωμα, το οποίο είναι προφανώς μια δεύτερη κορυφή του roll wave. Στη συνέχεια εμφανίζονται μερικά μικρότερα διδιάστατα (τουλάχιστον δύο) roll waves καθώς και αρκετά περιοδικά κύματα. Από ένα σημείο και πέρα και μέχρι την επιβολή της επόμενης διαταραχής ο υμένας φαίνεται να είναι επίπεδος.

Στο τέλος του καναλιού η μορφή του κύματος είναι η ίδια με της προηγούμενης θέσης. Δεν εμφανίζεται δηλαδή τρισδιάστατη δομή στο μέτωπο του κύματος. Πίσω ακριβώς από το roll wave ακολουθεί τρισδιάστατη δομή. Η δομή αυτή, καθώς ο υμένας κινείται, διατηρεί τη μορφή της και φαίνεται να κινείται «παγωμένη» μαζί με αυτόν. Αμέσως μετά έρχεται ένα roll wave το οποίο έχει μπροστά του τρισδιάστατη μορφή. Συγκεκριμένα, καθώς το κύμα φεύγει από το κανάλι, παρατηρούνται έξι βαθουλώματα στο μέτωπο αυτού.

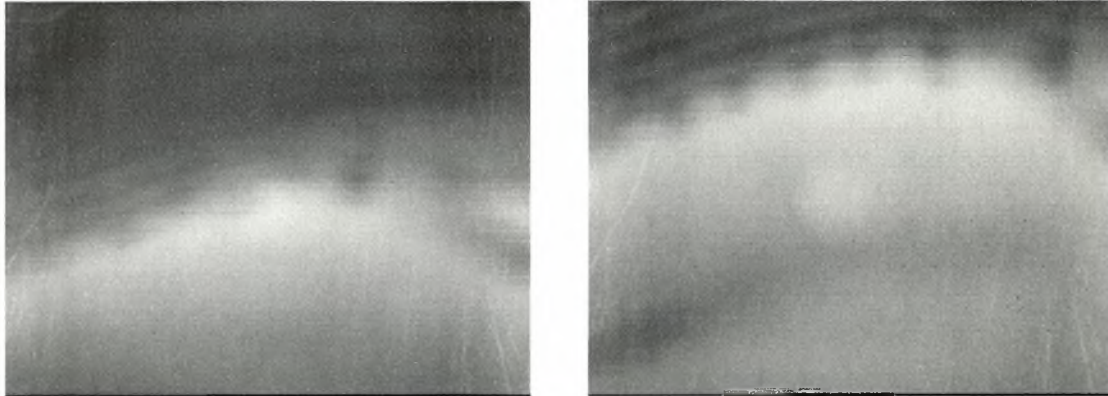


Σχήμα 4.4.15: Φωτογραφίες σε αριθμό Re ίσο με 37.

Ελήφθησαν στο τέλος του καναλιού.

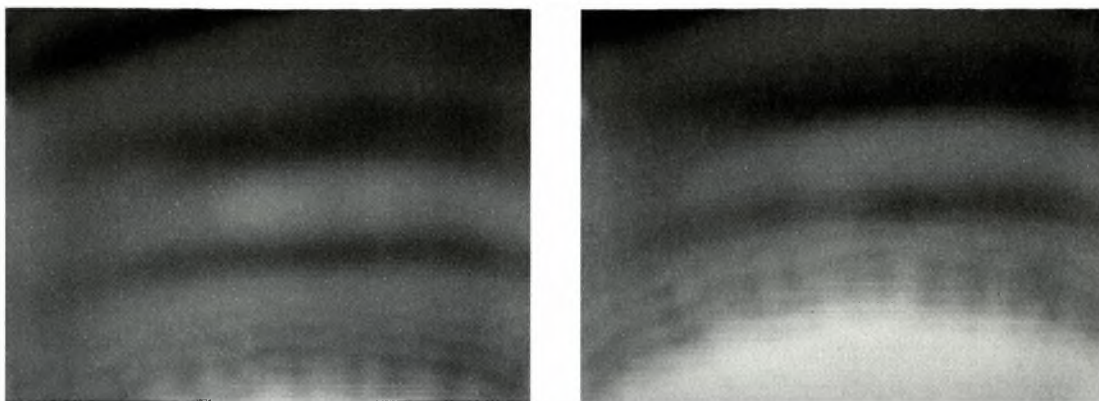
Το κύμα αυτό ακολουθείται από άλλα μικρότερα (δύο τουλάχιστον) τα οποία έχουν διδιάστατη δομή μπροστά και ελάχιστα ripples. Μόλις πάψουν να εμφανίζονται roll waves η δομή του υμένα παίρνει τη μορφή της αντίστοιχης αδιατάρακτης στις ίδιες συνθήκες (periodic or unforced waves).

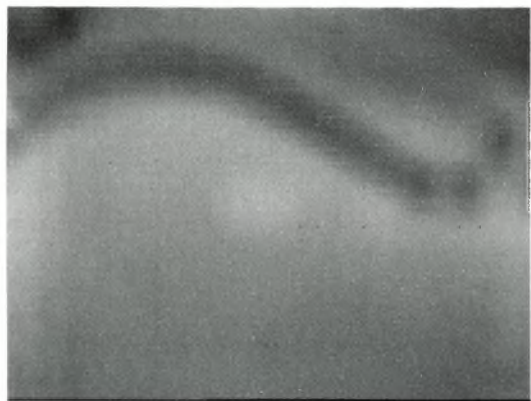
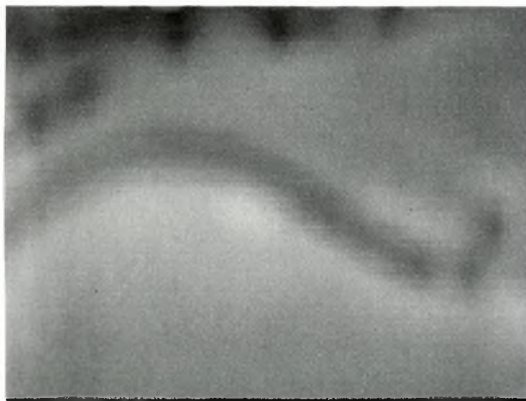
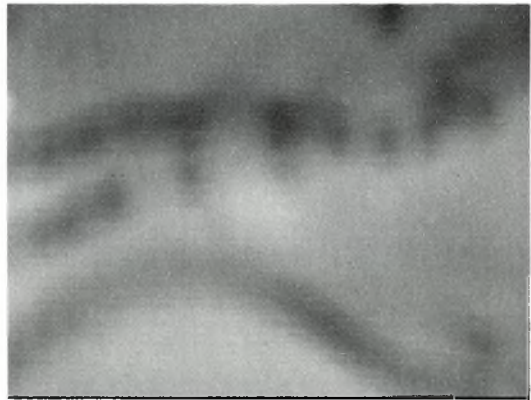
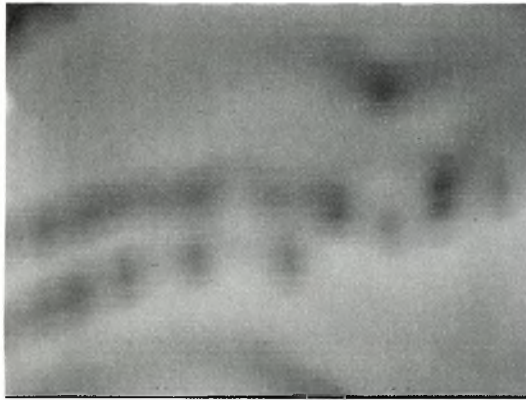
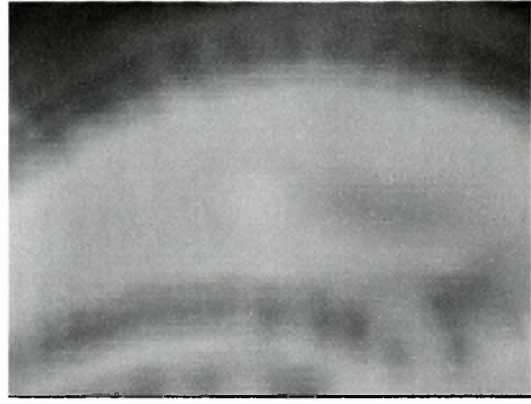
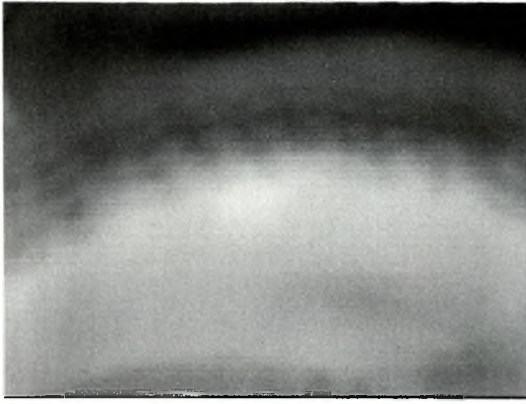
Στον αμέσως μεγαλύτερο αριθμό Re που εξετάστηκε ($Re = 49$), στην αρχή του καναλιού φαίνεται πάλι το υδραυλικό άλμα. Στην δεύτερη θέση (252 mm από την υπερχείλιση), φαίνεται ότι μπροστά από κύμα η δομή είναι έντονα τρισδιάστατη (εννέα ή δέκα βαθουλώματα με απόσταση 1,31 cm μεταξύ τους). Πίσω από το κύμα φαίνονται και πάλι ένα διδιάστατο βαθούλωμα – προφανώς μία δεύτερη κορυφή του κύματος – καθώς και κάποια περιοδικά κύματα.



Σχήμα 4.4.16: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re=49$ και στη θέση B.

Στο τέλος του καναλιού και μπροστά από το κύμα τα ripples είναι αρκετά και η τρισδιάστατη δομή έντονη. Παρατηρείται δηλαδή πάλι εμφάνιση βαθουλωμάτων στο μέτωπο του κύματος (δώδεκα τουλάχιστον, σε απόσταση περίπου 1 cm το ένα από το άλλο). Στις φωτογραφίες που ελήφθησαν φαίνεται ότι το roll wave κινείται πιο γρήγορα από τα περιοδικά κύματα που προηγούνται αυτού και τα παρασύρει (wave interaction phenomena). Πίσω από το κύμα έρχεται τρισδιάστατη δομή η οποία και κινείται διατηρώντας σταθερή τη μορφή της.

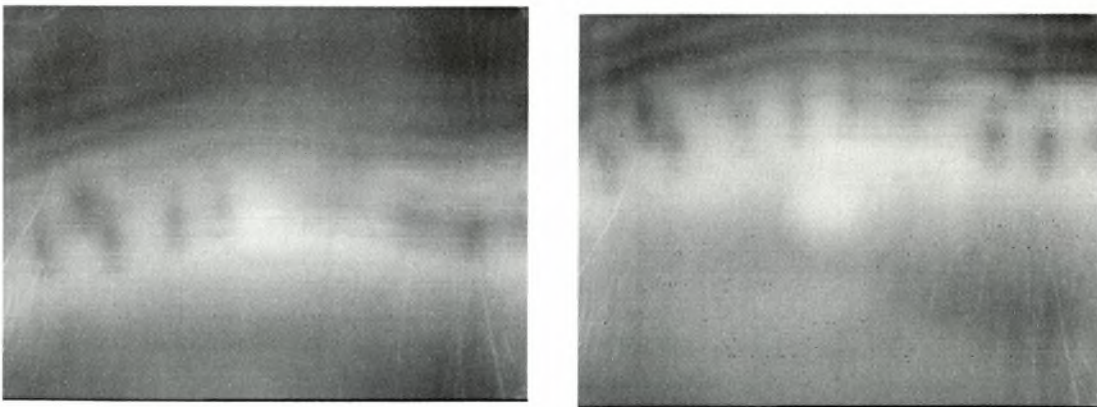




Σχήμα 4.4.17: Φωτογραφίες σε αριθμό
 $Re = 49$ – θέση C.

Τα κύματα που ακολουθούν είναι και αυτά roll waves με ελάχιστα ripples. Πίσω από το πρώτο από αυτά πάλι παρατηρείται τρισδιάστατη δομή. Η δομή αυτή φαίνεται να κινείται πολύ γρήγορα και στο τέλος του καναλιού μοιάζει να παίρνει τη μορφή τρισδιάστατου roll wave. Στη συνέχεια έρχονται δύο ακόμη, διδιάστατα αυτή τη φορά, roll waves με λίγα (δύο) ripples και αρκετά περιοδικά κύματα, τα οποία όμως οφείλονται στη συμπεριφορά του υμένα ανεξάρτητα από τη διαταραχή.

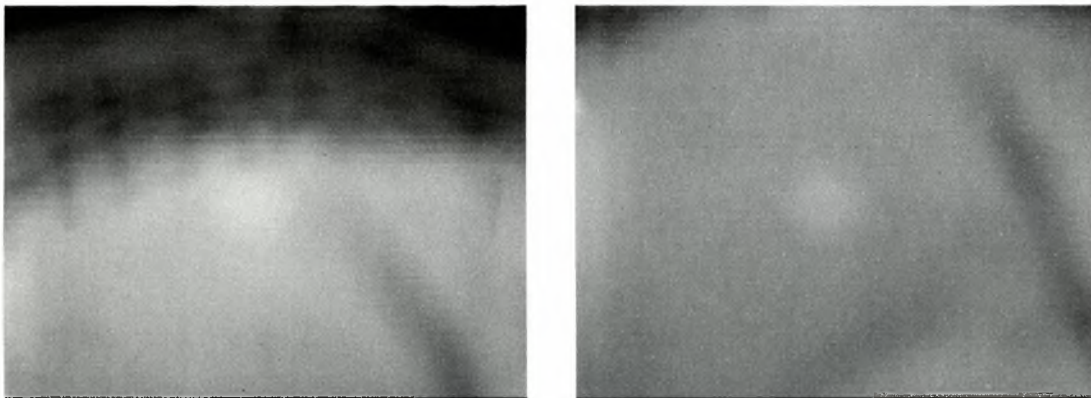
Αυξάνοντας τον αριθμό Re σε τιμή 99 παρατηρείται στην αρχή του καναλιού το υδραυλικό άλμα. Η ταχύτητα όμως του υμένα είναι τέτοια που μόνο μια έντονη φωτεινότητα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί. Στη θέση B η δομή μπροστά από το κύμα είναι τρισδιάστατη (έχει και αρκετά ripples). Τα βαθουλώματα είναι και σε αυτή την περίπτωση αρκετά (1,1 cm μήκος κύματος). Η ταχύτητα του κύματος είναι μεγαλύτερη από αυτή των διδιάστατων διαταραχών της ίδιας της ροής. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο φαίνεται ότι το roll wave «καταπίνει» τα περιοδικά κύματα που προηγούνται αυτού. Πίσω από το κύμα παρατηρείται ένα μεγάλο διδιάστατο βαθούλωμα (δεύτερη κορυφή του κύματος). Στη συνέχεια ακολουθούν κάποια μικρά περιοδικά κύματα και σταδιακά ο υμένας συμπεριφέρεται όπως ο αδιατάρακτος σε αντίστοιχες συνθήκες.



Σχήμα 4.4.18: Φωτογραφίες σε αριθμό Re = 99 – θέση B

Στην τρίτη θέση (τέλος του καναλιού) το κύμα έχει αρκετά ripples και τρισδιάστατη δομή μπροστά του. Όπως και στη θέση B παρουσιάζονται και εδώ δέκα βαθουλώματα. Πίσω από το κύμα έρχεται «παγωμένη»

τρισεδιάστατη δομή η οποία και κινείται μαζί με τη ροή. Δεν είναι πάντως σε καμία περίπτωση όσο έντονη ήταν η δομή αυτή στην προηγούμενη (χαμηλότερη) τιμή του αριθμού Re . Αμέσως μετά και για ελάχιστο χρόνο ο υμένας έχει μικρές διδιάστατες διαταραχές. Τα δύο roll waves που εμφανίζονται μετά, έχουν πίσω ακριβώς τρισεδιάστατη δομή. Μεταξύ τους όμως εμφανίζονται και διδιάστατα περιοδικά κύματα. Στη συνέχεια και πριν την επόμενη διαταραχή παρατηρείται μια δομή στην οποία τρισεδιάστατα κύματα κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η δομή του υμένα είναι ίδια με τη δομή της αδιατάρακτης ροής στις ίδιες συνθήκες.

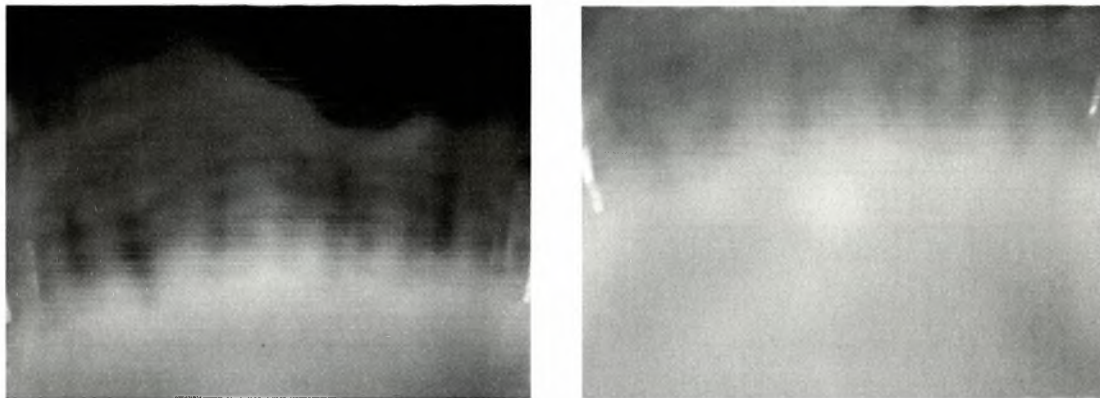


Σχήμα 4.4.19: Φωτογραφίες του κύματος και της τρισεδιάστατης δομής που έπεται αυτού σε αριθμό $Re = 99$ – θέση C.

Σε αριθμό Re ίσο με 151 και στη θέση B το κύμα φαίνεται να έχει λίγα (τρία) ripples καθώς και ελαφρώς τρισεδιάστατη δομή μπροστά του. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας του υμένα και των «περιορισμένων» δυνατοτήτων του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού δεν ήταν εφικτή η εξακρίβωση του ακριβούς αριθμού των βαθουλωμάτων. Μέχρι την επόμενη διαταραχή παρουσιάζονται στον υμένα μικρού πλάτους διδιάστατες διαταραχές (periodic waves). Είναι βέβαια αρκετά δύσκολο να ξεχωρίσουν από αυτές εκείνες που οφείλονται στην επιβαλλόμενη διαταραχή και εκείνες που οφείλονται αποκλειστικά στις συνθήκες ροής.

Στο τέλος του καναλιού το roll wave κινείται με μεγάλη ταχύτητα και παρασέρνει τις διαταραχές που προπορεύονται (wave interaction). Έχει αρκετά ripples και έντονη τρισεδιάστατη δομή μπροστά του. Τρισεδιάστατη βέβαια είναι η δομή και πίσω ακριβώς από το κύμα. Πάντως δεν είναι δυνατόν

να βρεθεί με σιγουριά ο ακριβής αριθμός των βαθουλωμάτων που βρίσκονται στο μέτωπο του κύματος (μάλλον έντεκα, μήκος κύματος αυτών περίπου 1,1 cm). Μετά τη διέλευση του κύματος δεν παρατηρούνται άλλα roll waves. Η δομή του υμένα είναι πλήρως τρισδιάστατη (κύματα κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις).



Σχήμα 4.4.20: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 151$, θέση C.

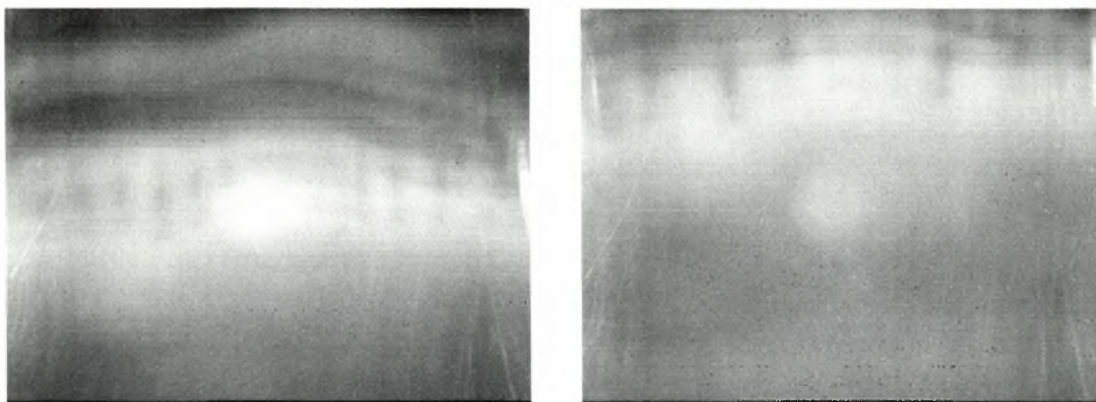
Η γενική παρατήρηση που έγινε στο τέλος της προηγούμενης ενότητας φαίνεται να επιβεβαιώνεται από τα όσα αναφέρθηκαν εδώ. Γίνεται δηλαδή λόγος για την επίδραση του μέσου αριθμού Re στην δομή που έπεται του αρχικού roll wave, θεωρώντας σαν αναφορά εκείνη την παροχή όπου και για πρώτη φορά παρατηρείται τρισδιάστατη δομή. Φαίνεται καθαρά ότι σε χαμηλότερες τιμές του αριθμού Re η εν λόγω δομή είναι περισσότερο έντονη από ότι σε μεγαλύτερες τιμές αυτού. Στις τιμές αυτές είναι πιο εύκολο να παρατηρηθεί ότι η δομή αυτή ακολουθεί τη ροή. Σε αρκετά υψηλούς αριθμούς Re τα φαινόμενα είναι αρκετά έντονα – γρήγορα, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η παρακολούθηση παρόμοιων δομών.

4.5. Πειράματα σε κλίση επτά μοίρες.

Ο ίδιος διαχωρισμός του πλάτους της διαταραχής που έγινε στις προηγούμενες σειρές πειραμάτων ακολουθήθηκε και στην συγκεκριμένη κλίση του καναλιού. Ας δούμε τι φαινόμενα παρατηρούνται σε κάθε μία από τις υπό εξέταση περιπτώσεις.

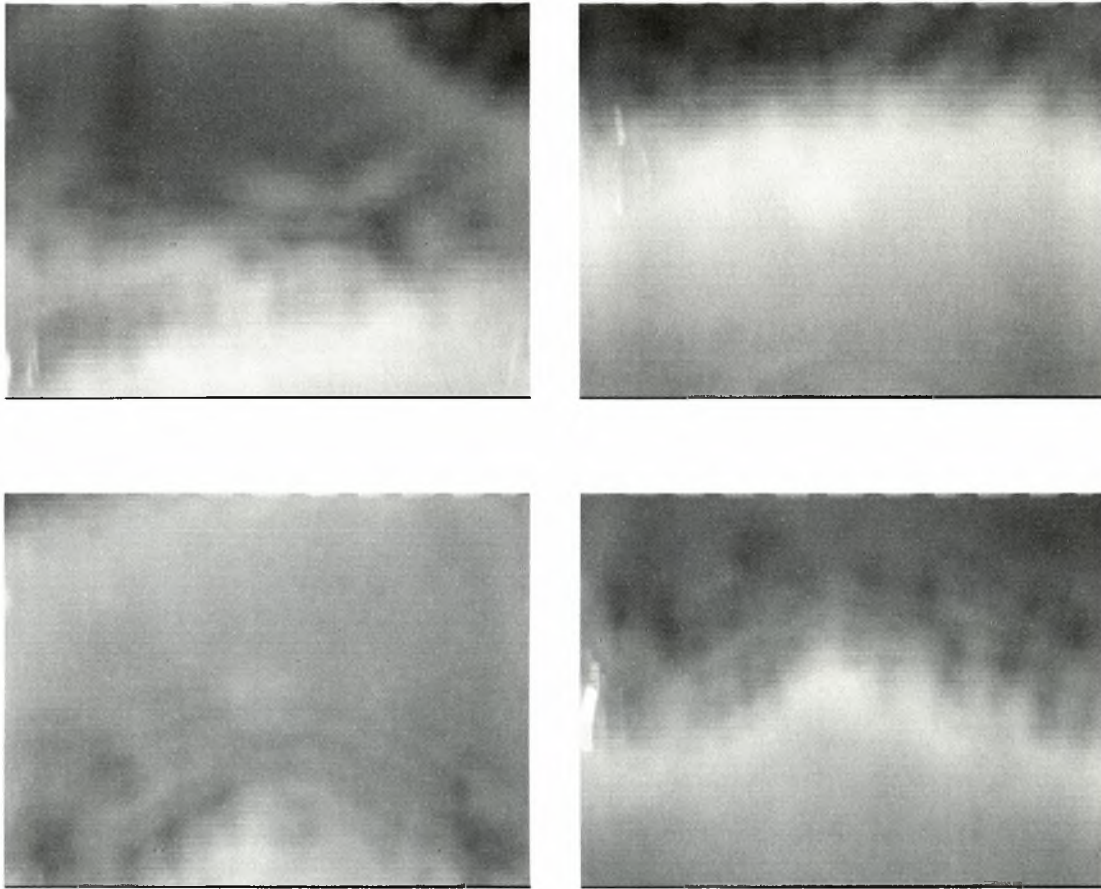
α) Πειράματα σε κλίση 7° σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5,8 sec – 0,2 sec.

Παρατίθενται οι παρατηρήσεις που έγιναν σε μεγάλο αριθμό Re (= 102). Στην πρώτη θέση λήψης φωτογραφιών η αυξομείωση της φωτεινότητας της εικόνας υποδηλώνει το πέρασμα του positive step που δημιουργείται από την απότομη αύξηση της παροχής. Στη θέση Β η έντονη τρισδιάστατη δομή και τα πολλά ripples είναι τα χαρακτηριστικά του κύματος. Στο μέτωπο του κύματος παρατηρούνται έντεκα ή δώδεκα βαθουλώματα (μήκος κύματος αυτών περίπου ίσο με τη μονάδα). Το δεύτερο roll wave που ακολουθεί, φαίνεται ότι, καθώς εγκαταλείπει την εικόνα, αρχίζει σταδιακά να σπάει. Μέχρι την επιβολή της επόμενης διαταραχής ο υμένας έχει τρισδιάστατη δομή.



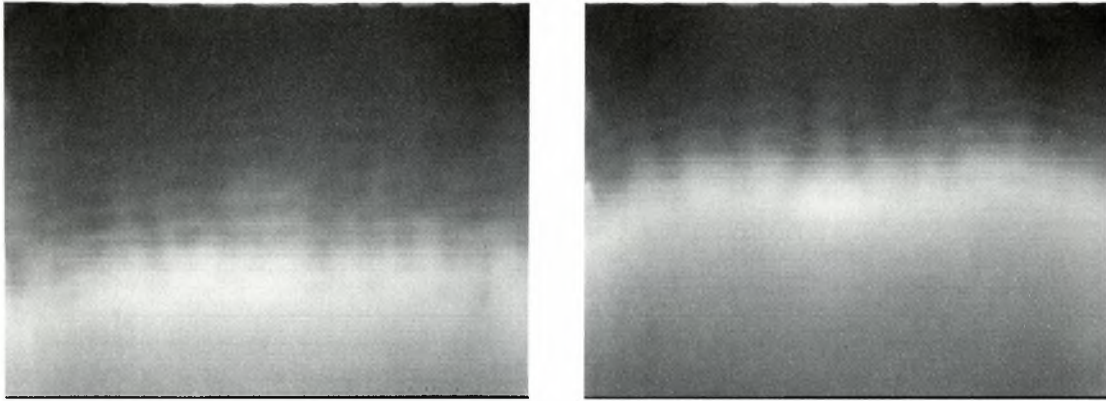
Σχήμα 4.5.1: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 102$ – θέση Β.

Στην θέση C (τέλος του καναλιού) παρουσιάζονται συνολικά πέντε roll waves. Από αυτά τα δύο πρώτα είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο και η δομή του υμένα μεταξύ αυτών φαίνεται ότι είναι τρισδιάστατη. Δεν είναι εφικτή η εύρεση του αριθμού των βαθουλωμάτων στο μέτωπο των κυμάτων αυτών.



Σχήμα 4.5.2: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 102$ – θέση C.

Τα τρία επόμενα έχουν μεγαλύτερη απόσταση το ένα από το άλλο και ο υμένας μεταξύ τους παρουσιάζεται επίπεδος. Όλα έχουν τρισδιάστατη δομή στο μέτωπό τους. Το πρώτο και το δεύτερο έχουν σχεδόν τον ίδιο αριθμό βαθουλωμάτων (έντεκα ή δώδεκα). Στο τρίτο κύμα δε διακρίνεται ξεκάθαρα το μήκος κύματος αυτών. Μετά τη διέλευση και του τελευταίου κύματος η δομή του υμένα γίνεται τρισδιάστατη και για μικρό χρονικό διάστημα φαίνονται να περνούν μικρότερα roll waves γρήγορα το ένα πίσω από το άλλο. Στη συνέχεια ο υμένας παίρνει τη μορφή που ομοιάζει με την αδιατάρακτη στις ίδιες συνθήκες ροή.

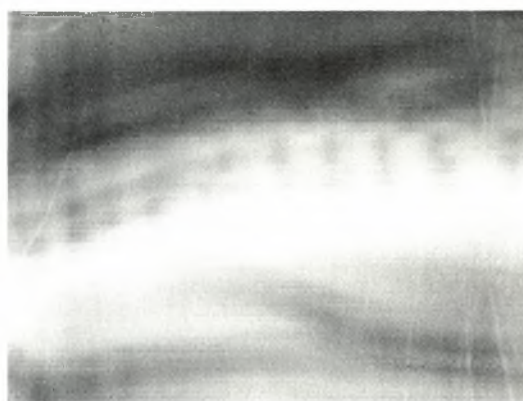
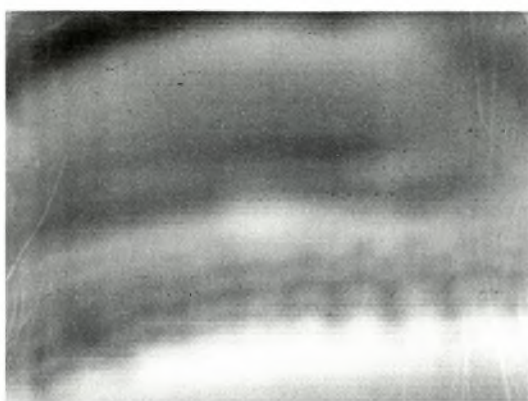


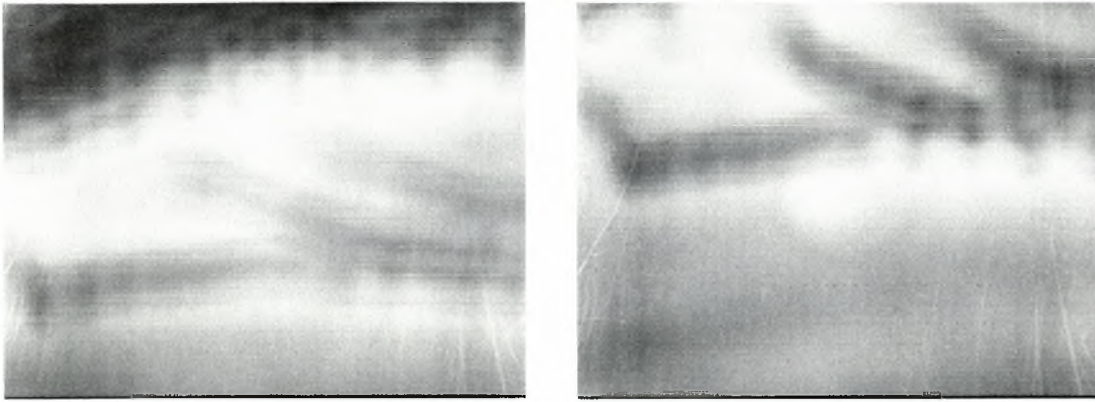
Σχήμα 4.5.3: Δύο από τα μοναχικά κύματα που ακολουθούν το αρχικό.

β) Πειράματα σε κλίση 7° σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5.5 sec – 0.5 sec.

Συγκεντρώθηκαν δεδομένα που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές τιμές του μέσου αριθμού Re : 51, 100 και 150. Και στην περίπτωση αυτή έγιναν λήψεις φωτογραφιών στα τρία διαφορετικά σημεία του καναλιού. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων ($Re = 51$) και στη θέση A έχουμε ουσιαστικά την δημιουργία του υδραυλικού άλματος αφού το κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας προκαλεί αύξηση του πάχους του υμένα. Ορατή είναι μόνο η αύξηση της φωτεινότητας της εικόνας που υποδηλώνει το πέρασμα του κύματος.

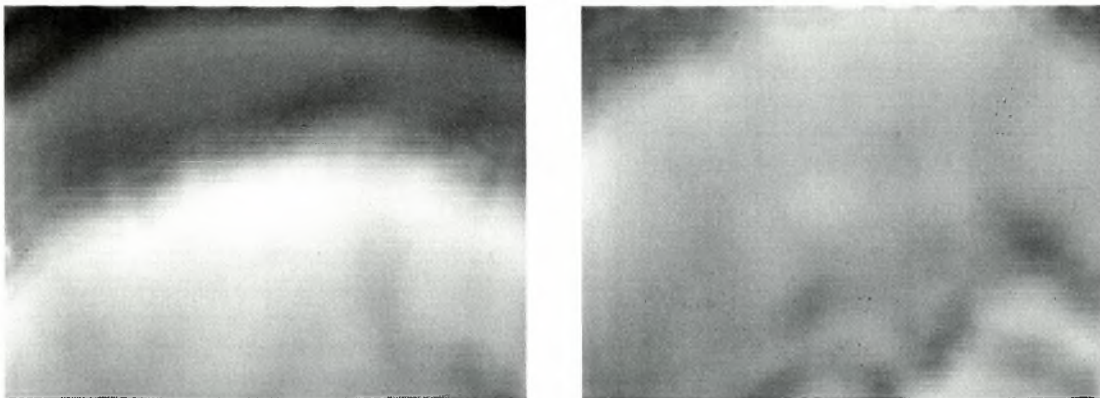
Στη θέση B τα αρκετά ripples και η έντονη τρισδιάστατη δομή (πολλά, μικρά βαθουλώματα, με μήκος κύματος ίσο με 0,97 cm περίπου) είναι τα χαρακτηριστικά ακριβώς μπροστά από το κύμα. Πίσω από αυτό έρχεται τρισδιάστατη δομή η οποία κινείται με τον υμένα χωρίς να αλλάζει μορφή. Την δομή αυτή ακολουθεί ένα διδιάστατο βαθούλωμα, το οποίο στο τέλος της εικόνας φαίνεται να έχει μετατραπεί σε roll wave. Πριν η ροή τελικά λάβει τη μορφή που έχει η αντίστοιχη αδιατάρακτη στις ίδιες συνθήκες παρατηρούνται μερικά ακόμα μικρότερα roll waves. Η δομή των κυμάτων αυτών είναι διδιάστατη, παρουσιάζουν βέβαια κάποιο «σπάσιμο» - απόκλιση δηλαδή από την τοξοειδή μορφή. Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνονται τόσο τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης με τα κύματα που προηγούνται, όσο και η τρισδιάστατη δομή ακριβώς πίσω από το κύμα.

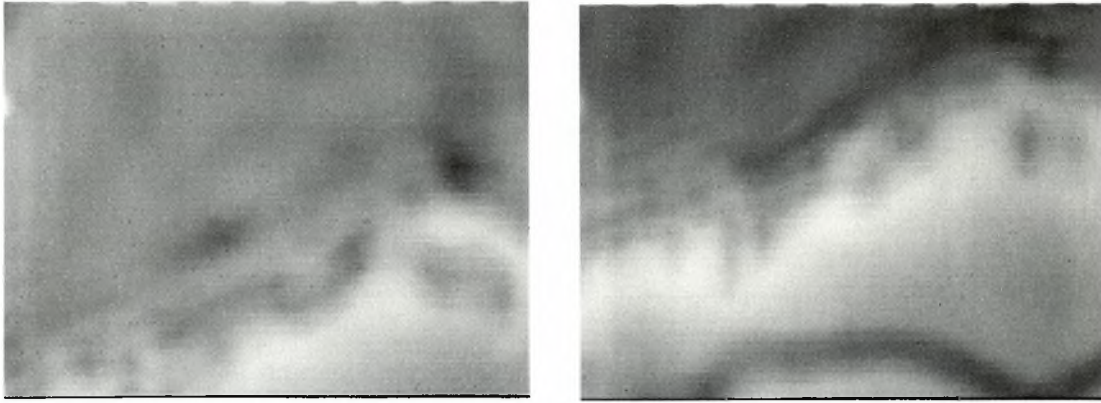




Σχήμα 4.5.4: Φωτογραφίες του κύματος στη θέση B και σε αριθμό $Re = 51$.

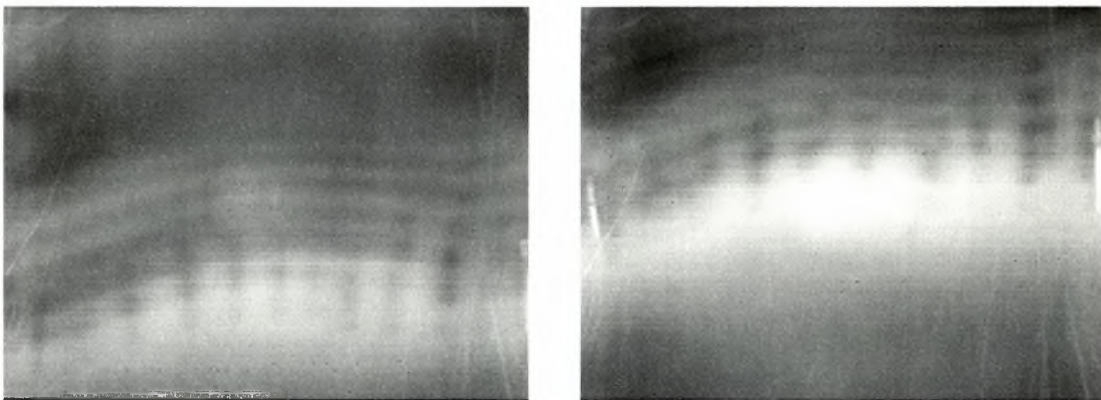
Στην τρίτη περιοχή μελέτης της συμπεριφοράς του υμένα (θέση C), το κύμα κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα παρασέρνει τις διαταραχές τις ροής που προηγούνται αυτού (φαινόμενα αλληλεπίδρασης). Έχει αρκετά ripples και έντονη 3D δομή μπροστά του. Τόσο έντονη που δεν μπορεί να βρεθεί ο ακριβής αριθμός των βαθουλωμάτων. Πίσω ακριβώς από αυτό πάλι ακολουθεί τρισδιάστατη δομή που κινείται “παγωμένη” με τη ροή. Αμέσως μετά έρχονται solitary waves με αρκετά ripples μπροστά τους. Στο μέτωπο των κυμάτων αυτών παρατηρείται τρισδιάστατη δομή, λιγότερο έντονη βέβαια από την αντίστοιχη του πρώτου κύματος. Μεταξύ των κυμάτων αυτών (τέσσερα) ο υμένας είναι σχεδόν επίπεδος. Ακριβώς μετά ο υμένας παίρνει τη μορφή της αδιατάρακτης στις ίδιες συνθήκες. Τα κύματα (roll waves) που δημιουργούνται μέχρι την επόμενη διαταραχή οφείλονται αποκλειστικά στην ίδια την ροή.





Σχήμα 4.5.5 : Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 51$ – θέση C.

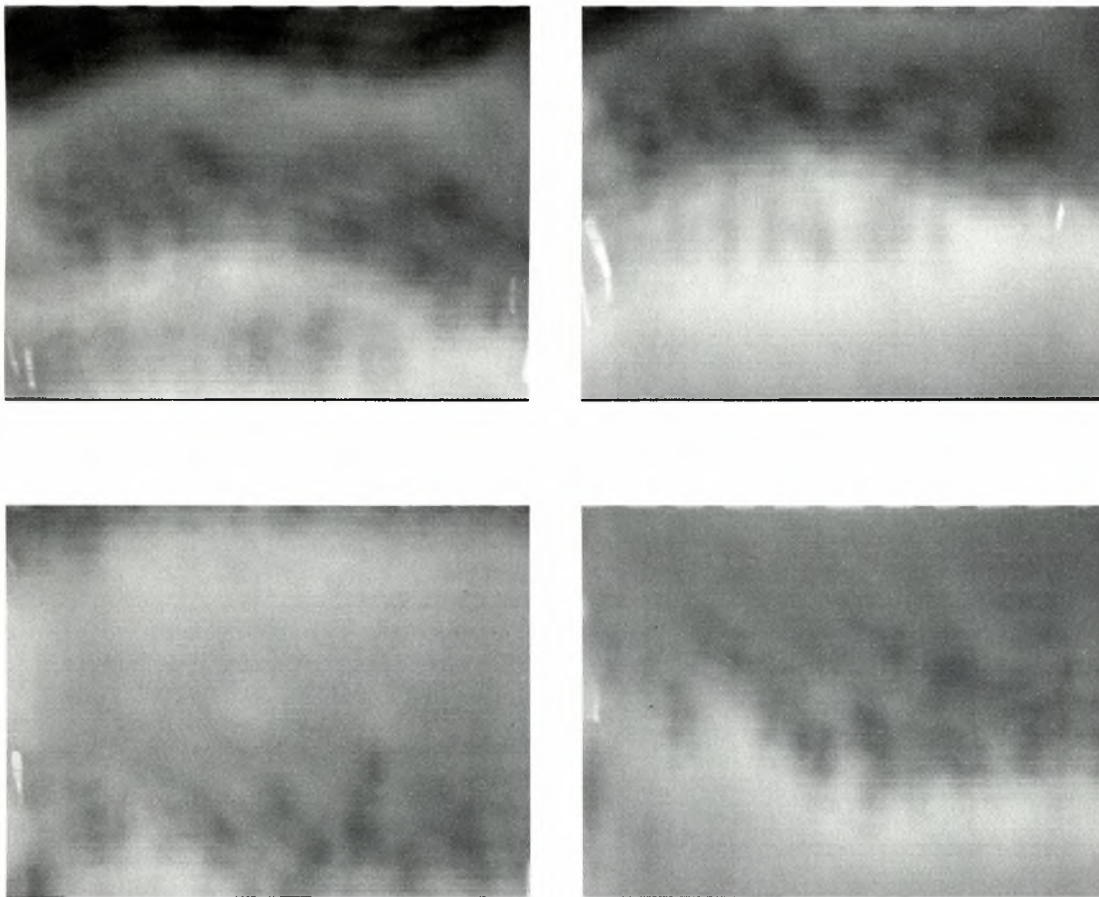
Σε μεγαλύτερη παροχή η οποία αντιστοιχεί σε $Re = 100$ και στην αρχή του καναλιού φαίνεται το υδραυλικό άλμα από την αυξομείωση της φωτεινότητας της εικόνας η οποία αντιστοιχεί σε αυξομείωση του πάχους του υμένα. Στην θέση B όταν εμφανίζεται το roll wave είναι εμφανής η τρισδιάστατη δομή καθώς και τα ripples που προηγούνται αυτού. Το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων στο μέτωπο του κύματος είναι ίσο με 1 cm περίπου. Πίσω από το κύμα αυτό ακολουθεί μία διδιάστατη διαταραχή η οποία τείνει στο τέλος του οπτικού πεδίου της κάμερας να μετατραπεί σε 3D. Σιγά σιγά ο υμένας συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ο αδιατάρακτος σε παρόμοιες συνθήκες, εμφανίζει δηλαδή τόσο 2D όσο και 3D αστάθειες.



Σχήμα 4.5.6: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 100$ – θέση B.

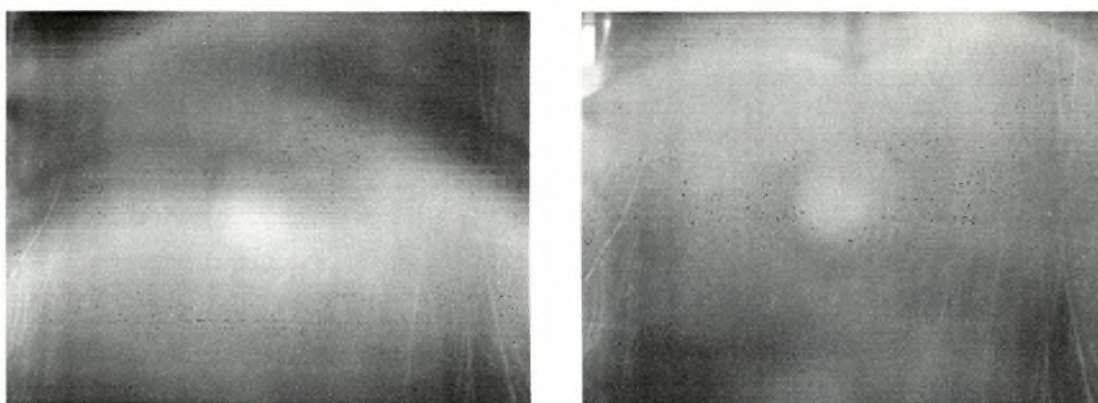
Στο τέλος του καναλιού η δομή του υμένα μπροστά από το roll wave παρουσιάζεται πιο έντονη από ότι στη θέση B. Το κύμα κινείται αρκετά

γρήγορα και ενώνεται με τα κύματα που προηγούνται αυτού. Η χαρακτηριστική δομή με τα βαθουλώματα παρουσιάζεται τόσο στο μέτωπο όσο και στην κορυφή του πρώτου roll wave. Πάντως είναι αρκετά δύσκολο να διακριθεί ο ακριβής αριθμός των βαθουλωμάτων. Ακολουθεί εντονότατη τρισδιάστατη δομή που ομοιάζει με αυτή του μετώπου του κύματος. Στις επόμενες φωτογραφίες παρατηρούνται αρκετά (περίπου οκτώ) μικρότερα roll waves να ακολουθούν. Η δομή πάντως των κυμάτων αυτών είναι και πάλι τρισδιάστατη. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών κυμάτων μεγαλώνει σταδιακά. Η συμπεριφορά του υμένα ακριβώς μπροστά αλλά και πίσω από το κάθε κύμα είναι η ίδια με την παρατηρούμενη μπροστά από την αρχική διαταραχή. Μετά και το τελευταίο κύμα η ροή πάλι παίρνει τη μορφή που θα είχε χωρίς την επιβολή της διαταραχής στην παροχή. Εμφανίζονται συγκεκριμένα, πέραν της πλήρους 3D δομής, μερικά roll waves με δομή παρόμοια με αυτά που οφείλονται στην επιβαλλόμενη διαταραχή.



Σχήμα 4.5.7: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 100$ – θέση C.

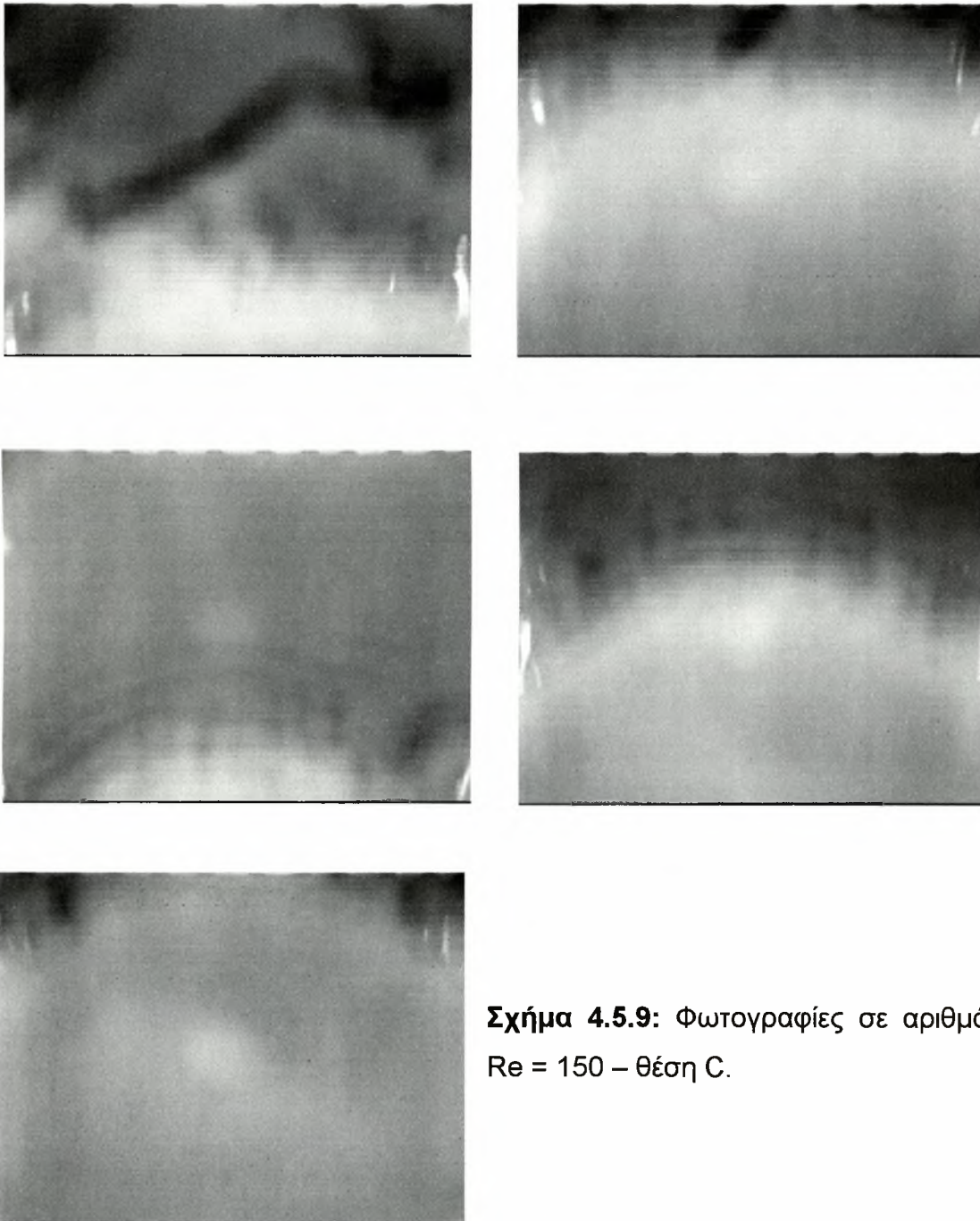
Σε ακόμη μεγαλύτερη παροχή ($Re=150$), οι οπτικές παρατηρήσεις είναι κάτι δύσκολο αφού η ταχύτητα του υμένα είναι πολύ μεγάλη, ειδικότερα στη θέση A. Στη θέση B πέραν του roll wave το οποίο φαίνεται καθαρά, δε φαίνεται να δημιουργούνται άλλα 2D ή 3D κύματα. Το κύμα κινείται πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να παρατηρούνται φαινόμενα αλληλεπίδρασης. Η δομή του υμένα αμέσως μετά το κύμα είναι πλήρως τρισδιάστατη και μετά από μικρό χρονικό διάστημα παίρνει τη μορφή της αδιατάρακτης ροής στις ίδιες συνθήκες (3D roll & periodic waves). Σε πειράματα όπου είτε ο αριθμός Re ήταν σχετικά μικρός ή η κλίση του καναλιού ήταν μικρότερη, ήταν εφικτό να παρατηρηθεί το σημείο στο οποίο η ροή έπαιρνε την μορφή της αντίστοιχης αδιατάρακτης. Εδώ δεν είναι δυνατόν να γίνει, τουλάχιστον όχι οπτικά, ο προσδιορισμός αυτός.



Σχήμα 4.5.8: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 150$ – θέση B.

Στην τρίτη θέση φαίνεται το κύμα που δημιουργεί η επιβαλλόμενη διαταραχή. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας δεν είναι δυνατόν να βρεθεί με σιγουριά ο αριθμός των βαθουλωμάτων στο μέτωπο του κύματος. Το σίγουρο πάντως είναι ότι το μήκος κύματος αυτών είναι πολύ μικρό, ενδεχομένως και μικρότερο της μονάδας. Αυτό φαίνεται πιο καθαρά στο δεύτερο roll wave το οποίο έχει τουλάχιστον δώδεκα βαθουλώματα. Η δομή μπροστά αλλά και πίσω από το πρώτο roll wave αλλά και από εκείνα που ακολουθούν (έξι) είναι πλήρως τρισδιάστατη. Το χρονικό διάστημα μεταξύ του κύματος αυτού και των επόμενων είναι πολύ μικρό και το πάχος του υμένα αρκετά μεγάλο. Έτσι δε φαίνεται κάποια ιδιαιτερότητα της ροής μεταξύ αυτών, παρά μόνο ότι είναι

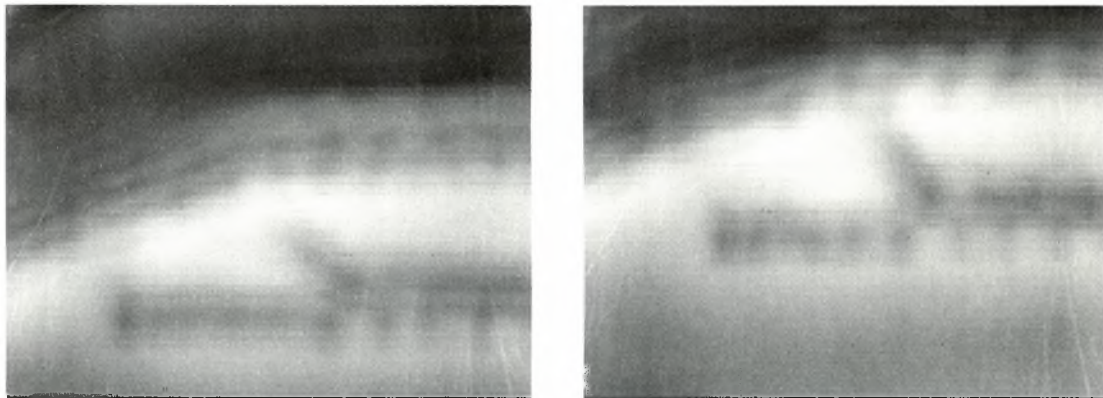
έντονα 3D. Δύσκολη είναι ακόμα η εύρεση του σημείου στο οποίο οι παρατηρούμενες αστάθειες του υμένα αρχίζουν να οφείλονται αποκλειστικά στην ίδια τη ροή. Πάντως στις ίδιες συνθήκες (κλίση, παροχή) η αδιατάρακτη ροή είναι και αυτή πλήρως τρισδιάστατη και παρουσιάζονται σε αυτή αρκετά roll waves.



Σχήμα 4.5.9: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 150$ – θέση C.

ν) Πειράματα σε κλίση 7° σε άνοιγμα – κλείσιμο: 5 sec – 1 sec.

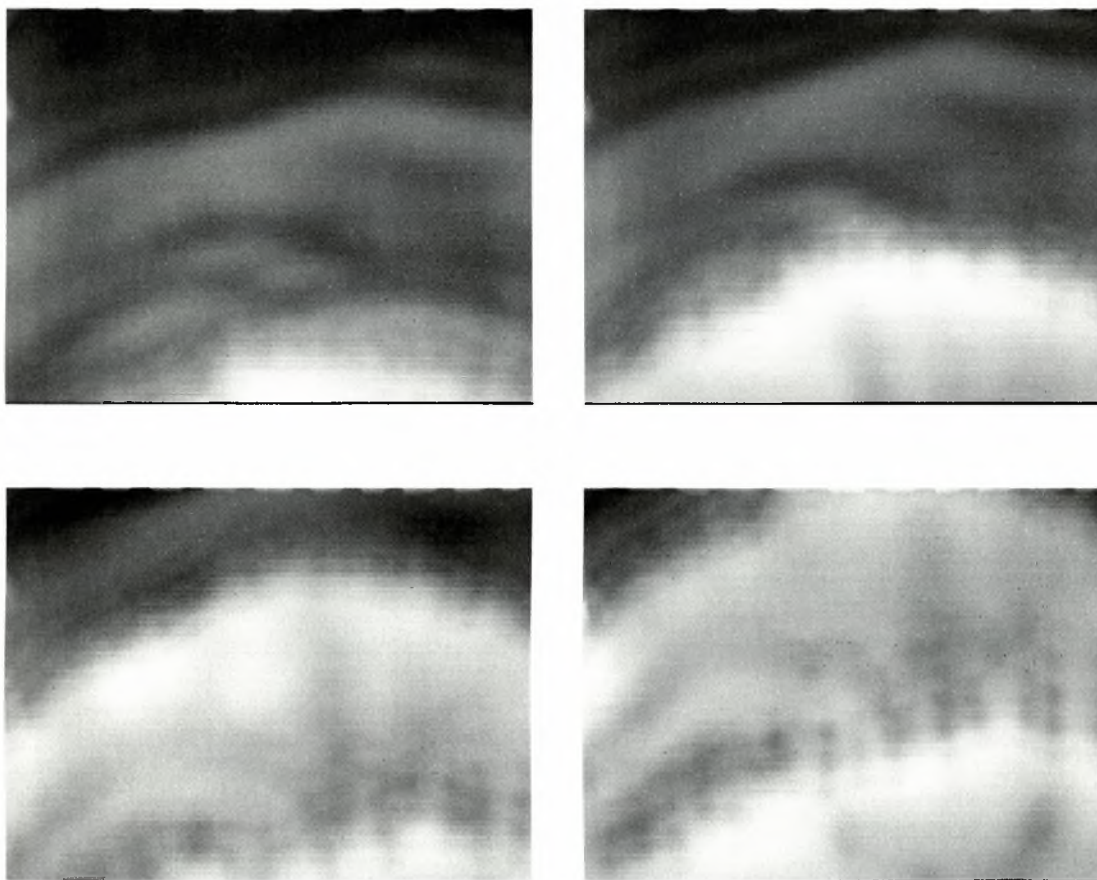
Φωτογραφίες ελήφθησαν στις τρεις θέσεις και για τρεις διαφορετικές τιμές του μέσου αριθμού Re . Στην πρώτη από αυτές ($Re = 51$) και στην πρώτη θέση (A), φαίνεται από την αυξομείωση στη φωτεινότητα της εικόνας ότι δημιουργείται το υδραυλικό κύμα. Στην θέση B φαίνεται το roll wave να έχει πολλά τρισδιάστατα ripples (έξι ή επτά) και τρισδιάστατη δομή στο μέτωπό του (μήκος κύματος των βαθουλωμάτων μικρότερο ή το πολύ ίσο με 0,98 cm). Η ίδια δομή παρατηρείται και πίσω ακριβώς από αυτό να κινείται μαζί με το κύμα χωρίς να αλλάζει σχήμα. Καθώς το κύμα φεύγει από την εικόνα φαίνεται ότι πίσω ακριβώς από αυτό έχει ήδη σχηματιστεί και άλλο roll wave, το οποίο προς το παρόν είναι διδιάστατο με ένα ελαφρύ σπάσιμο στη μορφή του. Φαίνεται καθαρά ότι το κύμα κινείται γρηγορότερα από τις υπόλοιπες διαταραχές του υμένα. Αποτέλεσμα είναι να τις παρασέρνει και να ενώνεται με αυτές (interaction).



Σχήμα 4.5.10: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 51$ – θέση B.

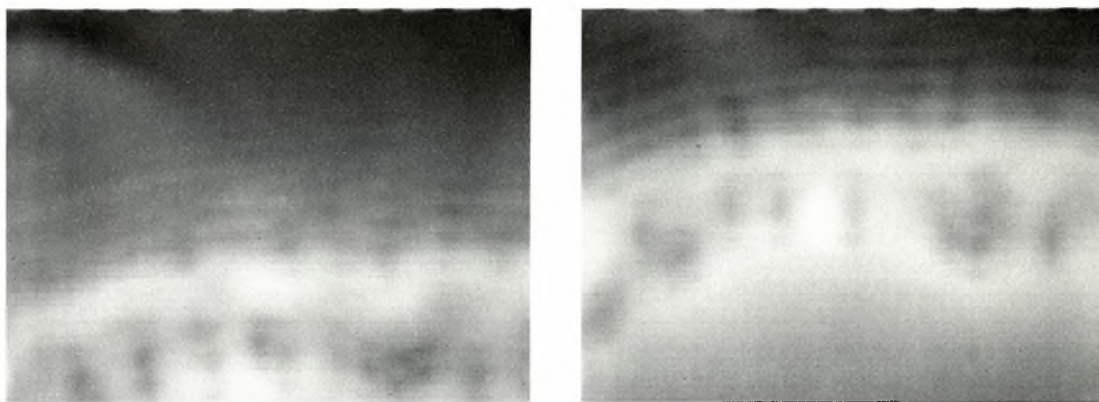
Από το σημείο αυτό και ύστερα παρουσιάζονται αρκετά (έξι) ακόμη μικρότερα roll waves. Όλα έχουν ελάχιστα – ένα ή δύο – ripples μπροστά τους και παρουσιάζουν διδιάστατη δομή καθώς εισέρχονται στο οπτικό πεδίο της κάμερας. Λίγο όμως πριν φύγουν φαίνονται καθαρά κάποια σπασίματα στη μορφή τους, καθώς και κάποια τρισδιάστατα βαθουλώματα. Μετά το πέρασμα και του τελευταίου από αυτά τα κύματα η ροή έχει δομή παρόμοια με την αδιατάρακτη στις ίδιες συνθήκες (αρκετά περιοδικά αλλά και solitary κύματα). Αυτό βέβαια συμβαίνει μέχρι την επιβολή της επόμενης διαταραχής.

Στο τέλος του καναλιού το κύμα, έχοντας έντονα τρισδιάστατη δομή μπροστά του (χωρίς ξεκάθαρο αριθμό βαθουλωμάτων πάλι), κινείται αρκετά γρήγορα και ενώνεται με τις αστάθειες τις ροής που προηγούνται αυτού. Όπως και στη θέση Β, ακριβώς πίσω από το κύμα ακολουθεί έντονη τρισδιάστατη δομή. Τα δύο roll waves που έρχονται αμέσως μετά είναι μικρότερα από το αρχικό, αλλά μπροστά και πίσω από αυτά παρατηρούνται αντίστοιχα φαινόμενα.



Σχήμα 4.5.11: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 51$ – θέση C.

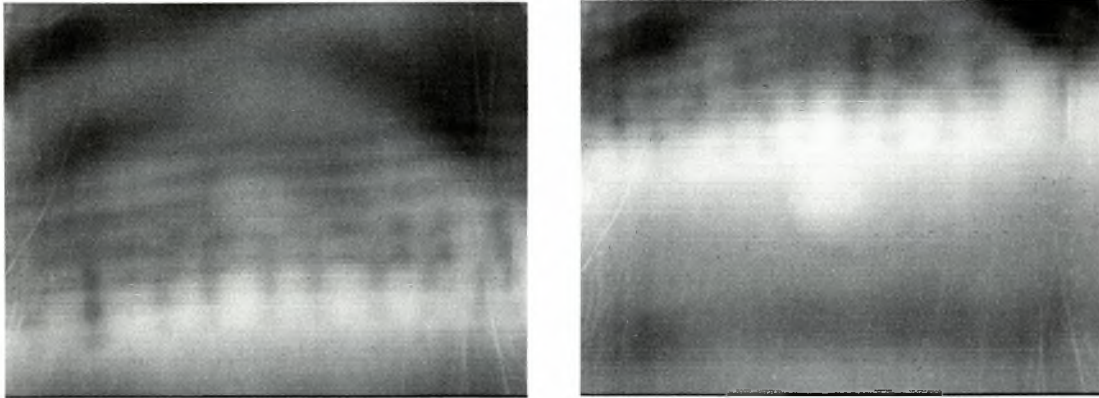
Στο πρώτο από τα κύματα αυτά φαίνονται περίπου έντεκα βαθουλώματα στο μέτωπό του. Ένα ακόμη σημαντικό σημείο είναι το ότι παρατηρείται στην κορυφή του κύματος αυτού δομή παρόμοια με αυτή του μετώπου του. Παρόμοια είναι η δομή και του επόμενου κύματος.



Σχήμα 4.5.12: Η μορφή ενός από τα κύματα που έπονται του αρχικού κύματος, στη θέση αυτή και στον ίδιο αριθμό Re .

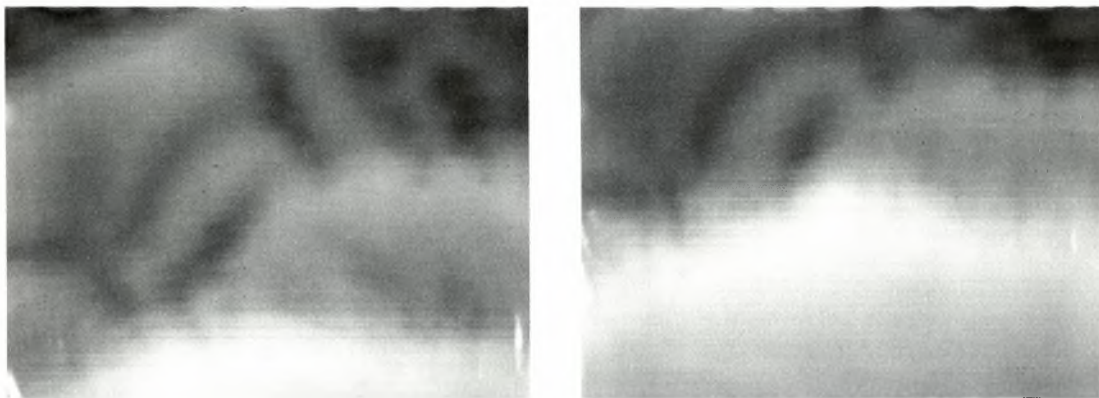
Το αμέσως επόμενο κύμα έχει αρκετά ripples. Η δομή μπροστά από αυτό είναι σαφώς λιγότερο έντονα 3D. Μέχρι την εμφάνιση του επόμενου κύματος ο υμένας είναι επίπεδος. Το κύμα που έπεται έχει πολλά ripples (επτά) και αρκετά «σπασίματα» μπροστά του. Ακολουθούν δύο ακόμη roll waves, μικρότερα από τα προηγούμενα και με διδιάστατο μέτωπο. Μεταξύ αυτών ο υμένας δεν είναι επίπεδος αφού φαίνονται κάποιες διδιάστατες διαταραχές. Από το σημείο αυτό και μετά, μέχρι το επόμενο κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας, έχουμε πλήρως άτακτη δομή με κύματα να κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις.

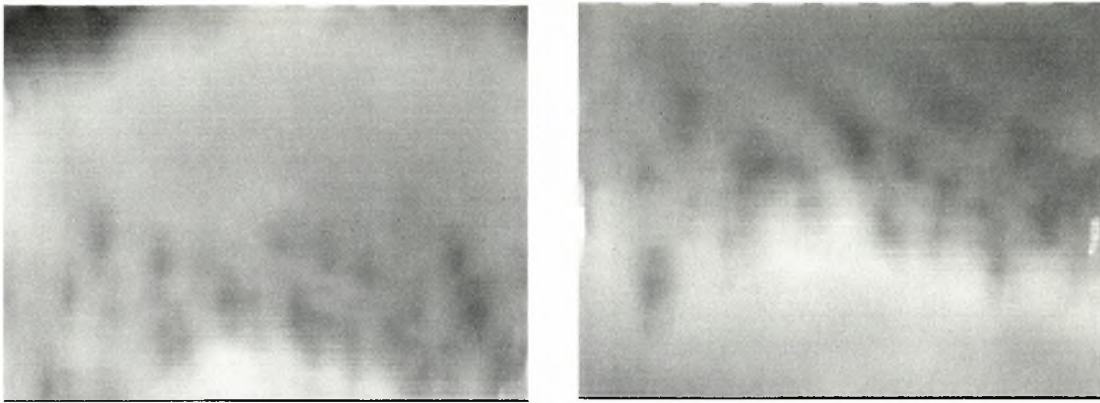
Σε μεγαλύτερο ακόμα μέσο αριθμό Re ($= 99$) και στη θέση A δεν φαίνεται κάτι παραπάνω από αυτά που αναφέρθησαν για τη θέση αυτή στην προηγούμενη σειρά μετρήσεων. Στη B θέση το κύμα φαίνεται να έχει αρκετά ripples και έντονη τρισδιάστατη δομή στο μέτωπό του. Φαίνονται να υπάρχουν 12 βαθουλώματα (μεγάλη πυκνότητα αυτών), γίνεται λόγος δηλαδή για ένα μήκος κύματος ίσο με 0,95 cm. Πίσω από το roll wave παρατηρείται η κορυφή ενός ακόμη κύματος. Αυτό το κύμα, λίγο πριν χαθεί από το οπτικό πεδίο της κάμερας στη θέση αυτή, φαίνεται ότι ήδη έχει αρκετά ripples, αλλά και αρκετά σπασίματα στη μορφή του.



Σχήμα 4.5.13: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 99$ – θέση B.

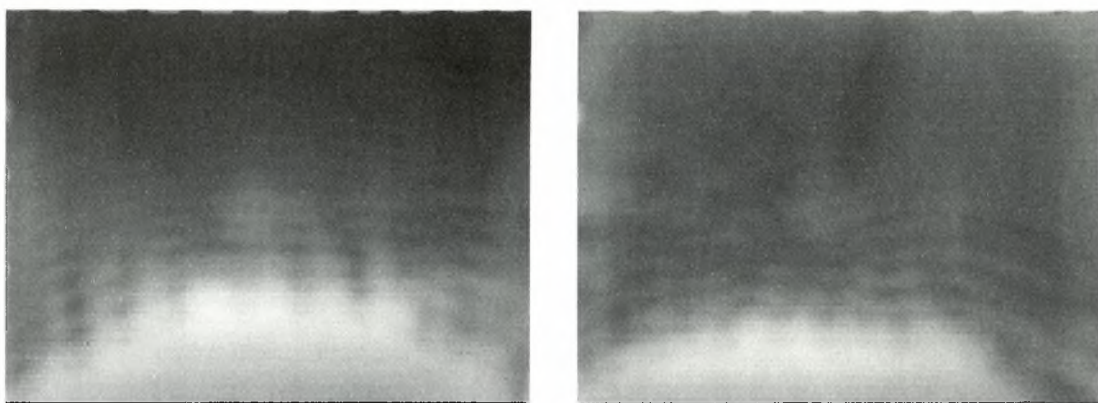
Στην τρίτη θέση λήψης φωτογραφιών πάλι παρουσιάζεται έντονη 3D δομή στο μέτωπο του roll wave, αλλά και πίσω από αυτό. Η δομή αυτή, όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, κινείται μαζί με τη ροή με μία μορφή που θα μπορούσε να θεωρηθεί σταθερή. Αμέσως μετά φαίνεται να έρχεται ένα ακόμη κύμα, του οποίου η δομή είναι ίδια με του αρχικού. Το αμέσως επόμενο κύμα είναι μικρότερο από τα δύο προηγούμενα, κινείται αρκετά γρήγορα και παρασέρνει τις τρισδιάστατες αστάθειες που βρίσκονται μεταξύ αυτού και του προηγούμενου. Και αυτό έχει αρκετά ripples και 3D δομή μπροστά του.





Σχήμα 4.5.14: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 99$ – θέση C.

Μετά από αυτό ο υμένας είναι επίπεδος μέχρι την εμφάνιση δύο ακόμα roll waves. Η δομή μπροστά απ' αυτά είναι παρόμοια με αυτή του προηγούμενου κύματος. Βέβαια στα προηγούμενα κύματα η τρισδιάστατη δομή ήταν σαφώς πιο έντονη. Στις παρακάτω φωτογραφίες που αντιστοιχούν σε αυτά τα κύματα, είναι εμφανή τα τρισδιάστατα ripples που προηγούνται του κύματος, καθώς και τα χαρακτηριστικά βαθουλώματα στο μέτωπο αυτών. Στο πρώτο από αυτά φαίνονται δέκα βαθουλώματα, ενώ στο δεύτερο κύμα ο αντίστοιχος αριθμός είναι μικρότερος (επτά ή οκτώ). Έτσι το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων είναι αντίστοιχα 1,2 και 1,45 cm.

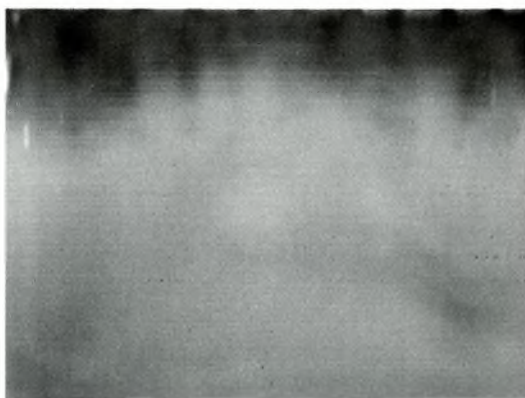
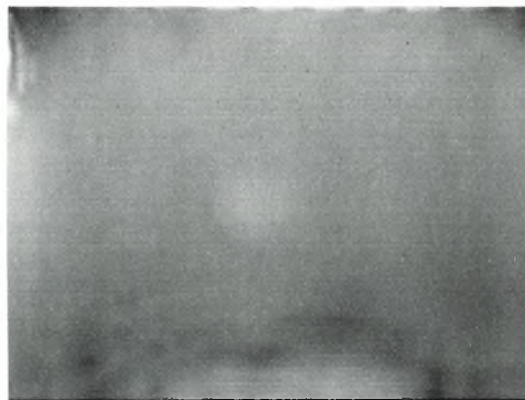
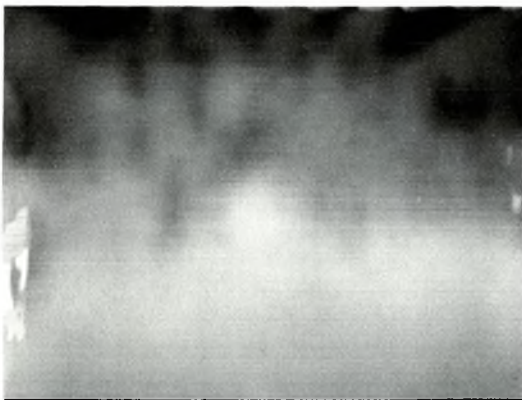


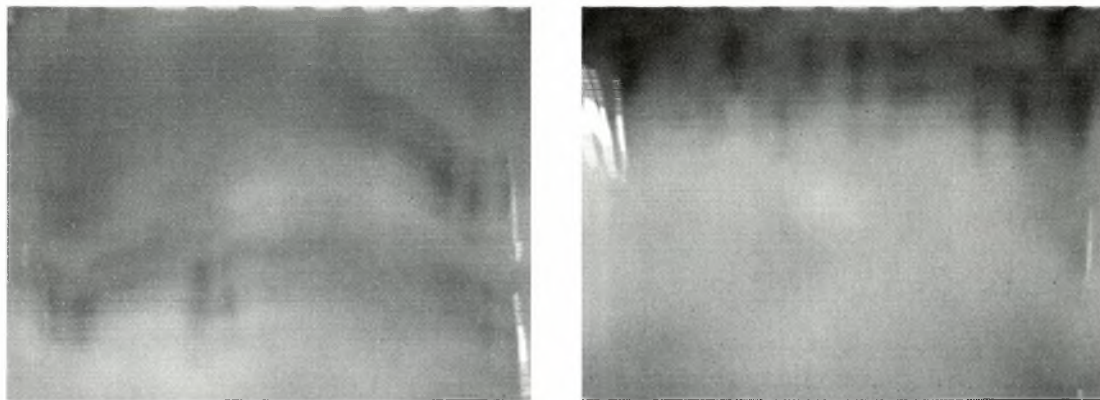
Σχήμα 4.5.15: Φωτογραφίες σε αριθμό $Re = 99$ – θέση C.
Πρόκειται για κύματα που έπονται του αρχικού.

Σε ακόμα μεγαλύτερη παροχή που αντιστοιχεί σε $Re = 150$ και στη θέση B το κύμα με αρκετά ripples, μορφή που αποκλίνει από την τοξοειδή και

τρισεδιάστατη δομή στο μέτωπό του, κινείται γρήγορα και παρασέρνει τις διαταραχές του υμένα που προηγούνται. Ακολουθούν τρισεδιάστατες διαταραχές μικρότερου πλάτους και τελικά η ροή αποκτά τη δομή η οποία αντιστοιχεί στην αδιατάρακτη ροή στις ίδιες συνθήκες.

Στο τέλος του καναλιού παρατηρείται έντονη τρισεδιάστατη δομή μπροστά από το κύμα. Δεν είναι πάντως δόκιμο να γίνει λόγος για βαθουλώματα και αριθμό αυτών, αφού τα φαινόμενα εξελίσσονται υπερβολικά γρήγορα. Παρόμοια δομή φαίνεται να ακολουθεί το κύμα, χωρίς να είναι υπερβολικά ευδιάκριτη. Τα επόμενα τρία κύματα είναι μικρότερα από το πρώτο, έρχονται γρήγορα αμέσως μετά το αρχικό και μπροστά αλλά και πίσω ακριβώς από αυτά ο υμένας έχει την ίδια 3D μορφή που είχε και το πρώτο. Ακολουθούν τρία ακόμη roll waves με μεγαλύτερη σχετικά απόσταση μεταξύ τους. Η μορφή των κυμάτων αυτών είναι και πάλι ίδια με το αρχικό. Για ένα μικρό χρονικό διάστημα που ακολουθεί παρατηρούνται συνεχόμενα κύματα με την ίδια πάλι δομή (τέσσερα ακόμη roll waves). Κατόπιν, πριν την επόμενη διαταραχή ο υμένας συμπεριφέρεται όπως ακριβώς η αδιατάρακτη ροή στις ίδιες ακριβώς συνθήκες.





Σχήμα 4.5.16: Φωτογραφίες της ροής σε αριθμό $Re = 150$, οι οποίες έχουν ληφθεί στη θέση C.

4.6. Σύνοψη των οπτικών παρατηρήσεων.

Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται η σύνοψη των σημαντικότερων από τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στο κεφάλαιο αυτό. Σε μικρές γωνίες κλίσης του καναλιού οι επιβαλλόμενες διαταραχές οδηγούν στην εμφάνιση διδιάστατων κυμάτων, ακόμα και για αρκετά μεγάλες τιμές του αριθμού Re . Παρατηρούνται βέβαια και κάποιες τρισδιάστατες αστάθειες. Αυτές εκδηλώνονται με τη μορφή βαθουλωμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στην κορυφή ή στο μέτωπο του μοναχικού κύματος. Σε γενικές γραμμές πάντως, η δομή του υμένα μπροστά από το κύμα όσο και πίσω από αυτό είναι διδιάστατη.

Στο μέτωπο του κύματος παρατηρείται η δημιουργία ρυτιδώσεων. Η παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει αυτές τις ρυτιδώσεις, είναι το πλάτος της διαταραχής. Αυξανόμενου του πλάτους, αυξάνονται και οι ρυτιδώσεις που προηγούνται του κύματος. Πίσω από το κύμα τώρα, ο υμένας είναι γενικά επίπεδος. Σε λίγες περιπτώσεις, για τις εν λόγω μοίρες, παρατηρούνται ελάχιστα διδιάστατα περιοδικά κύματα, μεταξύ δύο συνεχόμενων μοναχικών κυμάτων. Αυτά οφείλονται αποκλειστικά σε χαρακτηριστικά της ροής και δε σχετίζονται με τη διαταραχή.

Η αύξηση της κλίσης του καναλιού παίζει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία τρισδιάστατης δομής. Αυτή, στις τρεις μοίρες κλίση, εκφράζεται με την εντατικοποίηση του φαινομένου εμφάνισης των βαθουλωμάτων. Τελικά, ο αριθμός των βαθουλωμάτων εξαρτάται τόσο από την κλίση του καναλιού όσο και από τον μέσο αριθμό Re . Όσο η τιμή των παραμέτρων αυξάνεται, τόσο διευκολύνεται η δημιουργία της συγκεκριμένης δομής. Για μια συγκεκριμένη κλίση του καναλιού, ο μέγιστος αριθμός βαθουλωμάτων παρουσιάζεται σε σχετικά μεγάλες τιμές του Re . Περαιτέρω όμως αύξηση του Re μπορεί μόνο αρνητικά να επηρεάσει το υπό εξέταση φαινόμενο. Συνήθως, μετά από κάποιο αριθμό Re ο αριθμός αυτός σταθεροποιείται. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της δομής αυτής το οποίο μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του αριθμού Re και της κλίσης του καναλιού, είναι η θέση εμφάνισης της. Πάλι, αύξηση των τιμών των προαναφερθέντων παραμέτρων μετατοπίζει τη θέση αυτή πιο κοντά στο σημείο υπερχείλισης του υμένα.

Στην ίδια κλίση, φαίνεται ότι οι ρυτιδώσεις στο μέτωπο του κύματος παύουν να είναι πλήρως διδιάστατες, ειδικότερα για μεγάλες τιμές του αριθμού Re . Το φαινόμενο αυτό δίνει μία αρχική αίσθηση τρισδιάστατης δομής μπροστά από το κύμα.

Πέραν από την πρώτη αυτή «γεύση» τρισδιάστατης δομής, παρατηρείται ένα ακόμη σημαντικό φαινόμενο. Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών διαταραχών, παρατηρούνται και άλλα μοναχικά κύματα. Αυτά είναι μικρότερα από το πρώτο και, όπως και αυτό, εμφανίζονται στο μέτωπό τους διδιάστατες ρυτιδώσεις. Ο αριθμός αυτών, το μέγεθός και η απόσταση μεταξύ τους φαίνεται ότι εξαρτώνται πάλι από το είδος της διαταραχής. Όσο πιο μεγάλο το αρχικό κύμα που δημιουργείται, τόσο πιο πολλά και τα μοναχικά κύματα που ακολουθούν αυτό.

Η περαιτέρω αύξηση της κλίσης του καναλιού προσθέτει καινούριες και πιο εντυπωσιακές παρατηρήσεις στις ήδη υπάρχουσες. Από τις πέντε μοίρες και πάνω είναι σχεδόν αδύνατο να παρατηρηθεί ευσταθής περιοχή του υμένα, ακόμα και σε περιπτώσεις που ο αριθμός Re είναι πολύ μικρός. Η οποιαδήποτε επιβολή διαταραχής έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση τρισδιάστατων κυμάτων.

Το πιο ενδιαφέρον από τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν, είναι η τρισδιάστατη δομή που ακολουθεί ακριβώς πίσω από το κύμα. Η παρουσία αυτής είναι εμφανής, ακόμα και σε πολύ μικρούς αριθμούς Re . Ουσιαστικά, σε σχετικά μικρούς αριθμούς Re η παρουσία της είναι πιο έντονη από ότι σε μεγαλύτερες τιμές αυτού. Από τις εικόνες που ελήφθησαν είναι φανερό ότι η δομή αυτή έχει σταθερή μορφή και κινείται μαζί με τον υμένα.

Εννοείται βέβαια ότι και μπροστά από το κύμα η δομή είναι έντονα τρισδιάστατη. Πάλι εμφανίζονται τρισδιάστατα ripples και αρκετά βαθουλώματα τόσο στο μέτωπο όσο και στην κορυφή του κύματος. Βέβαια σε ορισμένες περιπτώσεις τα φαινόμενα είναι τόσο έντονα που είναι αδύνατον να ξεχωρίσει κανείς ρυτιδώσεις ή βαθουλώματα. Στις μεγάλες μοίρες και πάλι, κατέστη εφικτή η παρατήρηση φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων. Το κύμα που δημιουργούταν από την επιβαλλόμενη διαταραχή κινούταν πολύ γρήγορα και αλληλεπιδρούσε με αυτά που προηγούταν.

5. Επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

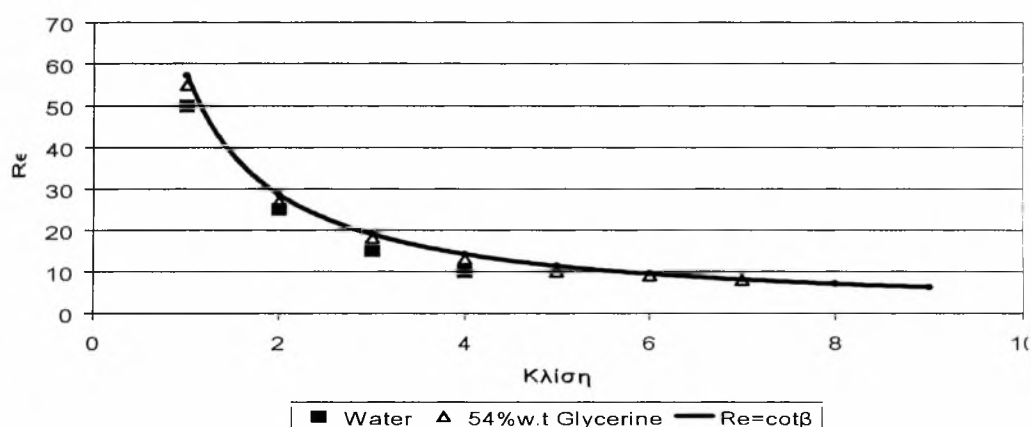
Στην προηγούμενη θεματική ενότητα παρατέθηκαν οι οπτικές ποιοτικές παρατηρήσεις, για συγκεκριμένα πειράματα. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία ποσοτικοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν σε πειράματα όπου εμφανίστηκαν διδιάστατα κύματα. Στις περιπτώσεις αυτές ήταν εφικτή η δημιουργία γραφημάτων καλής ποιότητας. Στα υπόλοιπα πειράματα η τρισδιάστατη δομή δεν επέτρεψε τη δημιουργία αντίστοιχων παραστάσεων. Οι μηχανισμοί πάντως που οδηγούν αρχικά στη δημιουργία των κυμάτων και έπειτα στην εξέλιξη αυτών με συγκεκριμένο τρόπο, είναι κοινοί για όλες τις εξετασθείσες περιπτώσεις. Κατάλληλο λογισμικό πρόγραμμα γραμμένο στο Matlab ήταν ο κύριος βοηθός στην προσπάθεια αυτή. Δεν εμφανίστηκε ανάγκη πιστοποίησης της μεθόδου αφού σε προηγούμενη εργασία εκτελέστηκε η ενέργεια αυτή [13].

5.1. Καμπύλη ευστάθειας – χρονική εξέλιξη των κυμάτων.

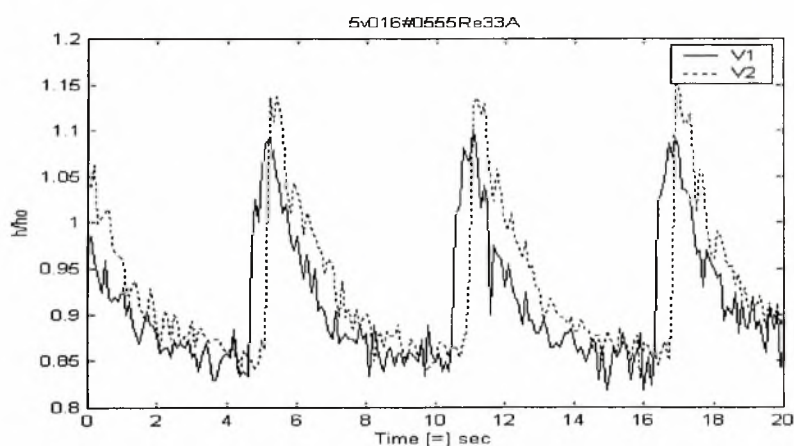
Αρχικά, θεωρήθηκε αναγκαία η δημιουργία της καμπύλης ευστάθειας για τις σειρές των μετρήσεων που διεξήχθησαν. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθεται η γραφική παράσταση, η οποία καθορίζει τις περιοχές στις οποίες ο υμένας είναι ευσταθής ή όχι, σαν συνάρτηση του αριθμού Re και της κλίσης του καναλιού. Η καμπύλη αυτή δεν αποτελεί μόνο ένα κριτήριο για την πιστοποίηση της καλής λειτουργίας της συσκευής αλλά και της μεθόδου.

Αποτελεί βασική προϋπόθεση για την περαιτέρω θεωρητική αλλά και πειραματική μελέτη του προβλήματος.

Από εκεί και πέρα, η δημιουργία και εξέλιξη των κυμάτων αποτέλεσε βασικό αντικείμενο προβληματισμού. Στο σχήμα που ακολουθεί της καμπύλης ευστάθειας φαίνεται η χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1,V2), στην πρώτη θέση λήψης δεδομένων. Τα δύο σημεία απέχουν μεταξύ τους απόσταση 75 mm. Ουσιαστικά, το κύμα φτάνει πρώτα στο σημείο V1 και μετά στο V2. Το γράφημα αυτό αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο πείραμα και παρατίθεται ενδεικτικά.



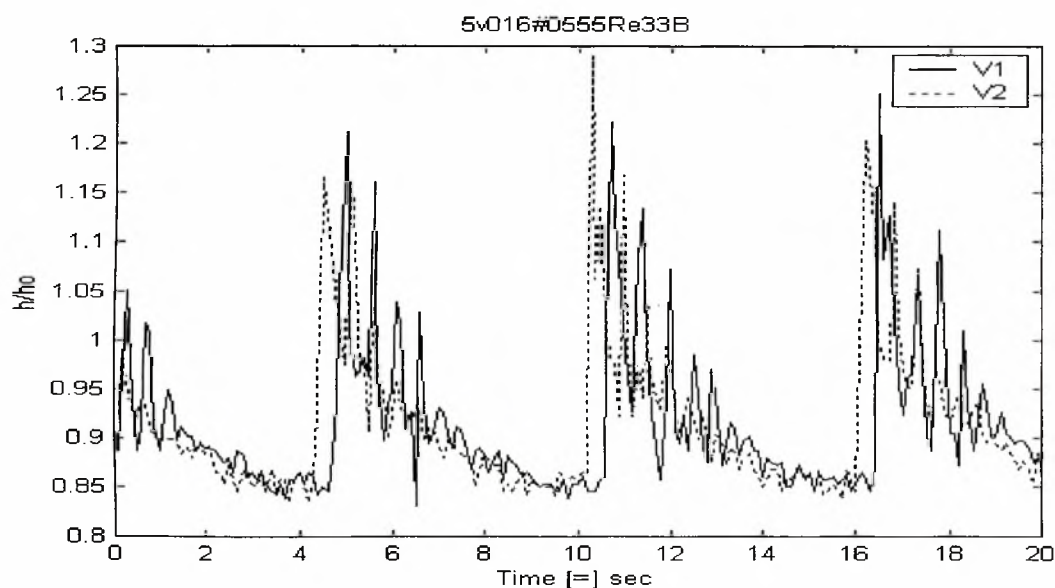
Σχήμα 5.1.1: Η καμπύλη ευστάθειας του υγρού υμένα σαν συνάρτηση του μέσου αριθμού Re , σε διάφορες τιμές της κλίσης του καναλιού.



Σχήμα 5.1.2: Η χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=33$, $\nu=0,16$ Hz(0,5-5,5)
Διάλυμα: Νερό, $D= 0$ mm.

Πέραν του γεγονότος ότι η επιβαλλόμενη διαταραχή μεταφέρεται πλήρως στον υμένα, αξίζει να αναφερθούν μερικά σημεία ακόμη. Η αρχική διαταραχή οδηγεί στη δημιουργία ενός κύματος. Το κύμα αυτό δεν έχει λάβει την τελική μορφή αλλά και τις τελικές του διαστάσεις. Αυτό γίνεται εμφανές τόσο από τη διαφορά του ύψους των κορυφών των δύο γραμμών, όσο και από το σχήμα που ακολουθεί.

Στο σχήμα αυτό αποτυπώνεται η εξέλιξη του ύψους των διαταραχών συναρτήσει του χρόνου, μεταξύ των ιδίων δύο σημείων V1 και V2 και στη δεύτερη θέση παρακολούθησης της ροής. Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του πειράματος παραμένουν οι ίδιες. Φαίνεται πως το αρχικό κύμα έχει ήδη διασπασθεί και έχει δημιουργήσει τρία ακόμη κύματα. Εμφανείς είναι και οι διαφορές στο ύψος του κύματος μεταξύ των δύο θέσεων. Στη δεύτερη θέση το αρχικό κύμα είναι σαφώς ψηλότερο από το αντίστοιχο στην πρώτη θέση.

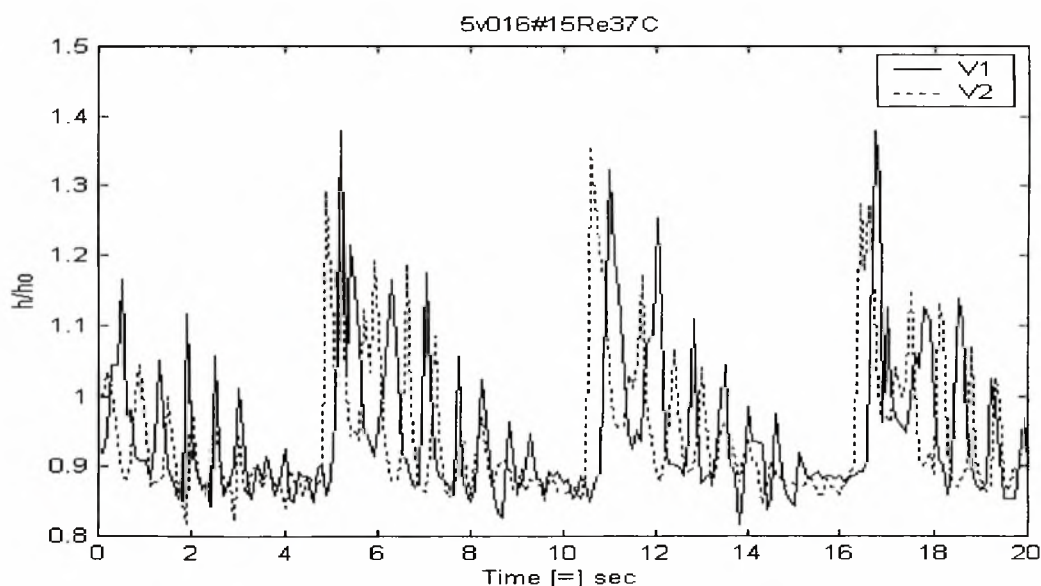


Σχήμα 5.1.3: Η χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=33$, $\nu=0,16$ Hz(0,5-5,5) Διάλυμα: Νερό, $D=252$ mm.

Οι τιμές των παραμέτρων των παραμέτρων του προβλήματος καθορίζουν τη θέση στην οποία το κύμα τελικά φτάνει σε μόνιμη κατάσταση. Δεν ήταν λίγες οι περιπτώσεις που, ακόμα και στην τρίτη θέση λήψης

φωτογραφιών, το κύμα δεν είχε λάβει την τελική του μορφή. Ακόμα περισσότερες ήταν οι περιπτώσεις όπου το κύμα, καθώς συνέχιζε να εξελίσσεται, συνέχιζε να διασπάται σε ακόμα περισσότερα κύματα.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια τέτοια περίπτωση. Φαίνονται καθαρά τα πέντε μικρότερα κύματα που έχουν δημιουργηθεί στο μέτωπο του αρχικού μοναχικού κύματος. Δεν αντιστοιχεί βέβαια σε πείραμα το οποίο διεξήχθη στις ίδιες ακριβώς συνθήκες με τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις. Η συχνότητα βέβαια της επιβαλλόμενης διαταραχής ήταν η ίδια, επετεύχθη όμως με διαφορετικό συνδυασμό χρόνου ανοίγματος – κλεισίματος της ηλεκτροβαλβίδας. Αντιστοιχεί σε δεδομένα που ελήφθησαν σε απόσταση 522 mm από το σημείο δημιουργίας του αρχικού μοναχικού κύματος. Ο μέσος αριθμός Re ήταν ελαφρώς μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις ($Re = 37$).



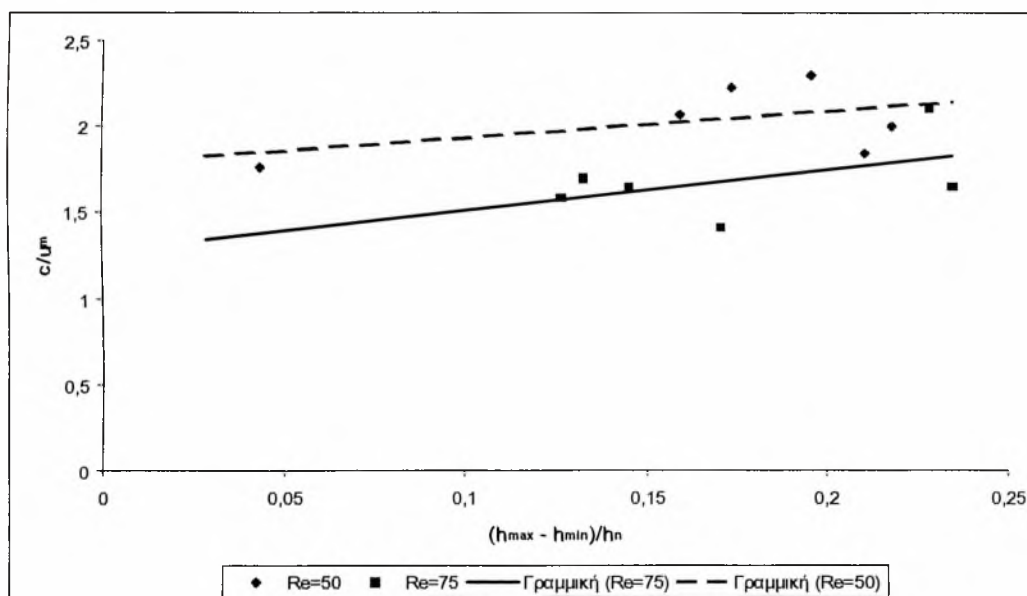
Σχήμα 5.1.4: Η χρονική εξέλιξη του ύψους των διαταραχών μεταξύ δύο σημείων (V1,V2) που απέχουν απόσταση 75mm, $Re=37$, $\nu=0,16$ Hz(1-5) Διάλυμα: Νερό, $D= 522$ mm.

Σημαντικά ποσοτικά στοιχεία μπορούν να προκύψουν από τα σχήματα αυτά. Συγκεκριμένα, είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός της ταχύτητας του κύματος, αλλά και οι απευθείας συγκρίσεις του ύψους των διαταραχών, σαν συνάρτηση των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος. Από την

επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα.

Στην γραφική αυτή παράσταση παρατίθεται η εξάρτηση της ταχύτητας των κυμάτων από το μέγεθός τους. Τόσο το ύψος των κυμάτων, όσο και η ταχύτητα αυτών έχουν αδιαστατοποιηθεί. Η αδιαστατοποίηση της ταχύτητας του κύματος πραγματοποιήθηκε με τη διαίρεση με την μέση τιμή της ταχύτητας του ρευστού. Η τελευταία υπολογίστηκε με τη βοήθεια της προσέγγισης, η οποία αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο της θεωρητικής ανάλυσης. Για την αδιαστατοποίηση του ύψους δημιουργήθηκε ο λόγος $(h_{\max} - h_{\min}) / h_n$. Συμβολίζεται με h_{\max} το ύψος του κύματος και με h_{\min} το πάχος του υμένα ακριβώς μπροστά από το κύμα. Το h_n είναι το πάχος που θα είχε ο αδιατάρακτος υμένας σε κάποια συγκεκριμένη τιμή του αριθμού Re .

Για τη δημιουργία του γραφήματος έγινε επιλογή μιας συγκεκριμένης σειράς πειραμάτων. Απεικονίζονται λοιπόν τα αποτελέσματα πειράματος που έγινε στις επτά μοίρες, σε μέσο αριθμό Re ίσο με 75 και 50. Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα γλυκερίνης, για την αποφυγή μετάβασης σε τρισδιάστατη δομή (λόγω του μεγάλου ιξώδους της γλυκερίνης).



Σχήμα 5.1.5: Απεικόνιση της ταχύτητας των κυμάτων σαν συνάρτηση του μεγέθους αυτών για διάφορες τιμές της κλίσης του καναλιού (κλίση καναλιού 7° , σε διάλυμα γλυκερίνης 26 % κ.β.).

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από το διάγραμμα αυτό είναι αρκετά σημαντικό. Η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών που απεικονίζονται είναι γραμμική. Αυξανόμενου του μεγέθους των κυμάτων, αυξάνεται και η ταχύτητά τους. Φαίνεται ακόμα ότι η ταχύτητα των κυμάτων είναι μεγαλύτερη για μικρότερες τιμές του αριθμού Re . Και στην περίπτωση αυτή έγινε έλεγχος και επιβεβαιώθηκε η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Η σύγκριση έγινε με δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία τα οποία αντιστοιχούν σε μελέτη ροής λεπτού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα.

Αρνητική εντύπωση ενδεχομένως να προκαλεί η διασπορά των σημείων πάνω στο διάγραμμα. Αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι, τοπικά, η ταχύτητα του υμένα διαφέρει από την τιμή που χρησιμοποιήθηκε για την αδιαστατοποίηση. Το πέρασμα των κυμάτων δημιουργεί αυξομειώσεις στο ύψος του υμένα. Αυτές οι διαταραχές οδηγούν σε μεταβολές της τιμής της μέσης ταχύτητας. Οι μεταβολές αυτές είναι πιθανότατα υπαίτιες για τη διασπορά των σημείων πάνω στο διάγραμμα.

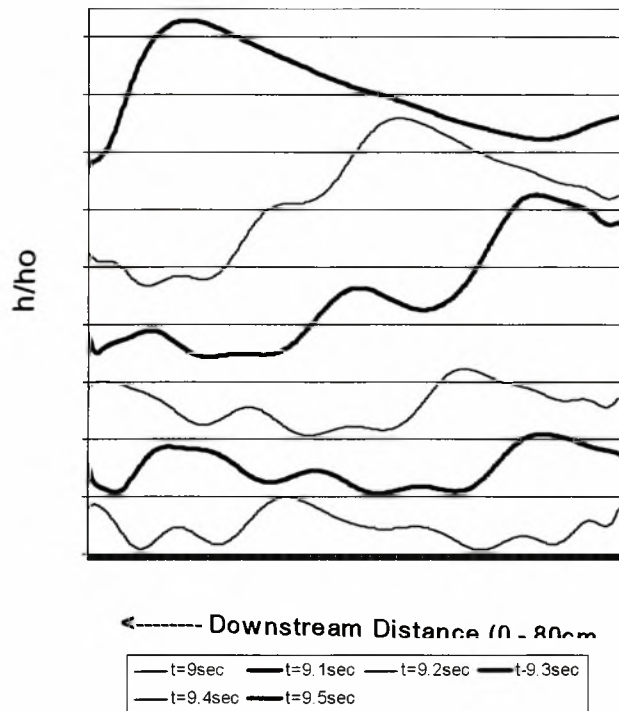
5.2. Φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων.

Το κεφάλαιο της αλληλεπίδρασης (wave interaction phenomena) τυγχάνει τεράστιας σημασίας για την πλήρη κατανόηση των φαινομένων που χαρακτηρίζουν το πρόβλημα της ροής λεπτού υγρού υμένα. Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν σημαντικά στοιχεία για τα διάφορα είδη αυτής. Παρατηρήθηκαν συγκεκριμένα περιπτώσεις συγχώνευσης κυμάτων, αλλά και απώθησης και διαχωρισμού μεταξύ αυτών.

I. Συγχώνευση (coalescence) κυμάτων.

Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις διάφορες σειρές πειραμάτων που διεξήχθησαν σε διαλύματα νερού, έδωσαν τη δυνατότητα δημιουργίας σχημάτων όπως το παρακάτω. Αυτό απεικονίζει την μεταβολή του πάχους του υμένα, σαν συνάρτηση της απόστασης κατάντη της ροής. Ουσιαστικά,

παρουσιάζεται το κύμα σε διαδοχικές θέσεις, από το σημείο δημιουργίας αυτού μέχρι το τέλος του καναλιού.

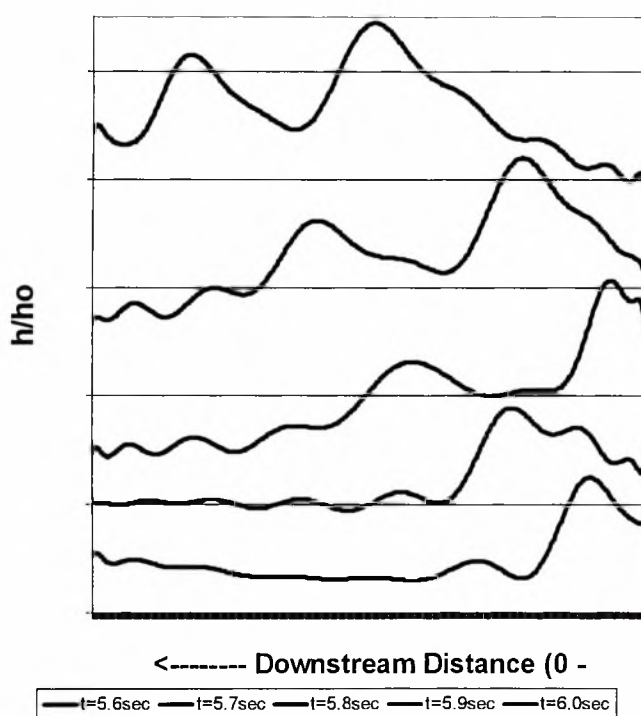


Σχήμα 5.2.1: Το κύμα παρουσιάζεται σε διαδοχικές θέσεις, με σκοπό την επίδειξη της συγχώνευσης των κυμάτων.

Για να εμφανιστεί η συγκεκριμένη μορφή αλληλεπίδρασης, πρέπει να υφίσταται η απαιτούμενη διαφορά μεγέθους μεταξύ των κυμάτων ($\Delta h > 0,35 h_0$). Αυτή η διαφορά αποτελεί την ωθούσα δύναμη για την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων. Εφόσον ολοκληρωθεί η συγχώνευση, οι ρυτιδώσεις μπροστά από το δημιουργούμενο κύμα εξαφανίζονται. Για ένα μικρό χρονικό διάστημα ο υμένας παραμένει επίπεδος και μετά οι ρυτιδώσεις επανεμφανίζονται. Πίσω τώρα από το κύμα που δημιουργείται, παρατηρείται αύξηση του ύψους του υποστρώματος. Αυτό, συγκρινόμενο με το αντίστοιχο μπροστινό προκύπτει αρκετά πιο παχύ. Το γεγονός αυτό συμβαδίζει με τα προβλεπόμενα από τη θεωρία. Αντίστοιχα σχήματα δημιουργήθηκαν και για διαλύματα γλυκερίνης. Η μόνη διαφορά είναι η καθυστέρηση, στην περίπτωση των διαλυμάτων γλυκερίνης, στην απόκτηση του τελικού σχήματος.

II. Απώθηση (repulsion) μεταξύ των κυμάτων.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η διαφορά μεγέθους μεταξύ δύο κυμάτων οδηγεί στην συγχώνευση τους. Στην περίπτωση που το μέγεθος των δύο κυμάτων είναι το ίδιο (ή σχεδόν το ίδιο), παρατηρείται το φαινόμενο της απώθησης. Το φαινόμενο αυτό συντελείται ανεξάρτητα με το προηγείται ή ακολουθεί.

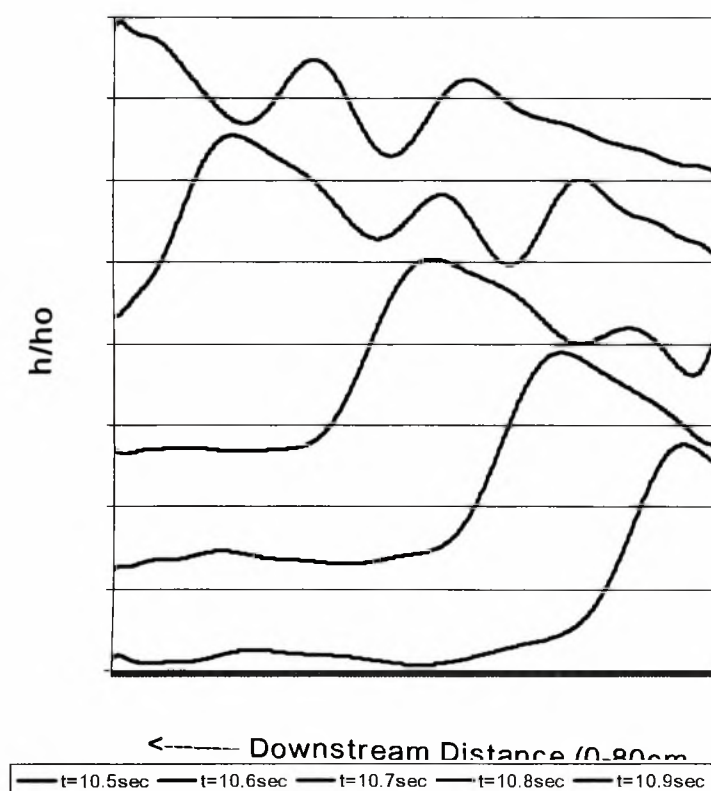


Σχήμα 5.2.2: Το κύμα παρουσιάζεται σε διαδοχικές θέσεις. Το φαινόμενο της απώθησης είναι εμφανές.

Στο σχήμα της προηγούμενης σελίδας παρουσιάζεται μία από τις περιπτώσεις απώθησης, οι οποίες παρατηρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Κύριο χαρακτηριστικό της απώθησης είναι η στιγμιαία επιτάχυνση ή επιβράδυνση των κυμάτων. Στην υπό εξέταση περίπτωση η διαταραχή που επιβάλλεται στη ροή του υμένα είναι έντονη. Έτσι η εμφάνιση τέτοιων φαινομένων είναι συνεχής.

III. Διαχωρισμός (break) των κυμάτων.

Το φαινόμενο αυτό συζητήθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται η εξέλιξη ενός κύματος σαν συνάρτηση της απόστασης κατάντη της ροής.

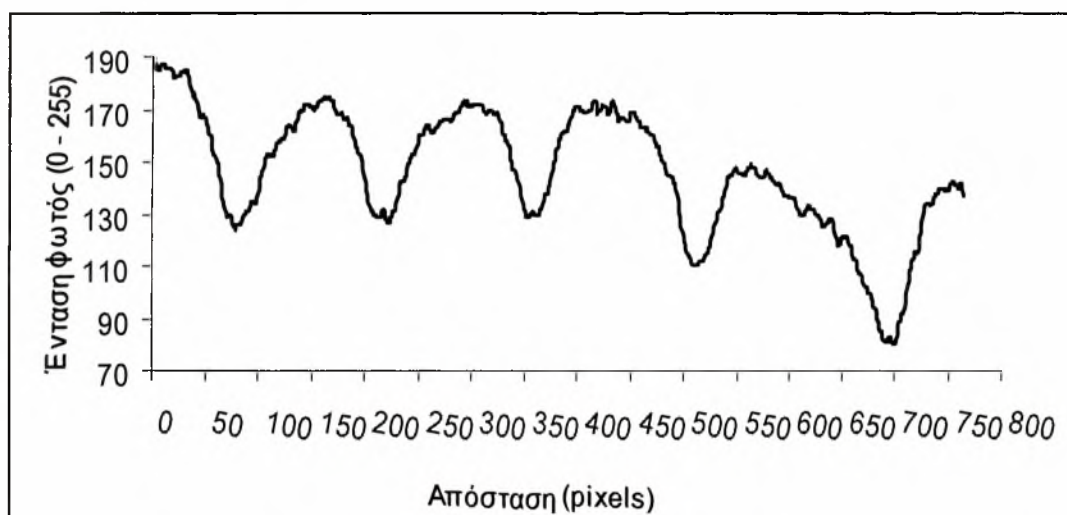


Σχήμα 5.2.3: Το κύμα παρουσιάζεται σε διαδοχικές θέσεις, με σκοπό την παρουσίαση του φαινομένου του διαχωρισμού των κυμάτων.

Στην πρώτη από τις καμπύλες του σχήματος (10,5 sec μετά τη δημιουργία του κύματος) φαίνεται ότι το κύμα δεν έχει στο μέτωπό του ρυτιδώσεις. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι έχει προηγηθεί συγχώνευση. Στην τρίτη καμπύλη (μόλις 0,2 sec αργότερα) είναι εμφανές ότι στην πλάτη του μοναχικού κύματος έχει ξεκινήσει ο διαχωρισμός. Στις επόμενες δύο καμπύλες το φαινόμενο εντατικοποιείται. Η δημιουργία ενός νέου μοναχικού κύματος έχει σχεδόν συντελεστεί.

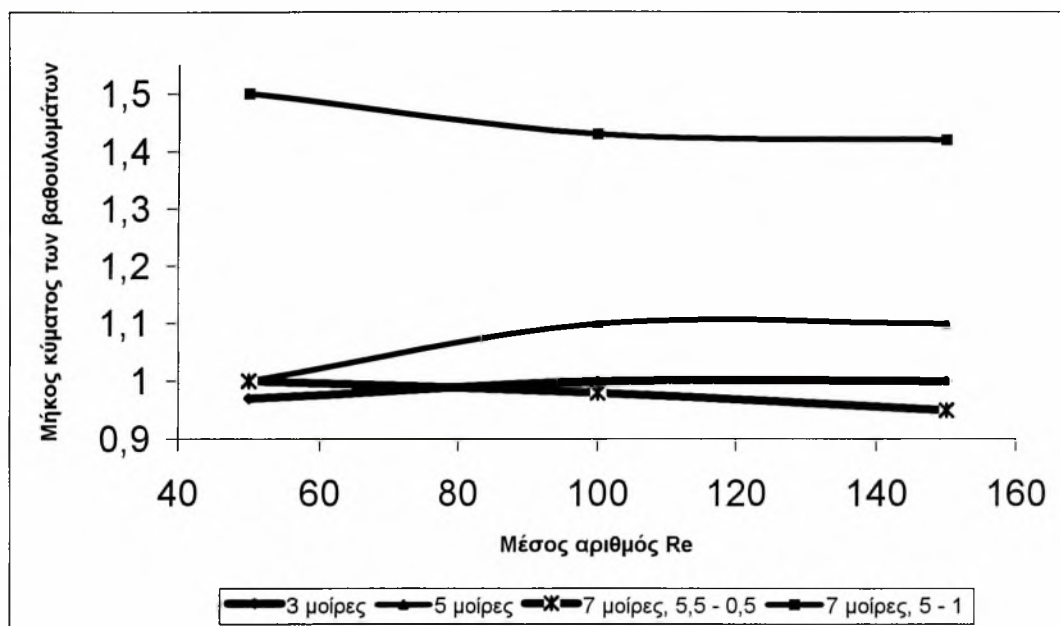
5.3. Μήκος κύματος των «βαθουλωμάτων».

Κατά την ποιοτική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, παρατηρήθηκαν στο μέτωπο των κυμάτων (και στην κορυφή αυτών αρκετές φορές) μικρά βαθουλώματα (depressions). Ακόμη περισσότερο έγινε λόγος για μήκος κύματος των βαθουλωμάτων αυτών. Αυτό έγινε επειδή, ειδικότερα στις μικρές κλίσεις του καναλιού, αυτά έχουν σχεδόν το ίδιο μέγεθος και ισαπέχουν. Αυτό εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί στο παρακάτω σχήμα. Η καμπύλη που απεικονίζεται σε αυτό είναι ουσιαστικά το προφίλ μιας γραμμής κάθετα στην κατεύθυνση της ροής. Η γραμμή αυτή λαμβάνεται στην περιοχή που δημιουργούνται τα βαθουλώματα.



Σχήμα 5.3.1: Προφίλ της έντασης φωτισμού κατάντη της ροής. Έχει ληφθεί σε τέτοιο σημείο που επιτρέπει την παρακολούθηση των βαθουλωμάτων.

Η παρουσία της ιδιαιτερότητας αυτής στο υπό εξέταση φαινόμενο προκάλεσε την περιέργεια για περαιτέρω επεξεργασία. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα. Αυτό απεικονίζει τη μεταβολή του μήκους κύματος των βαθουλωμάτων σαν συνάρτηση του αριθμού Re για διάφορες κλίσεις του καναλιού.



Σχήμα 5.3.2: Απεικόνιση του μήκους κύματος των βαθουλωμάτων σαν συνάρτηση του αριθμού Re για διάφορες τιμές της κλίσης του καναλιού.

Είναι φανερό ότι, για κάθε κλίση του καναλιού, η μεταβολή του μήκους κύματος των βαθουλωμάτων σαν συνάρτηση του αριθμού Re είναι πολύ μικρή. Βέβαια, η αύξηση της κλίσης προκαλεί μείωση του μήκους κύματος (αύξηση του αριθμού αυτών), για μια συγκεκριμένη τιμή του αριθμού Re. Έτσι, στις τρεις μοίρες το χαρακτηριστικό αυτό μήκος είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στις πέντε μοίρες, κ.ο.κ.

Ούτε η μεταβολή της διαταραχής (επιτυγχάνεται με την μεταβολή του συνδυασμού ανοίγματος – κλεισίματος της ηλεκτροβαλβίδας) φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην εξέλιξη του φαινομένου. Στο σχήμα αποτυπώνονται οι μετρήσεις του πάχους του υμένα στις επτά μοίρες, για δύο διαφορετικές διαταραχές. Φαίνεται καθαρά ότι η αλλαγή στο ύψος της διαταραχής επηρεάζει ελάχιστα το μήκος κύματος των βαθουλωμάτων. Ίσως η μόνη παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του εν λόγω φαινομένου να είναι η κλίση του καναλιού.

6. Συμπεράσματα

Μελετήθηκε η συμπεριφορά και η δομή λεπτού υγρού υμένα πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα. Έμφαση δόθηκε στη δημιουργία και μελέτη των διδιάστατων αλλά κυρίως των τρισδιάστατων διαταραχών.

Στις μικρές γωνίες κλίσης τα φαινόμενα είναι πλήρως διδιάστατα. Οι παρατηρήσεις στη συγκεκριμένη κατηγορία πειραμάτων ταυτίζονται με αντίστοιχες που έγιναν στο παρελθόν από πολλούς ερευνητές [6]. Η βασική διαφορά είναι ότι γι' αυτούς ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων είναι η συγχώνευση, ενώ στα πειράματα που έγιναν για τις ανάγκες της εργασίας αυτή παρατηρείται και διαχωρισμός αλλά και απώθηση. Η διδιάστατη δομή διαταράσσεται με την αύξηση του αριθμού Re , που οδηγεί στην εμφάνιση τρισδιάστατων ασταθειών στην εγκάρσια κατεύθυνση στο μέτωπο και στην κορυφή του μοναχικού κύματος. Πάντως τα μοναχικά κύματα που ακολουθούν το αρχικό έχουν πλήρως διδιάστατη δομή.

Η τελική κατάληξη των τρισδιάστατων ασταθειών είναι η δημιουργία βαθουλωμάτων που ομοιάζουν με αρνητικές κορυφές. Παρατηρήθηκε ότι αύξηση του αριθμού Re οδηγεί καταρχήν σε αύξηση του αριθμού των βαθουλωμάτων, δηλαδή μείωση του μήκους κύματος της εγκάρσιας διαταραχής. Πέρα από ένα αριθμό Re , το μήκος κύματος προσεγγίζει ασυμπτωτικά μια σταθερή τιμή. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι ότι η αύξηση τόσο του μέσου αριθμού Re όσο και της κλίσης του καναλιού μετατοπίζει το σημείο εμφάνισης των βαθουλωμάτων πιο κοντά στο σημείο υπερχείλισης (convective instability). Αντίστοιχα χαρακτηριστικά για το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρήθηκαν σε όλες τις εξετασθείσες κλίσεις.

Η περαιτέρω αύξηση της κλίσης του καναλιού καθιστά αδύνατη την παρατήρηση ευσταθούς περιοχής στον υμένα. Η οποιαδήποτε διαταραχή οδηγεί στην εμφάνιση τρισδιάστατων κυμάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η τρισδιάστατη δομή που ακολουθεί πίσω από το κύμα, η οποία κινείται «παγωμένη» (frozen field hypothesis). Η μορφή της δηλαδή δεν μεταβάλλεται καθώς αυτή μετακινείται με τον υμένα προς το τέλος του καναλιού. Πρόκειται για μια τρισδιάστατη αστάθεια η οποία δεν οδηγεί σε χρονικό χάος. Σε σχετικά μικρούς αριθμούς Re η παρουσία της είναι πιο έντονη από ότι σε μεγαλύτερες τιμές αυτού. Σε πολύ μεγάλους αριθμούς Re παρατηρούνται χαοτικές καταστάσεις (spatiotemporal chaos).

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Shetty, L. and Cerro, R. L. "*Flow of a thin film over a periodic surface*". Int. J. Multiphase Flow 18, 495-516, 1992.
2. Bontozoglou, V., Papapolymerou, G., "*Laminar flow down a wavy incline*". Int. J. Multiphase Flow. 23, 69-79, 1997.
3. Kapitza P.L., Kapitza S.P., "*Wave flow of thin viscous liquid films*", Zh. Exper. I Teor. Fiz., 19, 105, 1949.
4. Chang, H. -C., "*Wave evolution on a falling film*", Ann. Rev. Fluid Mech. 26, pp 103-136, 1994.
5. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.Ye., Pokusaev B.G., "*Wave formation on a vertical falling liquid film*", AIChE Journal, vol.31, No. 9, pp 1446 – 1460, 1985.
6. Liu J., Paul J.D., Gollub J.P., "*Measurements of the primary instabilities of film flows*", J. Fluid Mechanics, vol 250, pp 69 – 101, 1993.
7. Liu J., Gollub J.P., "*Solitary wave dynamics of film flows*", Phys. Fluids, vol 6, No. 5, pp 1702 – 1711, 1994.
8. Liu J., Schneider J.B., Gollub J.P., "*Three – dimensional instabilities of film flows*", Phys. Fluids, vol 7, No. 1, pp 55 – 67, 1994.
9. Liu J., "*Nonlinear dynamics of wavy film flows*", PhD thesis, Univ. of Pennsylvania, 1994.
10. Παπαϊωάννου Α. "*Μηχανική των ρευστών*", Τόμος Α & Β, Δ. Μαυρομάτη, 1993.
11. Pozrikidis C., "*Introduction to theoretical and computational fluid dynamics*", Oxford University press 1997.
12. Πίπτας Ι., "*Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας*", 1996.
13. Καραγιάννης, Κ., "*Ανάπτυξη οπτικής τεχνικής για τη μελέτη της ροής λεπτού υγρού υμένα*", Διπλωματική Εργασία Π.Θ, 1999.



