

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ
ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ**

υπό

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΖΟΥΛΟΥΜΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού
2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7037/1
Ημερ. Εισ.: 26-03-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2009
ΖΟΥ

© 2009 Γεώργιος Ζουλούμης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Μιχάλης Βλαχογιάννης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΖΟΥΛΟΥΜΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2009

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Πειραματικών Φαινομένων Μεταφοράς

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της κλίσης στα καθεστώτα ροής που απαντούν σε κυλινδρικούς αγωγούς κατά τη ταυτόχρονη ροή υγρού και αερίου. Συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση της κατωφερούς ροής, ενώ έμφαση δίνεται στα υποκαθεστώτα που παρατηρούνται στη διαστρωματωμένη ροή.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών που περιλαμβάνει αγωγό μήκους 12,5 m και διαμέτρου 2,5 cm. Τα πειράματα διεξήχθησαν με σύστημα νερού – αέρα για γωνίες: 0° , $-0,25^\circ$, $-0,5^\circ$, -1° και διαλύματος νερού / βουτανόλης – αέρα για γωνίες: $-0,25^\circ$, -1° για να εξεταστεί η επίδραση της επιφανειακής τάσης. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση των καθεστώτων ροής σε χάρτες συναρτήσεων των παροχών των δύο φάσεων.

Όπως προέκυψε από την πειραματική μελέτη, το καθεστώς της διαλείπουσας μετατοπίζεται σε υψηλότερες παροχές της υγρής φάσης με την αύξηση της κατωφερούς κλίσης του αγωγού. Επίσης το καθεστώς της λείας διαστρωματωμένης ροής περιορίζεται σε χαμηλότερες παροχές υγρού-αερίου με την αύξηση της γωνίας.

Τέλος, θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να μελετηθεί περαιτέρω η επίδραση της κλίσης σε συνδυασμό με τις φυσικές ιδιότητες των δύο ρευστών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ^ο 1. Εισαγωγή.....	σελ. 7
1.1. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	σελ. 8
1.2. Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών.....	σελ. 8
1.3. Σύμβολα – Παράμετροι της διφασικής ροής.....	σελ. 9
1.3.1. Συγκράτηση υγρού και κλάσμα κενού.....	σελ. 9
1.3.2. Μαζικές ροές (total mass flow).....	σελ. 10
1.3.3. Ποιότητα.....	σελ. 10
1.3.4. Φαινομενικές ταχύτητες φάσεων.....	σελ. 11
1.3.5. Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (Average Phase Velocities).....	σελ. 11
1.3.6. Ταχύτητα ολίσθησης, S (SlipRatio).....	σελ. 11
Κεφάλαιο 2 ^ο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	σελ. 12
2.1 Διφασική ροή (καθεστώτα).....	σελ. 12
2.2 Χάρτες περιοχών διφασικής ροής αέρα-νερού για οριζόντιο αγωγό και για αγωγό με κλίση.....	σελ. 13
2.3 Μεταπτώσεις περιοχών.....	σελ. 21
2.3.1 Μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή στη διαλείπουσα και στη δακτυλιοειδή.....	σελ. 21
2.3.2 Μετάπτωση από λεία διαχωρισμένη σε διαχωρισμένη με κύματα.....	σελ. 24
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή.....	σελ. 25
Κεφάλαιο 3 ^ο 3. Μοντελοποίηση της διαστρωματωμένης ροής.....	σελ. 28
Κεφάλαιο 4 ^ο 4. Πειραματικός εξοπλισμός και τεχνικές μετρήσεων.....	σελ. 30
4.1 Πειραματική διάταξη.....	σελ. 30
4.2 Μέθοδοι προσδιορισμού των καθεστώτων της διφασικής ροής.....	σελ. 31
4.2.1. Οπτική παρατήρηση.....	σελ. 31
4.2.2. Αγωγιμομετρική μέθοδος.....	σελ. 31
4.3. Ροή και μέτρηση παροχής.....	σελ. 32
4.4. Διαδικασία μετρήσεων.....	σελ. 34
Κεφάλαιο 5 ^ο 5. Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση.....	σελ. 36
5.1 Χάρτες καθεστώτων ροής.....	σελ. 36

5.2 Περιγραφή των κυμάτων και μεταπτώσεις των καθεστώτων ροής για τις διάφορες τιμές κλίσεων.....	σελ. 37
5.2.1. Περίπτωση Οριζόντιου Αγωγού.....	σελ. 37
5.2.2. Γωνία $\theta = -0,25^\circ$	σελ. 39
5.2.3. Γωνία $\theta = -0,5^\circ$	σελ. 40
5.2.4. Γωνία $\theta = -1^\circ$	σελ. 40
5.3 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για κλίση του αγωγού $-0,25^\circ$	σελ. 48
5.4 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για κλίση του αγωγού -1°	σελ. 53
Κεφάλαιο 6 ^ο 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	σελ. 55
Βιβλιογραφία.....	σελ. 57
Παράρτημα.....	σελ. 59

Κεφάλαιο 1^ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Φαινόμενα διφασικών ροών εμφανίζονται πολύ συχνά στη φύση. Η κίνηση των νεφών, ο κυματισμός της θάλασσας, τα γεωθερμικά ρευστά και η ροή του αίματος αποτελούν μερικά μόνο παραδείγματα. Διφασικές ροές απαντώνται και σε ένα πλήθος βιομηχανικών διεργασιών, όπως σε συστήματα διακίνησης πετρελαίου σε πυρηνικά εργοστάσια και σε συστήματα θέρμανσης ψύξης. Γι' αυτό το σκοπό έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην κατανόηση των μηχανισμών που τις διέπουν και ιδιαιτέρως στην περίπτωση ροής υγρού – αερίου σε οριζόντιο ή επικλινή αγωγό.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της διφασικής ροής είναι ότι η διεπιφάνεια υγρού αερίου μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό δυνατών μορφών που είναι γνωστές ως πρότυπα ή καθεστώτα ή περιοχές ροής (flow patterns or flow regimes). Οι κυριότερες περιοχές που εμφανίζονται σε οριζόντιο και ελαφρώς κεκλιμένο αγωγό είναι: η διαστρωματωμένη, η διαλείπουσα και η δακτυλιοειδής ροή. Το ποιο καθεστώς θα επικρατήσει σε έναν αγωγό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: η γεωμετρία του αγωγού, οι παροχές των δύο ρευστών και οι φυσικές τους ιδιότητες (ιξώδες, πυκνότητα, διεπιφανειακή τάση). Τα διάφορα δεδομένα καταγράφονται σε ειδικούς χάρτες, οι οποίοι είναι γνωστοί ως χάρτες καθεστώτων ροής (flow regime maps).

Όσον αφορά το καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής, αυτό έχει γίνει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών στο παρελθόν. Μέχρι τη δεκαετία του 80 οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες είχαν επικεντρωθεί στην περίπτωση του οριζόντιου αγωγού. Από τις πιο αξιόλογες ήταν αυτή των Taitel & Dukler (1976), οι οποίοι έκαναν τα πειράματά τους σε οριζόντιο αγωγό για σύστημα νερού – αέρα και δημιούργησαν ένα μοντέλο που προβλέπει τις συνθήκες μετάβασης από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή. Αργότερα άλλοι ερευνητές, όπως η Barnea (1980) έδειξαν ότι το μοντέλο των Taitel & Dukler δεν ισχύει στην περίπτωση κεκλιμένου αγωγού, ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί με κάποια ακρίβεια για πολύ μικρές κλίσεις του αγωγού. Οι ερευνητικές προσπάθειες συνεχίστηκαν και τα επόμενα χρόνια με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών μετάβασης από το ένα καθεστώς στο άλλο.

Η παρούσα εργασία το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην μελέτη της επίδρασης της κλίσης του αγωγού στο καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής για σύστημα νερού – αέρα και διαλύματος νερού / βουτανόλης – αέρα.

1.1 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Αρχικά δίνονται οι ορισμοί και παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα μοντέλα που περιγράφουν τη διφασική ροή υγρού – αερίου σε αγωγούς. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα διάφορα καθεστώτα που μπορούν να εμφανιστούν σε οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο αγωγό. Κατόπιν γίνεται εκτενής αναφορά στις διάφορες ερευνητικές προσπάθειες για την ερμηνεία των μηχανισμών που διέπουν τις μεταπτώσεις από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα και από λεία διαστρωματωμένη ροή σε διδιάστατα κύματα. Επίσης παρατίθενται χάρτες καθεστώτων ροής που κατασκευάστηκαν με βάση τα πειραματικά δεδομένα των εκάστοτε ερευνητών. Το 3^ο κεφάλαιο αναφέρεται στη μοντελοποίηση της διαστρωματωμένης ροής.

Η περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης και της διαδικασίας μετρήσεων για την κατασκευή των χαρτών για τις προαναφερθείσες γωνίες κλίσεων παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται τα πειραματικά δεδομένα και παρουσιάζονται φωτογραφίες των διαφόρων καθεστώτων ροής από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα παροχών.

Τέλος στο κεφάλαιο 6 εξάγονται συμπεράσματα που συνάγονται από την παρούσα πειραματική προσπάθεια και γίνονται προτάσεις για συνέχιση και βελτίωση της παρούσας εργασίας.

1.2. Μοντέλα ανάλυσης διφασικής ροής ρευστών

Η ανάλυση της διφασικής ροής στηρίζεται σε πειραματικά δεδομένα καθώς και σε απλά ή σύνθετα αναλυτικά μοντέλα (Ανδρίτσος & Παράς, 2004).

α) Εμπειρικές σχέσεις

Στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις και δίνονται με τη μορφή εξισώσεων. Δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις, επειδή προέκυψαν από πειράματα σε συγκεκριμένες συνθήκες.

β) Απλά αναλυτικά μοντέλα.

Μοντέλα, τα οποία δεν παίρνουν υπόψη τους τις λεπτομέρειες της ροής, αν και μερικές φορές μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην πρόβλεψη διαφόρων παραμέτρων. Σ' αυτά τα μοντέλα γίνεται χρήση των γενικευμένων εξισώσεων συνέχειας, ορμής και ενέργειας. Στο πιο απλό μοντέλο, στο **μοντέλο ομογενούς ροής (homogeneous flow model)**, τα δύο ρευστά περιγράφονται ως ένα ρευστό με κατάλληλα σταθμισμένες τιμές των φυσικών ιδιοτήτων και το οποίο υπακούει στους νόμους της μονοφασικής ροής. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του είναι μικρή, αφού δε λαμβάνει υπόψη τη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο φάσεων. Στο **μοντέλο διαχωρισμένης ροής (separated flow model)** οι δύο φάσεις θεωρούνται ότι ρέουν η μία χωριστά από την άλλη και οι βασικές εξισώσεις γράφονται χωριστά για κάθε φάση.

γ) Σύνθετα μοντέλα

Προσπάθεια για ανάπτυξη σχέσεων για ορισμένες παραμέτρους, όπως η κατανομή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης, ή για συγκεκριμένα καθεστάτα ροής, ξεκινώντας από κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Η περιγραφή του μοντέλου της ροής είναι ακριβής, όμως παρουσιάζεται αυξημένη δυσκολία στην επίλυση των εξισώσεων.

1.3. Σύμβολα – Παράμετροι της διφασικής ροής

Αρκετές παράμετροι της διφασικής ροής είναι συνέπεια του γεγονότος ότι λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο φάσεων η ελαφρότερη φάση ρέει ταχύτερα. Μερικές από τις ποσότητες που συναντιούνται σε ένα κείμενο διφασικής ροής και είναι χρήσιμες στο σχεδιασμό μιας συσκευής ή διεργασίας είναι οι εξής:

1.3.1. Συγκράτηση υγρού και κλάσμα κενού

Επειδή η αέρια φάση διαφέρει αισθητά από την υγρή ως προς την πυκνότητα και το ιξώδες, η αέρια φάση ρέει με μεγαλύτερη μέση ταχύτητα από την υγρή, φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως «συγκράτηση» ή «ολίσθηση» της μιας φάσης ως προς την άλλη. Ως **συγκράτηση υγρού (R, holdup)** ορίζεται ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το υγρό στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. **Κλάσμα κενού (a, void fraction)** είναι ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στον αγωγό σε ορισμένο τμήμα του. Εάν το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι A και τα εμβαδά

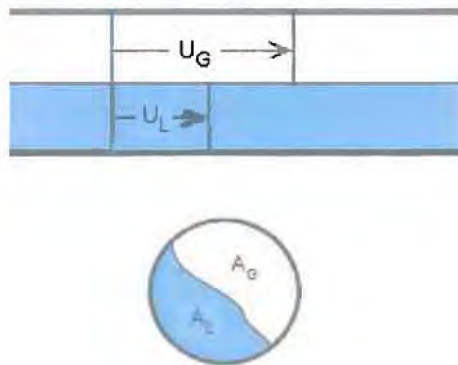
της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και την υγρή φάση αντίστοιχα είναι A_G

και A_L , τότε $a = \frac{A_G}{A}$

όπου $A = A_G + A_L$.

Τα δύο αυτά μεγέθη είναι σημαντικά επειδή προσδιορίζουν το χρόνο παραμονής των ρευστών στο σύστημα (μέγεθος συσκευών) και επειδή χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης, συνδέονται δε μεταξύ τους με τη σχέση:

$$R + a = 1$$



Σχήμα 1.1. Απλοποιημένη εικόνα της διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό

1.3.2. Μαζικές ροές (total mass flow)

Η συνολική μαζική ροή ορίζεται ως το άθροισμα της μαζικής παροχής του νερού (G_L) και του αερίου (G_G) σε kg/s:

$$G = G_L + G_G$$

1.3.3. Ποιότητα

Στη θεώρηση φαινομένων όπου συμβαίνει αλλαγή φάσης είναι καταλληλότερη τις περισσότερες φορές η χρήση του όρου της ποιότητας (x , quality), η οποία ορίζεται ως το κλάσμα μάζας της αέριας φάσης:

$$x = \frac{G_G}{G} = \frac{G_G}{G_G + G_L}$$

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι οι δείκτες L και G εκφράζουν την υγρή και την αέρια φάση αντίστοιχα.

1.3.4. Φαινομενικές ταχύτητες φάσεων

Ως μέτρο της παροχής των δύο φάσεων συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία οι φαινομενικές ταχύτητες (*superficial velocities*). Οι φαινομενικές ταχύτητες των φάσεων προσδιορίζονται θεωρώντας ότι οι δύο φάσεις ρέουν μόνες τους στον αγωγό. Η φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$U_{GS} = \frac{Q_G}{A} = \frac{G_G}{\rho_G A}$$

και η αντίστοιχη της υγρής φάσης ως:

$$U_{LS} = \frac{Q_L}{A} = \frac{G_L}{\rho_L A}$$

όπου Q_G είναι η ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης, Q_L η ογκομετρική παροχή της υγρής φάσης και ρ η πυκνότητα.

1.3.5. Μέσες πραγματικές ταχύτητες των φάσεων (*Average Phase Velocities*)

Η μέση πραγματική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$U_G = \frac{Q_G}{Aa} = \frac{G_G}{\rho_G Aa} = \frac{U_{GS}}{a}$$

και η μέση πραγματική ταχύτητα της υγρής φάσης ορίζεται ως:

$$U_L = \frac{Q_L}{A(1-a)} = \frac{G_L}{\rho_L A(1-a)} = \frac{U_{LS}}{1-a}$$

όπου a το κλάσμα κενού.

Ακόμη μπορεί να οριστεί και μια μέση ταχύτητα ρευστού (υγρής + αέριας φάσης)

$$U_M = \frac{Q_G + Q_L}{A} = U_{GS} + U_{LS}$$

1.3.6. Ταχύτητα ολίσθησης, *S* (*Slip Ratio*)

Η ταχύτητα ολίσθησης S (*Slip Ratio*) εκφράζει τη σχετική ταχύτητα της αέριας φάσης (U_G) ως προς την υγρή (U_L).

$$S = \frac{U_G}{U_L} = \frac{G_G \rho_L A_L}{G_L \rho_G A_G} = \left(\frac{x}{1-x} \right) \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \left(\frac{1-a}{a} \right)$$

Κεφάλαιο 2^ο

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Καθεστώτα Διφασικής Ροής

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής είναι ότι η διεπιφάνεια υγρού-αερίου μπορεί να λάβει ένα μεγάλο αριθμό δυνατών μορφών, οι οποίες είναι γενικά γνωστές με το όνομα *καθεστώτα ή πρότυπα ή περιοχές ροής (flow patterns, flow regimes)*. Τα καθεστώτα ροής εξαρτώνται από τη γεωμετρία του συστήματος, τις παροχές και τις ιδιότητες των ρευστών.

Στη βιβλιογραφία απαντάται μεγάλος αριθμός ονομάτων περιοχών ροής, πράγμα το οποίο αποτελεί συνέπεια της υποκειμενικής φύσης των ορισμών. Η σύγχυση επιτείνεται λόγω της ύπαρξης υβριδικών καθεστώτων ροής, καθεστώτων δηλαδή που βρίσκονται στο στάδιο μετάπτωσης.

Τόσο σε οριζόντιους όσο και σε αγωγούς με κλίση παρατηρούνται οι παρακάτω τύποι ροών.

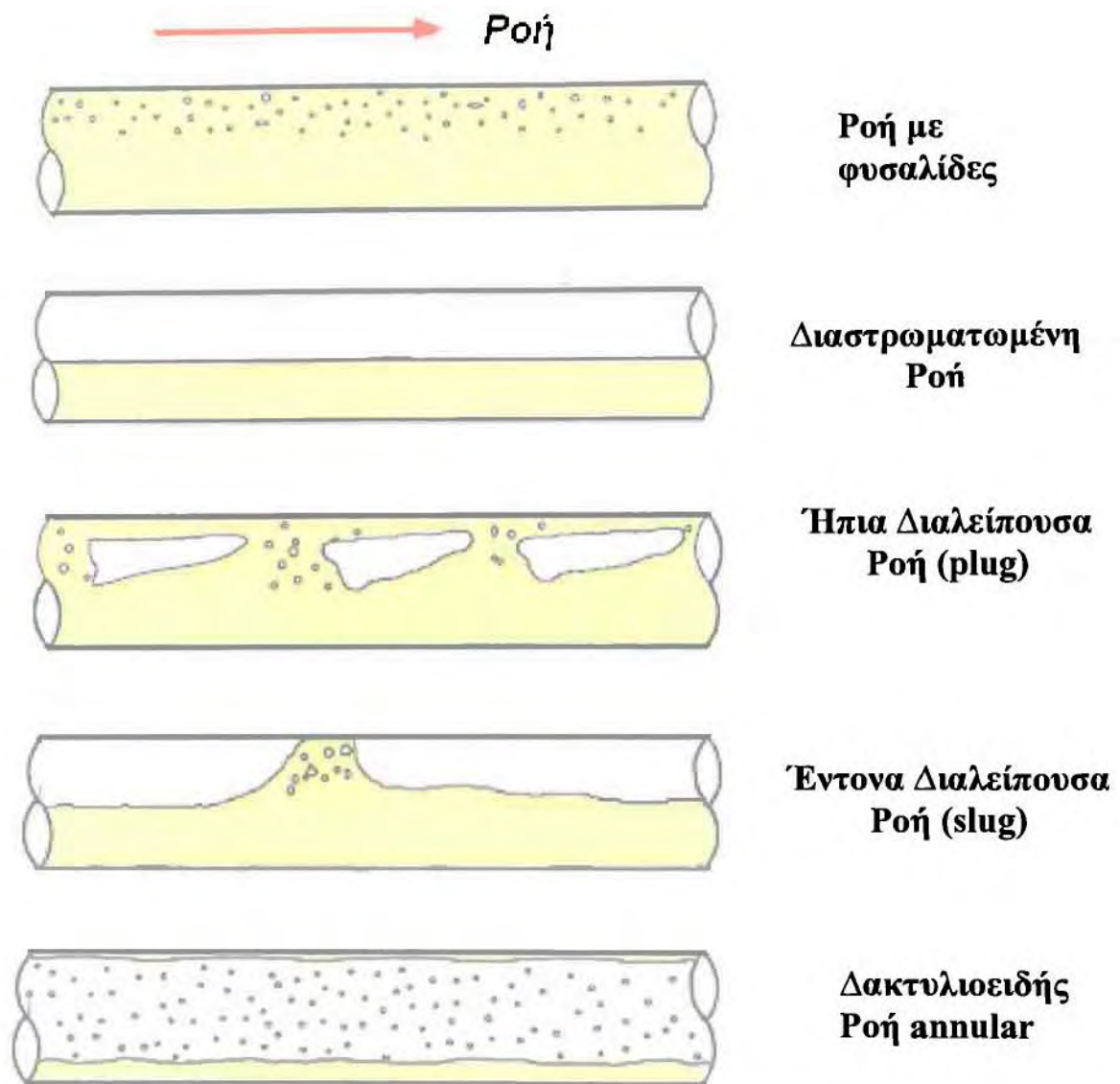
1. **Ροή με Φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow):** το αέριο βρίσκεται διεσπαρμένο με τη μορφή φυσαλίδων στη συνεχή υγρή φάση. Παρατηρείται σε μεγάλους ρυθμούς παροχής του υγρού. Οι φυσαλίδες τείνουν να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού ενώ για ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται ως αφρός.
2. **Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow):** το υγρό ρέει στο πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος. Σχηματίζεται για μικρές σχετικά παροχές των ρευστών. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι **λεία (Smooth)** ή να καλύπτεται με κύματα (**διδιάστατα ή Kelvin-Helmholtz**), κάτι που εξαρτάται βασικά από τη ταχύτητα της αέριας φάσης. Επίσης για μεγάλες ταχύτητες αερίου μπορεί το υγρό να αναρριχάται στο σωλήνα και να υπάρχει εκνέφωση σταγονιδίων (**atomization**).
3. **Διαλείπουσα Ροή (Intermittent Flow):** χαρακτηρίζεται από την περιοδική διέλευση μαζών, οι οποίες βουλώνουν τη διατομή του σωλήνα και κινούνται με την ταχύτητα του αερίου. Οι υγρές αυτές μάζες μπορούν να περιέχουν και να παρασύρουν πολυάριθμες φυσαλίδες αερίου οι οποίες συγκεντρώνονται προς το μπροστινό μέρος του κύματος και στην κορυφή του σωλήνα. Το καθεστώς της διαλείπουσας διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες ροής. Αφενός στην ήπια

διαλείπουσα ροή (Plug / Elongated Bubble) που συμβαίνει σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης και στην οποία μεγάλες «φουσαλίδες» ρέουν πάνω από μια υγρή στιβάδα η οποία είναι συνεχής κάτω από την επιμήκη φουσαλίδα. Αφετέρου στην έντονα διαλείπουσα ροή (Slug flow), που συμβαίνει με αύξηση της παροχής του αερίου και κατά την οποία υπάρχει ισχυρή ανάδευση της υγρής μάζας που καλύπτει τη διατομή του αγωγού, ενώ το μήκος των υγρών μαζών είναι πολύ μικρότερο απ' ό τι στην ήπια διαλείπουσα. Η διαλείπουσα ροή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη στις περισσότερες εφαρμογές γιατί προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να δονούνται οι σωληνώσεις. Κάτω από ορισμένες συνθήκες εμφανίζεται το καθεστώς της **ψευδο-διαλείπουσας (pseudoslug)**, όπου εμφανίζονται μεν υγρές μάζες αλλά αυτές δεν ρέουν με τη ταχύτητα του αερίου. Είναι προφανές, ότι αυτές οι υγρές μάζες δεν φράσουν εντελώς τη διατομή του αγωγού με αποτέλεσμα να μην προκαλούν απότομες διαφορές πίεσης.

4. **Δακτυλοειδής Ροή (Annular Flow):** το υγρό ρέει με τη μορφή ενός υμένα στα τοιχώματα του σωλήνα γύρω από ένα «πυρήνα αερίου», ο οποίος διακρίνεται από υψηλές ταχύτητες. Το πάχος της στιβάδας είναι μεγαλύτερο στον πυθμένα από ότι στην κορυφή του αγωγού εξαιτίας της δράσης της βαρύτητας και εξαρτάται από τους ρυθμούς παροχής των δύο ρευστών. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου ο «υγρός» δακτύλιος γίνεται πιο συμμετρικός.

2.2 Χάρτες περιοχών διφασικής ροής αέρα-νερού για οριζόντιο αγωγό και για αγωγό με κλίση

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την περιγραφή των διαφόρων καθεστώτων ροής μέσα σε σωλήνες είναι να σχεδιαστούν τα δεδομένα στους λεγόμενους χάρτες καθεστώτων ροής (flow regime maps), οι οποίοι χρησιμοποιούν ως συντεταγμένες τις παροχές των ρευστών, φυσικές ιδιότητες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος.



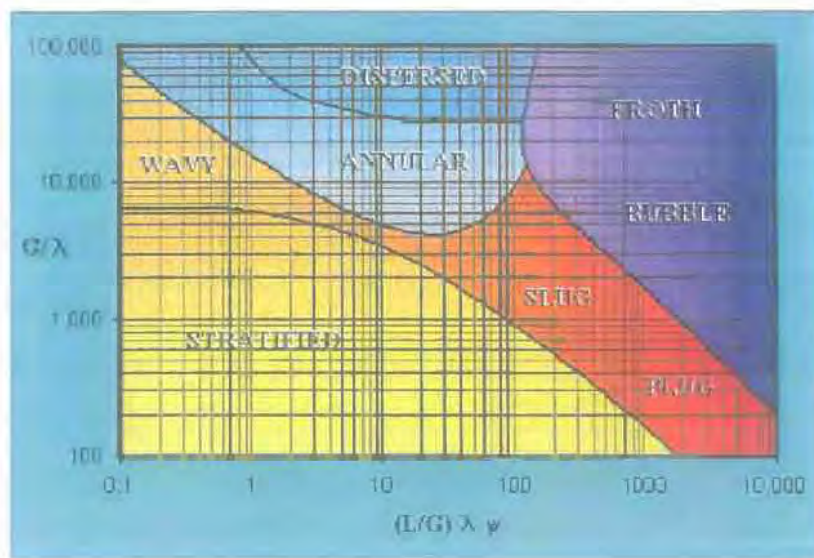
Σχήμα 2.1. Παράσταση των περιοχών ροής σε κυλινδρικό αγωγό

Αν και έχει πραγματοποιηθεί εκτενής έρευνα για την περιγραφή των καθεστώτων ροής, η πλειονότητα των χαρτών αναφέρεται σε οριζόντιες και κατακόρυφες ροές.

Όσον αφορά την οριζόντια ροή ο πρώτος πρωτοποριακός και γενικευμένος χάρτης προτάθηκε από τον Baker (1954) και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα (σχήμα 2.2). Ο Baker έλαβε υπόψη του τις φυσικές ιδιότητες εισάγοντας τις παρακάτω αδιάστατες παραμέτρους:

$$\lambda = \left(\frac{\rho_G}{\rho_A} \frac{\rho_L}{\rho_W} \right)^{0,5} \quad \psi = \frac{\sigma_W}{\sigma} \left[\frac{\mu_L}{\mu_W} \left(\frac{\rho_W}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3}$$

όπου σ η επιφανειακή τάση, μ το ιξώδες, ενώ οι δείκτες A και W υποδηλώνουν αέρα και νερό αντίστοιχα.

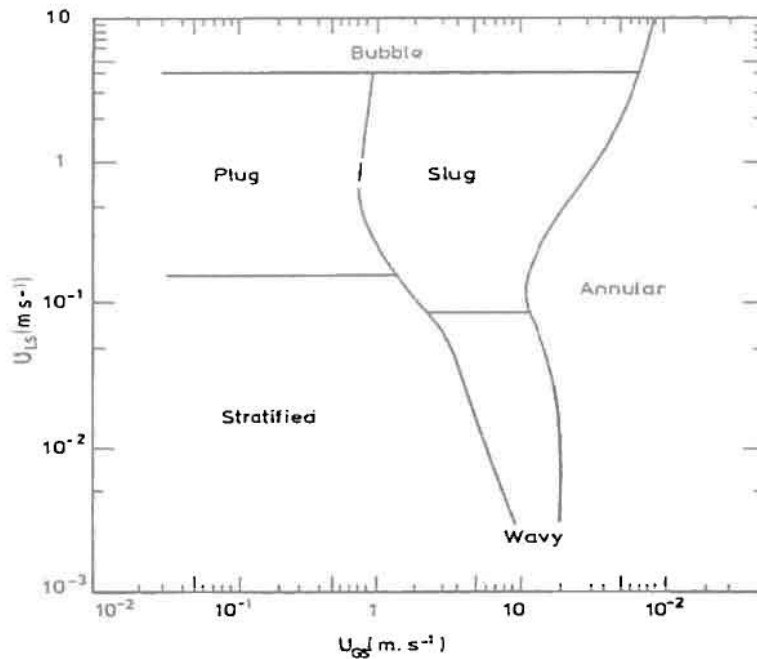


Σχήμα 2.2. Χάρτης καθεστώτων ροής του Baker (1954), $\theta=0^\circ$

Νεότερα όμως δεδομένα καθεστώτων ροής έδειξαν ότι ο χάρτης Baker δεν εκφράζει ικανοποιητικά ορισμένες παραμέτρους, όπως τη διάμετρο του αγωγού, πράγμα που οδήγησε στη δημιουργία άλλων εμπειρικών χαρτών. Αρκετοί άλλοι χάρτες έχουν προταθεί, όπως για παράδειγμα από τους: **Kosterin** (1949), **White & Huntington** (1955), **Govier & Omer** (1962), **Mandhane et al.** (1974), **Al-Sheikh et al.** (1970).

Ο πιο επιτυχημένος από αυτούς είναι ο χάρτης από τους **Mandhane et al** που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3 και βασίζεται σε πληθώρα πειραματικών δεδομένων. Βέβαια το βασικό πρόβλημα, ότι όλες οι μεταπτώσεις δεν μπορούν να αποδοθούν σωστά με κοινούς όρους παραμέτρων, ισχύει και σε αυτόν το χάρτη. Αυτό έχει

αναγνωριστεί από πολλούς ερευνητές και οδήγησε σε προσπάθειες για μηχανιστική προσέγγιση στις μεταπτώσεις.



Σχήμα 2.3. Χάρτης καθεστώτων ροής των Mandhane et al. (1974).

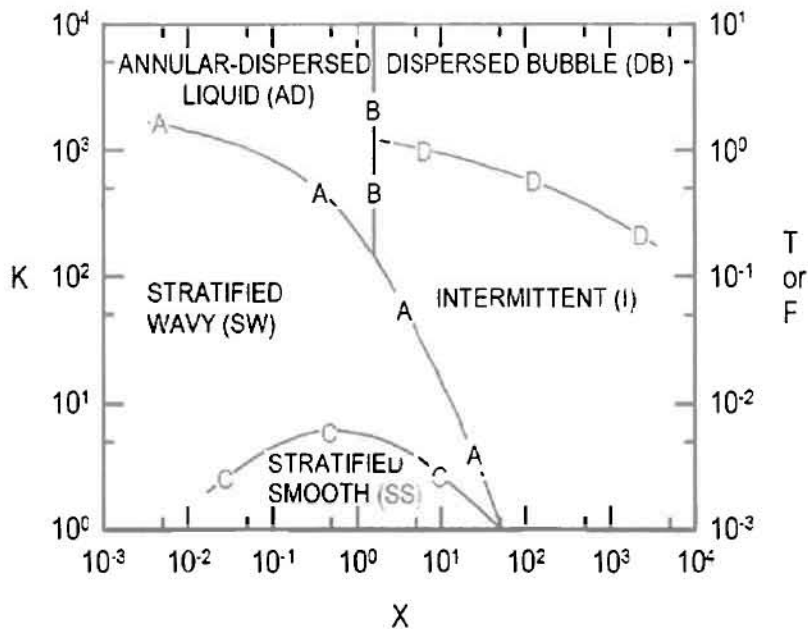
Μια τέτοια επιτυχημένη προσπάθεια είναι αυτή των **Taitel & Dukler** (1976). Αυτοί πρότειναν ένα φυσικό μοντέλο ικανό να περιγράψει τη μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής που απαντούν σε οριζόντιο ή σε σχεδόν οριζόντιο αγωγό με θεωρητική ανάλυση του μηχανισμού δημιουργίας των διαφόρων τύπων ροής. Ο χάρτης αυτός (Σχήμα 2.4) συμφωνεί αρκετά ικανοποιητικά με αρκετούς πειραματικούς χάρτες. Για τη χρήση αυτού του χάρτη χρησιμοποιούνται οι αδιάστατοι αριθμοί X, K και F, οι οποίοι ορίζονται ως εξής:

$$K = U_{GS} \left[\frac{\rho_G \rho_L U_{GS}}{\mu_L g (\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2}$$

$$X = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{L0}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{G0}} \right]^{1/2} \quad (\text{παράμετρος Lockhart - Martinelli})$$

και ο αριθμός Froude:

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{U_{GS}^2}{Dg \cos \beta}}$$



Σχήμα 2.4. Χάρτης καθεστώτων για οριζόντιο αγωγό των Taitel & Dukler (1976)

Αναφορικά με τη διαφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς και στη μελέτη των χαρακτηριστικών των ροών αυτών οι εργασίες είναι σχετικά περιορισμένες. Οι **Singh & Griffith** (1970) μελέτησαν τη διαλείπουσα ροή για σύστημα νερού-αέρα σε κατωφερή ροή. Οι ίδιοι ερευνητές ανέπτυξαν απλές σχέσεις για την πτώση πίεσης και τη συγκράτηση υγρού. Τη διαλείπουσα ροή μελέτησε επίσης και ο **Bonnecaze** (1971) ο οποίος δημοσίευσε δεδομένα για νερό-αέρα σε ένα εύρος γωνιών $\pm 10^\circ$ από το οριζόντιο επίπεδο. Στη συνέχεια, οι **Beggs & Brill** (1973) πρότειναν ένα μοντέλο για την περιγραφή της πτώσης πίεσης και της συγκράτησης του υγρού σε ροές με κλίση βασιζόμενοι στις ήδη υπάρχουσες σχέσεις της οριζόντιας ροής και χρησιμοποιώντας ένα διορθωτικό παράγοντα. Το πρόβλημα της πτώσης πίεσης σε ροές με κλίση εξετάστηκε και από τον **Savigny** (1962).

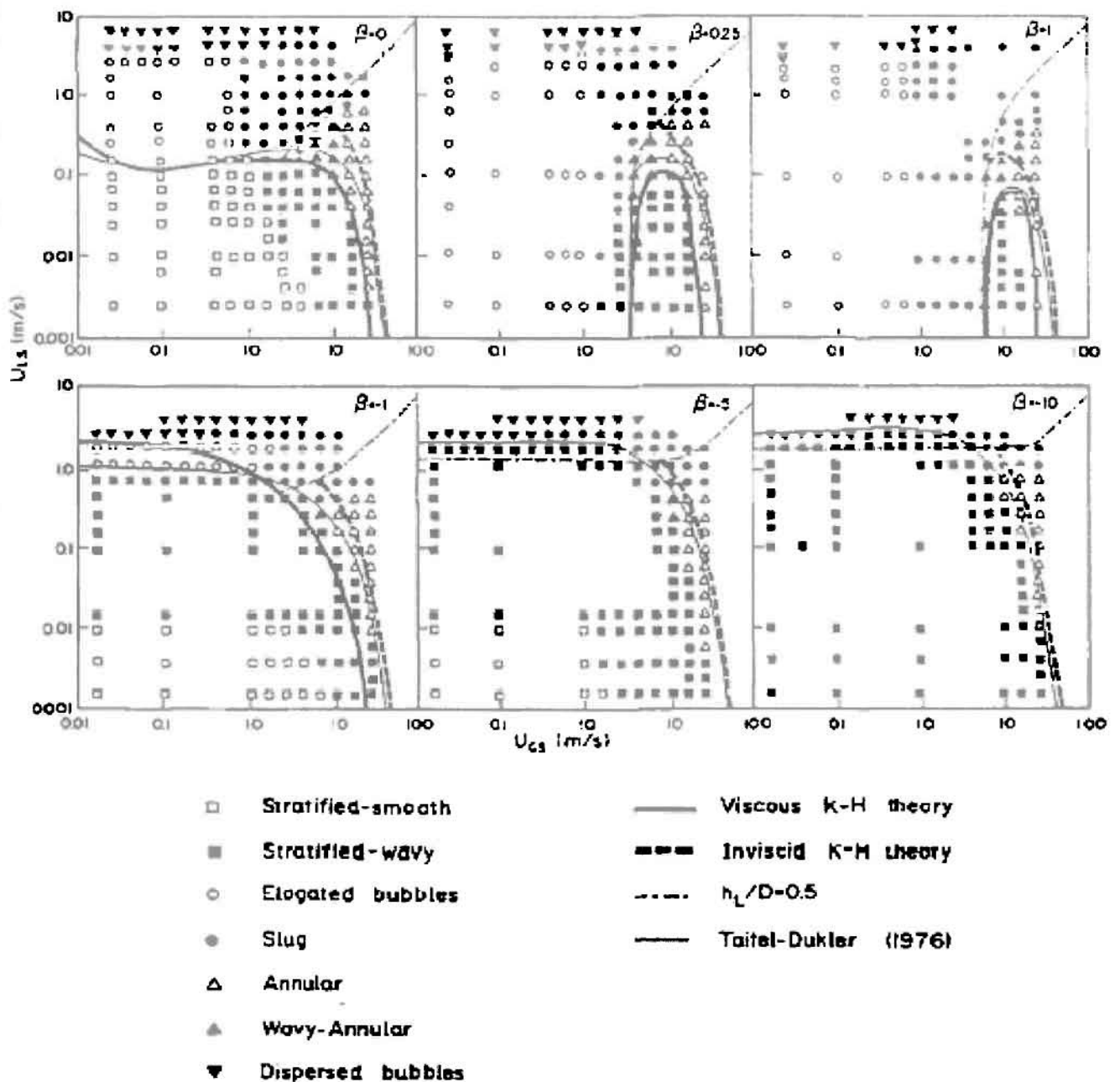
Αν και έχουν γίνει αρκετές ερευνητικές προσπάθειες σε όλο το εύρος κλίσεων $\pm 90^\circ$ δεν δημοσιεύτηκαν αντίστοιχοι χάρτες. Οι **Gould et al** (1974) δημοσίευσαν χάρτες καθεστώτων ροής μόνο σε οριζόντιους, κατακόρυφους και σε σωλήνες με ανωφέρεια 45° . Οι ερευνητές αυτοί συμπέραναν ότι η θέση της περιοχής μετάπτωσης από το καθεστώς διεσπαρμένων φυσαλίδων σε δακτυλιοειδή δεν επηρεάζεται σημαντικά με την κλίση. Ο **Greskovich** (1972) μελέτησε την συγκράτηση υγρού σε κατηφορική ροή. Στη συνέχεια πολύ σημαντική προσπάθεια έγινε από τους **Barnea** (1980) και τους

Brauner και Maron (1992) οι οποίοι μελέτησαν τα καθεστώτα ροής υγρού – αερίου και συνέκριναν τα αποτελέσματά τους με το θεωρητικό μοντέλο των Taitel & Dukler (1976). Το γενικό συμπέρασμά τους ήταν ότι το συγκεκριμένο μοντέλο δεν είναι ικανό να περιγράψει τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε ροή με κύματα καθώς το μοντέλο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη του τα κύματα εκείνα που δημιουργούνται λόγω της επίδρασης της βαρύτητας στην περίπτωση της κατηφορικής ροής.

Η Barnea (1986) μελέτησε την επίδραση της κλίσης στα διάφορα καθεστώτα ροής κάνοντας τα πειράματά του σε αγωγό διαμέτρου 2,55 cm με εύρος κλίσεων από 0 έως 10 ° στις περιπτώσεις ανηφορικής και κατηφορικής ροής. Τα καθεστώτα ροής προσδιορίστηκαν από οπτική παρατήρηση και από τη χρήση της αγωγιμομετρικής μεθόδου. Πειραματικοί χάρτες από αυτήν την εργασία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5.

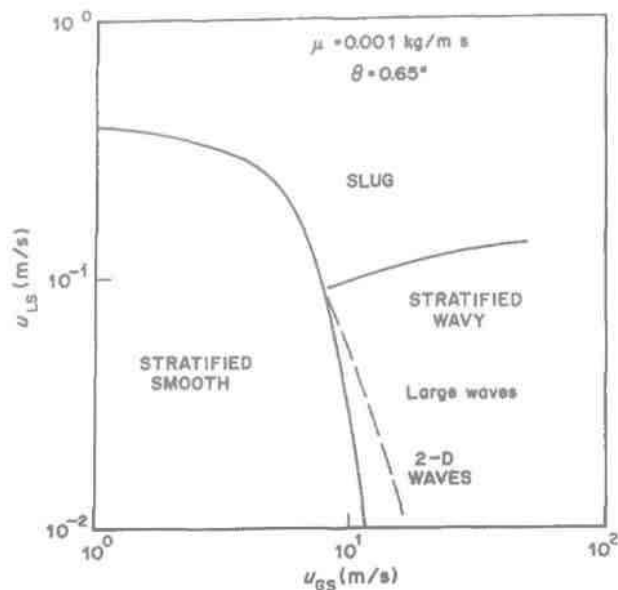
Η Barnea παρατήρησε ότι η μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα είναι πολύ ευαίσθητη στις αλλαγές της γωνίας. Ακόμα και για γωνίες μικρότερες της 1° (ανηφορική ροή) το καθεστώς της διαχωρισμένης ροής περιορίζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή, μάλιστα για κλίσεις μεγαλύτερες των 10° δεν παρατηρείται ο συγκεκριμένος τύπος ροής για οποιονδήποτε συνδυασμό συνθηκών (ρυθμοί ροής υγρού-αερίου). Το ίδιο παρατήρησαν και οι Grolman et al (1996). Αντιθέτως στην περίπτωση της κατηφορικής ροής η Barnea παρατήρησε ότι υπερτερεί το καθεστώς της διαστρωματωμένης και η διαλείπουσα ροή περιορίζεται σε υψηλότερους ρυθμούς παροχής υγρού.

Η ροή με κατωφερή κλίση μελετήθηκε και από τους Andreussi και Persen (1987) οι οποίοι πραγματοποίησαν τα πειράματά τους σε αγωγό μήκους 26 m μέτρων και εσωτερικής διαμέτρου 5 cm. Η κλίση του αγωγού ήταν 0,65° Σχήμα 2.6. Οι συγκεκριμένοι παρατήρησαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ροής μέσα στο καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής: τη λεία διαστρωματωμένη, όπου αν υπάρχουν διαταραχές αυτές είναι μικρού πλάτους, το καθεστώς διδιάστατων κυμάτων με τυπικές τιμές εύρους: 1 με 2 mm και μήκους 10 με 20 mm και τέλος την περιοχή που περιλαμβάνει μεγάλες διαταραχές.



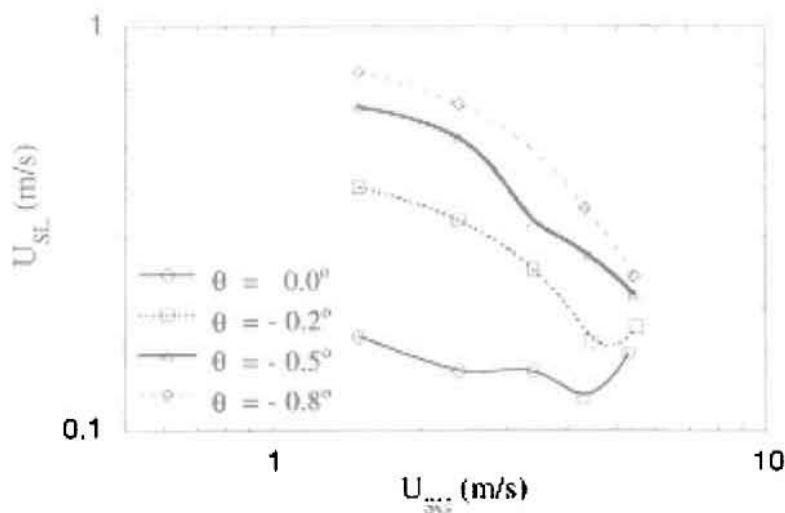
Σχήμα 2.5. Χάρτες καθεστώτων για διάφορες γωνίες από την Barnea σε αγωγό διαμέτρου 2.55 cm για σύστημα νερού – αέρα.

Ο χάρτης αυτός μοιάζει αρκετά με χάρτες άλλων ερευνητών όπως των Taitel & Dukler και των Mandhane et al. Ωστόσο περιέχει κάποιες διαφορές όπως ότι η μετάπτωση από μεγάλες διαταραχές σε διαλείπουσα συμβαίνει σε χαμηλότερες παροχές υγρού σε σχέση με τον χάρτη των Taitel & Dukler.



Σχήμα 2.6 Χάρτης καθεστώτων για γωνία $\theta=0,65^\circ$ των *Adreussi & Persen* σε αγωγό διαμέτρου 5 cm

Τέλος μια πολύ αξιόλογη προσπάθεια ήταν αυτή των Woods et al (1999), οι οποίοι μελέτησαν την επιρροή της αρνητικής κλίσης στις ιδιότητες των κυμάτων και την ανάπτυξη τους σε «slugs» για σύστημα νερού - αέρα. Πραγματοποίησαν πειράματα σε αγωγό από Plexiglas μήκους 23 m και διαμέτρου 0,0763 m υπό γωνίες $-0,2$, $-0,5$ και $-0,8^\circ$. Ο χάρτης που κατασκεύασαν οι συγκεκριμένοι ερευνητές περιλαμβάνει τα όρια των μεταπτώσεων από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα για τις παραπάνω τιμές κλίσεων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Οι Woods et al διαπίστωσαν ότι όταν ο αγωγός ήταν οριζόντιος και για χαμηλές ταχύτητες αερίου τα κύματα που εξελίσσονταν σε «slugs» και είχαν μήκος 16 με 20 cm προέκυπταν από άλλα μικρότερα με μήκος 8 με 10 cm μέσω ενός μη γραμμικού μηχανισμού ανάπτυξης. Σε σχετικά υψηλές ταχύτητες του αερίου το πάχος της υγρής στιβάδας δεν ήταν ικανό για να γίνει αυτός ο μηχανισμός εφικτός και τα «slugs» δημιουργούνταν από την συγχώνευση μοναχικών κυμάτων. Αντιθέτως στις περιπτώσεις που ο αγωγός ήταν υπό γωνία η έναρξη των «slugs» προέκυπτε από κύματα μεγάλου μήκους και μικρού πλάτους, τα οποία μπορούν να περιγραφούν από την ιξώδη θεωρία μεγάλου μήκους κύματος.



Σχήμα 2.7. Χάρτης των Woods & Hanratty (1999) που περιγράφει τα όρια μεταπτώσεων μεταξύ διαστρωματωμένης και διαλείπουσας για διάφορες γωνίες αγωγού διαμέτρου 7,63 cm.

Επίσης οι Woods και Hanratty παρατήρησαν ότι με την αύξηση της κλίσης του αγωγού η παροχή του υγρού που απαιτείται για την έναρξη των «Slugs» αυξάνεται, όπως παρατήρησαν και οι άλλοι ερευνητές. Τέλος τόνισαν ότι για μικρές ταχύτητες αερίου οι δυνάμεις της βαρύτητας γίνονται κυρίαρχες, ενώ για $U_{SG} > 5$ m/s η μετάπτωση είναι λιγότερο ευαίσθητη από την επίδραση της κλίσης, καθώς η επίδραση της αδράνειας της αέριας ροής υπερνικά τη σταθεροποιητική δύναμη της βαρύτητας.

2.3 Μεταπτώσεις Καθεστώτων Ροής

2.3.1 Μετάπτωση από τη λεία διαστρωματωμένη ροή στη διαλείπουσα

Για τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα θεωρείται υπεύθυνη η αστάθεια Kelvin-Helmholtz. Μια σύντομη φυσική ερμηνεία της αστάθειας αυτής είναι: η παρουσία κυμάτων στη διεπιφάνεια προκαλεί τοπική αύξηση της αέριας ταχύτητας στην κορυφή του κύματος και μείωση στον πυθμένα. Έτσι, σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli δημιουργείται υποπίεση στο κοίλωμα του κύματος. Αν αυτές οι αποσταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις σταθεροποιητικές δυνάμεις της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης (για μικρά μήκη κύματος), τότε το κύμα μεγαλώνει με αποτέλεσμα η υγρή μάζα να φράξει τη διατομή του αγωγού.

Αυτή η ανάλυση ευστάθειας μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

Αν θεωρήσουμε ένα πεπερασμένο κύμα πάνω σε μια οριζόντια διεπιφάνεια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8 με P τη πίεση στη επιφάνεια του υγρού και P' στην κορυφή

του κύματος τότε η συνθήκη για να αναπτυχθεί το κύμα είναι $P - P' > (h_G - h_G')(\rho_L - \rho_G)g$ με $P - P' = \frac{1}{2}\rho_G(U_G'^2 - U_G^2)$. Τότε το κριτήριο γίνεται

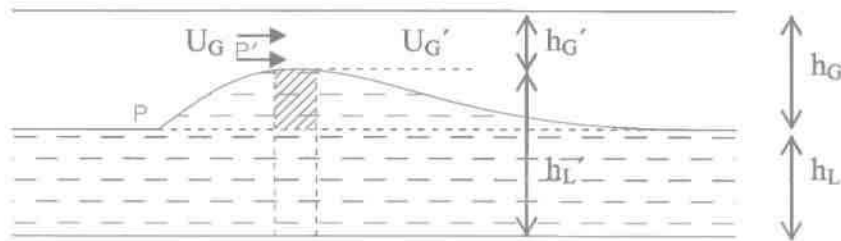
$$U_G > C_1 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)h_G}{\rho_G} \right]^{1/2} \text{ όπου το } C_1 \text{ εξαρτάται από το μέγεθος του κύματος και}$$

$$\text{ισούται με } C_1 = \left[\frac{2}{(h_G/h_G')(h_G/h_G'+1)} \right]^{1/2}.$$

Για απειροελάχιστη διαταραχή $h_G/h_G' \rightarrow 1$, $C_1 \rightarrow 1$ η σχέση γίνεται

$$U_G > \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)h_G}{\rho_G} \right]^{1/2}. \text{ Ωστόσο μια σύγκριση των δύο σχέσεων δείχνει ότι μια}$$

πεπερασμένη διαταραχή είναι λιγότερο σταθερή από μια απειροελάχιστη καθώς το C_1 είναι μικρότερο της μονάδος.



Σχήμα 2.8. Σχηματική παράσταση της αστάθειας K-H

Οι Wallis και Dobson (1972) κατέληξαν στη σχέση με $C_1=0.5$ παρατηρώντας διάφορα πειραματικά δεδομένα.

Αυτή η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί και σε γεωμετρία που αφορά κεκλιμένο σωλήνα με γωνία κλίσης β , οπότε για την ανάπτυξη του κύματος καταλήγουμε στη

$$\text{σχέση: } U_G > \left[\frac{2(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta (h'_t - h_t)}{\rho_G} \frac{A_G'^2}{A_G^2 - A_G'^2} \right]^{1/2}.$$

Για μικρές διαταραχές το A_G' μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Taylor γύρω από το

$$A_G \text{ και να δώσει: } U_G > C_2 \left[\frac{(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta A_G}{\rho_G dA_L/dh_L} \right]^{1/2}.$$

Οι Taitel & Dukler (1976) ακολούθησαν την κλασική θεωρία των Kelvin-Helmholtz και προτείνουν την παρακάτω σχέση για τη μετάπτωση:

$$U_G > \left(1 - \frac{h_L}{D}\right) \left[\frac{g(U_L - U_e)a}{U_G S_i} \right]^{0.5}, \text{ όπου } C_1 = 1 - \frac{h_L}{D}.$$

όπου h_L είναι το ύψος της υγρής στιβάδας από τον πυθμένα αγωγού διαμέτρου D και S_i είναι το πλάτος της διεπιφάνειας. Οι Taitel & Dukler χρησιμοποίησαν γεωμετρικά επιχειρήματα για να υποστηρίξουν ότι η παραπάνω σχέση περιγράφει την μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα για τιμές του λόγου:

$$\frac{h_L}{D} \geq 0,5$$

και σε δακτυλιοειδή για τιμές $\frac{h_L}{D} < 0,5$.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για οριζόντιους αγωγούς ή για αγωγούς με μικρή κλίση. Αν και η προσπάθεια των Taitel & Dukler είναι αξιόλογη, εν τούτοις αρκετά πειραματικά δεδομένα δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις που δίνει το μοντέλο τους. Μερικές από τις ανεπάρκειες του μοντέλου αυτού είναι:

1. Προβλέπει μεγάλη επίδραση του ιξώδους του υγρού στη μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή, κάτι που δεν έχει επαληθευτεί σε πειράματα άλλων ερευνητών
2. Όπως γίνεται φανερό από τον αριθμό F , η μετάπτωση σε δακτυλιοειδή φαίνεται σαν συνάρτηση της διαμέτρου του αγωγού, σε αντίθεση με πειραματικά δεδομένα που δείχνουν μικρή εξάρτηση.

Αν και έχει σημειωθεί σημαντική εξέλιξη πάνω στην έρευνα για τις προϋποθέσεις μετάπτωσης από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα, το μοντέλο των Taitel & Dukler είναι ευρύτατα εφαρμόσιμο. Ωστόσο πολλές έρευνες έδειξαν ότι τρεις θεωρίες μπορούν να περιγράψουν τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα. Αυτές είναι: 1) ιξώδης γραμμική ευστάθεια μεγάλου μήκους κύματος σε διαχωρισμένη ροή, 2) αστάθεια Kelvin-Helmholtz, 3) η ευστάθεια ενός slug.

Οι Lin & Hanratty (1986), οι οποίοι εφάρμοσαν τη μέθοδο της ιξώδους γραμμικής ευστάθειας, συμπεριέλαβαν την επίδραση της διεπιφανειακής τάσης τ_i και της τάσης που εφαρμόζεται από το τοίχωμα του σωλήνα. Έδειξαν ότι εφόσον η

ταχύτητα του κύματος είναι διαφορετική από την ταχύτητα του υγρού, η αδράνεια του υγρού παίζει αποσταθεροποιητικό ρόλο, με αποτέλεσμα η κρίσιμη ταχύτητα του αερίου που προβλέπεται από τη μη ιξώδη θεωρία να είναι μικρότερη. Η επιβεβαίωση αυτής της θεωρίας έγινε από τον Woods (2000), ο οποίος ασχολήθηκε με ροή σε σωλήνες που είχαν κλίση προς τα κάτω. Αυτός παρατήρησε την ύπαρξη κυμάτων μεγάλου μήκους σε χαμηλές ταχύτητες του αερίου και μάλιστα παρατήρησε ότι αυτά εξελίσσονται σε slug με ταχύτητα αερίου ίση με αυτή που προβλέπεται από την ιξώδη θεωρία μεγάλου μήκους κύματος. Η θεωρία επίσης περιγράφει τις μεταπτώσεις σε οριζόντια ροή αερίου-υγρού σε χαμηλές ταχύτητες αερίου, ακόμα και αν τα κύματα που δημιουργούνται είναι μικρού μήκους.

2.3.2 Μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε διαστρωματωμένη με κύματα

Όπως είναι γνωστό η περιοχή της διαχωρισμένης ροής μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι και τρία υποκαθεστώτα: τη λεία διαστρωματωμένη, τη ροή με διδιάστατα κύματα (2D) και τη ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz. Τα διδιάστατα προκαλούνται από την δράση του αερίου πάνω στην επιφάνεια του υγρού, αλλά η τιμή της ταχύτητας του είναι μικρότερη από την κρίσιμη που απαιτείται για την ανάπτυξη του κύματος και την μετάβαση σε διαλείπουσα ή δακτυλιοειδή ροή.

Ο μηχανισμός δημιουργίας αυτών είναι πολύπλοκος και όχι απόλυτα κατανοητός. Είναι γενικά αποδεκτό ότι δημιουργούνται όταν η δράση της πίεσης και της επιφανειακής τάσης υπερνικά την απόσβεση λόγω του ιξώδους. Οι Taitel & Dukler (1976) υιοθέτησαν την ιδέα που εισήγαγε ο Jeffreys (1925), ο οποίος πρότεινε την ακόλουθη συνθήκη έναρξης του συγκεκριμένου τύπου κυμάτων:

$$(U_G - C)^2 C > \frac{4v_L g(\rho_L - \rho_G)}{s\rho_G}.$$

Το s στην παραπάνω σχέση είναι ένας συντελεστής «προστασίας» που πρότεινε ο Jeffreys και εκτίμησε την τιμή του γύρω στο 0,3. Ωστόσο ο Benjamin εκτίμησε πολύ μικρότερες τιμές για τον συντελεστή που κυμαίνονται από 0,01 έως 0,03. Το C είναι η ταχύτητα του κύματος και στις περισσότερες περιπτώσεις των μεταπτώσεων ισχύει ότι $U_G \gg C$. Οι θεωρίες που αφορούν αυτά τα κύματα προτείνουν ότι ο λόγος της ταχύτητας του κύματος προς τη μέση ταχύτητα του φίλμ μειώνεται με την αύξηση του



αριθμού Reynolds. Στις υψηλές τιμές του αριθμού Re, οι οποίες σχετίζονται με τυρβώδη ροή και λαμβάνουν χώρα κοντά σ' αυτές τις μεταπτώσεις, η τιμή του λόγου προσεγγίζει το 1 με 1,5. Για λόγους απλότητας, και επειδή ο ακριβής εντοπισμός αυτής της μετάπτωσης δεν είναι τόσο σημαντικός, χρησιμοποιείται η σχέση $U_L = c$. Αυτές οι προσεγγίσεις υποκατέστησαν την εξίσωση και δίνουν το κριτήριο γι' αυτή τη

$$\text{μετάπτωση: } U_G > \left[\frac{4V_L(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta}{s\rho_G U_L} \right]^{1/2}$$

Η συσχέτιση αυτή μπορεί να εκφραστεί σε αδιάστατη μορφή ως:

$$K > \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{U_L U_G} \sqrt{s}}, \text{ όπου το } K \text{ είναι το προϊόν του τροποποιημένου αριθμού Froud και της}$$

τετραγωνικής ρίζας του αριθμού Re του υγρού.

$$K^2 = F^2 \text{Re}_{LS} = \left[\frac{\rho_G (U_{GS})^2}{(\rho_L - \rho_G) D g \cos \beta} \right] \left[\frac{D U_{LS}}{\nu_L} \right]$$

2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των διαφασικών ροών είναι πολλοί μεταξύ των οποίων: οι παροχές των ρευστών, η διάμετρος του αγωγού, η κλίση του και οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών (το ιξώδες του υγρού, η επιφανειακή τάση, η πυκνότητα).

Επίδραση του ιξώδους

Στις χαμηλές ταχύτητες του αερίου τα κύματα αναπτύσσονται όταν η ενέργεια που τα τροφοδοτεί από τις μεταβολές της πίεσης είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που σπαταλάται (dissipative effects) από το ιξώδες (Cohen & Hanratty, 1965). Τα κύματα αυτά είναι τα λεγόμενα κύματα **Jeffreys** και δεν παρατηρούνται σε υγρά με μεγάλα ιξώδη.

Μια άλλη σημαντική επίδραση του ιξώδους αφορά τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή. Σύμφωνα με παρατηρήσεις που έκαναν οι **Andritsos et al (1989)**, με την αύξηση του ιξώδους για δεδομένα $\frac{h_c}{D}$ και U_{GS} μειώνεται η ταχύτητα της ροής του υγρού με αποτέλεσμα η αποσταθεροποιητική επίδραση της αδράνειας του υγρού στη ροή να μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το όριο μετάπτωσης σε διαλείπουσα να μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες παροχές του υγρού.

Επίδραση της διαμέτρου

Όπως φαίνεται από το κριτήριο των Taitel & Dukler και από την ιξώδη θεωρία μεγάλου μήκους κύματος των Lin & Hanratty, η κρίσιμη ταχύτητα του αερίου που απαιτείται για να λάβει χώρα η μετάπτωση σε διαλείπουσα αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού. Από παρατηρήσεις που έκαναν οι Andritsos et al (1989) και οι Andritsos & Hanratty (1987) στις χαμηλές ταχύτητες αερίου ο λόγος $\frac{h_L}{D}$ καθώς και η U_{LS} που απαιτούνται για την μετάπτωση σε διαλείπουσα αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου. Ωστόσο, από τα πειράματα των συγκεκριμένων ερευνητών προέκυψε ότι σε υψηλές ταχύτητες αέριας ροής τα μεγέθη αυτά γίνονται ανεξάρτητα από τις μεταβολές της διαμέτρου και του ιξώδους. Στην περίπτωση αυτή τα slug δημιουργούνται από τη συνένωση ακανόνιστων κυμάτων μικρού μήκους που αναπτύχθηκαν από μια αστάθεια Kelvin-Helmholtz.

Σε υψηλές ταχύτητες αερίου η κρίσιμη τιμή του όρου $\frac{h_L}{D}$ είναι μικρότερη απ' ότι στις χαμηλές.

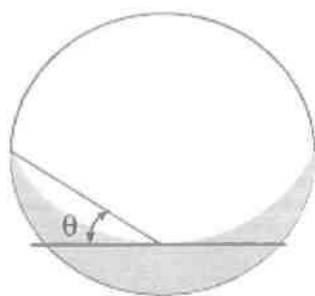
Επίδραση της κλίσης

Στην περίπτωση κατωφερούς ροής το υγρό κινείται πιο γρήγορα και έχει χαμηλότερο επίπεδο εξαιτίας της δύναμης της βαρύτητας, όπου μια συνιστώσα της έχει την κατεύθυνση της ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται υψηλότεροι ρυθμοί ροής αερίου και υγρού για να λάβει χώρα μετάπτωση από διαχωρισμένη σε διαλείπουσα. Καθώς αυξάνεται περισσότερο η διαφορά από το οριζόντιο επίπεδο (η προς τα κάτω γωνία) το καθεστώς διαστρωματωμένης ροής καταλαμβάνει μεγαλύτερη περιοχή στο χάρτη. Αντιθέτως όταν ο αγωγός είναι ανωφερής τότε για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών υπερτερεί το καθεστώς της διαλείπουσας.

Ο τύπος της λείας διαχωρισμένης δεν παρατηρείται για ανηφορικές ροές με μικρές κλίσεις του σωλήνα εκτός εάν πρόκειται για πολύ μικρές γωνίες ($0,25^\circ$). Αντίθετα με την περίπτωση της οριζόντιας και της ανωφερούς ροής, όπου τα κύματα κάνουν την εμφάνισή τους λόγω της δράσης του αέρα στην διεπιφάνεια, στην προς τα κάτω η φυσική αστάθεια της διεπιφάνειας προέρχεται από τη δράση της βαρύτητας, ακόμα και με την απουσία της ροής του αέρα. Η έναρξη αυτών των κυμάτων εξαρτάται από την ταχύτητα του υγρού και το πάχος του οριακού στρώματος και το σχήμα της

διεπιφάνειας επηρεάζεται έντονα από την κλίση. Έτσι για μηδαμινούς ρυθμούς αέρα η μετάπτωση από ομαλή σε κυματώδη επιφάνεια οφείλεται αποκλειστικά από την ροή του υγρού.

Όσον αφορά το σχήμα της διεπιφάνειας υγρού - αερίου, αυτό φαίνεται ότι είναι κυρτό, τουλάχιστον για μικρές κλίσεις. Όταν η παροχή του υγρού είναι μικρή τότε οι τριχοειδής δυνάμεις που ασκούνται από τα τοιχώματα γίνονται κυρίαρχες και επομένως το σχήμα της επιφανείας παίρνει την κυρτή μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9

Κεφάλαιο 3^ο

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

Θεωρούμε καθεστώς διαστρωματωμένης ροής όπως αναπαριστούν και τα σχήματα 3.1 – 3.2 και εφαρμόζουμε τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής για τις δύο φάσεις:

$$-A_L \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_{wL} S_L + \tau_i S_i + \rho_L A_L g \sin \theta = 0 \quad (3.1)$$

$$-A_G \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_{wG} S_G - \tau_i S_i + \rho_G A_G g \sin \theta = 0 \quad (3.2)$$

Όπου οι δείκτες G και L αναφέρονται στη φάση του αερίου και του υγρού αντίστοιχα, $\frac{dP}{dx}$ η πτώση πίεσης, A είναι η επιφάνεια, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, τ_w οι διατμητικές τάσεις με τα τοιχώματα του αγωγού και με ρ συμβολίζεται η πυκνότητα της κάθε φάσης.

Εξισώνοντας την πτώση πίεσης των 2 φάσεων προκύπτει:

$$\tau_{wG} \frac{S_G}{A_G} - \tau_{wL} \frac{S_L}{A_L} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) + (\rho_L - \rho_G) g \sin \theta = 0 \quad (3.3)$$

Οι διατμητικές τάσεις προκύπτουν ως εξής:

$$\tau_{wL} = f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2} \quad \tau_{wG} = f_G \frac{\rho_G U_G^2}{2} \quad \tau_i = f_i \frac{\rho_G (U_G - U_L)^2}{2} \quad (3.4)$$

όπου οι συντελεστές τριβής υπολογίζονται από τις σχέσεις του Blasius:

$$f_L = 16 / \text{Re}_L \quad f_G = 16 / \text{Re}_G \quad \text{για } \text{Re}_{(G \text{ ή } L)} < 2000 \quad (3.5)$$

$$f_L = 0,046 \text{Re}_L^{-0,2} \quad f_G = 0,046 \text{Re}_G^{-0,2} \quad \text{για } \text{Re}_{(G \text{ ή } L)} > 2000 \quad (3.6)$$

όπου οι αριθμοί Reynolds ορίζονται ως συναρτήσεις των υδραυλικών διαμέτρων D_L για την υγρή και D_G για την αέρια φάση.

$$\text{Re}_L = \frac{D_L U_L}{\nu_L}, \quad \text{Re}_G = \frac{D_G U_G}{\nu_G} \quad (3.7)$$

με ν_L και ν_G τα κινηματικά ιξώδη της υγρής και της αέριας φάσης αντίστοιχα.

Οι υδραυλικές διαμέτροι σύμφωνα με τον Agrawal ορίζονται:

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L} \quad D_G = \frac{4A_G}{S_G + S_i} \quad (3.8)$$

Όσον αφορά τον συντελεστή f , έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις από πολλούς ερευνητές. Οι Taitel & Dukler πρότειναν ότι η διεπιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί λεία, οπότε σύμφωνα με αυτούς θα ισχύει $f_i = f_G$. (3.9)

Ωστόσο οι Andreussi & Persen υποστήριξαν ότι η σχέση των Taitel & Dukler δεν ισχύει στην περίπτωση που η ροή αποτελείται από διδιάστατα κύματα και ότι ο συντελεστής f_i παίρνει μεγαλύτερες τιμές. Οπότε από πειράματα που έκαναν σε αγωγό διαμέτρου 5 cm και κλίσης $0,65^\circ$ κατέληξαν στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{f_i}{f_G} = 1 + 29,7(F - 0,36)^{0,67} \left(\frac{h_L}{D}\right)^{0,3} \quad (3.10)$$

όπου F είναι ο αριθμός Froude.

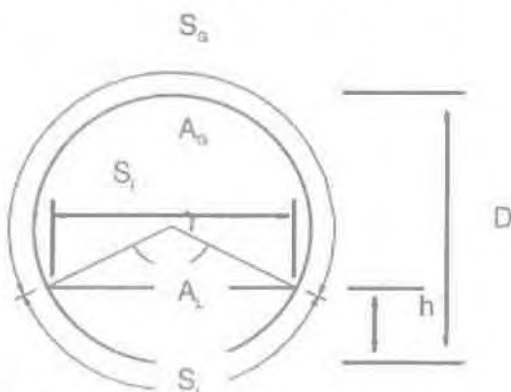
Μετρώντας το πάχος της υγρής στιβάδας και κάνοντας χρήση των παρακάτω σχέσεων βρίσκουμε τα εμβαδά A_G και A_L :

$$\gamma = 2 \cos \left[1 - 2 \left(\frac{h_L}{D} \right) \right] \quad (3.11)$$

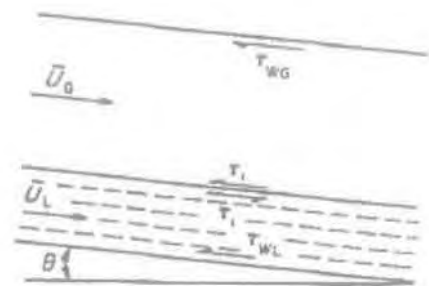
$$\frac{A_L}{A} = \frac{1}{2\pi} (\gamma - \sin \gamma) \quad (3.12)$$

$$\frac{A_G}{A} = 1 - \frac{A_L}{A} \quad (3.13)$$

και έτσι από την εξίσωση (3.1) ή (3.2) υπολογίζουμε την πτώση πίεσης της ροής.



Σχήμα 3.1 Αναπαράσταση της διατομής του αγωγού



Σχήμα 3.2 Σχηματική παράσταση της ροής

Κεφάλαιο 4^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη όπου έγιναν οι παρατηρήσεις των διαφόρων καθεστώτων ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Ο αγωγός στον οποίο γίνονται τα πειράματα διφασικής ροής αποτελείται από τμήματα αγωγών Plexiglas, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με φλάντζες και έχει συνολικό μήκος 12,75 m και εσωτερική διάμετρο 0,024 m. Η χρήση των φλάντζων δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης και εναλλαγής των διαφόρων μετρητικών τμημάτων στο σύστημα. Όλος ο αγωγός στηρίζεται πάνω σε ένα μεταλλικό πλαίσιο και έχει τη δυνατότητα μέσω ενός μίαντα να μεταβάλλεται η κλίση του κατά $\pm 1,5^\circ$.

Η επιλογή του Plexiglas έγινε για τους εξής λόγους: πρώτον επιτρέπει τις οπτικές παρατηρήσεις και τη λήψη φωτογραφιών και δεύτερον γίνεται εύκολη η επεξεργασία του με τον τόρνο και συγκολλάται εύκολα με χλωροφόρμιο. Επιπλέον είναι αρκετά σκληρό και δεν αλλοιώνεται κατά την επαφή με δραστικά υγρά.

Στον αγωγό υπάρχουν δύο τμήματα μετρήσεων για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και της πτώσης πίεσης. Το υλικό που τα περιβάλλει είναι και αυτό από Plexiglas και περιέχουν ειδικά βύσματα (συρματάκια) τα οποία είναι τοποθετημένα σε κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές ανά ζεύγη. Αυτά είναι ανοξείδωτα και κατασκευασμένα από κράμα και έχουν διάμετρο 0,4 mm και απέχουν μεταξύ τους 2 mm. Τέλος τα διάφορα δεδομένα καταγράφονται και επεξεργάζονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στα συγκεκριμένα πειράματα οι παρατηρήσεις έγιναν μόνο οπτικά όπως αναφέρεται λεπτομερέστερα παρακάτω.

Όσον αφορά τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν το αέριο ήταν ατμοσφαιρικός αέρας και το υγρό είτε σκέτο νερό από το δίκτυο ύδρευσης, είτε διάλυμα νερού – βουτανόλης έτσι ώστε η επιφανειακή τάση να είναι 40 .

Οι δύο φάσεις εισέρχονται στον αγωγό διαμέσου ενός τμήματος ανάμιξης που είναι ένα απλό «Y» και εισάγονται υπό γωνίες -35° και 35° από το οριζόντιο επίπεδο. Η διφασική ροή εξέρχεται μέσα σε μια πλαστική δεξαμενή η οποία παίζει το ρόλο του διαχωριστή των δύο φάσεων. Στη συνέχεια ο αέρας εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από

την κορυφή του διαχωριστή ενώ το υγρό εκρέει από τον πυθμένα του. Η ίδια αυτή πλαστική δεξαμενή χρησιμοποιείται και ως δεξαμενή νερού για την ανακυκλοφορία μέσω της διάταξης με τη χρήση φυγόκεντρης αντλίας.

Ο αέρας τροφοδοτείται στο σύστημα μέσω ενός συμπιεστή. Η παροχή του αέρα μετριέται μέσω δύο βαθμονομημένων ροόμετρων στην έξοδο των οποίων υπάρχει μανόμετρο για την καταγραφή της πίεσης εξόδου. Τέλος η παροχή του υγρού ρυθμίζεται και μετριέται από 3 ροόμετρα: ένα μικρών παροχών, ένα μεσαίων και ένα μεγάλων παροχών.

4.2 Μέθοδοι προσδιορισμού των καθεστώτων της διφασικής ροής

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό των καθεστώτων και των χαρακτηριστικών της διφασικής ροής: οπτική παρατήρηση, αγωγιμομετρική μέθοδος, απορρόφηση ακτίνων X ή ακτίνων γ, μελέτη της πτώσης πίεσης.

4.2.1. Οπτική παρατήρηση

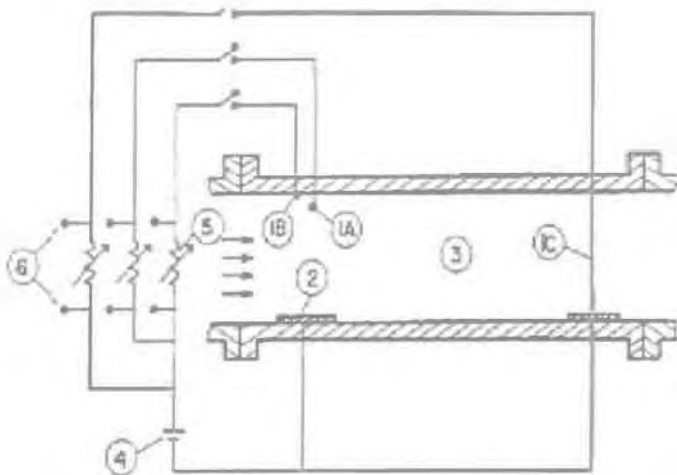
Οι οπτικές παρατηρήσεις σ' ένα διαφανές τμήμα του αγωγού είναι ο απλούστερος τρόπος ανίχνευσης των μορφών της διφασικής ροής. Στην περίπτωση ταχύτατα εξελισσόμενων φαινομένων, όπου η απλή παρατήρηση δεν είναι αρκετή, η χρήση φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high speed photography) ή η φωτογράφιση αξονικής διατομής (axial view photography) είναι επιβεβλημένη (Hewitt & Roberts, 1969). Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη η οπτική επαφή με το εσωτερικό του αγωγού (π.χ. αδυναμία χρήσης διαφανούς σωλήνα λόγω υψηλής πίεσης).

Ο προσδιορισμός των μεταπτώσεων από ροή σε ροή στην συγκεκριμένη εργασία έγινε οπτικά, ενώ σε πολλές περιπτώσεις έγινε φωτογράφιση των ροών.

4.2.2. Αγωγιμομετρική μέθοδος

Χρησιμοποιείται μόνο όταν η υγρή φάση είναι αγωγίμη. Βασίζεται στη χρήση μετρητικού ζεύγους συρμάτων (probe), που τροφοδοτείται με ρεύμα υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Όταν βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση δίνει υψηλό σήμα

εξόδου, ενώ σε επαφή με την αέρια δίνει σχεδόν μηδενικό. Οι μεταβολές αυτές οι οποίες μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50 Ω), τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή. Για τον προσδιορισμό των καθεστώτων ροής έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές (Barnea et al., 1980) κατάλληλοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων.



Σχήμα 4.1 Διάταξη ανίχνευσης καθεστώτων ροής (Barnea et al., 1980)

4.3. Ροή και μέτρηση παροχής

Υπάρχουν δεκάδες τύποι μετρητικών παροχής είτε υγρών, είτε αερίων. Άλλα μετρούν την μαζική παροχή, η οποία είναι και η απλούστερη και άλλα την ογκομετρική. Βέβαια υπάρχουν και εκείνα που μετρούν είτε τοπική ταχύτητα είτε την πτώση πίεσης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στη συγκεκριμένη περίπτωση για την ρύθμιση και τη μέτρηση των παροχών του υγρού και του αερίου γίνεται χρήση τριών και δύο ροόμετρων αντίστοιχα, τα οποία είναι τύπου ροτάμετρου. Είναι απλές και γερές κατασκευές που περιέχουν στο εσωτερικό τους έναν πλωτήρα, ο οποίος ανυψώνεται ανάλογα με την παροχή του υγρού ή του αερίου και σταθεροποιείται μέχρι να επέλθει ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων βαρύτητας, άνωσης και αντίστασης του πλωτήρα.

$$\rho_b g V_b = \rho g V_b + F_d$$

Βάρος
Άνωση
Αντίσταση

Στις συσκευές αυτές η πτώση πίεσης είναι μικρή. Η παροχή είναι ανάλογη του ύψους του πλωτήρα και υπολογίζεται απλά διαβάζοντας την ένδειξη του ροόμετρου, στην οποία έχει φτάσει ο πλωτήρας.

Για κάθε σύστημα είτε νερού-αέρα, είτε διάλυμα νερού-βουτανόλης-αέρα πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση των ροόμετρων υγρού. Για τη διαδικασία αυτή είναι απαραίτητο να μετρήσουμε το βάρος του υγρού που χύνεται μέσα στη δεξαμενή σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η ογκομετρική παροχή του υγρού υπολογίζεται ως

$$Q = \frac{V}{1000t}$$

όπου Q σε m^3 / sec , V σε lt, t σε sec.

Η φαινομενική ταχύτητα του υγρού υπολογίζεται θεωρώντας ότι όλη η διατομή του αγωγού καλύπτεται από υγρό και ισούται με: $U_{LS} = \frac{Q}{A}$.

Στη συνέχεια σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων παριστάνεται η φαινομενική ταχύτητα του υγρού ως προς την ένδειξη του ροόμετρου. Συνήθως η σχέση μεταξύ της φαινομενικής ταχύτητας και της ένδειξης του ροόμετρου είναι γραμμική.

Για τη βαθμονόμηση των ροόμετρων του αέρα χρησιμοποιείται μια ειδική συσκευή μέτρησης όγκου του αέρα. Για τη διαδικασία αυτή απομονώνεται ο αγωγός του αέρα από το τμήμα ανάμειξης και συνδέεται με τη συσκευή. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να μετράμε τον όγκο του αέρα που διέρχεται από τη συσκευή και το χρόνο. Η ογκομετρική παροχή του αέρα υπολογίζεται από την ίδια σχέση που ισχύει και για το υγρό. Για την ογκομετρική παροχή του αέρα γίνεται μια διόρθωση που ορίζεται από τη

$$\text{σχέση: } Q_{act} = \frac{Q_{mesur}}{\sqrt{(P_{rometers} + 1)}}$$

Όπου Q_{mesur} είναι η ογκομετρική παροχή του αέρα που υπολογίστηκε από την σχέση και $P_{rometers}$ είναι η πίεση που δείχνει το μανόμετρο κάθε φορά που αλλάζουμε την ένδειξη του ροόμετρου.

Η βαθμονόμηση όλων των ροόμετρων για κάθε σύστημα φαίνεται στο παράρτημα. Στα συγκεκριμένα πειράματα δε χρειάστηκε να γίνει κανενός είδους βαθμονόμηση, επειδή τα ροόμετρα ήταν ήδη βαθμονομημένα.

4.4. Διαδικασία μετρήσεων

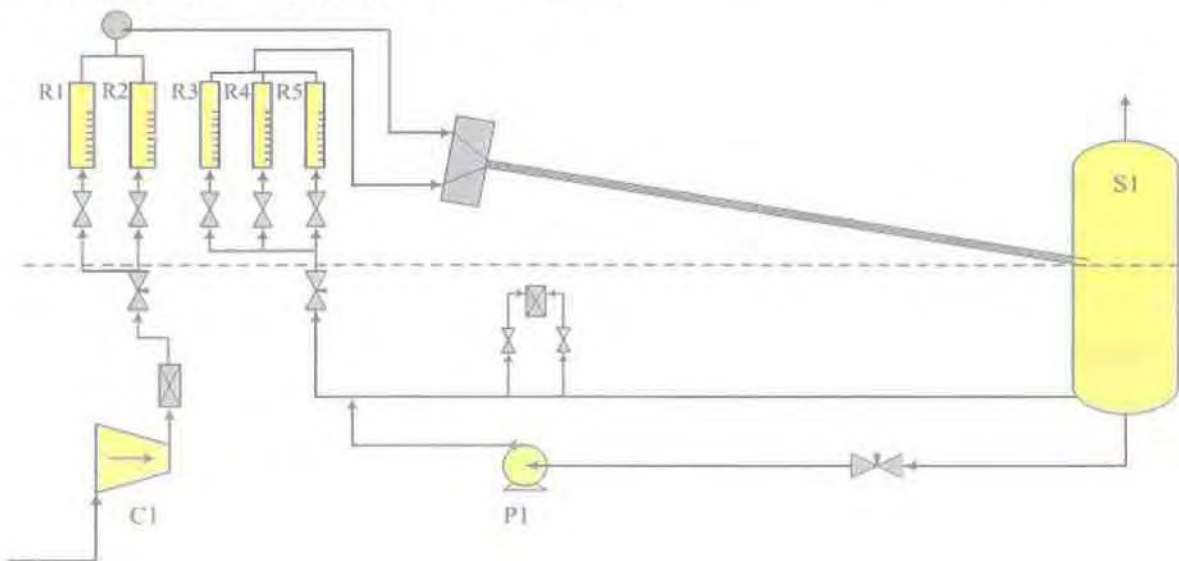
Όπως έχει τονιστεί ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης πάνω στο καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έγιναν πειράματα χρησιμοποιώντας συστήματα νερού – αέρα ή διάλυμα νερού βουτανόλης με αέρα σε γωνίες 0° , $-0,25^\circ$, $-0,5^\circ$, -1° και $-0,25^\circ$, -1° αντίστοιχα.

Για τη διαδικασία μετρήσεων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Για την έναρξη των πειραμάτων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η βαθμονόμηση των ροόμετρων, όμως στην συγκεκριμένη περίπτωση τα ροόμετρα ήταν ήδη βαθμονομημένα.
2. Εν συνεχεία αλλάζουμε την κλίση του αγωγού (αρνητική κλίση δηλαδή ροή προς τα κάτω). Πριν ανοίξουμε την αντλία ανοίγουμε την βάνα επιστροφής του υγρού που είναι συνδεδεμένη λίγο μετά την αντλία, έτσι ώστε να μπορούμε να στέλνουμε το νερό προς δύο κατευθύνσεις, προς τα ροόμετρα του υγρού και προς τη δεξαμενή. Αν το νερό που στέλνει η αντλία πάει κατευθείαν στα ροόμετρα, μπορεί να μας δημιουργήσει προβλήματα, π.χ. διαρροές κτλ.
3. Ανοίγουμε τις βάνες τροφοδοσίας του νερού και του αερίου. Το υγρό και το αέριο περνάνε πρώτα από τα ροόμετρα. Πρέπει η τιμή της υπερπίεσης στα ροόμετρα να μην ξεπερνάει τα 2 bar. Η περιοχή των φαινομενικών ταχυτήτων που μας ενδιαφέρει, καλύπτεται από δύο ροόμετρα αέρα και τρία ροόμετρα υγρού.
4. Κατόπιν καθορίζονται τα ζεύγη των φαινομενικών ταχυτήτων που καλύπτουν την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Στη συνέχεια κρατάμε σταθερή την παροχή του υγρού και αυξάνουμε σταδιακά την παροχή του αέρα, παρατηρώντας και σημειώνοντας κάθε φορά το καθεστώς ροής στο οποίο βρισκόμαστε. Στη συνέχεια, αφού καλύψουμε αρκετές παροχές του αέρα στο ένα ροόμετρο, ανοίγουμε το δεύτερο ροόμετρο

του αέρα, το οποίο αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες παροχές και κλείνουμε το πρώτο. Εφόσον καλύψουμε όλες τις τιμές παροχής του αερίου που μας ενδιαφέρει, αυξάνουμε την υγρή παροχή και επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία, ξεκινώντας πάλι από το μικρό ροόμετρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα καθεστώτων ροής.

Πρέπει να τονιστεί ότι σε κάθε αλλαγή της παροχής του αερίου, ιδιαιτέρως δε του υγρού, απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα αναμονής, προκειμένου να επέλθει ισορροπία στη ροή. Τότε η παρατήρηση που γίνεται είναι έγκυρη. Ο προσδιορισμός των καθεστώτων ροής γίνεται οπτικά, σε τμήμα που απέχει από το τμήμα εισόδου αέρα-νερού 6m και αφού έχουμε όλα τα ζεύγη φαινομενικών ταχυτήτων, μπορούμε να δημιουργήσουμε τους χάρτες καθεστώτων ροής.



- C1 : Συμπιεστής
- P1 : Αντλία
- S1 : Διαχωριστής αέριας-φάσης
- R1, R2 : Ροόμετρα Αέριας φάσης
- R3, R4, R5 : Ροόμετρα Υγρής φάσης

Σχήμα 4.2 Πειραματική Διάταξη

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

5.1 Χάρτες καθεστώτων ροής

Συνολικά έχουν κατασκευαστεί 6 χάρτες καθεστώτων ροής, τέσσερις για το σύστημα νερού – αέρα και δύο για το σύστημα διαλύματος νερού/βουτανόλης – αέρα 7% περιεκτικότητας σε βουτανόλη, για τις διάφορες τιμές κλίσεων του αγωγού.

Όπως προαναφέρθηκε, για το σύστημα νερού – αέρα οι γωνίες του αγωγού που διεξήχθη το πείραμα ήταν 0° , $-0,25^\circ$, $-0,5^\circ$, -1° και οι αντίστοιχοι χάρτες διακρίνονται στα Σχήματα 5.1 - 5.4, ενώ για το σύστημα με τη βουτανόλη οι γωνίες ήταν $-0,25^\circ$, -1° και τα αποτελέσματα καταγράφονται στα Σχήματα 5.5 - 5.6. Ως άξονες χρησιμοποιήθηκαν: η φαινομενική ταχύτητα του αέρα U_{GS} για οριζόντιο και η φαινομενική ταχύτητα του υγρού U_{LS} στον κατακόρυφο.

Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι στο σύστημα νερού/βουτανόλης – αέρα δεν παρατηρείται το καθεστώς της λείας διαστρωματωμένης ροής για καμία κλίση του αγωγού. Ακόμα και στις χαμηλές παροχές υγρού και αερίου εμφανίζονται διαταραχές που έχουν την μορφή «επιφανειακών παλμών». Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί η χρήση της βουτανόλης προκαλεί μείωση της διεπιφανειακής τάσης και ως γνωστόν η επιφανειακή τάση προκαλεί απόσβεση των κυμάτων.

Όσον αφορά το σύστημα νερού – αέρα, η περιοχή που καταλαμβάνει το συγκεκριμένο καθεστώς (λεία διαστρωματωμένη) στο χάρτη παρουσιάζει μια μείωση με την αύξηση της προς τα κάτω κλίσης και δεν παρατηρείται στην περίπτωση της κλίσης -1° .

Τέλος η πιο σημαντική μεταβολή που διακρίνεται στους χάρτες είναι ότι με την αύξηση της κλίσης το καθεστώς της διαλείπουσας μετατοπίζεται προς τα πάνω, σε μεγαλύτερες παροχές του υγρού και την θέση της καταλαμβάνει το καθεστώς των διδιάστατων κυμάτων.

5.2 Περιγραφή των κυμάτων και μεταπτώσεις των καθεστώτων ροής για τις διάφορες τιμές κλίσεων

5.2.1. Περίπτωση Οριζόντιου Αγωγού

Για μικρές παροχές υγρού και αερίου εμφανίζεται το καθεστώς της λείας διαστρωματωμένης ροής, όπου το αέριο ρέει πάνω από το υγρό και η επιφάνεια παραμένει αμετάβλητη. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνουμε την τιμή της ταχύτητας του αέρα, κάνουν την εμφάνισή τους διαταραχές, τις οποίες διακρίνουμε από το γεγονός ότι η επιφάνεια μοιάζει να πάλλεται. Είναι η αρχή των διδιάστατων κυμάτων, τα οποία μεγαλώνουν σε μήκος και σε πλάτος με την αύξηση της ταχύτητας του αερίου.

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του υγρού, οι διαταραχές ξεκινούν σε μικρότερες ταχύτητες του αερίου, ώσπου η λεία επιφάνεια εξαφανίζεται πλήρως σε ταχύτητες υγρού: $U_{LS} > 0,03$ m/s.

Στη συνέχεια με την περαιτέρω αύξηση της αέριας ροής κάνουν την εμφάνιση τους κύματα, τα οποία μοιάζουν να στροβιλίζονται και να συγχωνεύονται με τα υπόλοιπα κατά μήκος της πορείας τους και η ταχύτητα τους είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των διδιάστατων. Είναι τα λεγόμενα κύματα Kelvin – Helmholtz. Οπότε λέμε ότι έχουμε μετάπτωση από το καθεστώς των διδιάστατων (2D) σε Kelvin – Helmholtz. Με ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του αερίου τα κύματα αυτά καλύπτουν μεγαλύτερο μέρος κατά μήκος του αγωγού, ώσπου στο τέλος τα διδιάστατα εξαφανίζονται πλήρως και τα κύματα Kelvin – Helmholtz είναι τα μόνα που κυριαρχούν. Καθώς αυξάνεται η αέρια φαινόμενη ταχύτητα, μικραίνει το μήκος τους, ενώ μεγαλώνει η συχνότητα τους.

Για ταχύτητες υγρού $U_{LS} = 0,011$ m/s και αερίου $U_{GS} = 19$ m/s περίπου, αρχίζουν να αποσπώνται σταγόνες από τη διεπιφάνεια, οι οποίες συμπαρασύρονται από την αέρια φάση και αποτίθενται στα πλευρικά ή στα άνω τοιχώματα του σωλήνα, οπότε έχει αρχίσει το φαινόμενο της εκνέφωσης. Μια μεγαλύτερη αύξηση της αέριας ροής έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται περισσότερο οι σταγόνες που συσσωρεύονται στα τοιχώματα του σωλήνα, δημιουργώντας έτσι ρυάκια νερού τα οποία χύνονται στην υγρή φάση, πράγμα που προαναγγέλλει την μετάπτωση σε δακτυλιοειδή ροή.

Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στον χάρτη, για ταχύτητες αερίου από $U_{GS} = 17,5$ m/sec και υγρού $U_{LS} = 0,072$ m/sec έχουμε πλέον την εμφάνιση της δακτυλιοειδούς ροής. Σε αυτή την περίπτωση το υγρό σχηματίζει μια συνεχή υγρή

στιβάδα σε όλη την περιφέρεια του αγωγού, έχοντας όμως μεγαλύτερο πάχος στον πυθμένα από ότι στην κορυφή λόγω της επίδρασης της βαρύτητας.

Για την ίδια παροχή νερού, αλλά για μικρότερες παροχές αερίου ($U_{LS} = 0,072$ m/s, $2 \text{ m/s} < U_{GS} < 4 \text{ m/s}$) έχουμε την εμφάνιση διαλείπουσας ροής. Σε αυτό το είδος ροής έχουμε την παρουσία κυμάτων μεγάλου μήκους, τα οποία φράζουν εντελώς την διατομή του σωλήνα προκαλώντας απότομη αύξηση της πίεσης με αποτέλεσμα να έχουμε δόνηση του αγωγού. Στις χαμηλές ταχύτητες αερίου το είδος της ροής είναι ήπια διαλείπουσα (Plug), κατά την οποία οι υγρές μάζες που καλύπτουν όλη τη διατομή του αγωγού έχουν μεγάλο μήκος έως και 20 cm. Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς αυτά ταξιδεύουν παρασύρουν σημαντική ποσότητα νερού, προκαλώντας μείωση στο πάχος της υγρής στιβάδας με αποτέλεσμα να απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι το υγρό να επανέλθει στο ανάλογο ύψος για τη δημιουργία του επόμενου «plug». Στις ακόμα μεγαλύτερες παροχές του υγρού, όμως, το ύψος που καταλαμβάνει το υγρό είναι αρκετά μεγάλο επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία 2 ή και 3 «plugs», τα οποία έχουν διαφορετικό μήκος και συχνότητα εμφάνισης.

Αντιθέτως σε υψηλές παροχές της αέριας φάσης έχουμε το καθεστώς της έντονης διαλείπουσας ροής, κατά την οποία τα κύματα (slugs) έχουν πολύ μικρότερο μήκος και διακρίνονται από ισχυρή ανάδευση υγρής μάζας. Σε αυτή την περίπτωση το ύψος της υγρής στιβάδας είναι μικρότερο και ο μηχανισμός δημιουργίας τέτοιων κυμάτων βασίζεται στη συγχώνευση άλλων μικρότερων.

Τέλος στην περίπτωση που αυξήσουμε την ταχύτητα του αέρα για μια δεδομένη παροχή υγρού, αυτά τα κύματα αρχίζουν να φθίνουν σε μέγεθος, ώσπου στο τέλος παύουν να βουλώνουν τη διατομή του αγωγού. Τότε λέμε ότι έχουμε περάσει στο καθεστώς της ψευδοδιαλείπουσας, η οποία μοιάζει πολύ με τη διαλείπουσα, αλλά μπορεί να την ξεχωρίσει κανείς από το γεγονός ότι τα κύματα τρέχουν με μικρότερη ταχύτητα από αυτήν του αερίου. Επίσης η συχνότητα εμφάνισης τους είναι μεγαλύτερη από αυτή των Slug.

Οι δύο τελευταίοι τύποι ροής μαζί με την δακτυλιοειδή είναι αυτοί που κυριαρχούν, όπως φαίνεται και στο χάρτη, σε μεγάλες παροχές υγρού.

5.2.2. Γωνία $\theta = -0,25^\circ$

Σύστημα νερού – αέρα

Είναι γενικά αποδεκτό ότι στην περίπτωση κατηφορικής ροής η υγρή στιβάδα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα για την ίδια παροχή υγρού απ' ό τι στην οριζόντια, λόγω της δράσης της συνιστώσας της βαρύτητας που έχει την κατεύθυνση της ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ύψος του υγρού να είναι μικρότερο και να απαιτούνται μεγαλύτερες παροχές υγρού για να είναι εφικτή η μετάπτωση σε διαλείπουσα. Έτσι και στην περίπτωση των $-0,25^\circ$ παρατηρείται ότι η περιοχή της διαλείπουσας μετατοπίζεται σε υψηλότερες παροχές της υγρής φάσης όπως φαίνεται και στο συγκεκριμένο χάρτη. Πιο συγκεκριμένα η μετάπτωση ξεκινά για ταχύτητα νερού: $U_{LS} = 0,1$ m/s και αερίου: $U_{GS} = 2,5$ m/s, ενώ όπως προαναφέρθηκε η αντίστοιχη τιμή για την οριζόντια ροή είναι $U_{LS} = 0,0724$ m/s.

Όσον αφορά την περιοχή που καταλαμβάνει στο χάρτη το καθεστώς της λείας διαστρωματωμένης, περιορίζεται σε χαμηλότερες παροχές νερού – αέρα και συγκεκριμένα για ταχύτητες νερού: $U_{LS} > 2$ m/s δεν παρατηρείται ο συγκεκριμένος τύπος ροής. Αυτό είναι λογικό, γιατί όπως είναι ήδη γνωστό η δράση της βαρύτητας προκαλεί κυματισμούς στη διεπιφάνεια ακόμα και με την απουσία αέρα (Barnea et al 1986).

Όσον αφορά τις μεταπτώσεις μεταξύ των υπόλοιπων καθεστώτων δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές.

Σύστημα νερού / βουτανόλης – αέρα

Στην περίπτωση που ως υγρή φάση χρησιμοποιείται διάλυμα νερού – βουτανόλης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν παρατηρήθηκε το καθεστώς λείας διαστρωματωμένης ροής, λόγω του ότι υπήρξε μείωση της επιφανειακής τάσης σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που ισχύει στην περίπτωση του νερού. Η τιμή της διεπιφανειακής τάσης του συγκεκριμένου διαλύματος ισούται με 40 dyn/cm. Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι υπήρξε μια μετατόπιση του ορίου μετάπτωσης των διαστάσεων κυμάτων σε κύματα Kelvin – Helmholtz σε χαμηλότερες παροχές αερίου. Τέλος δεν παρατηρήθηκαν ουσιαστικές αλλαγές στο όριο της μετάπτωσης σε διαλείπουσα σε σχέση με το σύστημα νερού – αέρα, παρά μόνο σε λίγο υψηλότερη ταχύτητα αερίου ($U_{LS}=0,1$ m/s, $U_{GS}=3$ m/s).

5.2.3. Γωνία $\theta = -0,5^\circ$

Με την περαιτέρω αύξηση της γωνίας του αγωγού από το οριζόντιο, παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μετατόπιση του ορίου μετάπτωσης σε διαλείπουσα σε μεγαλύτερες παροχές του νερού. Πιο συγκεκριμένα η μετάπτωση συμβαίνει για ταχύτητες νερού: $U_{LS}=0,15$ m/s και αερίου: $U_{GS}=2,51$ m/s περίπου, ενώ οι αντίστοιχες τιμές που ισχύουν στην περίπτωση των $-0,25^\circ$ είναι: $U_{LS}=0,1$ m/s και $U_{GS}=3$ m/s. Είναι αναμενόμενο εφόσον το ύψος της υγρής στιβάδας είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των $-0,25^\circ$.

Όσον αφορά την μετάπτωση σε διδιάστατα, παρατηρείται μια μικρή μετατόπιση σε μικρότερες ταχύτητες αερίου για ταχύτητα υγρού $U_{LS}=0,004$ m/s.

Τέλος και σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρούνται ουσιαστικές μεταβολές στα όρια των μεταπτώσεων μεταξύ των άλλων καθεστώτων.

5.2.4. Γωνία $\theta = -1^\circ$

Σύστημα νερού – αέρα

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και στην περίπτωση που αυξηθεί και άλλο η κατωφέρεια του αγωγού και συγκεκριμένα όταν η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο γίνει -1° , περιορίζεται ακόμα περισσότερο η περιοχή της διαλείπουσας, όπως φαίνεται και στον συγκεκριμένο χάρτη. Ωστόσο υπάρχει μια διαφοροποίηση. Ενώ στην περίπτωση χαμηλών παροχών αερίου παρατηρείται ότι το καθεστώς των διδιάστατων κυμάτων επεκτείνεται σε υψηλότερες παροχές υγρού ($U_{LS}=0,25$ m/sec), στις υψηλές ταχύτητες αερίου και πιο συγκεκριμένα για $U_{GS}=3,4$ m/s περίπου εμφανίζεται και πάλι το καθεστώς της διαλείπουσας για την ίδια παροχή υγρού ($U_{LS}=0,15$ m/s) που ισχύει και στην περίπτωση των $-0,5^\circ$. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι σ' αυτή την περίπτωση η αποσταθεροποίηση που επιφέρει η αέρια ροή είναι ισχυρότερη της σταθεροποιητικής επίδρασης της βαρύτητας.

Τέλος όσον αφορά το καθεστώς της λείας διαστρωματωμένης, εξαφανίζεται πλήρως στην περίπτωση κατωφέρειας -1° .

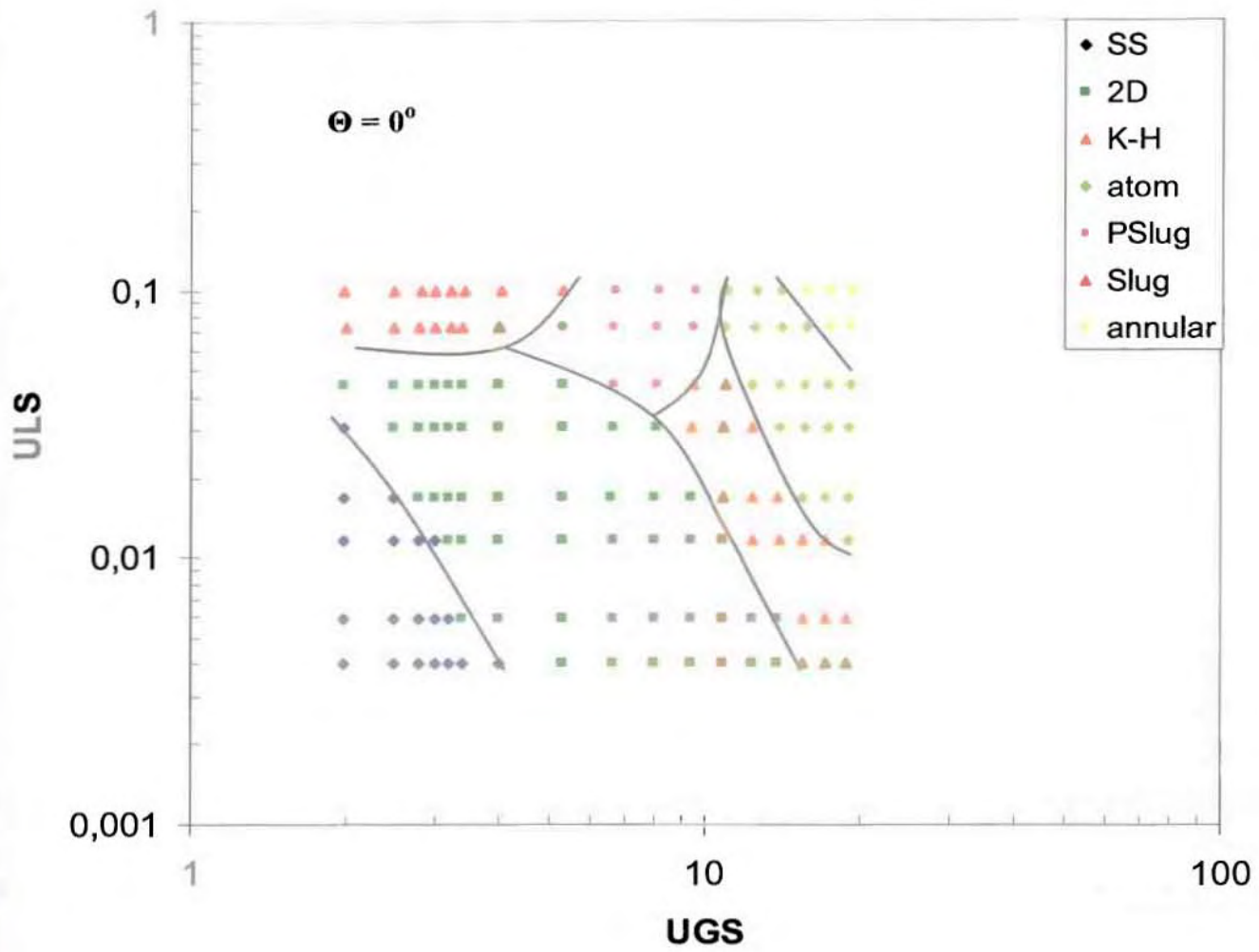
Σύστημα νερού / βουτανόλης – αέρα

Τέλος και στην περίπτωση που ως υγρή φάση χρησιμοποιήσουμε διάλυμα βουτανόλης, με κατωφέρεια αγωγού -1° παρατηρείται μια μετατόπιση των ορίων

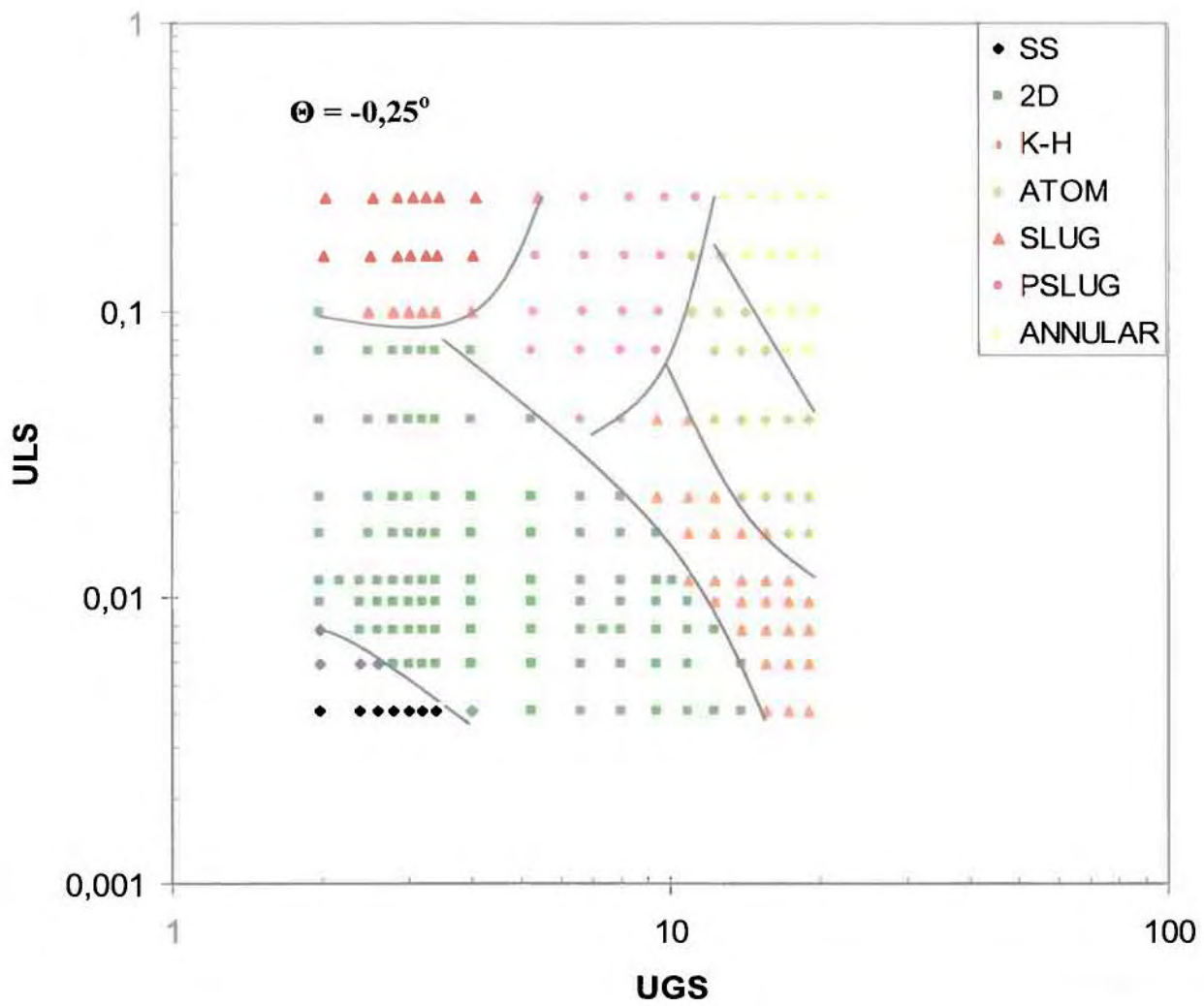
μετάπτωσης σε διαλείπουσα σε μεγαλύτερους ρυθμούς υγρής ροής. Πιο συγκεκριμένα η μετάπτωση συμβαίνει για τιμή φαινομενικής ταχύτητας: $U_{LS}=0,15$ m/s. Η αντίστοιχη τιμή για κατωφέρεια αγωγού $-0,25^\circ$ είναι $U_{LS}=0,1$ m/s. Επίσης διακρίνουμε μια ελαφριά μετατόπιση των ορίων μετάπτωσης από το καθεστώς των διδιάστατων κυμάτων σε κύματα Kelvin - Helmholtz σε μεγαλύτερες ταχύτητες της αέριας φάσης απ' ότι στην περίπτωση των $-0,25^\circ$, πράγμα που υποδηλώνει ότι η κατωφερής κλίση επηρεάζει και τα όρια των άλλων περιοχών μετάπτωσης. Ωστόσο όπως ειπώθηκε και προηγουμένως τη πιο σημαντική μεταβολή σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις υφίσταται το όριο μετάπτωσης από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι χάρτες των καθεστώτων ροής όλων των παραπάνω περιπτώσεων και τέλος παρουσιάζονται φωτογραφίες από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα παρχών.

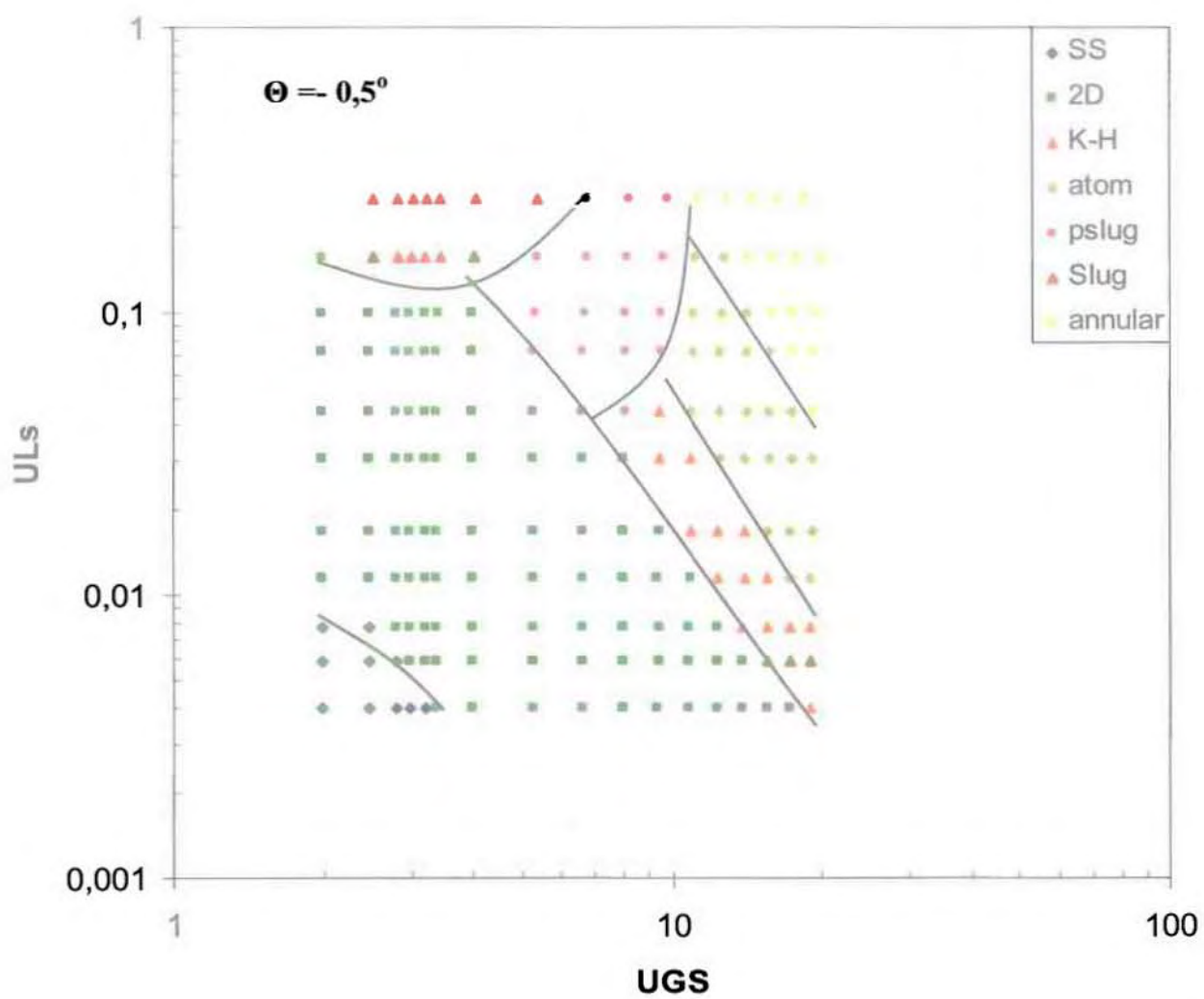
Σύστημα νερού- αέρα



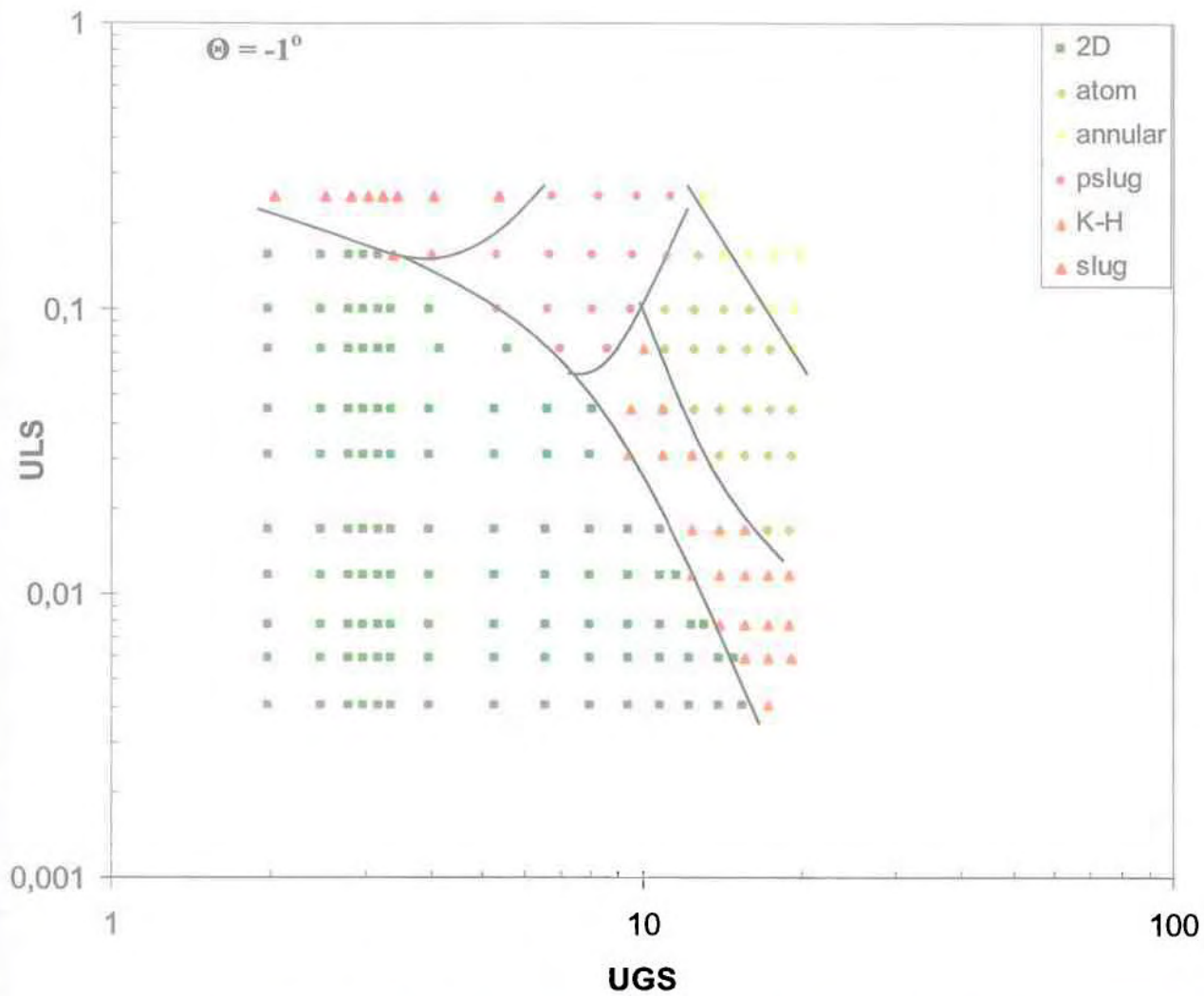
Σχήμα 5.1. Χάρτης Καθεστώτων Ροής για Οριζόντιο Αγωγό σε Σύστημα νερού - αέρα



Σχήμα 5.2. Χάρτης Καθεστώτων Ροής για Αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και κλίσης $\theta = -0,25^\circ$ σε Σύστημα νερού - αέρα

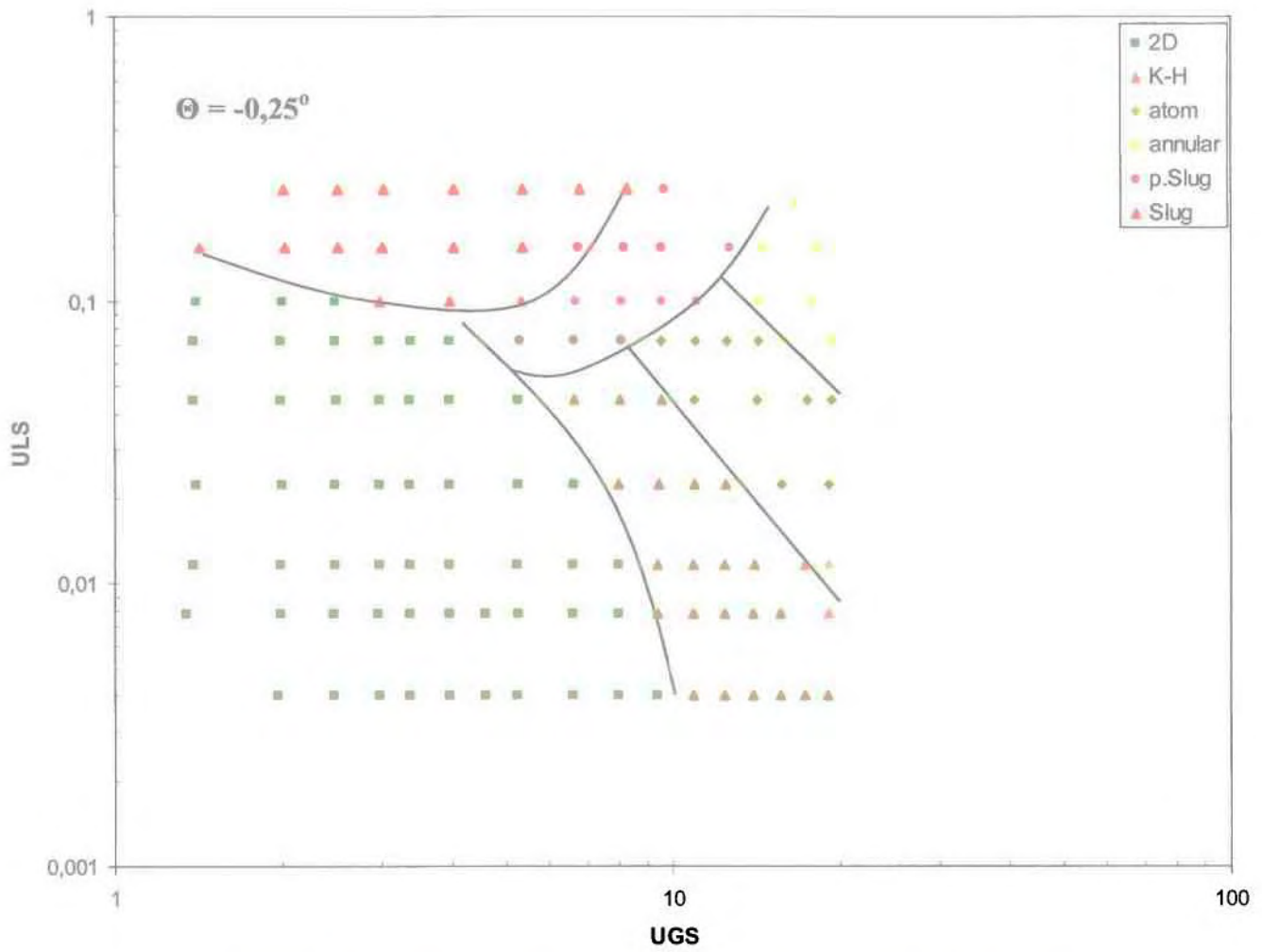


Σχήμα 5.3. Χάρτης Καθεστώτων Ροής για Αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και κλίσης $\theta = -0,5^\circ$ σε Σύστημα νερού - αέρα

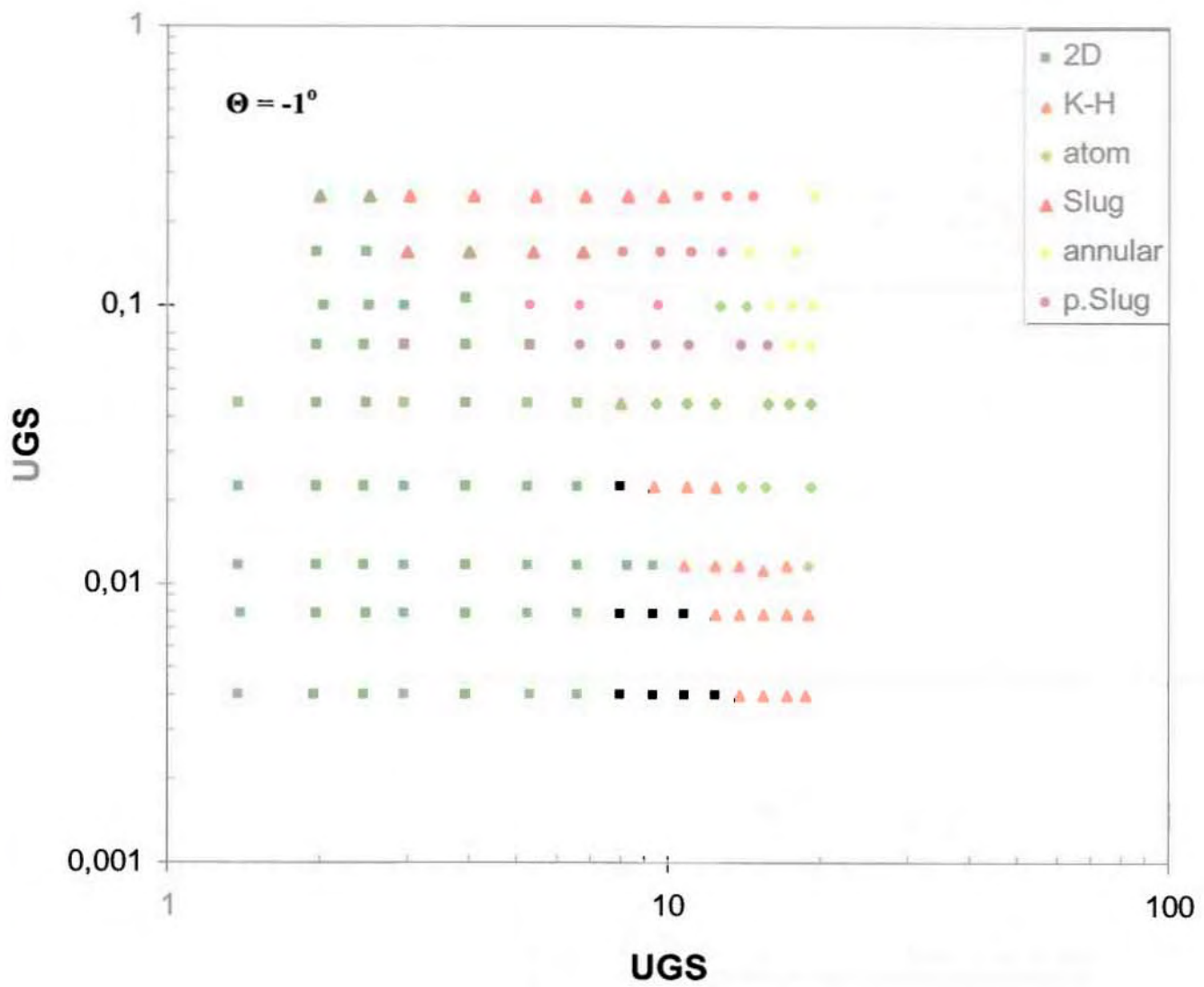


Σχήμα 5.4. Χάρτης Καθεστώτων Ροής για Αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και κλίσης $\theta = -1^\circ$ σε Σύστημα νερού - αέρα

.Σύστημα νερού / βουτανόλης – αέρα



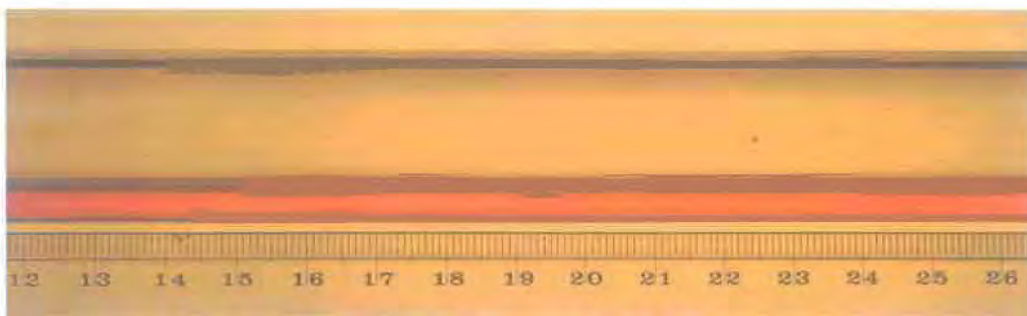
Σχήμα 5.5. Χάρτης Καθεστώτων Ροής για Αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και κλίσης $\theta = -0,25^\circ$ σε Σύστημα νερού / βουτανόλης – αέρα



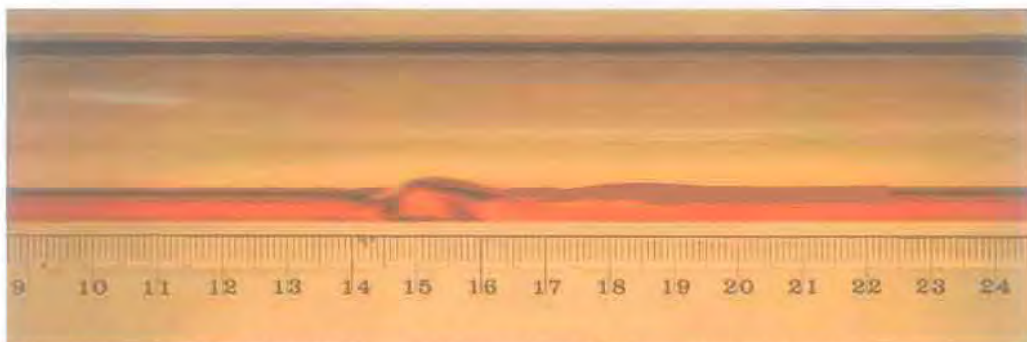
Σχήμα 5.6. Χάρτης Καθεστώτων Ροής για Αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και κλίσης $\theta = -1^\circ$ σε Σύστημα νερού / βουτανόλης - αέρα

5.3 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για κλίση του αγωγού $-0,25^\circ$

Όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7 για χαμηλή φαινομενική ταχύτητα νερού και αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου έχουμε την εξής εξέλιξη στο καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής. Αρχικά η διεπιφάνεια είναι λεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7α. Με αύξηση της ταχύτητας του αερίου κάνουν την εμφάνιση τους διδιάστατα κύματα. Σε ακόμα μεγαλύτερες παροχές αερίου έχουμε την εμφάνιση των κυμάτων Kelvin – Helmholtz.



(α) $U_{LS}=0,008$ m/s και $U_{GS}=2$ m/s **Λεία διαστρωματωμένη ροή**



(β) $U_{LS}=0,008$ m/s και $U_{GS}=12,34$ m/s **διδιάστατα κύματα (2D)**



(γ) $U_{LS}=0,008$ m/s και $U_{GS}=13,92$ m/s **κύματα Kelvin – Helmholtz**

Σχήμα 5.7: Μορφές κυμάτων στο καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής

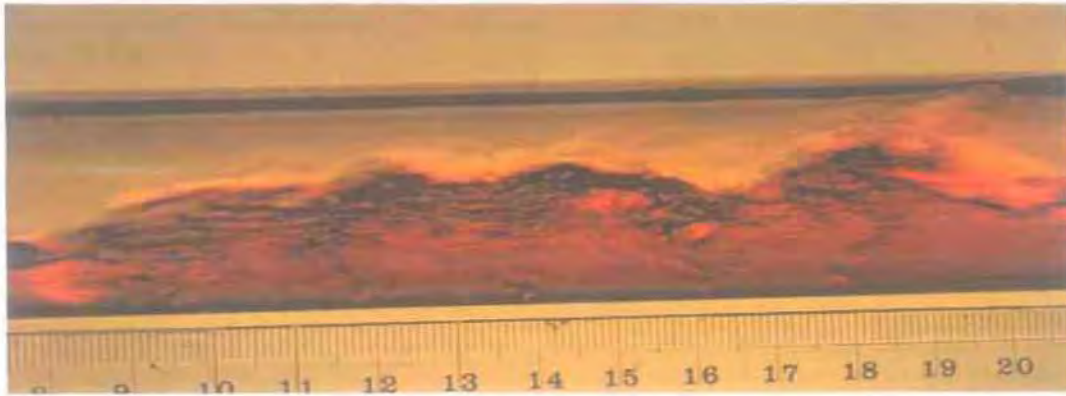
Στην παρακάτω φωτογραφία εικονίζεται το φαινόμενο της εκνέφωσης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την εναπόθεση σταγονιδίων πάνω στα τοιχώματα του αγωγού και σχηματίζεται σε υψηλότερες ταχύτητες της αέριας φάσης από αυτές των Kelvin – Helmholtz



(α) $U_{LS}=0,022$ m/s και $U_{GS}=15,5$ m/s **εκνέφωση**

Σχήμα 5.8: Καθεστώς εκνέφωσης (atomization)

Στις παρακάτω φωτογραφίες εικονίζονται τα καθεστώτα της ψευδοδιαλείπουσας και της δακτυλιοειδούς ροής που παρατηρούνται σε μεγαλύτερες τιμές της φαινομενικής ταχύτητας του νερού. Στη φωτογραφία (α) διακρίνουμε ότι το κύμα δε φράσει τη διατομή του αγωγού, ενώ στη φωτογραφία (β) βλέπουμε τη συνεχή υγρή στιβάδα να έχει καλύψει την περιφέρεια του αγωγού, έχοντας όμως μεγαλύτερο πάχος στον πυθμένα λόγω της δράσης της βαρύτητας.



(α) $U_{LS}=0,072$ m/s και $U_{GS}=5,3$ m/s **Ψευδοδιαλείπουσα ροή**



(β) $U_{LS}=0,072$ m/s και $U_{GS}=18,9$ m/s **Δακτυλιοειδής ροή**

Σχήμα 5.9: Φωτογραφίες Ψευδοδιαλείπουσας και δακτυλιοειδούς ροής

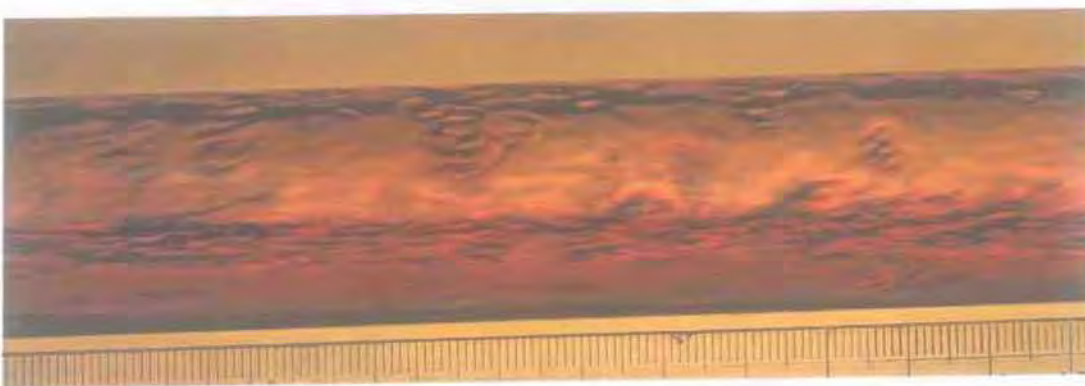
Στις παρακάτω φωτογραφίες διακρίνεται το καθεστώς της ήπιας διαλείπουσας ροής «plug» που κάνει την εμφάνιση του στις υψηλές παροχές νερού και στις χαμηλές παροχές του αερίου. Πιο συγκεκριμένα διακρίνεται η όλη πορεία της υγρής μάζας που φράσει την διατομή του αγωγού.



(α) $U_{LS}=0,1$ m/s και $U_{GS}=2,5$ m/s **Μπροστινό τμήμα του «plug»**



(β) $U_{LS}=0,1$ m/s και $U_{GS}=2,5$ m/s **Η υγρή μάζα (plug) που φράσει την διατομή**



(γ) $U_{LS}=0,1$ m/s και $U_{GS}=2,5$ m/s **Μετά το πέρασμα του «plug»**

Σχήμα 5.10 Η πορεία της υγρής μάζας (plug)

Στην παρακάτω φωτογραφία διακρίνεται το καθεστώς της έντονης διαλείπουσας ροής, το οποίο χαρακτηρίζεται από έντονη ανάδευση υγρής μάζας και εμφανίζεται σε μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου.



$U_{LS}=0,1 \text{ m/s}$ και $U_{GS}=4 \text{ m/s}$ **καθεστώς έντονης διαλείπουσας ροής**

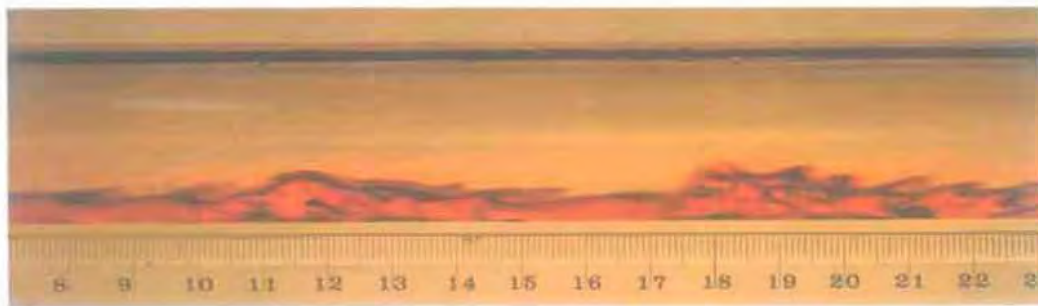
Σχήμα 5.11 Φωτογραφία ενός «slug»

5.4 Φωτογραφίες καθεστώτων ροής για κλίση του αγωγού -1°

Στις παρακάτω φωτογραφίες διακρίνουμε την εξέλιξη της ροής, που αντιστοιχεί σε φαινομενική ταχύτητα νερού $U_{LS}=0,03$ m/s με τη σταδιακή αύξηση της ταχύτητας της αέριας φάσης.



(α) $U_{LS}=0,03$ m/s και $U_{GS}=6,6$ m/s **διδιάστατα κύματα μεγάλου μήκους (2D)**



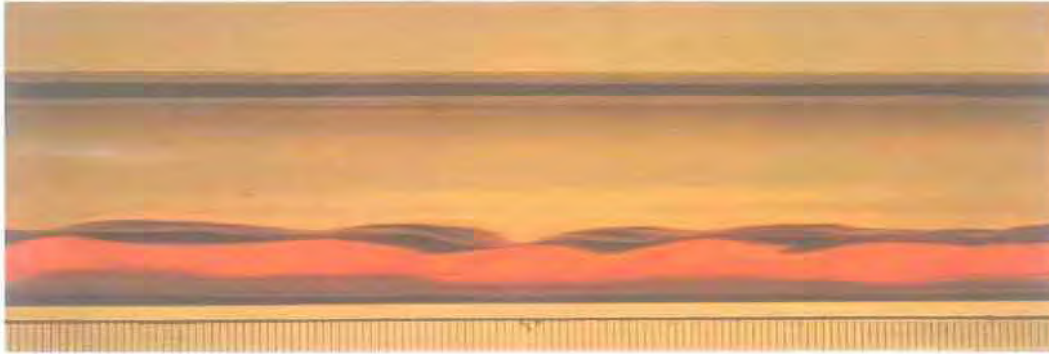
(β) $U_{LS}=0,03$ m/s και $U_{GS}=11$ m/s **κύματα Kelvin - Helmholtz**



(γ) $U_{LS}=0,03$ m/s και $U_{GS}=14$ m/s **εκνέφωση (atomization)**

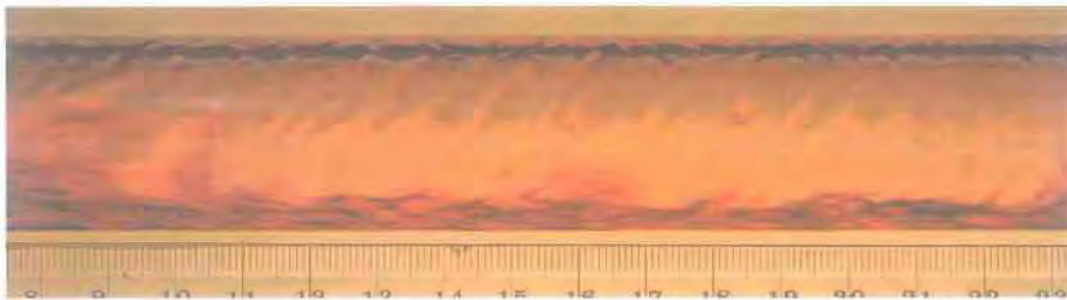
Σχήμα 5.11 Η εξέλιξη της μορφής των κυμάτων με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα

Στην παρακάτω φωτογραφία διακρίνουμε διδιάστατα κύματα μεγάλου μήκους που αντιστοιχούν σε ταχύτητα νερού $U_{LS} = 0,1 \text{ m/s}$ και αερίου $U_{GS} = 3 \text{ m/s}$. Στις αντίστοιχες τιμές για την γωνία των $-0,25^\circ$ είχαμε το καθεστώς της διαλείπουσας.



Σχήμα 5.12 Καθεστώς διδιάστατων κυμάτων για τιμές ταχυτήτων νερού και αερίου αντίστοιχα $U_{LS} = 0,1 \text{ m/s}$ $U_{GS} = 3 \text{ m/s}$

Τέλος παρουσιάζεται μια φωτογραφία στην οποία διακρίνεται το καθεστώς της δακτυλιοειδούς ροής για την ίδια τιμή της ταχύτητας νερού και αερίου: $U_{GS} = 19,5 \text{ m/s}$ $U_{LS} = 0,1 \text{ m/s}$



Σχήμα 5.13 Καθεστώς δακτυλιοειδούς ροής για τιμές ταχυτήτων νερού και αερίου αντίστοιχα $U_{LS} = 0,1 \text{ m/s}$ $U_{GS} = 19,5 \text{ m/s}$

Κεφάλαιο 6^ο

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η συγκεκριμένη εργασία έχει σκοπό να εξετάσει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η βαρύτητα το καθεστώς της διαστρωματωμένης ροής για κατωφερή κλίση του αγωγού.

Συνολικά μπορούν να εξαχθούν δύο κύρια συμπεράσματα. Το πρώτο και κυριότερο είναι όταν αυξάνεται η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με το οριζόντιο επίπεδο τα όρια της μετάπτωσης από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα μετατοπίζονται σε υψηλότερους ρυθμούς της υγρής φάσης. Αυτό είναι λογικό καθώς στην περίπτωση κατωφερούς αγωγού η βαρύτητα έχει την κατεύθυνση της ροής με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φαινομενική ταχύτητα του υγρού και να μειώνεται το πάχος της υγρής στιβάδας. Επομένως απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα της υγρής φάσης για να επιτευχθεί το πάχος της υγρής στιβάδας που απαιτείται για τη δημιουργία των «slugs»

Δεύτερον όσον αφορά τα όρια μετάπτωσης από λεία διαστρωματωμένη ροή σε διδιάστατα κύματα, μετατοπίζονται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Στην προκειμένη περίπτωση η φυσική αστάθεια της διεπιφανείας προκαλείται λόγω της δράσης της βαρύτητας ακόμα και με την απουσία της αέριας ροής. Έτσι η έναρξη των κυμάτων εξαρτάται από την ταχύτητα του υγρού. Ωστόσο το καθεστώς της λείας διαστρωματωμένης ροής δεν παρατηρήθηκε στην περίπτωση που ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε το διάλυμα νερού – βουτανόλης. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μείωση της διεπιφανειακής τάσης που ως γνωστόν παίζει έναν σταθεροποιητικό ρόλο στη δημιουργία κυμάτων.

Αναφορικά με τα όρια των μεταπτώσεων των άλλων καθεστώτων επηρεάζονται πολύ λιγότερο από τη βαρύτητα. Βέβαια περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το καθεστώς της διαλείπουσας ροής, η οποία είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη στις διάφορες εφαρμογές. Γι' αυτό το σκοπό όταν σχεδιάζεται κάποια εγκατάσταση θα πρέπει να εξετάζονται πολύ προσεχτικά οι διάφορες παράμετροι για την αποφυγή της. Και όπως προκύπτει από την παραπάνω μελέτη μια από αυτές και πολύ σημαντική είναι η κλίση του αγωγού.

Θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να εξεταστεί η επίδραση της κλίσης σε συνδυασμό με τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων (ιξώδες, πυκνότητα). Επίσης θα

είχε έντονο ενδιαφέρον η μελέτη της επίδρασης της κλίσης για γωνίες μεγαλύτερες της 1° .

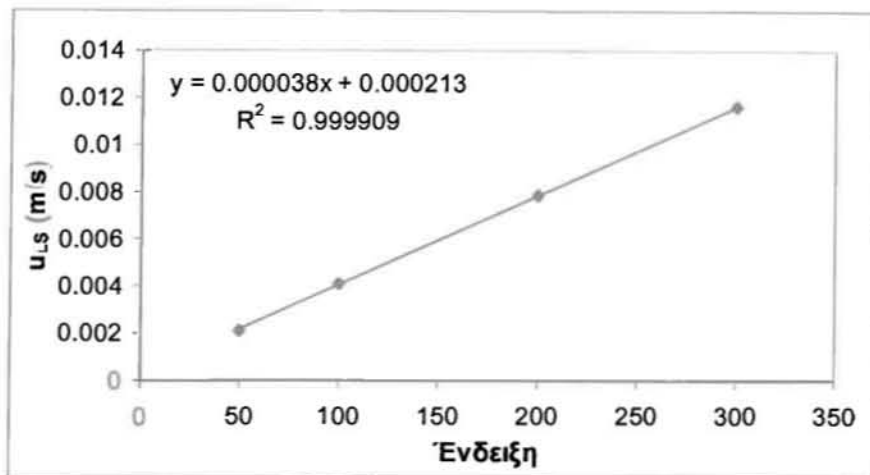
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andreussi, P. and Persen, L.N. Stratified Gas-Liquid Flow in Downwardly Inclined Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 13, pp 565-575, 1987.
- Andritsos, N. and Hanratty, T.J. Interfacial Instabilities for Horizontal Gas-Liquid Flows in Pipelines. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 13, pp 583-603, 1987.
- Andritsos, N. Effect of pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow' PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, 1986
- Andritsos, N., Williams, L. and Hanratty, T.J. Effect of Liquid Viscosity on the Stratified-Slug Transition in Horizontal Pipe Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 15, pp 877-892, 1989.
- Baker, O. Simultaneous Flow of Oil and Gas. *Oil and Gas Journal*, Vol 53, pp 185-195, 1954.
- Barnea, D. 'On the Effect of Viscosity on Stability of Stratified Gas-Liquid Flow- Application to Flow Pattern Transition at Various Pipe Inclination. *Chem. Engineering Science*, Vol 46, pp 2123-2131, 1991
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes, Comparison of Experimental Data with Theory. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 6, pp 217-2525, 1980.
- Grolman, E., Commandeur, N.C.J., de Baat, E.C. and Fortuin, J.M.H. Wavy-to-Slug Flow Transition in Slightly Inclined Gas-Liquid Pipe Flow. *AIChE Journal*, Vol 42, pp 901-909, 1996.
- Jayawardena, S.S., Balakotaiah, V. and Witte, L. Flow Pattern Transition Maps for Microgravity Two-Phase Flows. *AIChE Journal*, Vol 43, pp 1637-1640, 1997
- Jeffreys, H. On the Formation of Water Waves by Wind. *Proc. Royal Soc. A.*, 107, pp 189-206, 1925
- Kokal, S.L. and Stanislav, J.F. An Experimental Study of Two-Phase Flow Patterns in Slightly Inclined Pipes-II. Liquid Holdup and Pressure Drop. *Chem. Eng. Science*, Vol 44, pp 681-693, 1989
- Lin, P.Y. and Hanratty, T.J. Prediction of the Initiation of Slugs with Linear Stability Theory. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 12, pp 79-98, 1986
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K.A. Flow Pattern Map for Gas-Liquid in Horizontal Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 1, pp 537-553, 1974.
- Taitel, Y. and Dukler, A.E. A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal*, Vol 22, pp 47-55, 1976
- Taitel, Y. and Dukler, A.E. Effect of Pipe Length on the Transition Boundaries for High Viscosity Liquids. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 13, pp 577-581, 1987
- Wallis, G.B. and Dobson, J.E. The Onset of Slugging in Horizontal Stratified Air-Water Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 1, pp 173-193, 1973
- Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T. Effects of Fluids Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 5, pp 437-462, 1979
- Woods, B.D., Hurlburt, E.T. and Hanratty, T.J. Mechanism of Slug Formation in Downwardly Inclined Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp 997-998, 2000.

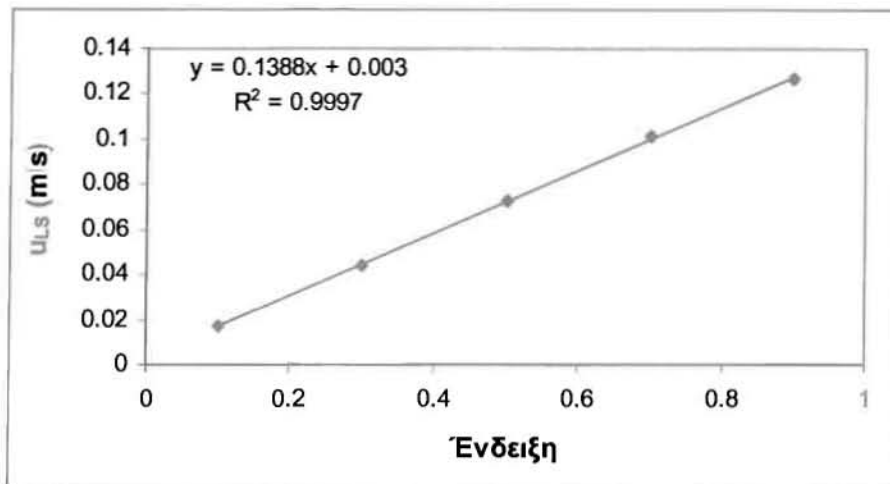
E.T. Hurlburt & T.J. Hanratty, Prediction of the transition from stratified to slug and plugflow for long pipes.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

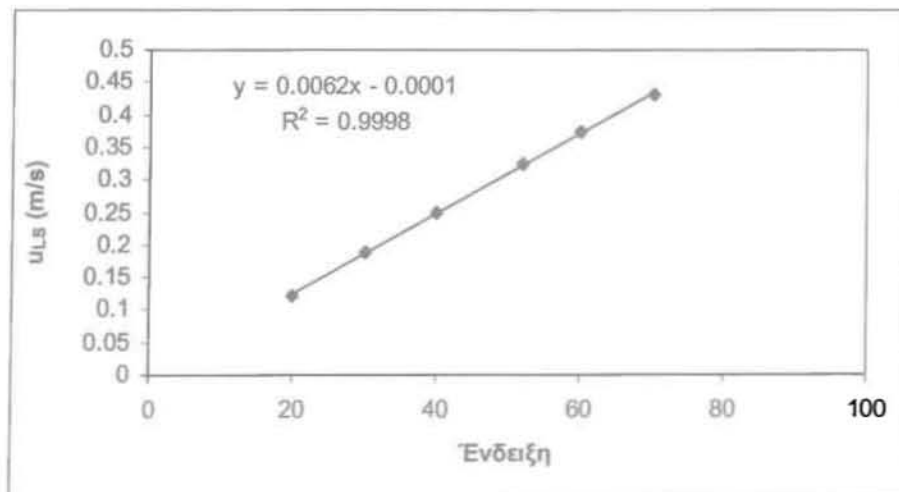
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΥΓΡΟΥ



Σχήμα Π.1 Καμπύλη βαθμονόμησης ροομέτρου υγρής φάσης μικρών παροχών

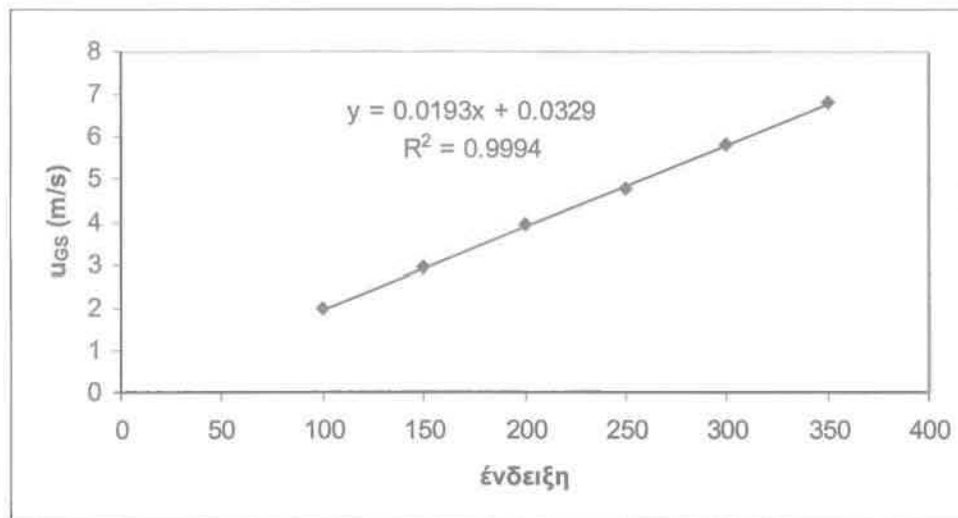


Σχήμα Π.2 Καμπύλη βαθμονόμησης ροομέτρου υγρής φάσης μεσαίων παροχών

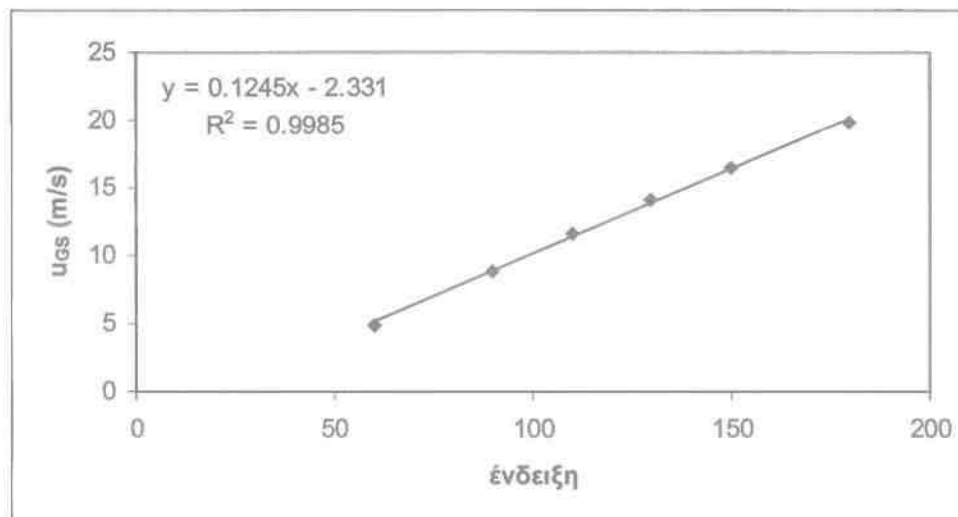


Σχήμα Π.3 Καμπύλη βαθμονόμησης ροομέτρου υγρής φάσης μεγάλων παροχών

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΡΟΟΜΕΤΡΩΝ ΑΕΡΑ



Σχήμα Π.4 Καμπύλη βαθμονόμησης ροομέτρου αέριας φάσης μικρών παροχών



Σχήμα Π.5 Καμπύλη βαθμονόμησης ροομέτρου αέριας φάσης μεγάλων παροχών