

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ  
ΑΕΡΑ-ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΓΩΓΟ**

υπό

**ΡΟΥΚΑ ΛΑΜΠΡΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π.Θ., 2008

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2010



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

Αριθ. Εισ.: 9035/1  
Ημερ. Εισ.: 01-11-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
620.106 4  
ΡΟΥ

© 2010 Ρουκάς Λάμπρος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής 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 (Επιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Ανδρίτσο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Βασίλειο Μποντόζογλου, Μιχαήλ Βλαχογιάννη, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Οφείλω επίσης ευχαριστίες στη Χριστίνα για τη βοήθεια που μου έδωσε στη λειτουργία της πειραματικής διάταξης.

Πάνω από όλα θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Θεοφανή και Γιώργο για την αγάπη και τη συνεχή υποστήριξη που μου προσέφεραν. Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου.

Λάμπρος Ρουκάς

## Περίληψη

Η διφασική ροή υγρού-αερίου, δηλαδή η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων ενός ή περισσότερων ρευστών σε οριζόντιους ή σχεδόν οριζόντιους αγωγούς, απαντάται σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως συμπυκνωτές, εξατμιστήρες, μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου και γεωθερμικών ρευστών. Η πρόβλεψη του καθεστώτος της διαλείπουσας ροής (slug flow) που παρατηρείται κατά τη διφασική ροή είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας καθώς χαρακτηρίζεται από απότομες αυξήσεις της πίεσης, γεγονός ανεπιθύμητο στις περισσότερες εφαρμογές.

Τα τελευταία 50 χρόνια έχει μελετηθεί συστηματικά η διφασική ροή υγρού-αερίου σε αγωγούς. Ωστόσο οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες εστιάζονται στο σύστημα ροής νερού-αέρα σε οριζόντιους ή κατακόρυφους αγωγούς. Σχετικά ολιγάριθμες είναι οι μελέτες που διερευνούν τη διφασική ροή με τη χρήση άλλων ρευστών και την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις διάφορες μεταπτώσεις.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση των περιοχών ροής με την κατασκευή χαρτών περιοχών ροής διφασικών συστημάτων αέρα-υγρού. Οι παρατηρήσεις και οι μετρήσεις γίνονται σε οριζόντιο αγωγό μήκους 12,75 m και διαμέτρου 0,024 m. Η αναγνώριση των περιοχών ροής γίνεται με οπτική παρατήρηση.

Τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είναι νερό ( $\sigma=72$  dyn/cm), μίγμα νερού-ισοπροπανόλης 5% ( $\sigma=50$  dyn/cm) και μίγμα νερού-SDS 1CMC ( $\sigma=22$  dyn/cm). Οι εν λόγω ουσίες (ισοπροπανόλη, SDS) χρησιμοποιήθηκαν λόγω της ιδιοτητάς τους να μειώνουν την επιφανειακή τάση.

Αρχικά γίνεται μία αναφορά σε παλαιότερες μελέτες και θεωρητικά μοντέλα ερευνητών που αφορούν τη διφασική ροή γενικότερα αλλά και σε μελέτες που αφορούν την επίδραση της επιφανειακής τάσης στους χάρτες των καθεστώτων ροής.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μείωση της επιφανειακής τάσης οδηγεί στη μετάπτωση της ροής από το ένα καθεστώς ροής σε άλλο σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες αερίου, απάλειψη κάποιων καθεστώτων ροής και αύξηση του εύρους κάποιων άλλων.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Καθεστώτα ροής σε κατακόρυφους αγωγούς.....	3
2.2 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς.....	5
2.3 Προσδιορισμός των περιοχών ροής.....	9
2.4 Χάρτες καθεστώτων ροής και όρια μεταπτώσεων.....	11
2.5 Επιφανειακή τάση.....	18
2.6 Πειράματα με χρήση SDS.....	20
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....</b>	<b>22</b>
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>31</b>
4.1 Διάγραμμα καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-νερού.....	31
4.2 Διάγραμμα καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-ισοπροπανόλης.....	33
4.3 Διάγραμμα καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα- SDS.....	38
4.4 Σύγκριση διαγραμμάτων καθεστώτων ροής μεταξύ τους.....	43
4.5 Σύγκριση διαγραμμάτων καθεστώτων ροής με παλαιότερη εργασία.....	44
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>47</b>
5.1 Συμπεράσματα.....	47
5.2 Προτάσεις.....	48
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>49</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>53</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε κατακόρυφο αγωγό για ροή προς τα επάνω.....	5
Σχήμα 2-2 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό.....	7
Σχήμα 2-3 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας (Jayawardena et al., 1997).....	9
Σχήμα 2-4 Χάρτης καθεστώτων ροής σύμφωνα με τον Baker (1954).....	12
Σχήμα 2-5 Χάρτης καθεστώτων ροής όπως προτάθηκε από τους Mandhane et al. (1974).....	15
Σχήμα 3-1 Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.....	23
Σχήμα 3-2 Σχηματική απεικόνιση του συντακτικού τύπου της ισοπροπανόλης.....	26
Σχήμα 3-3 Σχηματική απεικόνιση του συντακτικού τύπου της ισοπροπανόλης.....	27
Σχήμα 3-4 Σχηματική απεικόνιση του συντακτικού τύπου του SDS.....	29
Σχήμα 4-1 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-νερού.....	31
Σχήμα 4-2 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-ισοπροπανόλης.....	33
Σχήμα 4-3 Αποτύπωμα κυμάτων 2-D ( $U_g=3,8929$ m/s, $U_l=0,0252$ m/s).....	35
Σχήμα 4-4 Αποτύπωμα κυμάτων K-H ( $U_g=13$ m/s, $U_l=0,07623$ m/s).....	35
Σχήμα 4-5 Αποτύπωμα κυμάτων slug ( $U_g=2,9279$ m/s, $U_l=0,50192$ m/s).....	36
Σχήμα 4-6 Φωτογραφική απεικόνιση λείας διαστρωματωμένης ροής (smooth).....	36
Σχήμα 4-7 Φωτογραφική απεικόνιση διαστρωματωμένης ροής με δισδιάστατα κύματα (2-D).....	36
Σχήμα 4-8 Φωτογραφική απεικόνιση διαστρωματωμένης ροής με κύματα τύπου K-H.....	37
Σχήμα 4-9 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-SDS.....	38
Σχήμα 4-10 Αποτύπωμα κυμάτων 2-D ( $U_g= 12.609$ m/s, $U_l= 0.007623$ m/s).....	40
Σχήμα 4-11 Αποτύπωμα κυμάτων slug ( $U_g= 3.1209$ m/s, $U_l= 0.050192$ m/s).....	40
Σχήμα 4-12 Αποτύπωμα κυμάτων pslug ( $U_g= 5.139$ m/s, $U_l= 0.10016$ m/s).....	41
Σχήμα 4-13 Φωτογραφική απεικόνιση λείας διαστρωματωμένης ροής (smooth).....	41
Σχήμα 4-14 Φωτογραφική απεικόνιση ροής με εκνέφωση (atomization).....	41
Σχήμα 4-15 Φωτογραφική απεικόνιση ενός slug.....	42



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Σκοπός της εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της διαφασικής ροής υγρού-αερίου και πιο συγκεκριμένα η επίδραση της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση των περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό.

Η διαφασική ροή αερίου-υγρού, δηλαδή η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων σε ένα αγωγό, οριζόντιο, κατακόρυφο ή κεκλιμένο αποτελεί μία από τις συνηθέστερες μορφές ροής που απαντώνται στη βιομηχανία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι διεργασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης, η απορρόφηση, η απόσταξη, η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου καθώς και σε συσκευές μεταφοράς θερμότητας με αλλαγή φάσης.

Ένα σημαντικό στοιχείο που βοηθά στην κατανόηση της ροής και την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της διαφασικής ροής υγρού-αερίου μέσα σε ένα αγωγό είναι ο καθορισμός των καθεστώτων ροής που εμφανίζονται στη ροή. Στους χάρτες περιοχών ροής (flow map regimes, flow map patterns) απεικονίζονται οι διάφορες μορφές της διεπιφάνειας των δύο φάσεων στη διαφασική ροή μέσα σε αγωγούς.

Το καθεστώς ροής που θα προκύψει εξαρτάται από παράγοντες όπως: οι συνθήκες παροχής του υγρού και του αερίου, η πίεση, η μεταφορά θερμότητας, οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών (πυκνότητα, ιξώδες, επιφανειακή τάση) και η γεωμετρία του αγωγού (μορφή της διατομής, κλίση, διάμετρος, τραχύτητα).

Το πιο συνηθισμένο σύστημα που χρησιμοποιείται κατά τις πειραματικές μελέτες είναι το σύστημα αέρα-νερού. Λίγες σχετικά είναι οι εργασίες που μελετάνε την επίδραση της επιφανειακής τάσης και ακόμα λιγότερες η μελέτη να γίνεται σε οριζόντιο αγωγό. Παρουσιάζει ωστόσο ενδιαφέρον η μελέτη άλλων ουσιών ως υγρό που μειώνουν την επιφανειακή τάση καθώς και το πως σχηματίζονται τα καθεστώτα ροής στις περιπτώσεις αυτές.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να γίνει μία πειραματική προσπάθεια μελέτης της επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση των περιοχών της διαφασικής ροής στον οριζόντιο αγωγό του εργαστηρίου. Αυτό γίνεται με τη χρήση διαλυμάτων, με ουσίες που μειώνουν την τιμή της επιφανειακής τάσης σε σχέση με αυτή του νερού. Οι ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι η ισοπροπανόλη και το SDS.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται οι ορισμοί περιοχών ροής και περιγράφονται οι προτεινόμενοι χάρτες περιοχών ροής. Γίνεται η ερμηνεία της επιφανειακής τάσης που μελετάμε. Παραθέτονται αναλυτικές πληροφορίες για τις ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία ως υγρά διαλύματα. Γίνεται τέλος αναφορά σε παλαιότερες μελέτες όπου μελετήθηκε η επίδραση της επιφανειακής τάσης στη διφασική ροή.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και η διαδικασία των μετρήσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο μεταξύ τους όσο και με παλαιότερες μελέτες παρόμοιου αντικειμένου καθώς και σχολιασμός αυτών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική προσπάθεια σε αυτή τη θεματολογία.

Στη βιβλιογραφία παρατίθενται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές που φάνηκαν πολύτιμες για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας

Στο παράρτημα τέλος παρατίθενται χρήσιμα στοιχεία όπως πίνακες και διαγράμματα, αποτελέσματα βαθμονόμησης των ροόμετρων του αέρα και των υγρών, μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων των υγρών καθώς και βιβλιογραφικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην πορεία της εργασίας αυτής.

## **2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η διφασική ροή υγρού-αερίου χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως συμπυκνωτές, εξατμιστήρες, μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου και γεωθερμικών ρευστών. Η πρόβλεψη του καθεστώτος της διαλείπουσας ροής (slug flow) που παρατηρείται κατά τη διφασική ροή είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας καθώς χαρακτηρίζεται από απότομες αυξήσεις της πίεσης γεγονός ανεπιθύμητο στις περισσότερες εφαρμογές.

Όπως έχει ήδη τονιστεί, κατά την ταυτόχρονη ροή υγρού-αερίου σε αγωγό κυκλικής διατομής σπουδαίο ρόλο παίζει η πρόβλεψη του καθεστώτος ροής, καθώς ο καθορισμός του καθεστώτος είναι απαραίτητος προκειμένου να γίνει ακριβέστερος ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της ροής. Η μεταφορά ενέργειας, μάζας και ορμής ανάμεσα στις δύο φάσεις εξαρτάται άμεσα από το εμβαδόν της διεπιφάνειας ανά μονάδα όγκου και κατά συνέπεια από το καθεστώς ροής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ροή, η οποία χαρακτηρίζεται από δραματική αύξηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος του αγωγού.

### **2.1 Καθεστώτα ροής σε κατακόρυφους αγωγούς**

Λόγω της αναφοράς παρακάτω σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε κατακόρυφο αγωγό κρίνεται σκόπιμη η αναφορά για τα καθεστώτα ροής σε κατακόρυφους αγωγούς.

Για κατακόρυφη ροή προς τα πάνω οι Taitel et al. (1980) περιέγραψαν τους παρακάτω τύπους διφασικής ροής, οι οποίοι παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2-1.

#### *Ροή με Φυσαλίδες (Bubble Flow)*

Κατά τη διφασική ροή με φυσαλίδες η υγρή φάση είναι συνεχής με την αέρια διασπαρμένη με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Παρατηρείται σε μικρή σχετικά ογκομετρική παροχή αερίου με πλήρη ανάμιξη της αέριας στην υγρή φάση και για διάμετρο αγωγού μεγαλύτερη των περίπου 5 cm. Σε μεγαλύτερες παροχές υγρού αναφέρεται ως Ροή με Διασπαρμένες Φυσαλίδες (Bubbly Dispersed Flow), αν και η διαφοροποίηση των δύο υποκαθεστώτων είναι συνήθως δύσκολη.

### *Διαλείπουσα Ροή (Intermittent, «Slug» or «Plug» Flow)*

Κύριο χαρακτηριστικό της διαλείπουσας ροής είναι οι αξονο-συμμετρικές μεγάλες φυσαλίδες αερίου, γνωστές ως φυσαλίδες Taylor (Taylor Bubble), που έχουν τη μορφή βλήματος. Η διάμετρός τους πλησιάζει τη διάμετρο του αγωγού με ομοιόμορφη ανοδική κίνηση. Ανάμεσα στα τοιχώματα του αγωγού και στις φυσαλίδες Taylor το υγρό ρέει προς τα κάτω με μορφή λεπτής στιβάδας. Μεταξύ των φυσαλίδων Taylor υπάρχει συνεχής υγρή φάση με διασπαρμένη την αέρια σε μικρές φυσαλίδες. Αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου ο λόγος του μήκους της φυσαλίδας Taylor ως προς το μήκος της υγρής φάσης μειώνεται και η ροή μεταπίπτει στη λεγόμενη ανάμεικτη ροή.

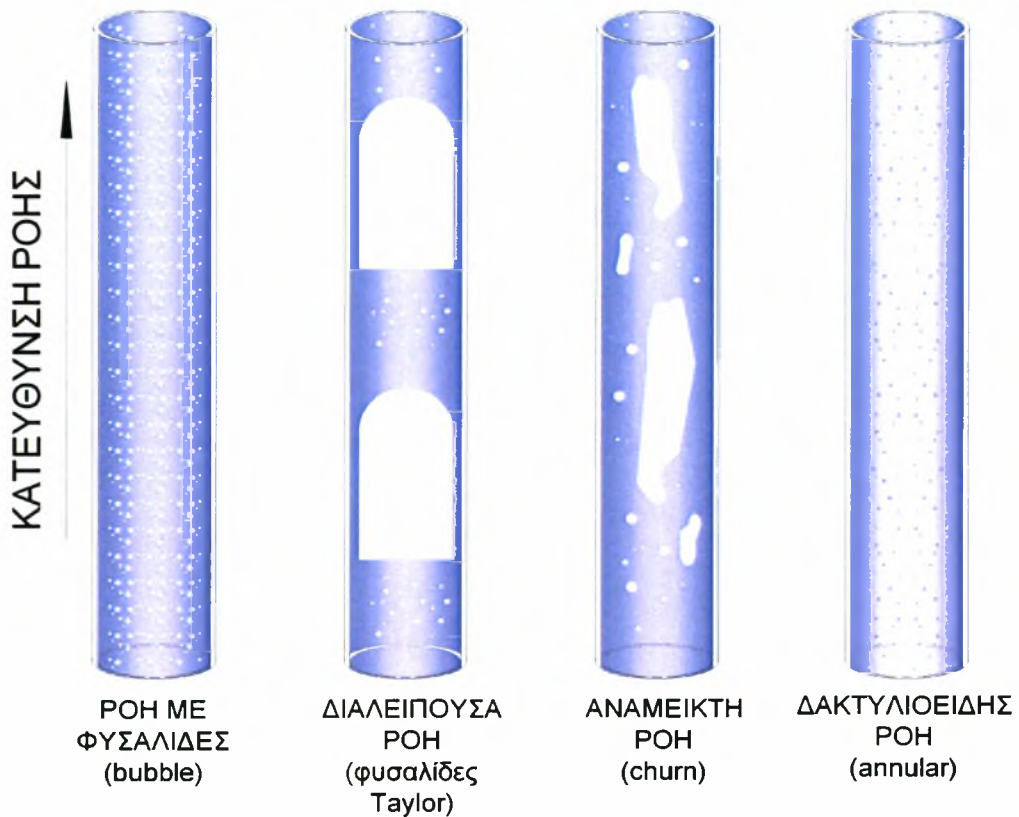
### *Ανάμεικτη Ροή (Churn Flow)*

Κατά την ανάμεικτη ροή, υπάρχει μια έντονη ακατάστατη ανάμιξη των δυο φάσεων. Η αύξηση της ογκομετρικής παροχής της αέριας φάσης σε σχέση με τη διαλείπουσα ροή έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση και τη διάσπαση των φυσαλίδων Taylor, οι οποίες γίνονται ακανόνιστες, στενότερες με μεγάλες συγκεντρώσεις κατά φάση. Συχνά χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο εισόδου, διότι η ροή έπειτα από ορισμένο μήκος σωλήνωσης (αναλόγως της διαμέτρου) μεταπίπτει σε διαλείπουσα ή δακτυλιοειδή. Κύριο γνώρισμά της είναι η ταλαντωτική κίνηση των τμημάτων της υγρής φάσης.

### *Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)*

Στην περίπτωση της δακτυλιοειδούς ροής, η αέρια φάση είναι συνεχής στο κέντρο του αγωγού με σχετική διασπορά της υγρής φάσης με μικρά σταγονίδια. Η υγρή φάση ρέει κυρίως στα τοιχώματα του αγωγού ως λεπτή στιβάδα.

Η μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο γίνεται συνήθως σταδιακά με συνέπεια την ύπαρξη περιοχών μεικτών καθεστώτων ροής. Κατά την κατακόρυφη ροή προς τα κάτω, τα καθεστώτα ροής είναι σαφώς διαφορετικά σε σχέση με την κατακόρυφη ροή προς τα πάνω. Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής αυτής είναι η τάση δημιουργίας δακτυλιοειδούς ροής, η οποία εξάλλου δημιουργείται ακόμη και με μηδενική ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης (falling films).



Σχήμα 2-1 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε κατακόρυφο αγωγό για ροή προς τα επάνω

## 2.2 Καθεστώτα ροής σε οριζόντιους αγωγούς

Σε οριζόντιους αγωγούς τα καθεστώτα ροής είναι πιο σύνθετα από ότι σε κατακόρυφους ως συνέπεια της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία έχει την τάση να συγκεντρώνει το υγρό στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος του. Σύμφωνα με τους Mandhane et al. (1974), Taitel & Dukler (1976) και Lin & Hanratty (1986) τα πλέον αποδεκτά καθεστώτα ροής είναι τα ακόλουθα και παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2-2.

### *Ροή με φουσαλίδες (Dispersed Bubble Flow)*

Κατά τη ροή με φουσαλίδες το αέριο κινείται με τη μορφή φουσαλίδων διεσπαρμένο στη συνεχή υγρή φάση. Αυτό το καθεστώς ροής σχηματίζεται για μεγάλους ρυθμούς παροχής του υγρού. Οι φουσαλίδες έχουν την τάση να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού, ενώ υπό ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται ως αφρός.

### *Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow)*

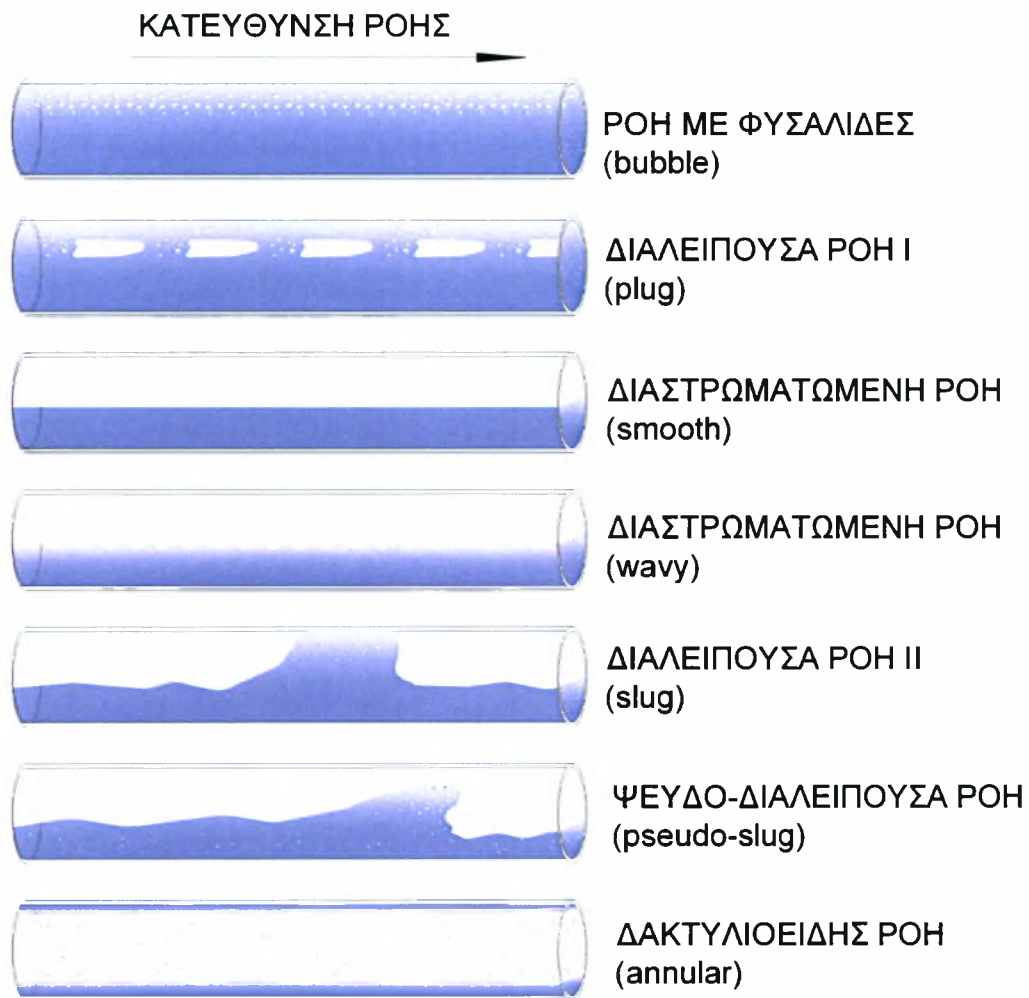
Κατά την διαστρωματωμένη ροή το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος. Το καθεστώς αυτό παρατηρείται για σχετικά μικρές ποσότητες ρευστών. Η διεπιφάνεια των ρευστών είναι λεία ή καλύπτεται από κύματα, κάτι που εξαρτάται από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Επιπλέον, για μεγάλες παροχές της αέριας φάσης το υγρό μπορεί να αναρριχάται στο σωλήνα και να λαμβάνει χώρα εκνέφωση σταγονιδίων.

### *Διαλείπουσα Ροή («Slug» or Intermittent Flow)*

Η διαλείπουσα ροή χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («slugs») από το σωλήνα, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Αυτές οι υγρές μάζες μπορεί να εμπεριέχουν και να παρασύρουν πολλές φυσαλίδες αερίου. Η ροή αυτή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές, διότι προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να προκαλούνται δονήσεις στις σωληνώσεις, να απαιτούνται μεγάλοι διαχωριστές κ.α. Έτσι είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας η πρόβλεψη της μετάπτωσης στο καθεστώς αυτό.

### *Ψευδο-Διαλείπουσα Ροή («Pseudo-Slug» Flow)*

Η ψευδο-διαλείπουσα ροή παρατηρείται πάντοτε αμέσως μετά την διαλείπουσα ροή. Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («pseudo-slugs») από το σωλήνα, που κινούνται με ταχύτητα που η τιμή της είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Έτσι, καθώς οι μάζες αυτές ρέουν με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του αερίου, η περίμετρος του αγωγού διαβρέχεται περιοδικά από την υγρή φάση αλλά η αέρια φάση παραμένει ως ένα σημείο συνεχής. Συνήθως περιορίζονται σε μικρής διαμέτρου αγωγούς.



**Σχήμα 2-2** Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό

### *Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)*

Η δακτυλιοειδής ροή είναι παρόμοια με αυτή που παρατηρείται στην κατακόρυφη ροή, με την διαφορά ότι η υγρή στιβάδα δεν είναι συμμετρική γύρω από τον αγωγό λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Εμφανίζεται για πολύ μεγάλες παροχές της αέριας φάσης. Σχεδόν πάντοτε στη δακτυλιοειδή ροή, μέρος του υγρού βρίσκεται συμπαρασυρόμενο από την αέρια φάση με τη μορφή σταγονιδίων.

Στην παρούσα εργασία ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής (Andritsos & Hanratty, 1987a)

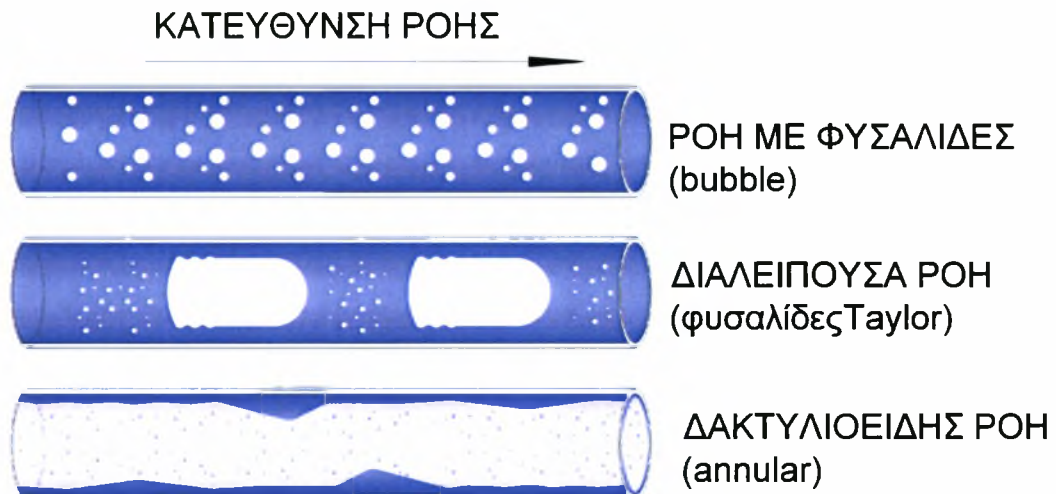
- *Λεία διαχωρισμένη ροή*, η οποία εμφανίζεται σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης και η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων είναι λεία.
- *Διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D)*. Με μικρή αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης εμφανίζονται στη διεπιφάνεια τα πρώτα κανονικά δισδιάστατα κύματα, με μικρό μήκος και πλάτος κύματος, τα οποία παρατηρούνται για σχετικά στενό εύρος ταχυτήτων της αέριας φάσης. Ουσιαστικά, αρχικά παρατηρούνται ως διαταραχές στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων.
- *Διαστρωματωμένη ροή με κύματα μεγάλου μήκους και πλάτους, η οποία στη συνέχεια θα αναφέρεται ως ροή με κύματα Kelvin-Helmholtz (K-H)*. Τα κύματα αυτού του τύπου εμφανίζονται με περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων είναι αρκετά τραχιά. Στη βιβλιογραφία τα κύματα αυτά βρίσκονται συχνά και με το όνομα κύματα περιδίνησης (roll waves).
- *Ροή με εκνέφωση*, όπου λεπτές υγρές δέσμες (liquid filaments) ή σταγονίδια αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων K-H και εναποτίθενται στο πάνω μέρος του αγωγού. Ως μετάπτωση σε αυτό το υποκαθεστώ ροής ορίζονται οι συνθήκες παροχής όπου για πρώτη φορά παρατηρούνται σταγονίδια στο πάνω μέρος του αγωγού. Επίσης για μικρές διαμέτρους παρατηρείται αναρρίχηση της υγρής στιβάδας στα τοιχώματα του αγωγού, η οποία σε συνδυασμό με την απόθεση σταγονιδίων θα οδηγήσει τελικά στη δακτυλοειδή ροή. Για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου ο μηχανισμός της απόθεσης σταγονιδίων είναι ο κύριος μηχανισμός δημιουργίας δακτυλοειδούς ροής.

Για την κατακόρυφη ροή και για την οριζόντια διφασική ροή έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πολύαριθμοι χάρτες καθεστώτων ροής. Βέβαια οι περισσότεροι από αυτούς έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα σε μικρούς αγωγούς (20-50 mm διάμετρο), για το σύστημα νερό - αέρας και για ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η οριζόντια διφασική ροή συναντάται πολύ συχνά σε διαστημικές εφαρμογές, όπου η βαρύτητα είναι σχεδόν μηδενική. Στις περιπτώσεις αυτές τα καθεστώτα ροής διαφοροποιούνται όπως φαίνεται και το Σχήμα 2-3, ενώ τα χαρακτηριστικά του κάθε καθεστώτος αλλά και οι συνθήκες στις οποίες εξελίσσεται εξαρτώνται από την κατεύθυνση του και από την κλίση του αγωγού (Jayawardena et al., 1997).



Τρία κύρια καθεστώτα ροής παρατηρούνται σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας, η ροή με φυσαλίδες, η διαλείπουσα ροή και η δακτυλιοειδής ροή, ενώ η δακτυλιοειδής ροή κυριαρχεί για μεγάλο εύρος ρυθμών ροής υγρής και αέριας φάσης όταν η τιμή της βαρύτητας είναι πολύ μικρή. Η ροή με φυσαλίδες και η δακτυλιοειδής ροή είναι αυτές που προτιμώνται, καθώς η διαλείπουσα ροή προκαλεί έντονες δονήσεις στους αγωγούς.



**Σχήμα 2-3** Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας (Jayawardena et al., 1997)

## 2.3 Προσδιορισμός των περιοχών ροής

Ο προσδιορισμός των περιοχών ροής γίνεται με τις ακόλουθες μεθόδους (Ανδρίτσος & Παράς, 1991), οι οποίες είναι καλές για χαμηλές παροχές υγρού-αερίου και μακριά από περιοχές μετάπτωσης (π.χ. διαλείπουσα-δακτυλιοειδής).

- **Οπτική παρατήρηση**

Πρόκειται για τον απλούστερο τρόπο ανίχνευσης των μορφών διφασικής ροής. Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν υπάρχει δυνατότητα χρήσης διάφανου αγωγού (για όχι υψηλές πιέσεις, για συστήματα που δεν επηρεάζονται από το φως).

Στην περίπτωση ταχύτατα εξελισσόμενων φαινομένων, όπου η απλή παρατήρηση δεν είναι ακριβής, η χρήση φωτογραφικής μεθόδου μεγάλης ταχύτητας (high speed photography) ή η φωτογράφιση της αξονικής διατομής (axial view photography) είναι επιβεβλημένη (Hewitt & Roberts, 1969).

- **Αγωγιμομετρική μέθοδος**

Χρησιμοποιείται μόνο όταν η υγρή φάση είναι (ή μπορεί να γίνει) αγωγίμη. Βασίζεται στη χρήση μετρητικού που όταν βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση δίνει υψηλό σήμα εξόδου, ενώ σε επαφή με την αέρια φάση δίνει σχεδόν μηδενικό. Για τον προσδιορισμό των περιοχών ροής έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές κατάλληλοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων.

- **Μέθοδοι που εξαρτώνται από στατιστική ανάλυση**

- **Απορρόφηση ακτίνων X(ή ακτίνων γ)**

Από τη διαφορά της απορρόφησης των ακτίνων στις διάφορες φάσεις μετριέται το ποσοστό κενού, δηλαδή ο μέσος χρονικά όγκος που καταλαμβάνει η κάθε φάση στον αγωγό. Το σήμα εξόδου του ανιχνευτή αναλύεται στατιστικά και από την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του σήματος, εκτιμάται το είδος της ροής. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι αφενός ότι δεν έχει εφαρμοστεί σε μεγάλες παροχές όπου υπάρχει δυσκολία στην ταυτοποίηση των περιοχών ροής και αφετέρου ότι η συσκευή είναι ακριβή και επικίνδυνη λόγω της ακτινοβολίας.

- **Μεταβολή της πίεσης**

- 1. Πτώση της πίεσης**

Η ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των διαταραχών πίεσης προσδιορίζει το είδος ροής (Simpson et al. 1977) : η διαχωρισμένη ροή δίνει ‘κορυφή’ σε μηδενική

συχνότητα, η ροή με φυσαλίδες δίνει ομοιόμορφο φάσμα συχνοτήτων, η διαλείπουσα και η δακτυλοειδής ροή δίνουν χαρακτηριστικά ή κορυφή στο φάσμα.

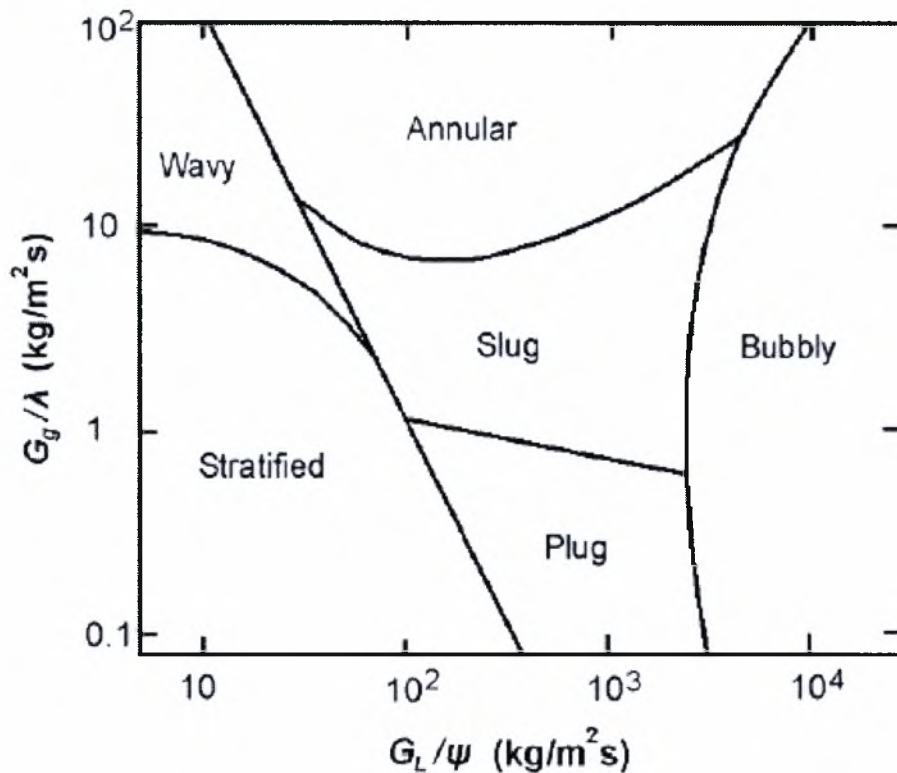
## 2. Τοπική πίεση

Οι Lin & Hanratty (1987) πρότειναν ότι η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή μπορεί να πιστοποιηθεί από την αλληλοσυσχέτιση δύο σημάτων πίεσης από δύο μετρητικά που απέχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους. Αν τα σήματα συσχετίζονται τότε πρόκειται για διαλείπουσα ροή. Η μέθοδος είναι ίσως η καταλληλότερη για βιομηχανική εφαρμογή λόγω απλότητας της.

### 2.4 Χάρτες καθεστώτων ροής και όρια μεταπτώσεων

Η πρόβλεψη του καθεστώτος ροής που επικρατεί σε έναν αγωγό κατά την ομορροή υγρού – αερίου παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό των μεγεθών που διέπουν τη ροή. Το καθεστώς ροής καθορίζεται από το λόγο του εμβαδού της διεπιφάνειας των ρευστών ανά μονάδα όγκου και συνεπώς ρυθμίζει τη μεταφορά ενέργειας, μάζας και ορμής μεταξύ των δύο φάσεων. Η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού που λαμβάνει χώρα κατά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή, καθιστά τη μετάπτωση αυτή ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Για τους λόγους αυτούς λοιπόν, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες τα τελευταία 50 χρόνια ούτως ώστε να αναπτυχθούν μοντέλα που να περιγράφουν τη μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο. Ορισμένα από αυτά περιγράφονται παρακάτω.

Από τους πρώτους που προσπάθησαν να περιγράψουν τη μετάπτωση από το ένα είδος ροής στο άλλο σε οριζόντιο αγωγό ήταν ο Baker (1954), ο οποίος κατασκεύασε χάρτες, έχοντας πρώτα διακρίνει τα διάφορα καθεστώτα ροής. Αναγκάστηκε να εισάγει διορθωτικές παραμέτρους, καθώς διέθετε πειραματικά δεδομένα μόνο από μετρήσεις σε συστήματα νερού - αέρα σε ομορροή σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, ώστε ο χάρτης να μπορεί να βρει εφαρμογή και σε διαφορετικά συστήματα και συνθήκες. Επίσης διατύπωσε και τις αντίστοιχες εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο στον ακόλουθο χάρτη ο οποίος είχε ως συντεταγμένες  $Gg/\lambda$  ως προς  $GL/\psi$ , (όπου  $Gg$ ,  $GL$  οι μαζικές ταχύτητες αέριας και υγρής φάσης).



Σχήμα 2-4 Χάρτης καθεστώτων ροής σύμφωνα με τον Baker (1954)

Η ψευδο-διαλείπουσα ροή παρατηρείται πάντοτε αμέσως μετά την διαλείπουσα ροή. Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («pseudo-slugs») από το σωλήνα, που κινούνται με ταχύτητα που η τιμή της είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Έτσι, καθώς οι μάζες αυτές ρέουν με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του αερίου, η περίμετρος του αγωγού διαβρέχεται περιοδικά από την υγρή φάση αλλά η αέρια φάση παραμένει ως ένα σημείο συνεχής. Συνήθως περιορίζονται σε μικρής διαμέτρου αγωγούς.

Οι διορθωτικοί παράγοντες ορίζονται ως εξής:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_G}{0,075} \right) \left( \frac{\rho_L}{62,3} \right) \right]^{0,5}$$

$$\psi = \frac{73}{\sigma} \left[ \mu_L \left( \frac{62,3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3}$$

όπου: G: αέρια φάση, L: υγρή φάση, ρ: πυκνότητα, σ= επιφανειακή τάση

Σύμφωνα με τους Wallis & Dodson, (1973) ο χάρτης αυτός είναι εύχρηστος μόνο για αρχικές εκτιμήσεις καθώς δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής. Αρχικά, η τεταγμένη του χάρτη δεν είναι αδιάστατη με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ευρεία εφαρμογή του. Συνυπολογίζοντας δε τις πολυάριθμες παραμέτρους που επιδρούν στη διαφασική ροή (αδρανειακές και ιξώδεις δυνάμεις στις δύο φάσεις, επιφανειακή τάση και άνωση), γίνεται αντιληπτό ότι είναι αδύνατο να περιγραφεί η μετάπτωση στα διάφορα καθεστάτα ροής από τις ίδιες παραμέτρους. Συνεπώς, η μετάπτωση σε κάθε καθεστάτ ροής θα έπρεπε να ερευνηθεί υπολογίζοντας τα καθεστάτα ξεχωριστά.

Οι Wallis & Dodson (1973) ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή σε ήπια («plug») ή έντονα («slug») διαλείπουσα ροή διεξάγοντας πειράματα σε αγωγούς ορθογωνικής διατομής. Διαπίστωσαν ότι και τα δύο καθεστάτα διαλείπουσας ροής δημιουργούνται εξαιτίας της παρουσίας ενός μεγάλου κύματος στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου. Υποστήριξαν ότι η μετάπτωση και στα δύο αυτά καθεστάτα προκαλείται από την αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz και τα αντιμετώπισαν σαν ένα καθεστάτ.

Η διαφορά στην προσέγγιση αυτή σε σχέση με τις υπόλοιπες έγκειται στο γεγονός ότι δεν στηρίζεται στην ανάλυση μικρών διεπιφανειακών διαταραχών, αλλά στο δεδομένο ότι δημιουργείται ένα μεγάλο κύμα που κλείνει τον αγωγό, υπό την επίδραση δυνάμεων Bernoulli που αναπτύσσονται από την αέρια φάση.

Ο Hoogendoorn (1959) μελέτησε τη διαφασική ροή αέρα-νερού και αέρα-διαλυμάτων ελαίων σε λείες οριζόντιες σωληνώσεις με διαμέτρους από 24 έως 140 mm και σε μη λείες σωληνώσεις με εσωτερική διάμετρο 50 mm. Στους χάρτες περιοχών ροής που κατασκεύασε δεν χρησιμοποίησε ως άξονες τις φαινομενικές ταχύτητες των δύο φάσεων. Αντίθετα ως άξονα x έθεσε την ταχύτητα του διαφασικού μίγματος και ως άξονα y το αδιάστατο επί τοις εκατό ποσοστό της αέριας φάσης.

Αργότερα ο Scott (1963) τροποποιεί το χάρτη του Baker χρησιμοποιώντας τα πιο πρόσφατα δεδομένα των Hoogendoorn (1959) και Govier et al (1962). Δεν υπάρχει ακριβής θέση των συνόρων της μίας περιοχής ροής από την άλλη, αλλά στη θέση τους μία ευρεία ταινία ανάμεσα στις διάφορες περιοχές ροής.

Οι Kordyban and Ranov (1970) πρότειναν ότι η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα σε κλειστό αγωγό οφείλεται στην αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz, η

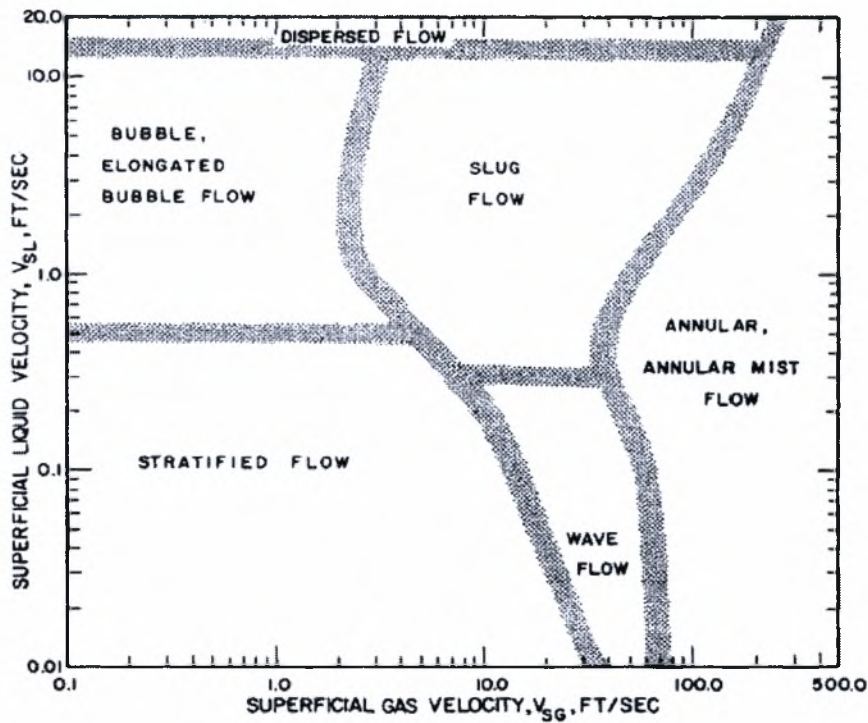
οποία ενισχύεται από την επαφή με το επάνω τοίχωμα του αγωγού και εξαρτάται από το πλάτος του κύματος.

Η αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η κίνηση του κύματος μετατρέπεται από περιοδική σε εκθετική καθώς η ταχύτητα της αέριας φάσης είναι αρκετά μεγάλη και η συνισταμένη της πίεσης που βρίσκεται σε φάση με το ύψος του κύματος είναι τέτοιου μεγέθους, ώστε η αναρρόφηση που δημιουργείται να είναι μεγαλύτερη από την αντιτιθέμενη δύναμη.

Παρατηρήθηκε ότι για συγκεκριμένη γεωμετρία αγωγού και φυσικές ιδιότητες, οι τέσσερις βασικές μεταβλητές που επιδρούν στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή είναι η ταχύτητα του αερίου, το ύψος της υγρής στιβάδας, το μήκος και το πλάτος του κύματος. Ωστόσο, από την πειραματική μελέτη προέκυψε ότι οι μεταβλητές που επηρεάζουν τη μετάπτωση είναι μόνο η ταχύτητα του αερίου και το ύψος της υγρής στιβάδας.

Οι Mandhane et al. (1974), εξετάζοντας τους μέχρι τότε διαθέσιμους χάρτες ροής, διαπίστωσαν ότι ήταν δυνατές αρκετές βελτιώσεις, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι πιο ακριβή. Μελέτησαν το σύστημα νερού - αέρα σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου από 1,3 cm έως 15 cm σκοπεύοντας να εντοπίσουν τα εμφανιζόμενα καθεστώτα ροής που εμφανίζονται και να κατασκευάσουν έναν χάρτη αυτών. Χρησιμοποίησαν ως συντεταγμένες τις φαινομενικές ταχύτητες  $u_{GS}$  και  $u_{LS}$  ώστε ο χάρτης να είναι απλός στην χρήση. Ισχυρίστηκαν ότι η επίδραση της διαμέτρου και των φυσικών ιδιοτήτων των δύο φάσεων μπορεί να αγνοηθεί. Εκτός της ικανοποιητικής ακρίβειας που παρουσιάζει, πλεονέκτημα του χάρτη αυτού είναι ότι καθιστά δυνατή την αναπαράσταση του καθεστώτος ροής με φυσαλίδες.

Taitel & Dukler (1976) διαπίστωσαν ότι για οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 2-5 cm η μετάπτωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από μεταβολές της διαμέτρου και για το λόγο αυτό, οι χάρτες σαν των Mandhane et al. (1974), είναι αρκετά ακριβείς, καθώς τα περισσότερα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους προήλθαν από αγωγούς μικρής διαμέτρου. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι χάρτες αυτοί δεν αναπαριστούν σωστά την περιοχή όπου αναπτύσσονται τα καθεστώτα ροής όταν διαφοροποιηθεί το εξεταζόμενο σύστημα, π.χ. πετρέλαιο - φυσικό αέριο, ενώ η διάμετρος του αγωγού επηρεάζει σημαντικά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Έτσι πρότειναν τη χρήση αδιάστατων αριθμών, αναλόγως της περιοχής ροής, για την περιγραφή της μετάπτωσης.



Σχήμα 2-5 Χάρτης καθεστώτων ροής όπως προτάθηκε από τους Mandhane et al. (1974)

Στην προσέγγισή τους προσπάθησαν να λάβουν υπόψη την επίδραση της διαμέτρου, των φυσικών ιδιοτήτων και της κλίσης του αγωγού στη μετάπτωση και στις εξισώσεις που ανέπτυξαν όλα τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη είναι συνάρτηση μόνο του αδιάστατου όρου  $h/D$ .

Οι Barnea et al (1979) κατασκεύασαν πειραματικά χάρτες περιοχών ροής μόνο για το σύστημα αέρα-νερού σε αγωγούς διαμέτρου 1,95 cm και 2,55 cm και μήκους 3 m. Η μελέτη έγινε για οριζόντιους αγωγούς καθώς επίσης και για αγωγούς με κλίση μέχρι και  $-10^\circ$ ,  $+10^\circ$ .

Από τους ορισμούς που χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες περιοχές ροής, απουσιάζει αυτός της ψευδοδιαλείπουσας. Αντίθετα στους χάρτες που παρουσιάζουν υπάρχει η δακτυλοειδής με κύματα περιοχή. Η διάκριση των περιοχών μετάπτωσης έγινε με μοναδικό κριτήριο την οπτική παρατήρηση. Στο άρθρο συγκρίνουν τα πειραματικά τους αποτελέσματα με το θεωρητικό μοντέλο των Taitel & Dukler (1976).

Οι Weisman et al (1979) ύστερα από πειράματα κατασκευάζουν χάρτες περιοχών ροής σε αγωγούς διαμέτρου από 1,2 έως 5 cm. Οι φυσικές ιδιότητες των υγρών μεταβάλλονται με συστηματικό τρόπο, έτσι ώστε να εξεταστούν εκτενώς οι επιδράσεις του

ιξώδους, της επιφανειακής τάσης και της πυκνότητας του υγρού και του αερίου στη διαμόρφωση των περιοχών ροής. Οι οπτικές τους παρατηρήσεις ενισχύθηκαν και από μία ανάλυση της πτώσης πίεσης. Έτσι τα δικά τους αποτελέσματα ήταν λιγότερο υποκειμενικά από τα αντίστοιχα άλλων ερευνητών. Στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν σοβαρές διαφοροποιήσεις των πειραματικών τους αποτελεσμάτων στις περιοχές μετάπτωσης από τα αντίστοιχα άλλων ερευνητών ή μοντέλων που είχαν προταθεί παλιότερα.

Οι Mishima & Ishii (1980) μελέτησαν τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή και προσπάθησαν να επεκτείνουν τη θεωρία των Kordyban & Ranov (1970). Θεωρώντας ότι τα κύματα είναι μικρού πλάτους, ότι το κύμα που αυξάνεται με το μεγαλύτερο ρυθμό, το «πιο επικίνδυνο κύμα», παρατηρείται τη στιγμή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα ροή και έχει μία μέγιστη τιμή πλάτους, συμπέραναν ότι η επιφανειακή τάση μπορεί να αγνοηθεί εάν θεωρηθεί συνολική συμπεριφορά του κύματος.

Αργότερα, οι Lin & Hanratty (1986) λόγω της αδυναμίας της μη ιξώδους Kelvin - Helmholtz θεωρίας να προβλέψει σωστά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή σε χαμηλά ιξώδη της υγρής φάσης, καθώς αγνοεί τους αδρανειακούς όρους που αποσταθεροποιούν τη ροή, προσπάθησαν να αναπτύξουν μια θεωρία, όπου να λαμβάνονται υπόψη οι ιξώδεις και οι αδρανειακοί όροι, με αποτέλεσμα η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή να επέρχεται σε χαμηλότερες ταχύτητες αέριας φάσης, από αυτές που προβλέπονταν από την μη ιξώδη Kelvin - Helmholtz θεωρία. Στόχος της ανάλυσης τους ήταν η πρόβλεψη των συνθηκών, όπου μια ημιτονοειδής διαταραχή μικρού πλάτους και μεγάλου μήκους κύματος στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου, είναι ασταθής και πρότειναν κριτήρια μετάπτωσης για

αγωγούς ορθογωνικής και κυκλικής διατομής.

Ο Kordyban (1985) παρατήρησε ότι η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα εξαιτίας μιας τοπικής αστάθειας Kelvin - Helmholtz, στην κορυφή του κύματος. Έπειτα από πειράματα, διαπίστωσε ότι πριν από τη μετάπτωση εμφανίζονται πάντα μικρά κύματα στην κορυφή των μεγάλων. Η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή οφείλεται στην απότομη αύξηση του μεγέθους αυτών των μικρών κυμάτων. Πρότεινε ότι η εμφάνιση των κυμάτων αυτών αποτελεί την έναρξη της αστάθειας Kelvin - Helmholtz, αλλά ισχυρίζεται ότι η δημιουργία των κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή οφείλεται στον ακόλουθο μηχανισμό. Για ταχύτητες της αέριας φάσης μεγαλύτερες από της υγρής, δημιουργούνται κύματα στη διεπιφάνεια εξαιτίας της συνιστώσας της πίεσης που βρίσκεται σε φάση με την κλίση του



κύματος. Τα κύματα αυτά αναπτύσσονται σχετικά αργά, αλλά σταδιακά κλείνουν μέρος του αγωγού, προκαλώντας μεγάλη μεταβολή στην πίεση. Με τον τρόπο αυτό τα κύματα προσεγγίζουν την αστάθεια Kelvin - Helmholtz. Ωστόσο, πριν λάβει χώρα αστάθεια ολόκληρου του κύματος, συμβαίνουν τοπικές αστάθειες στην κορυφή του κύματος εξαιτίας της μεγάλης κλίσης της πίεσης στο σημείο αυτό και της μικρής κλίσης του κύματος. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται μικρά κύματα στην κορυφή των μεγάλων και αναπτύσσονται μέχρι να αγγίζουν το πάνω μέρος του αγωγού.

Λίγο αργότερα, οι Lin & Hanratty (1986) παρατήρησαν ότι για τιμές ιξώδους από 1 έως 100 cP, δεν παρουσιάζεται έντονη επίδραση στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 500 cP οι όροι των αδρανειακών δυνάμεων τείνουν να εξαφανιστούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα για μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή.

Η θεωρία που ανέπτυξαν για το σύστημα νερό - αέρας οι Lin & Hanratty (1986) προβλέπει ότι οι δυνάμεις αδράνειας της υγρής φάσης δρουν αποσταθεροποιητικά, με αποτέλεσμα η εμφάνιση διαταραχών μεγάλου πλάτους στη διεπιφάνεια να επέρχεται σε παροχές αερίου μικρότερες από αυτές που προβλέπει η μη ιξώδης Kelvin - Helmholtz θεωρία (Andritsos et al., 1989). Ακόμη, προβλέπει ότι η αύξηση του ιξώδους δρα σταθεροποιητικά κατά τη μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για σταθερό λόγο  $h/D$  και το αυξανόμενο ιξώδες, η ταχύτητα της υγρής φάσης μειώνεται για δεδομένη φαινομενική ταχύτητα αερίου και οι δυνάμεις αδράνειας του υγρού δρουν λιγότερο αποσταθεροποιητικά. Ωστόσο, για πολύ μεγάλες τιμές του ιξώδους, η δράση αυτή σχεδόν εξαφανίζεται και

τα αποτελέσματα της μη ιξώδους Kelvin - Helmholtz ανάλυσης είναι πιο αξιόπιστα. Τέλος, ήταν οι πρώτοι οι οποίοι απέδειξαν ότι η μη ιξώδης Kelvin - Helmholtz θεωρία δεν είναι ικανή να περιγράψει σωστά την ευστάθεια της διαστρωματωμένης ροής.

Οι Andritsos & Hanratty (1987b) μελέτησαν τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε αγωγό κυκλικής διατομής ορίζοντας τρεις επιμέρους περιοχές της διαστρωματωμένης ροής: διδιάστατα κύματα, κύματα μεγάλου πλάτους ή Kelvin - Helmholtz κύματα και τέλος την εκνέφωση σταγονιδίων υγρού, όπου το υγρό αναρριχάται στο σωλήνα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έλαβαν υπόψη τους ιξώδεις όρους, ενώ για αρκετά μεγάλο μήκος κύματος  $\lambda$  χρησιμοποίησαν την ανάλυση των Lin & Hanratty. Επίσης, παρατήρησαν ότι για υγρά μεγάλου ιξώδους το φαινόμενο

ελέγχεται από τον μηχανισμό Kelvin - Helmholtz. Τέλος, παρατήρησαν ότι κύρια επίδραση του ιξώδους είναι η αύξηση της ταχύτητας του αερίου που απαιτείται για την έναρξη της δημιουργίας των διδιάστατων κυμάτων και η μείωση του εύρους των συνθηκών ροής όπου αυτά εμφανίζονται.

Οι Wu et al. (1987) έπειτα από πειράματα σε αγωγό διαμέτρου 20,3 cm, αξιολόγησαν τα μοντέλα που πρότειναν οι Taitel & Dukler (1976) και ο Wallis (1969). Διαπίστωσαν ότι για κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου 2,45 cm σε ατμοσφαιρικές συνθήκες τα δυο παραπάνω μοντέλα σχεδόν ταυτίζονται, ενώ στην περίπτωση αγωγού διαμέτρου 20,3 cm και πίεση 75 bar, το μοντέλο του Wallis (1969) προβλέπει μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης στις οποίες επέρχεται η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν και από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τέλος, σύμφωνα με τους (Fan et al., 1993), οι συνθήκες που επικρατούν στη είσοδο και στην έξοδο καθώς και το μήκος του αγωγού, επιδρούν στην εμφάνιση της διαλείπουσας ροής. Όπως παρατηρήθηκε το μήκος του αγωγού παρουσιάζει πολύ πιο έντονη επίδραση στην εξέλιξη του καθεστώτος ροής συγκριτικά με τις συνθήκες στην είσοδο και έξοδο του αγωγού. Σε αγωγούς μεγαλύτερου μήκους, η απόσταση του σημείου όπου εμφανίζεται το «slug» και του σημείου όπου εξέρχεται από τον αγωγό είναι μεγαλύτερη από αυτήν σε αγωγούς μικρότερου μήκους, κατά συνέπεια, τη στιγμή της εξόδου του «slug» από τον αγωγό, το ύψος της υγρής στιβάδας είναι μεγαλύτερο στο σημείο όπου εμφανίζεται.

## 2.5 Επιφανειακή τάση

### α. Ορισμοί

**Επιφάνειες (surfaces)** : Τα όρια μεταξύ αερίων και υγρών φάσεων

**Διεπιφάνειες (interfaces)** : Τα όρια μεταξύ δύο υγρών φάσεων

Ο όρος **surface** είναι μία ιδανική περίπτωση του όρου **interfaces** έτσι ώστε οι όροι διεπιφάνεια ή διεπιφανειακή τάση (interfacial tension) αναφέρονται επίσης στους όρους επιφάνεια ή επιφανειακή τάση (surface tension).

**Επιφανειοδραστική ουσία** : Μία ουσία που μειώνει την επιφανειακή τάση ενός υγρού αυξάνοντας τη διαβρεχτική του ικανότητα.

## **β. Ερμηνεία της εμφάνισης της επιφανειακής τάσης**

Κάθε υγρό αποτελείται από αμέτρητα μόρια που έλκονται ισχυρά το ένα με το άλλο. Αυτές οι δυνάμεις έλξεως ασκούνται προς όλες τις διευθύνσεις και το υγρό διατηρείται σε κατάσταση ισορροπίας. Στην επιφάνεια του υγρού τέτοιες δυνάμεις δεν δρουν από έξω. Όλες οι δυνάμεις εξασκούνται προς τα μέσα κι επέρχεται ισορροπία μόνο όταν τα επιφανειακά μόρια έλκονται προς τα μέσα μέρος του υγρού, με αποτέλεσμα την ελάττωση της επιφάνειας του στο ελάχιστο δυνατό.

Η δύναμη που έλκει τα μόρια προς τα μέσα εξισορροπείται από μία τάση στην επιφάνεια, η οποία περιορίζει την παραπέρα σμίκρυνση της επιφάνειας και είναι η επιφανειακή τάση.

Η επιφανειακή τάση ενός διαλύματος είναι διαφορετική από την τάση του καθαρού υγρού. Με την αύξηση της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας μπορεί να συμβεί είτε αργή αύξηση, είτε αργή ελάττωση της επιφανειακής τάσης του διαλύματος, ανάλογα με τη φύση της διαλυμένης ουσίας. Στην περίπτωση όμως των υδατικών διαλυμάτων επιφανειοδραστικών ουσιών (ουσιών που μειώνουν την επιφανειακή τάση), με την αύξηση της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας συμβαίνει απότομη ελάττωση της επιφανειακής τάσης μέχρι μιας σταθερής τιμής.

## **γ. Μέθοδοι μέτρησης της επιφανειακής τάσης (Weser , 1980)**

- i)** Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση δυνάμεων είναι απλές στην εφαρμογή και δίνουν μεγάλη ακρίβεια :
  - Μέθοδος του δακτυλιδιού (Ring method)
  - Μέθοδος της πλακός (Plate method )
  - Μέθοδος της σπείρας (Loop method )
  
- ii)** Οι μέθοδοι που σχετίζονται με πίεση είναι οι ακόλουθες :
  - Ανύψωση σε τριχοειδή σωλήνα
  - Μέθοδος μέγιστης πίεσης φυσαλίδας αερίου

iii) Οι γεωμετρικές μέθοδοι οι οποίες εξαρτώνται από οπτικές παρατηρήσεις και μετρήσεις γεωμετρικών μεγεθών είναι οι παρακάτω :

- Μέθοδος κρεμάμενης σταγόνας (Pending drop method )
- Μέθοδος της σταγόνας δίχως προεξοχές (Sessible drop method )
- Μέθοδος όγκου-σταγόνας (Drop volume method )
- Μέθοδος στροβιλιζόμενης σταγόνας (Spinning drop method )
- Μέθοδος μέτρησης γωνίας επαφής (Contact angle measurement )

iv) Οι μέθοδοι δυναμικών μετρήσεων είναι :

- Μέθοδος επιφανειακών κυμάτων (Surface waves )
- Μέθοδος ταλαντευόμενων πιδάκων υγρού (Oscillating liquid jets )

## 2.6 Πειράματα με χρήση SDS

**Καθεστώτα ροής σε διαφασική ροή σε κάθετο αγωγό και μεταβολές πίεσης με την επίδραση του επιφανειοδραστικού SDS.**

Οι Tanabordee Duangprasert, Anuvat Sirivat, Kitipat Siemanond και James O. Wilkes πραγματοποίησαν το 2008 πειράματα όπου χρησιμοποίησαν νερό και διαλύματα με SDS. Μελετήθηκε η επίδραση, με την προσθήκη του επιφανειοδραστικού, στη μετάπτωση στα καθεστώτα ροής, στις μεταβολές της πίεσης και στο μέγεθος των φυσαλίδων και της ταχύτητας. Η προσθήκη του επιφανειοδραστικού μειώνει την τιμή του critical Reynolds του αέρα για τις μεταβιβάσεις σε διαλείπουσα ροή με φυσαλίδες και διαλείπουσα ροή. Οι τιμές της πίεσης στα διαλύματα SDS είναι χαμηλότερες σε σχέση με το νερό ειδικά στη διαλείπουσα ροή και στη διαλείπουσα-στροβιλώδη ροή. Στις χαμηλές τιμές  $Re_{air}$  τα μεγέθη των φυσαλίδων στο διάλυμα με το SDS είναι χαμηλότερες σε σχέση με το νερό με αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους. Με την αύξηση και για υψηλότερες τιμές του  $Re_{air}$  το μέγεθος των φυσαλίδων στο διάλυμα του SDS γίνεται μεγαλύτερο σε σχέση με το νερό το οποίο αποδίδεται στην επίδραση της επιφανειακής τάσης

## **Επίδραση της επιφανειοδραστικής ουσίας σε διφασική ροή αέρα-νερού σε τριχοειδείς σωλήνες.**

Οι LIU Zhen-hua και GAO Yi-ru με πειράματα που πραγματοποίησαν στο πανεπιστήμιο Shanghai Jiaotong μελέτησαν την επίδραση του SDS στη διφασική ροή αέρα νερού σε τριχοειδείς σωλήνες. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο σε κάθετους όσο και σε οριζόντιους τριχοειδείς σωλήνες με εσωτερική διάμετρο 1,6 mm. Το διάλυμα είναι νερό με SDBS ενώ το αέριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν άζωτο. Για τον κάθετο τριχοειδή σωλήνα οι μεταβολές στα καθεστώτα ροής γίνονται σε χαμηλότερες ταχύτητες ροής σε σχέση με το νερό-αέριο στον ίδιο σωλήνα. Για τον οριζόντιο τριχοειδή σωλήνα η επιφανειακή τάση έχει μικρό αποτέλεσμα στη μετάβαση από ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή και έχει μόνο μικρή επίδραση στην μετάβαση από διαλείπουσα ροή I (plug) σε διαλείπουσα ροή II (slug) και από διαλείπουσα ροή σε δακτυλιοειδή. Η επιφανειακή τάση έχει σημαντική επίδραση στα κυματοειδή καθεστώτα ροής.

## **Επίδραση στην απαλοιφή της διαλείπουσας ροής**

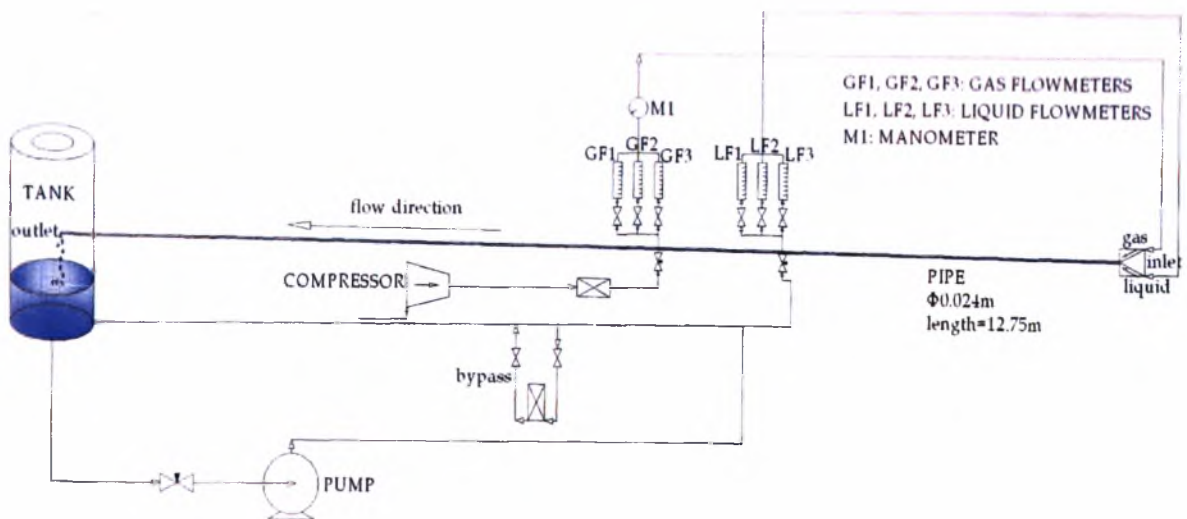
Οι R.J. Wikens και D.K. Thomas πραγματοποίησαν το 2007 πειράματα με χρήση SDS. Τα πειράματα έγιναν σε οριζόντιο σωλήνα διαμέτρου 0,052 m σε διφασική ροή σε ταχύτητες του υγρού 0,03 έως 1,2 m/s και σε ταχύτητα αέρα 3,8, 5,2, 6,6 m/s. Με την προσθήκη 400 ppm SDS στο νερό μειώνει την πτώση πίεσης μεταξύ 25-40% σε σχέση με διάλυμα χωρίς SDS. Η ίδιας συγκέντρωσης SDS δεν έχει καμία οπτική επίδραση στην απλή πτώση πίεσης.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε διάταξη οριζόντιου αγωγού για τη μελέτη διφασικής ροής υγρού-αερίου που προπήρχε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών. Η σχηματική παράσταση της διάταξης που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1. Η διάταξη αποτελείται από έναν οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 0.024 m κατασκευασμένο από Plexiglass, ο οποίος απαρτίζεται από 8 επιμέρους τμήματα μήκους 0,25 m, 1,0 m και 2,0 m. Το συνολικό μήκος του αγωγού είναι 12,75 m και περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Το πάχος του αγωγού είναι ικανό (περίπου 7.5 mm) ώστε να διασφαλίζεται η μηχανική αντοχή του, ενώ τα άκρα των επιμέρους τμημάτων είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στη ροή. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δαχτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το διάκενο μεταξύ των τμημάτων του αγωγού. Ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε κατάλληλα υποστηρίγματα σε μεταλλικό πλαίσιο ώστε να είναι δυνατή η ευθυγράμμιση του με το οριζόντιο επίπεδο.

Με σκοπό τη μείωση των διαταραχών κατά την επαφή το τμήμα ανάμιξης των δύο φάσεων είναι τύπου «Υ», κατασκευασμένο από συμπαγές Plexiglass όπου οι δύο φάσεις εισάγονται υπό γωνία  $-35^\circ$  και  $+35^\circ$  ως προς τον οριζόντιο αγωγό. Η απόσταση μεταξύ του σημείου εισόδου και του πρώτου τμήματος μετρήσεων είναι 2,2 m, ενώ ένα δεύτερο τμήμα μετρήσεων βρίσκεται σε απόσταση 8,5 m από την είσοδο του αγωγού.

Στο τέλος του αγωγού η ροή εισάγεται σε ένα πλαστικό δοχείο διαχωρισμού φάσεων διαμέτρου 0,5 m και ύψους 1,1 m. Η αέρια φάση εξέρχεται από την κορυφή του διαχωριστή, ενώ η υγρή φάση συγκεντρώνεται στον πυθμένα του. Η υγρή φάση ανακυκλώνεται με τη βοήθεια ανοξείδωτης φυγοκεντρικής αντλίας. Στο εσωτερικό του δοχείου διαχωρισμού και στο κάτω μέρος του βρίσκεται ψυκτική σπείρα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της υγρής φάσης που ανακυκλοφορεί στο σύστημα. Η θερμοκρασία της υγρής φάσης μετράται με τη βοήθεια θερμομέτρου και σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων παρέμεινε σταθερή. Όλα τα τμήματα αγωγών της διάταξης, εκτός από το ευθύγραμμο τμήμα παρατηρήσεων και μετρήσεων, είναι κατασκευασμένα από PVC ή είναι από εύκαμπτο αγωγό PE.



Σχήμα 3-1 Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Ως υγρή φάση για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε νερό δικτύου, υδατικό διάλυμα ισοπροπανόλης και υδατικό διάλυμα με SDS. Ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης για κάθε διάλυμα έγινε βασισμένος στη βιβλιογραφία. Για το νερό η τιμή της επιφανειακής τάσης προσδιορίζεται σε 75 mN/m. Για το υδατικό διάλυμα 5% της ισοπροπανόλης η τιμή της επιφανειακής τάσης προσδιορίζεται σε 50 mN/m. Τέλος η τιμή της επιφανειακής τάσης για το υδατικό διάλυμα με 1 CMC προσδιορίζεται σε 21,81 mN/m. Η ρύθμιση της παροχής της υγρής φάσης γίνεται με τη βοήθεια βάνας διαφράγματος και η μέτρηση της παροχής της υγρής φάσης επιτυγχάνεται με μία συστοιχία τριών ροομέτρων με πλωτήρα, διαφορετικής παροχής, των οποίων οι καμπύλες βαθμονόμησης παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Για την αποφυγή «στραγγαλισμού» της φυγοκεντρικής αντλίας στην έξοδο της υπάρχει ένα by-pass που οδηγεί το επιπλέον νερό στη δεξαμενή.

Ως αέρια φάση χρησιμοποιήθηκε αέρας δικτύου. Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται από τον κεντρικό συμπιεστή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών AIRCO M529 (4 HP). Η παροχή της αέριας φάσης ρυθμίζεται με τη βοήθεια μίας βάνας διαφράγματος και μετράται με τρία ροόμετρα αντίστοιχα. Η βαθμονόμηση των ροομέτρων της αέριας φάσης έγινε με το μετρητικό Ritter 40. Η ελάχιστη παροχή 0.4 m<sup>3</sup>/h και μέγιστη 65 m<sup>3</sup>/h.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το τμήμα ανάμιξης στην είσοδο του αγωγού βρίσκεται πάντα ελαφρώς υπερυψωμένο σε σχέση με τον ευθύγραμμο αγωγό ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων. Επίσης σε τακτά

χρονικά διαστήματα ελεγχόταν η ευθυγράμμιση του αγωγού με νερό περίπου μέχρι τη μέση και την κατάλληλη ανύψωση ή το κατέβασμα τμημάτων του αγωγού ώστε η κατανομή του νερού να είναι ομοιόμορφη κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού.

Το πάχος της υγρής στιβάδας μετρείται σε δύο θέσεις κατά μήκος του αγωγού, η πρώτη βρίσκεται σε απόσταση 88 D από την είσοδο και η δεύτερη σε απόσταση 336 D από την είσοδο. Για τη μέτρησή του χρησιμοποιείται η αγωγιμομετρική τεχνική (conductance technique), η οποία στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσά τους.

Η αγωγιμομετρική τεχνική με ζεύγος παράλληλων συρμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η υγρή φάση είναι, ή μπορεί να γίνει, αγώγιμη και σύμφωνα με τον Laurinat (1982) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε διαστικές ροές υγρού-αερίου από τον Swanson (1966). Ουσιαστικά μετρείται η σύνθετη αντίσταση (impedance) μεταξύ των δύο παράλληλων συρμάτων-ηλεκτροδίων. Το μέγεθος αυτό σε ένα αγώγιμο μέσο τείνει σε μία συγκεκριμένη τιμή και η γωνία φάσης της τάσης της πηγής σε σχέση με το ρεύμα τείνει στο μηδέν όταν η συχνότητα του σήματος είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Έτσι η σύνθετη αγωγιμότητα που μετρείται είναι ουσιαστικά η ωμική αγωγιμότητα του συστήματος, η οποία συνήθως είναι ανάλογη με το ύψος του νερού ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια. Για τον καθορισμό των καθεστώτων ροής κατά τη διαστική ροή σε ένα αγωγό μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος συνδυασμός ηλεκτροδίων-αισθητήρων οι οποίοι βασίζονται είτε στη μέτρηση της ωμικής αγωγιμότητας ή της χωρητικής αγωγιμότητας.

Η θεωρία για τη χρήση της αγωγιμομετρικής τεχνικής με ζεύγος παράλληλων συρμάτων βασίζεται στην ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάμεσα σε δύο μεταλλικά σύρματα κάθετα στη διεύθυνση της ροής ενός αγώγιμου ρευστού, που εκτείνεται στο άπειρο προς όλες τις άλλες διευθύνσεις, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (όπως αναφέρεται από τον Laurinat, 1982):

$$C = \frac{\gamma h}{\ln \left( \frac{D_0 + (D_0^2 - d^2)^{0.5}}{d} \right)}$$

όπου :

C : αγωγιμότητα

h : πάχος της υγρής στιβάδας

γ : ειδική αγωγιμότητα της υγρής φάσης



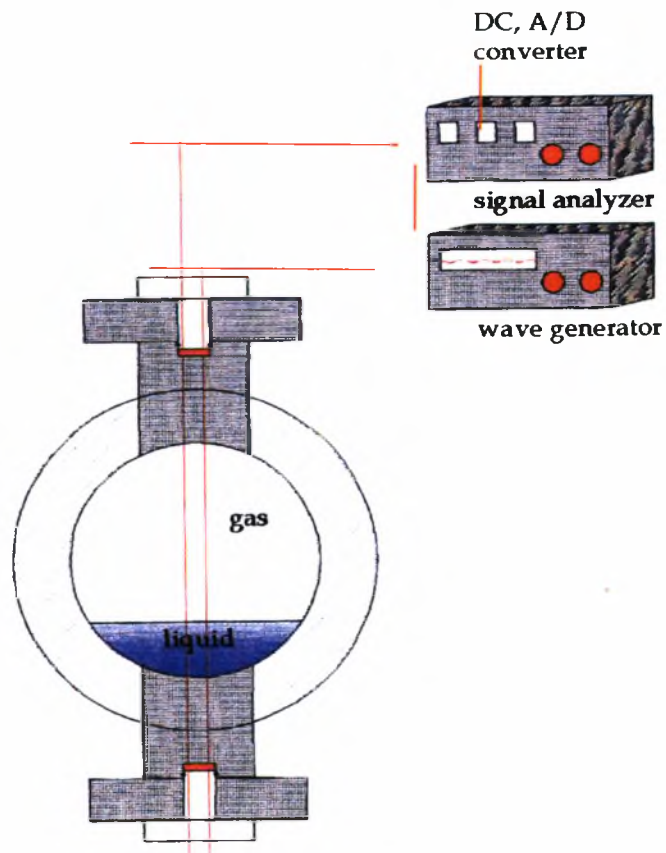
$D_0$  : απόσταση μεταξύ των συρμάτων

$d$  : διάμετρος των συρμάτων

Για λεπτά πάχη της υγρής στιβάδας προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ της αγωγιμότητας που μετρείται και του πάχους είναι γραμμική. Η σχέση μεταξύ αγωγιμότητας και πάχους της στιβάδας βρίσκεται ύστερα από κατάλληλη βαθμονόμηση της μετρητικής διάταξης.

Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας με την αγωγιμομετρική τεχνική, ενώ σε κάθε αισθητήρα υπάρχουν 2 ζεύγη παράλληλων συρμάτων που μετράνε το ύψος της υγρής στιβάδας κάθε φορά. Τα σύρματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ανοξειδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0,4 mm και απείχαν μεταξύ τους 3 mm.

Ο αισθητήρας (probe) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί ηλεκτρόλυση του υγρού από τη γεννήτρια HAMEG HM 8030, 5 MHz. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες μετρούνται στα άκρα μιας μικρής αντίστασης (50  $\Omega$ ), τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή. Ο αναλυτής αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, που ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης, καθώς και από το τμήμα αναδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 25 kHz, που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους της αντιστοιχεί στις μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Ηλεκτρικό κύκλωμα εξασφαλίζει στην έξοδό του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής στιβάδας.



**Σχήμα 3-2** Μετρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και η σύνδεση με τον αναλυτή σήματος

## Ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν σε υγρά μίγματα

1) Ισοπροπανόλη ή ισοπροπυλική αλκοόλη ή 2-προπανόλη (isopropanole )

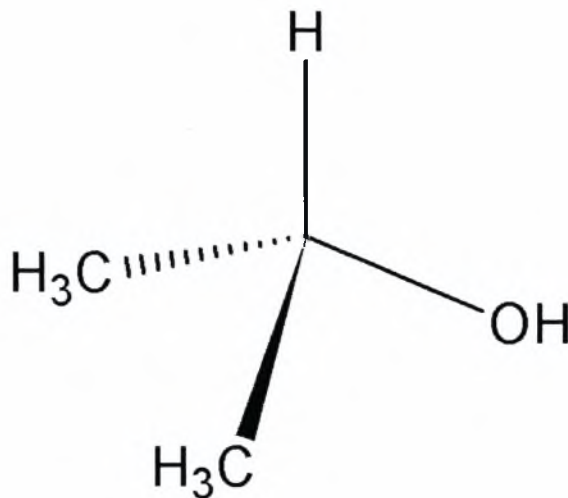
$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$  (συντακτικός τύπος)

### Επίδραση στην επιφανειακή τάση

Σε περιεκτικότητα 5% σε νερό μειώνουν την επιφανειακή τάση από 75 m N/m σε 50 m N/m .

### Γενικά

Άχρωμο, πολύ εύφλεκτο υγρό, πλήρως διαλυτό στο νερό, συνθετικό υλικό δεν απαντάται στη φύση, χρησιμοποιείται ως βιομηχανικός διαλύτης



Σχήμα 3.3 Σχηματική απεικόνιση του συντακτικού τύπου της ισοπροπανόλης

### Ιδιότητες

- Σε κανονικές συνθήκες άχρωμο, πολύ εύφλεκτο, με οσμή που θυμίζει μίγμα αιθανόλης-ακετόνης. Πλήρως διαλυτό στο νερό, την αιθανόλη την ακετόνη το χλωροφόρμιο, το βενζόλιο, καλός διαλύτης για ένα μεγάλο αριθμό οργανικών ενώσεων.
- Σχηματίζει αζεοτροπικό μίγμα με το νερό σε περιεκτικότητα 87,4% αλκοόλη.

- Οξειδώνεται εύκολα και αντιδρά βίαια όταν έρθει σε επαφή με ισχυρά οξειδωτικές ενώσεις
- Η καύση της μπορεί να δώσει προϊόντα τοξικές ενώσεις όπως το CO.
- Αντιδρά με δραστικά μέταλλα όπως το κάλιο προς αλκοξειδία.

### Χρήσεις

- Παραγωγή ακετόνης
- Βιομηχανικός διαλύτης
- Καθαριστικό ηλεκτρικών συσκευών

### Κίνδυνοι

- Είναι πολύ εύφλεκτη και σχηματίζει εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα γι' αυτό θα πρέπει να αποθηκεύεται σε προστατευμένο μέρος, μακριά από θερμότητα και να χρησιμοποιείται σε καλά αεριζόμενους χώρους και με τη βοήθεια προστατευτικών γαντιών.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό της ισοπροπανόλης οξειδώνεται στο συκώτι προς ακετόνη, η οποία πιθανότατα στη συνέχεια μεταβολίζεται σε κάποιο οξικό ή μυρμηκικό άλας και τελικά σε CO<sub>2</sub>.
- Σε περίπτωση κατάποσης ή εισπνοής μεγάλων ποσοτήτων μπορεί να προκαλέσει υπνηλία, ναυτία, αναισθησία ακόμα και θάνατο.

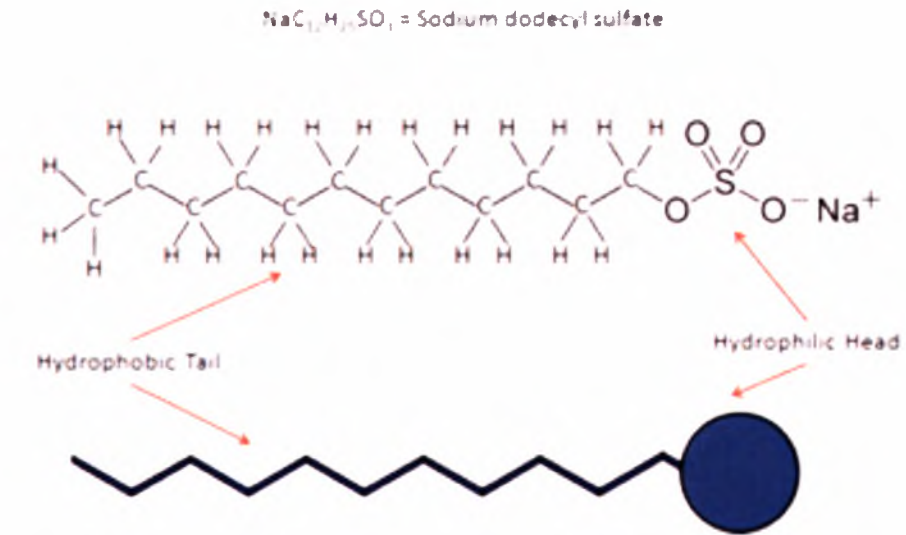
### Στοιχεία

Μοριακό βάρος	: 60,1 g/mol
Εμφάνιση	: άχρωμο υγρό
Αριθμός CAS	: 67-63-0
Αριθμός EC	: 200-661-7
Σημείο τήξης	: - 85,8 °C
Σημείο βρασμού	: 82,5 °C
Ειδικό βάρος	: 0,789
Διαλυτότητα (στο νερό)	: πλήρως διαλυτό
Δείκτης διάθλασης	: 1,378 (20 °C)
Οξύτητα (pKa)	: 16,5

Ιξώδες (cP) : 2,2 (20 °C)  
 Κίνδυνοι : πολύ εύφλεκτο, ερεθιστικό για τα μάτια  
 Θερμοκρασία αυτανάφλεξης : 425 °C  
 Σημείο ανάφλεξης : 12 °C

2) **Sodium dodecyl sulfate (SDS) ή Λαουρυλοθειικό νάτριο**

$C_{12}H_{25}SO_4Na$  (συντακτικός τύπος)



Σχήμα 3.4 Σχηματική απεικόνιση του συντακτικού τύπου του SDS

**Επίδραση στην επιφανειακή τάση**

liquid	Surface tension (mN/m)
Water	71,27
SDS solution (0,5 CMC)	22,02
SDS solution (1 CMC)	21,81
SDS solution (1,5 CMC)	21,6

1 CMC= 2,75 g/L

## Γενικά

Λευκή ή ελαφριά κίτρινη σκόνη με ελαφριά οσμή. Είναι μία ανιονική επιφανειοδραστική ουσία που χρησιμοποιείται σε πολλά καθαριστικά και υγειονομικά σκευάσματα.

## Ιδιότητες

Το μόριο συνδέεται σε μία "ουρά" 12 ατόμων άνθρακα, με μία ομάδα θεικού άλατος που δίνει στο μόριο αμφίφυλες ιδιότητες που απαιτούνται από ένα απορρυπαντικό.

## Χρήσεις

Χρησιμοποιείται για την αφαίρεση ελαιούχων λεκέδων και υπολειμμάτων. Βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις σε βιομηχανικά προϊόντα όπως καθαριστικά πατωμάτων, σαπούνια αυτοκινήτων. Σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις βρίσκεται σε οδοντόκρεμες, σαμπουάν και αφρούς ξυρίσματος.

## Κίνδυνοι

Μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στα μάτια και δερματικές παθήσεις.

## Στοιχεία

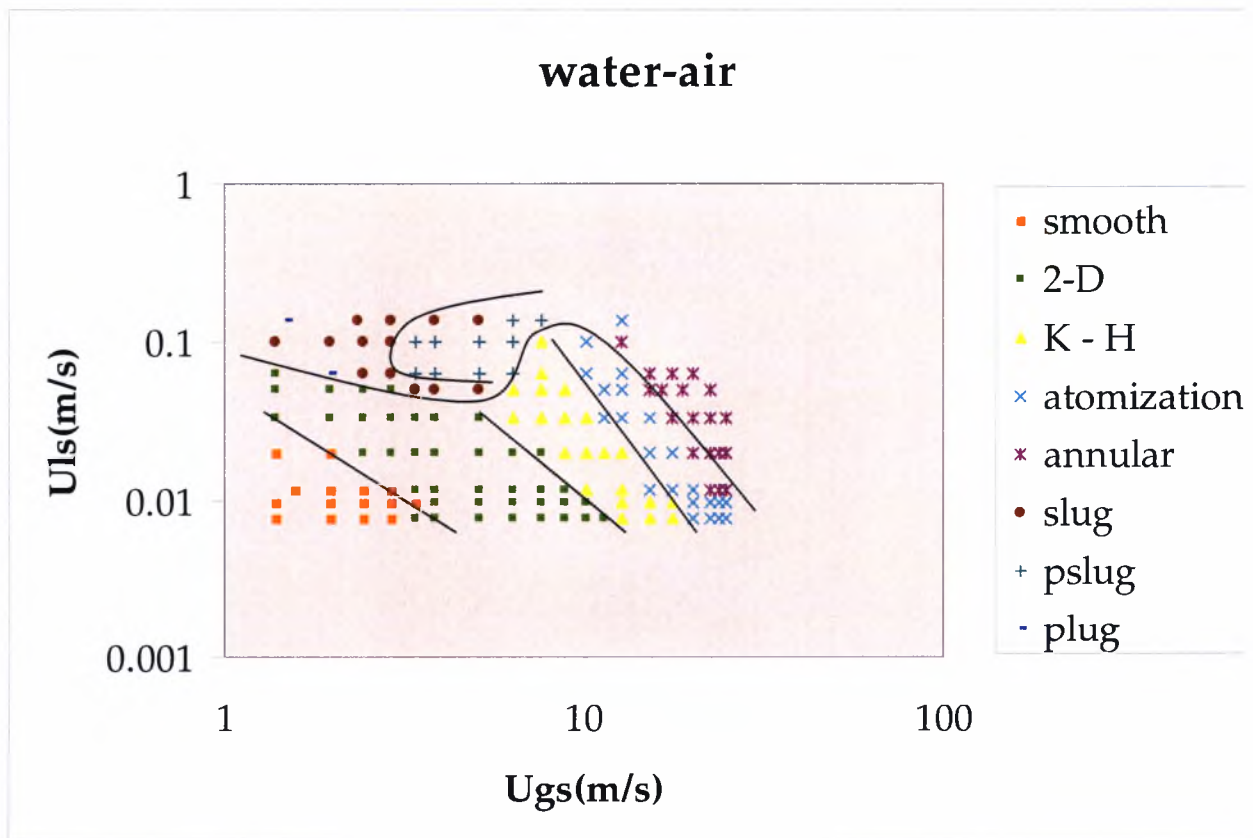
Μοριακό βάρος	: 288,38 g/mol
Εμφάνιση	: λευκή ή ελαφριά κίτρινη σκόνη
Αριθμός CAS	: 151-21-3
Σημείο ανάφλεξης	: > 95 °C
Σημείο τήξης	: 204-207 °C
Ειδικό βάρος	: 1,05
Διαλυτότητα (στο νερό)	: 10g/100g water
Τοξικότητα	: 1288 mg/Kg
Πυκνότητα	: 1,01 g/cm <sup>3</sup>
pH	: 9-10 ( 1% Aq.Sol)

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών παρουσιάζονται με τη μορφή χαρτών καθεστώτων ροής. Γίνεται ξεχωριστή παρουσίαση και ανάλυση για κάθε διάλυμα ενώ στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των χαρτών μεταξύ τους ώστε να προκύψουν τα συμπεράσματα για το πώς επηρεάζει η μεταβολή της επιφανειακής τάσης στο σχηματισμό των καθεστώτων ροής.

### 4.1 Διάγραμμα καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-νερού

Ο χάρτης καθεστώτων ροής που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία για διαφασική ροή αέρα-νερού ( $\sigma=72 \text{ dyn/cm}$ ) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1:



Σχήμα 4.1

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων παρατηρήθηκαν τέσσερα κύρια καθεστώτα ροής στο εσωτερικό του αγωγού : διαλείπουσα ροή (slug flow), ψευδο-

διαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow), διαστρωματωμένη ροή και δακτυλιοειδής ροή (annular flow).

Η διαστρωματωμένη ροή διαχωρίζεται, σύμφωνα με τη θεωρία, σε 4 υποκαθεστώτα : τη λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) όπου εμφανίστηκε σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης, τη διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) που εμφανίζεται ως κανονικές διαταραχές στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων για μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, τη ροή με κύματα τύπου K-H που εμφανίζεται ως κύματα με πιο τραχιά επιφάνεια για περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και ροή με εκνέφωση όπου εμφανίζεται με την εναπόθεση σταγονιδίων που αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων στο πάνω μέρος του αγωγού.

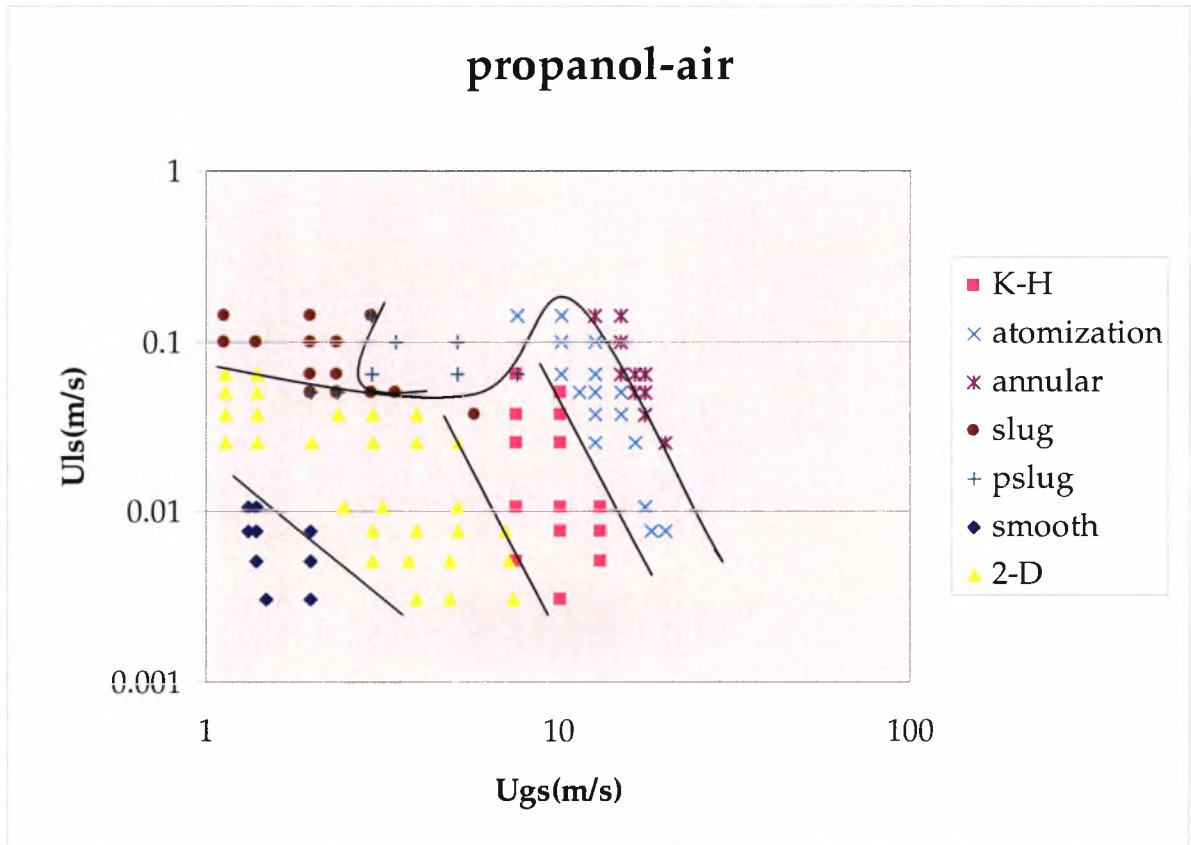
Η δακτυλιοειδής ροή εμφανίστηκε για ακόμα υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του αέρα όπου η κύρια μάζα του υγρού ρέει με τη μορφή στιβάδας στα τοιχώματα του αγωγού με τον αέρα να ρέει στο κέντρο.

Η διαλείπουσα ροή άρχισε να εμφανίζεται για υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του νερού. Αρχικά σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης παρατηρείται μια πολύ μικρή εμφάνιση ήπιας διαλείπουσας ροής (plug) ενώ με την αύξηση της αέριας φάσης κάνει την εμφάνισή της η έντονη διαλείπουσα ροή. Με περαιτέρω αύξηση της αέριας φάσης εμφανίζεται και η ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug).



## 4.2 Διάγραμμα καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-υδατικού διαλύματος ισοπροπανόλης

Ο χάρτης καθεστώτων ροής που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία για διφασική ροή αέρα-υδατικού διαλύματος 5% ισοπροπανόλης ( $\sigma=50 \text{ dyn/cm}$ ) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2



Σχήμα 4.2

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων παρατηρήθηκαν τέσσερα κύρια καθεστώτα ροής στο εσωτερικό του αγωγού : διαλείπουσα ροή (slug flow), ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow), διαστρωματωμένη ροή και δακτυλιοειδής ροή (annular flow).

Η διαστρωματωμένη ροή διαχωρίζεται σε 4 υποκαθεστώτα : τη λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) όπου εμφανίστηκε σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης, τη διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) που εμφανίζεται ως κανονικές διαταραχές στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων για μεγαλύτερες

φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, τη ροή με κύματα τύπου K-H που εμφανίζεται ως κύματα με πιο τραχιά επιφάνεια για περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και ροή με εκνέφωση όπου εμφανίζεται με την εναπόθεση σταγονιδίων που αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων στο πάνω μέρος του αγωγού. Τόσο στη λεία όσο και στη ροή με δισδιάστατα κύματα παρατηρείται η παρουσία «δακρύων» στα τοιχώματα του αγωγού. Η παρουσία των «δακρύων» γίνεται εντονότερη όταν γίνεται μετάβαση από την λεία ροή σε αυτή με τα δισδιάστατα κύματα και ερμηνεύεται από την εξάτμιση του οινοπνεύματος που έχει η ισοπροπανόλη σαν αλκοόλη.

Η δακτυλιοειδής ροή εμφανίστηκε για ακόμα υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του αέρα όπου η κύρια μάζα του υγρού ρέει με τη μορφή στιβάδας στα τοιχώματα του αγωγού με τον αέρα να ρέει στο κέντρο.

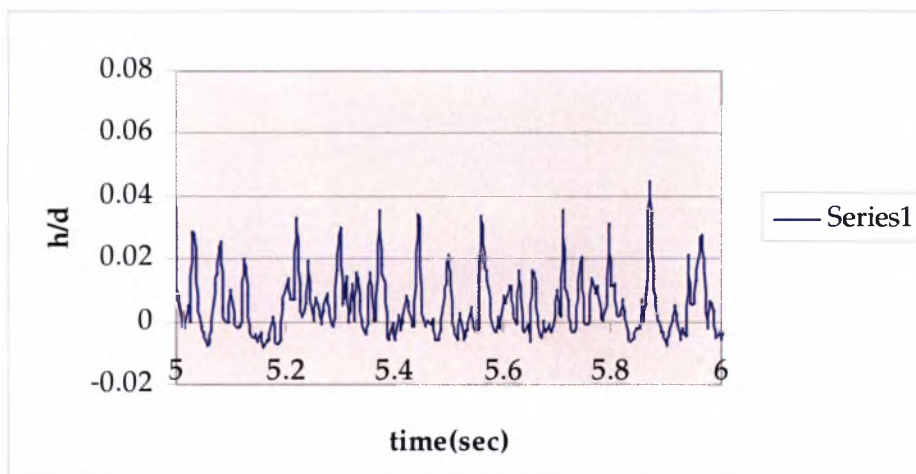
Η διαλείπουσα ροή άρχισε να εμφανίζεται για υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του υγρού διαλύματος. Αρχικά σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης παρατηρείται της αέριας φάσης κάνει την εμφάνισή της η έντονη διαλείπουσα ροή (slug). Με περαιτέρω αύξηση της αέριας φάσης εμφανίζεται και η ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug). Δεν παρατηρείται καθόλου ήπια διαλείπουσα ροή.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων γινότανε συνεχής έλεγχος της περιεκτικότητας της ισοπροπανόλης ώστε να διατηρείται όσο το δυνατόν γίνεται στο 5% του υδατικού διαλύματος. Ο έλεγχος γίνεται με μέτρηση της πυκνότητας του διαλύματος.

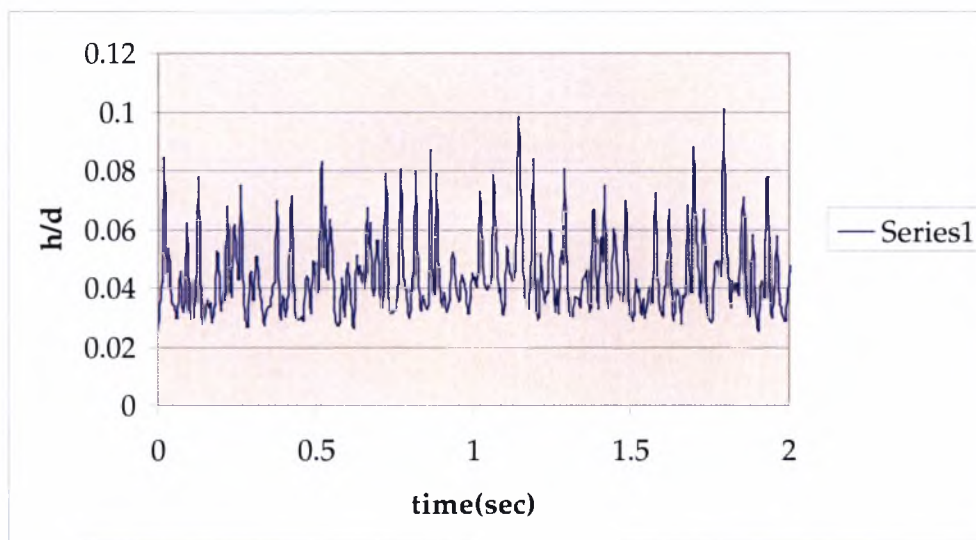
Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι η πυκνότητα του νερού είναι  $0,999 \text{ g/cm}^3$ . Μετρήθηκε η πυκνότητα της ισοπροπανόλης και προέκυψε  $0,804 \text{ g/cm}^3$ . Γίνανε επίσης μετρήσεις για διάφορα υδατικά διαλύματα ισοπροπανόλης : για 500 ml νερού με 15 ml ισοπροπανόλης (περιεκτικότητα 3%) προέκυψε  $0,9925 \text{ g/cm}^3$  ( $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), για 500 ml νερού με 25 ml ισοπροπανόλης (περιεκτικότητα 5%) προέκυψε  $0,9955 \text{ g/cm}^3$  ( $T=24,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ), για 500 ml νερού με 30 ml ισοπροπανόλης (περιεκτικότητα 6%) προέκυψε  $0,9988 \text{ g/cm}^3$  ( $T=25,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας προετοιμάστηκε υδατικό διάλυμα με 5% περιεκτικότητα σε ισοπροπανόλη. Σε διάφορα χρονικά σημεία του πειράματος λαμβανότανε δείγμα του υδατικού διαλύματος, γινότανε μέτρηση της πυκνότητας και εάν παρατηρούταν μεγάλη απόκλιση από την αρχική τιμή λόγω εξάτμισης, γινότανε συμπλήρωση του διαλύματος με ισοπροπανόλη ύστερα από υπολογισμούς.

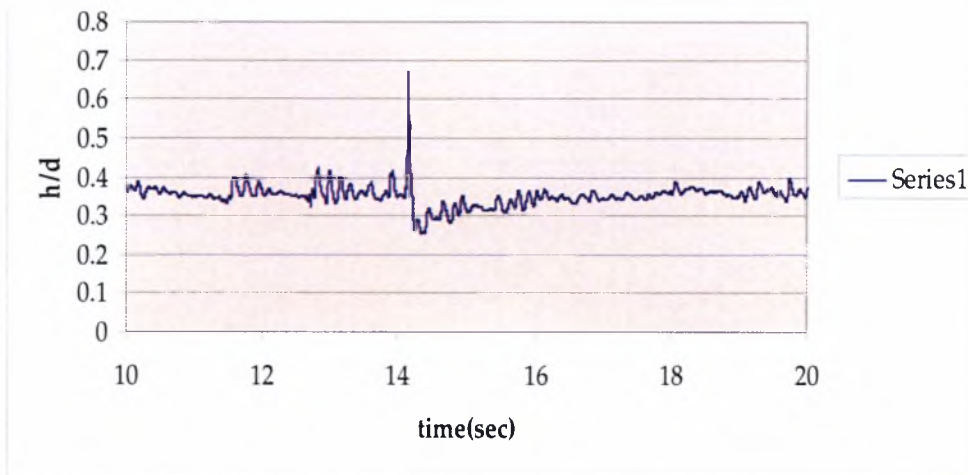
Παρακάτω παρουσιάζονται αποτυπώματα της ροής που προέκυψαν κατά την διαφασική ροή ισοπροπανόλης-αέρα για διαφορετικές τιμές στις ταχύτητες των δύο ρευστών.



Σχήμα 4.3 Αποτύπωμα κυμάτων 2-D ( $U_g=3,8929$  m/s,  $U_l=0,0252$  m/s)



Σχήμα 4.4 Αποτύπωμα κυμάτων K-H ( $U_g=13$  m/s,  $U_l=0,07623$  m/s)



Σχήμα 4.5 Αποτύπωμα κυμάτων slug ( $U_g=2,9279$  m/s,  $U_l=0,50192$  m/s)

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφικές απεικονίσεις της ροής που προέκυψαν κατά την διαφασική ροή ισοπροπανόλης-αέρα



Σχήμα 4.6 Φωτογραφική απεικόνιση λείας διαστρωματωμένης ροής (smooth)



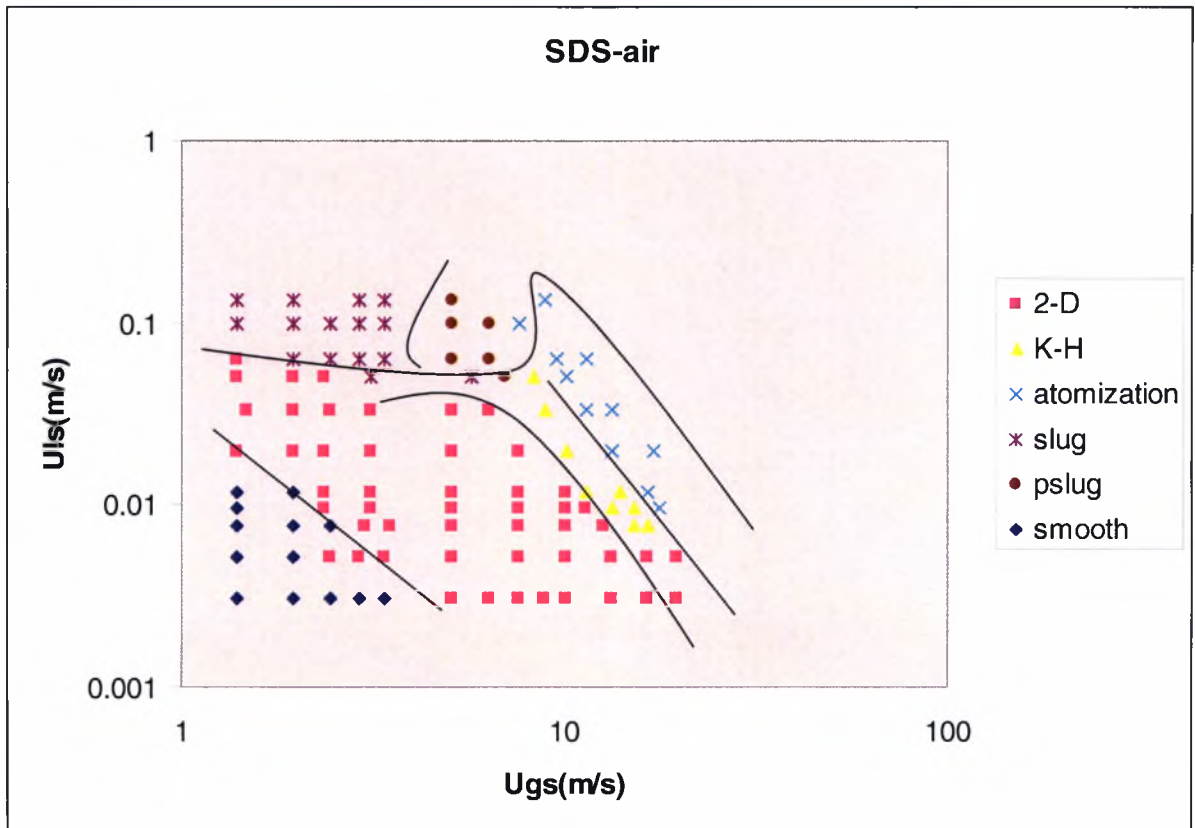
Σχήμα 4.7 Φωτογραφική απεικόνιση διαστρωματωμένης ροής με δισδιάστατα κύματα(2-D)



Σχήμα 4.8 Φωτογραφική απεικόνιση διαστρωματωμένης ροής με κύματα τύπου K-H

### 4.3 Διάγραμμα καθεστώτων ροής για το σύστημα αέρα-υδατικού διαλύματος με SDS

Ο χάρτης καθεστώτων ροής που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία για διφασική ροή αέρα-υδατικού διαλύματος με (1,375 g/L) SDS ( $\sigma=22$  dyn/cm) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.9

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων παρατηρήθηκαν τρία κύρια καθεστώτα ροής στο εσωτερικό του αγωγού : διαλείπουσα ροή (slug flow), ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug flow) και διαστρωματωμένη ροή.

Η διαστρωματωμένη ροή διαχωρίζεται σε 4 υποκαθεστώτα : τη λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) όπου εμφανίστηκε σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της υγρής και της αέριας φάσης, τη διαστρωματωμένη ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) που εμφανίζεται ως κανονικές διαταραχές στην διεπιφάνεια των δύο φάσεων για μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης, τη ροή με κύματα τύπου K-H που εμφανίζεται ως

κύματα με πιο τραχιά επιφάνεια για περαιτέρω αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας της αέριας φάσης και ροή με εκνέφωση όπου εμφανίζεται με την εναπόθεση σταγονιδίων που αποκόπτονται από τις κορυφές των κυμάτων στο πάνω μέρος του αγωγού.

Για τα τέσσερα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροή παρατηρήθηκαν κάποια αξιοσημείωτα φαινόμενα τα οποία και θα αναφερθούν. Κατά τη λεία διαστρωματωμένη ροή η μορφή που παρουσιάζει το υδατικό διάλυμα είναι θολό (mist) και κιτρινωπό κάτι που έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία. Για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες του υγρού και του αέρα στα πρώιμα στάδια δημιουργίας των κυμάτων τα κύματα παρατηρούνται μόνο στο μέσο του σωλήνα και με την παρουσία φυσαλίδων στον πάτο του σωλήνα.

Με αύξηση της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού φυσαλίδες παρατηρούνται στα τοιχώματα και στην επιφάνεια του υγρού. Σε ακόμα μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες υγρού σχηματίζονται στην επιφάνεια του υγρού οπτικά "X" ενώ όταν προέκυψε ροή με εκνέφωση αυτό έγινε παρουσία "σαπουνάδας". Με αύξηση των φαινομενικών ταχυτήτων του αέρα και του νερού σε λεία διαστρωματωμένη ροή παρατηρήθηκαν εσωτερικές δίνες στο υδατικό διάλυμα ενώ σε ροή με εκνέφωση παρατηρήθηκε δημιουργία αιωρούμενων φυσαλίδων. Τέλος σε ακόμα μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες για το υγρό και τον αέρα και για το σχηματισμό των δισδιάστατων κυμάτων το ύψος που παρατηρήθηκε ήταν μικρό.

Η διαλείπουσα ροή άρχισε να εμφανίζεται για υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του νερού. Αρχικά σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης παρατηρείται της αέριας φάσης κάνει την εμφάνισή της η έντονη διαλείπουσα ροή (slug). Με περαιτέρω αύξηση της αέριας φάσης εμφανίζεται και η ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug). Δεν παρατηρείται καθόλου ήπια διαλείπουσα ροή. Κατά την έντονη διαλείπουσα ροή υπήρξε παρουσία φυσαλίδων ενώ σε μεγαλύτερες φαινομενικές ταχύτητες παρουσία "σαπουνάδας". Δεν παρατηρήθηκε καθόλου δακτυλοειδής ροή.

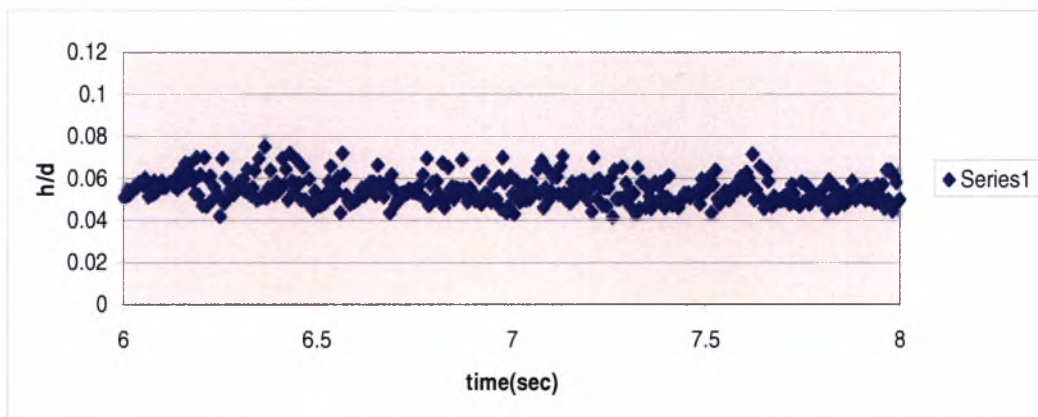
Σημειώνεται επίσης ότι για την έντονη διαλείπουσα ροή (slug) και την ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug) παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις της πτώσης πίεσης.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών όχι μόνο μειώνει την επιφανειακή τάση, αλλά αυξάνει και το επιφανειακό ιξώδες και σε αυτή την αύξηση οφείλονται τα φαινόμενα που παρατηρούνται με τη χρήση τους

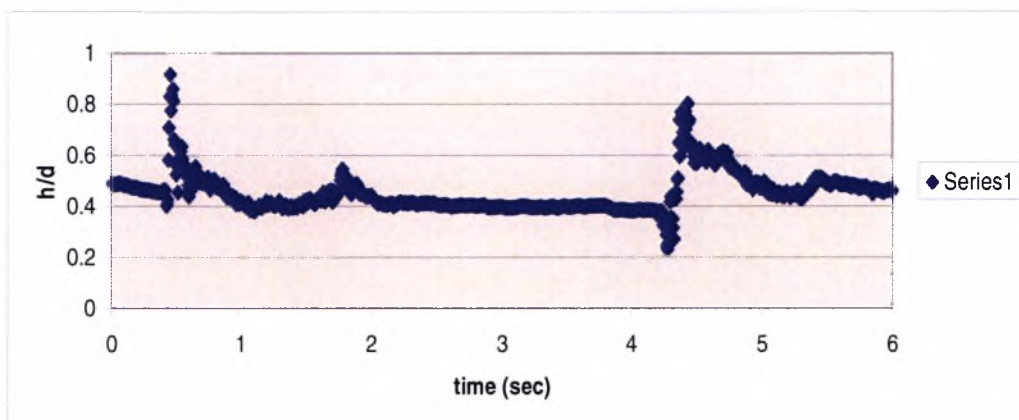
Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε υδατικό διάλυμα με SDS περιεκτικότητας 1 CMC(2,75 g/L) το οποίο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει επιφανειακή τάση  $\sigma=21,81$  dyn/cm.

Η αρχική τιμή της θερμοκρασίας του πειράματος ήταν  $T_{αρχ}=21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ενώ στο τέλος του πειράματος μετρήθηκε  $T_{τελ}=25,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  με πυκνότητα  $0,9975\text{ g/cm}^3$  και αγωγιμότητα  $1.530\text{ mS/cm}$ .

Παρακάτω παρουσιάζονται αποτυπώματα της ροής που προέκυψαν κατά την διφασική ροή διαλύματος SDS-αέρα για διαφορετικές τιμές στις ταχύτητες των δύο ρευστών.

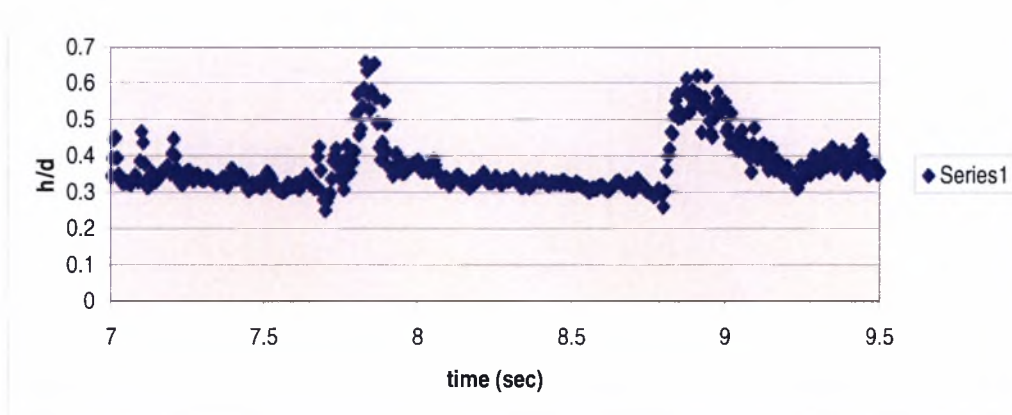


Σχήμα 4.10 Αποτύπωμα κυμάτων 2-D ( $U_g= 12.609\text{ m/s}$ ,  $U_l= 0.007623\text{ m/s}$ )



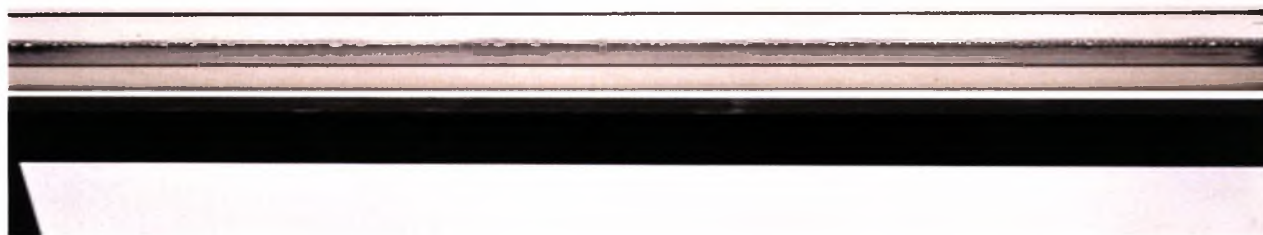
Σχήμα 4.11 Αποτύπωμα κυμάτων slug ( $U_g= 3.1209\text{ m/s}$ ,  $U_l= 0.050192\text{ m/s}$ )





Σχήμα 4.12 Αποτύπωμα κυμάτων pslug ( $U_g = 5.139$  m/s,  $U_l = 0.10016$  m/s)

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφικές απεικονίσεις της ροής που προέκυψαν κατά την διαφασική ροή διαλύματος SDS-αέρα



Σχήμα 4.13 Φωτογραφική απεικόνιση λείας διαστρωματωμένης ροής (smooth)



Σχήμα 4.14 Φωτογραφική απεικόνιση ροής με εκνέφωση (atomization)



Σχήμα 4.15 Φωτογραφική απεικόνιση ενός slug

#### 4.4 Σύγκριση διαγραμμάτων καθεστώτων ροής μεταξύ τους

Γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων καθεστώτων ροής για τα συστήματα αέρα-νερού ( $\sigma=72$  dyn/cm) με το σύστημα αέρα-ισοπροπανόλης 5% ( $\sigma=50$  dyn/cm) και το σύστημα αέρα-SDS 1CMC ( $\sigma=22$  dyn/cm).

Συγκρίνοντας τα συστήματα του αέρα-νερού ( $\sigma=72$  dyn/cm) και αέρα-ισοπροπανόλης 5% ( $\sigma=50$  dyn/cm) μεταξύ τους παρατηρούμαι στη δεύτερη περίπτωση μείωση της περιοχής που εμφανίζεται λεία διαστρωματωμένη ροή(smooth).

Από την άλλη παρατηρήθηκε ότι οι μεταπτώσεις τόσο στα υπόλοιπα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής (2-D,K-H,atomization) όσο και στη ψευδοδιαλείπουσα ροή γίνεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.

Η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δε φαίνεται να επηρεάζεται από την μεταβολή της επιφανειακής τάσης ενώ και το εύρος που εμφανίζεται φαίνεται να παραμένει το ίδιο.

Αξίζει να σημειωθεί η μείωση του εύρους που παρουσιάζει το καθεστώς της ψευδοδιαλείπουσας ροής (pslug) καθώς και η απουσία της ήπιας διαλείπουσας ροής από το διάγραμμα αέρα-ισοπροπανόλης 5%.

Συγκρίνοντας τα συστήματα του αέρα-νερού ( $\sigma=72$  dyn/cm) και αέρα-SDS 1CMC ( $\sigma=22$  dyn/cm) μεταξύ τους παρατηρούμαι ότι στο σύστημα με το SDS οι μεταπτώσεις σε ροή με δισδιάστατα κύματα(2-D),ροή με κύματα K-H και ροή με εκνέφωση(atomization) γίνεται σε υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.

Από την άλλη παρατηρήθηκε ότι στο σύστημα με το επιφανειοδραστικό το εύρος του καθεστώτος ροής με δισδιάστατα κύματα (2-D) είναι μεγαλύτερο και το εύρος του καθεστώτος ροής με κύματα K-H είναι μικρότερο σε σχέση με το σύστημα του νερού.

Παρατηρήθηκε επίσης για το σύστημα με το SDS μείωση του εύρους στο καθεστώς ροής με εκνέφωση(atomization) καθώς και απουσία του καθεστώτος δακτυλιοειδούς ροής.

Σημειώνεται τέλος ότι η μετάπτωση σε ψευδοδιαλείπουσα ροή (pslug) υφίσταται σε υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης καθώς και η απουσία ήπιας διαλείπουσας ροής (plug) για το σύστημα αέρα-SDS.

## 4.5 Σύγκριση διαγραμμάτων καθεστώτων ροής που προέκυψαν με παλαιότερη εργασία

Σε αυτή την ενότητα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτή την εργασία με αποτελέσματα που προέκυψαν από παλαιότερες εργασίες με αντικείμενο μελέτης την επίδραση της επιφανειακής τάσης στη διφασική ροή.

Στην παλαιότερη εργασία με θέμα *'Μελέτη επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό για διφασική ροή αέρα-υγρών'* του Σαμουηλίδη Λάζαρου μελετήθηκε η επίδραση της επιφανειακής τάσης στα συστήματα : αέρα-νερού ( $\sigma=72$  dyn/cm), αέρα-βουτανόλης 1,5% ( $\sigma=48,2$  dyn/cm), αέρα-βουτανόλης 7% ( $\sigma=28,2$  dyn/cm).

Από την εργασία αυτή προέκυψε για την επίδραση της επιφανειακής τάσης μία σειρά από συμπεράσματα. Με μείωση της επιφανειακής τάσης παρατηρήθηκε ελαφριά μείωση της φαινομενικής ταχύτητας του υγρού στην οποία συμβαίνει η μετάπτωση από ήπια διαλείπουσα ροή (plug) σε λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) ενώ δεν επιδρά καθόλου στη μετάπτωση από ήπια διαλείπουσα ροή (plug) σε έντονη διαλείπουσα ροή (slug).

Η μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) σε ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) και ροή με κύματα τύπου K-H (K-H) γίνεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του αέρα ενώ για μετάπτωση από ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) και ροή με κύματα τύπου K-H (K-H) σε ροή με εκνέφωση (atomization) παρατηρήθηκε ίδια φαινομενική ταχύτητα αέρα.

Σύμφωνα με την εργασία η μείωση της επιφανειακής τάσης δεν επίδρασε στη μετάπτωση από ροή με εκνέφωση (atomization) προς δακτυλιοειδή ροή (annular). Παρατηρήθηκε τέλος επέκταση της περιοχής ροής με εκνέφωση (atomization) και συρρίκνωση της περιοχής με ψευδοδιαλείπουσα ροή (pseudo-slug).

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο εργασιών θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κάποιοι παράγοντες. Η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε στην παλαιότερη εργασία περιελάμβανε σωλήνα με μικρότερο μήκος οπότε πιο περιορισμένη δυνατότητα να αναπτυχθούν επαρκώς τα είδη των ροών. Από την άλλη τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν πέρα του αέρα-νερού είναι με διαφορετικά υδατικά διαλύματα και κατ'επέκταση διαφορετικές τιμές επιφανειακής τάσης. Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψιν για τη

σύγκριση το υποκειμενικό στοιχείο τόσο για την παρούσα όσο και για την παλαιότερη αφού ο σχηματισμός των διαγραμμάτων έγινε με βάση την οπτική παρατήρηση.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω και κάνοντας μία σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο εργασιών προκύπτουν κάποια κοινά συμπεράσματα. Η μείωση της επιφανειακής τάσης με τη χρήση αλκοόλης επηρεάζει την μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή (smooth) σε ροή με δισδιάστατα κύματα (2-D) και ροή με κύματα τύπου K-H (K-H) και γίνεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες του αέρα. Επιπροσθέτως παρατηρήθηκε και στις δύο εργασίες η επέκταση της περιοχής ροής με εκνέφωση (atomization) και η συρρίκνωση της περιοχής με ψευδοδιαλείπουσα ροή (pseudo-slug).

Σε άλλη εργασία με θέμα 'Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στη διασπαστική ροή υγρού αερίου σε οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς' της Τζώρτζη Χριστίνας μελετήθηκε η επίδραση της επιφανειακής τάσης στα συστήματα : αέρα-νερού ( $\sigma=72 \text{ dyn/cm}$ ), αέρα-κανονικής βουτανόλης ( $\sigma=40 \text{ dyn/cm}$ ).

Σύμφωνα με αυτή την εργασία η μείωση της επιφανειακής τάσης προκάλεσε την απουσία της λείας διαστρωματωμένης ροής (smooth) καθώς και την αύξηση της ζώνης μετάπτωσης σε ροή με K-H.

Από την άλλη διαπιστώθηκε ότι οι μεταπτώσεις στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής (2-D,K-H,atomization) αλλά και στη ψευδοδιαλείπουσα ροή (pslug) λαμβάνουν χώρα σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.

Τέλος παρατηρήθηκε ότι η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή της επιφανειακής τάσης, γεγονός που παρατηρήθηκε και με τη μεταβολή της πυκνότητας της αέριας φάσης.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο εργασιών θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κάποιοι παράγοντες. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν πέρα του αέρα-νερού είναι με διαφορετικά υδατικά διαλύματα και κατ'επέκταση διαφορετικές τιμές επιφανειακής τάσης. Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψιν για τη σύγκριση το υποκειμενικό στοιχείο τόσο για την παρούσα όσο και για την παλαιότερη αφού ο σχηματισμός των διαγραμμάτων έγινε με βάση την οπτική παρατήρηση.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω και κάνοντας μία σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και της παραπάνω εργασίας προκύπτουν κάποια κοινά συμπεράσματα. Για μείωση της επιφανειακής τάσης με τη χρήση αλκοόλης οι μεταπτώσεις

στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής (2-D,K-H,atomization) αλλά και στη ψευδοδιαλείπουσα ροή (pslug) λαμβάνουν χώρα σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης ενώ η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή δε φαίνεται να επηρεάζεται.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας. Αντικείμενο της μελετης ήταν η μελέτη επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό για διαφασική ροή αέρα-υγρών.

### 5.1 Συμπεράσματα

Από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία συνάχθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα :

Με τη μείωση της επιφανειακής τάσης γενικά

- Δεν επηρεάζεται η μετάπτωση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή (pseudo-slug).
- Μείωση του εύρους του καθεστώτος με ψευδοδιαλείπουσα ροή (pseudo-slug).
- Αύξηση του εύρους του καθεστώτος της ροής με δισδιάστατα κύματα (2-D).
- Παρατηρείται εξαφάνιση της ήπιας διαλείπουσας ροής (plug).

Με μείωση της επιφανειακής τάσης με τη χρήση αλκοόλης (ισοπροπανόλης)

- Οι μεταπτώσεις σε ροή με δισδιάστατα κύματα(2-D),ροή με κύματα K-H και ροή με εκνέφωση(atomization) γίνεται σε χαμηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.

Με μείωση της επιφανειακής τάσης με τη χρήση επιφανειοδραστικού (SDS)

- οι μεταπτώσεις σε ροή με δισδιάστατα κύματα(2-D),ροή με κύματα K-H και ροή με εκνέφωση(atomization) γίνεται σε υψηλότερες φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης.
- Απουσία της δακτυλιοειδούς ροής (annular).
- Μείωση του εύρους των καθεστώτων της ροής με κύματα K-H και της ροής με εκνέφωση (atomization).

## 5.2 Προτάσεις

Υπάρχουνε κάποια σημεία που θα μπορούσαν να βελτιωθούν και κάποιες νέες παράμετροι να ληφθούν υπόψιν έτσι ώστε να βελτιωθεί η μελέτη της επιφανειακής τάσης στη διαφανική ροή. Οι προτάσεις είναι οι εξής :

- Προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης με κάποιο μετρητικό όργανο πέρα από τη βιβλιογραφία για μεγαλύτερη ακρίβεια των συμπερασμάτων.
- Τοποθέτηση συστήματος συλλογής και ανακύκλωσης της εξατμιζόμενης ισοπροπανόλης (και κάθε άλλης αλκοόλης που θα χρησιμοποιηθεί) στο δοχείο διαχωρισμού με σκοπό την καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις.
- Μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων κατά την πειραματική διαδικασία τόσο για τις ταχύτητες του αέρα όσο και του υγρού για καλύτερη προσέγγιση των καθεστώτων των ροών.
- Πραγματοποίηση πειραμάτων με τη χρήση και άλλων ουσιών που μειώνουν την επιφανειακή τάση με σκοπό την επέκταση της μελέτης της επιφανειακής τάσης στη διαφανική ροή.
- Μελέτη για την επιρροή του ιξώδους στο σχηματισμό των καθεστώτων ροής στη διαφανική ροή όταν χρησιμοποιούνται επιφανειοδραστικές ουσίες.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andreussi, P. and Bendiksen, K. An Investigation of Void Fraction in Liquid Slugs for Horizontal and Inclined Gas-Liquid Pipe Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, **15**, pp 937-946, 1989.
- 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. Effect of pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow. *PhD Thesis*, University of Illinois, Urbana, 1986.
- Andritsos, N. and Hanratty, T.J. Interfacial Instabilities for Horizontal Gas-Liquid Flows in Pipelines. *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol 13**, pp 583-603, 1987b.
- 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.
- Ανδρίτσος, Ν., Παράς Σ. Διφασική ροή υγρού-αερίου σε αγωγούς. Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών, Πρόγραμμα Επιμόρφωσης Επιστημόνων Ευτέρπη (Μέτρο 2.1), 1991.
- Baker, D. 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 Inclinations. *Chem. Engineering Science*, **Vol 46**, pp 2123-2131, 1991.
- Barnea, D., Taitel, Y. Flow Pattern transition in two phase Gas-Liquid Flow. *Encyclopedia of Fluid mechanics*, **3**, 403-473, 1986.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow: Horizontal to Vertical. *Chem. Engineering Science*, **Vol 5**, pp 735-740, 1982.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol 6**, pp 217-225, 1980.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E. Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow pattern Transitions for Upward Flow. *Chem. Engineering Science*, **Vol 40**, pp 131-136, 1985.
- Beggs, H.D. and Brill, J.P. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. *J. of Petroleum Technology*, **Vol 25**, pp 607-617, 1973

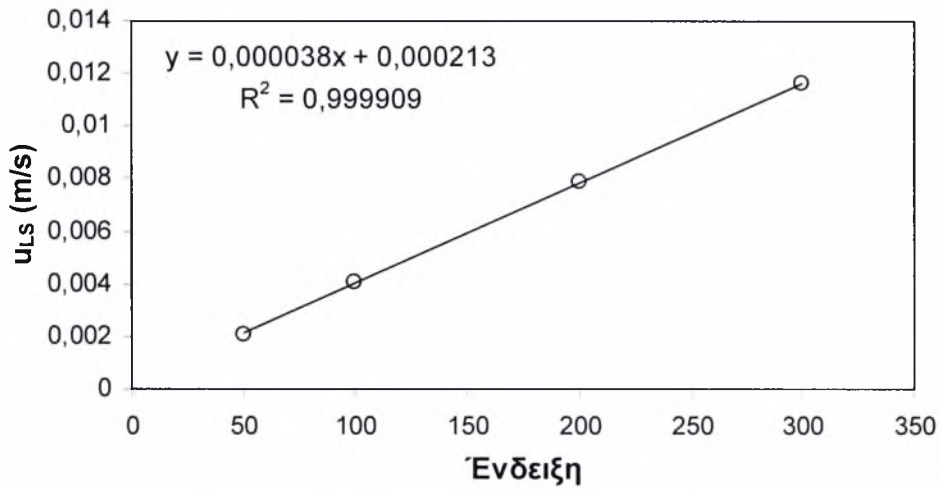
- Brauner, N. and Maron, M. Analysis of Stratified/Non Stratified Transitional Boundaries in Inclined Gas-Liquid Flows. *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol 18**, pp 541-557, 1992.
- Butterworth, D. A Visual study of Mechanism in Horizontal Air-Water Flow. *Atomic Energy Research Establishment Report M 2556*, Harwell, England, 1972.
- Dukler, A.E., Hubbard M.G. A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near-Horizontal Tubes. *Int. Eng. Chem. Fundamentals*, **14**, 337, 1975.
- Dukler, A.E., Taitel Y. Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems: Measurement and Modeling. *Multiphase science and technology*, **2**, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1986.
- Fan, Z., Lusseyran, F. and Hanratty, T.J. Initiation of Slugs in Horizontal Gas-Liquid Flows. *AIChE Journal*, **Vol 39**, pp 1741-1753, 1993.
- Funada, T. and Joseph, D.D. Viscous Potential Flow Analysis of Kelvin-Helmholtz Instability in a Channel. *J. Fluid Mech*, **Vol 445**, pp 263-283, 2001.
- Grolman, E. and Fortuin, M.H. Gas-Liquid Flow in Slightly Inclined Pipes. *Chem. Eng. Science*, **Vol 52**, pp 4461-4471, 1997.
- 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.
- Hanratty, T.J. and Hershman, A. Initiation Of Roll Waves. *AIChE Journal*, **Vol 7**, pp 488-497, 1961.
- Hoogendoorn, C.J. Gas liquid flow in horizontal pipes. *Chem. Enqng. Sci.*, **9**, 205-217, 1959.
- 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.
- Kokal, S.L. and Stanislav, J.F. An Experimental Study of Two-Phase Flow Patterns in Slightly Inclined Pipes-I. Flow Patterns. *Chem. Eng. Science*, **Vol 44**, pp 665-679, 1989.
- 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.
- Kordyban, E.S. Some Details of Developing Slugs in Horizontal Two-Phase Flow. *AIChE Journal*, **Vol 31**, pp 802-806, 1985.
- Kordyban, E.S. and Ranov, T. Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow. *Journal of Basic Engineering*, pp 857-864, December 1970.

- 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.
- Lioumbas, J.S., Paras, S.V. and Karabelas, A.J. Co-Current Stratified Gas-Liquid Downflow- Influence of the Liquid Flow Field on Interfacial Structure. *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol 31**, pp 869-896, 2005.
- LIU Zhen-hua, GAO Yi-pu. Effect of surfactant on two-phase flow patterns of water-gas in capillary tubes. *School of Mechanical Engineering*, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China, 2006.
- Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C. Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. *Chem. Eng. Prog.*, **Vol. 45**, pp 39-48, 1949.
- 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.
- Mishima, K. and Ishii, M. Theoretical Prediction of Onset of Horizontal Slug Flow. *Journal of Fluids Engineering*, **Vol 102**, pp 441-445, 1980.
- Murphy, N.F., J.E. Lastovica, Fallis J.G. Correlation of interfacial tension of two-phase three component Systems. *Industrial and Engineering Chemistry*, **49**, 1035-1042, 1957.
- Newton, C.H., Behnia, M. and Reizes, J.A. The Effect of Liquid Viscosity on Gas Wall and Interfacial Shear Stress in Horizontal Two-Phase Pipe Flow. *Chem. Eng. Science.*, **Vol. 54**, pp 1071-1079, 1999.
- Simmons, M.J.H. and Hanratty, T.J. Transition from Stratified to Intermittent Flows in Small Angle Upflows. *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol 27**, pp 599-616, 2001.
- 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., Barnea, D. and Dukler, A.E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical Tube. *AIChE Journal*, **Vol 26**, pp 345-354, 1980.
- Tanabordee Duangprasert a, Anuvat Sirivat, Kitipat Siemanond, James O. Wilkes. Vertical two-phase flow regimes and pressure gradients under the influence of SDS surfactant. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, 808-817, 2008.
- Wallis, G.,B. One Dimensional two-phase flow. McGraw-Hill, New York 1969.
- Wallis, G.B. and Dodson, 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

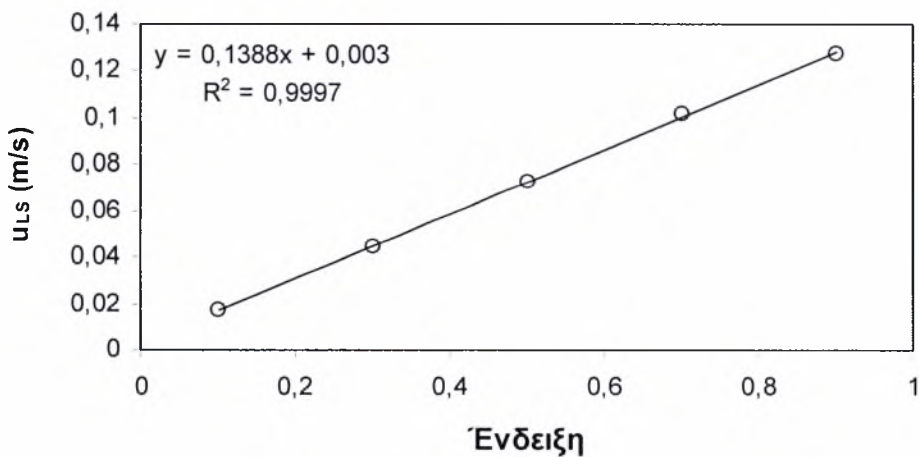
- Wilkens R.J., Thomas D.K. Multiphase drag reduction: Effect of eliminating slugs. Department of Chemical and Materials Engineering, University of Dayton, 300 College Park, Dayton, OH 45469-0246, USA, 2006.
- Woods, B.D., Hurlburt, E.T. and Hanratty, T.J. Mechanism of Slug Formation in Downwardly Inclined Pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol. 26**, pp 997-998, 2000.
- Wu, H.L., Pots, B.F.M., Hollenberg, J.F. and Meerhoff, R. Flow Pattern Transitions in Two-Phase Gas/Condensate Flow at High Pressure in a 8-inch Horizontal Pipe. *Conference of Multiphase Flow*, pp 13-21, The Hague, Netherlands, May 1987.
- Σαμουηλίδης Λ. Μελέτη επίδρασης της επιφανειακής τάσης στη διαμόρφωση περιοχών ροής σε οριζόντιο αγωγό για διφασική ροή αέρα-υγρών. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1992.
- Τζώτζη, Χ. Επίδραση των Φυσικών Ιδιοτήτων των Ρευστών στη Διφασική Ροή Υγρού-Αερίου σε Οριζόντιους και Σχεδόν Οριζόντιους Αγωγούς. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2009.
- Συρανίδου Κ. Επίδραση της κλίσης του αγωγού στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σε Διφασική ροή Υγρού-Αερίου. Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2009.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

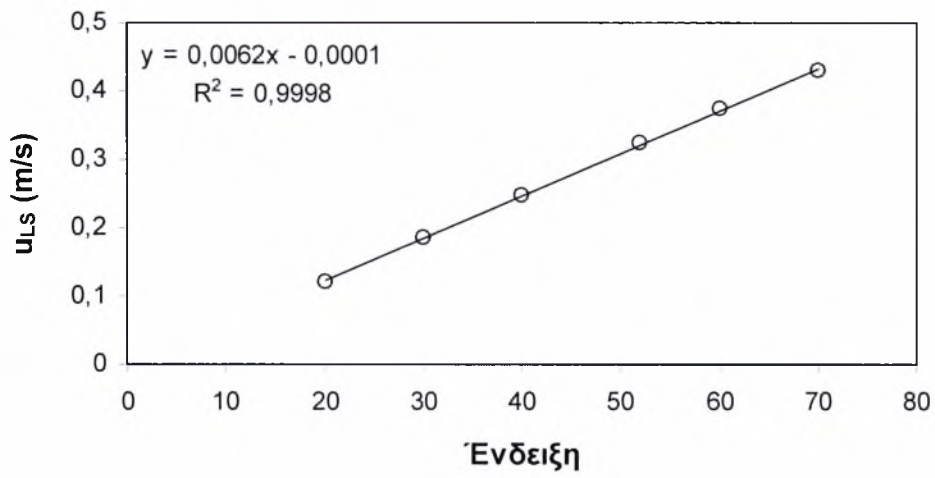
### Καμπύλες Βαθμονόμησης Ροόμετρων Υγρής Φάσης



Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου LF1 (μικρής παροχής)

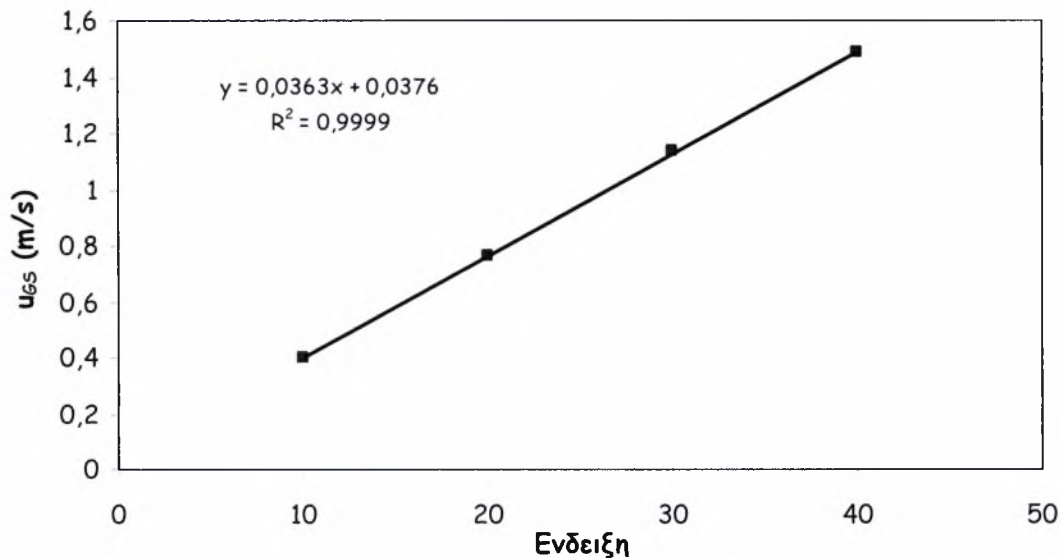


Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου LF2 (μεσαίας παροχής)

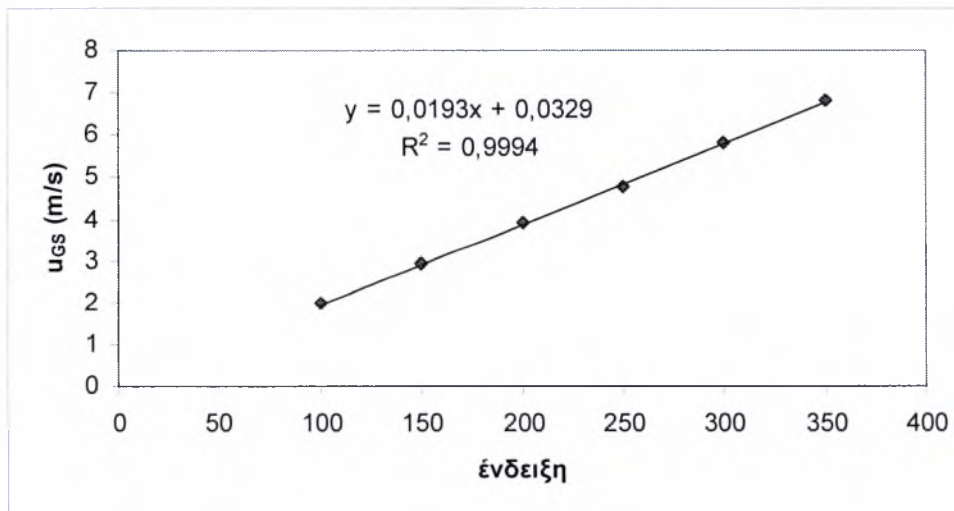


Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου LF3 (μεγάλης παροχής)

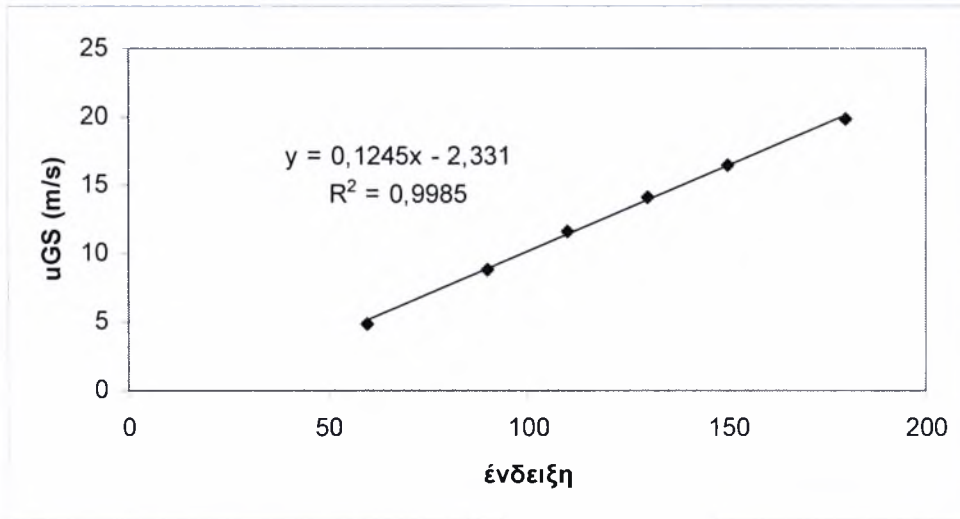
## Καμπύλες Βαθμονόμησης Ροόμετρων Αέριας Φάσης



Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου GF1 (μικρής παροχής)



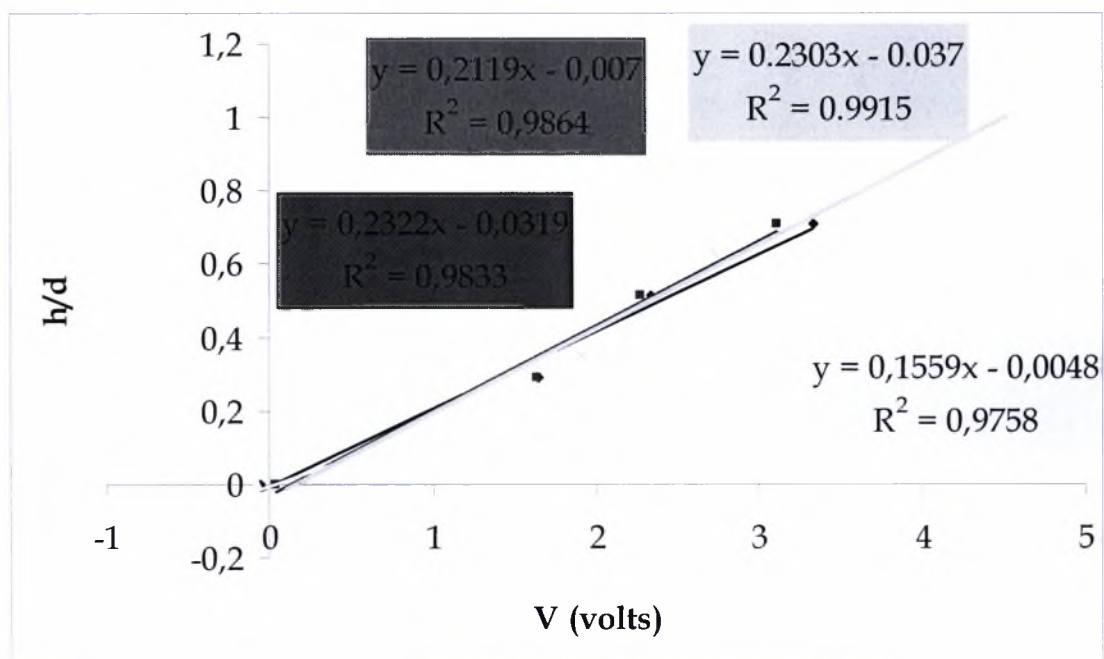
Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου GF2 (μεσαίας παροχής)



Καμπύλη βαθμονόμησης ροόμετρου GF3 (μεγάλης παροχής)



## Καμπύλες Βαθμονόμησης Μετρητικών Παράλληλων Συρμάτων



- #1
- #2
- #3
- #4

### ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Επιφανειακή τάση για νερό

temperature (° C)	surface tension (erg cm <sup>-2</sup> )
-8	77.0
-5	76.4
0	75.6
5	74.9
10	74.22
15	73.49
18	73.05
20	72.75
25	71.97
30	71.18
40	69.56
50	67.91
60	66.18
70	64.4
80	62.6
100	58.9

Πηγή: <http://scienceworld.wolfram.com/physics/SurfaceTension.html>

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Επιφανειακή τάση για ισοπροπανόλη

**Table 4. Surface Tension of 2-Propanol (1) + Water (2)**

mass %	$x_1$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$ at $t/^\circ\text{C}$						
		20	25	30	35	40	45	50
0	0.000	72.75	72.01	71.21	70.42	69.52	68.84	67.92
5	0.016	50.32	49.58	48.88	48.16	47.37	46.66	45.82
10	0.032	41.21	40.42	39.73	39.06	38.43	37.78	37.04
15	0.050	35.27	34.63	34.01	33.38	32.76	32.13	31.51
20	0.070	31.16	30.57	29.98	29.37	28.79	28.18	27.59
25	0.091	28.88	28.28	27.71	27.14	26.58	26.04	25.47
30	0.114	27.38	26.82	26.28	25.73	25.18	24.66	24.11
40	0.167	25.81	25.27	24.74	24.23	23.72	23.21	22.69
50	0.231	24.78	24.26	23.76	23.27	22.78	22.29	21.81
60	0.310	24.05	23.51	22.97	22.54	22.03	21.52	21.01
70	0.412	23.17	22.68	22.18	21.71	21.22	20.76	20.28
80	0.545	22.62	22.14	21.66	21.18	20.71	20.23	19.78
90	0.730	22.21	21.69	21.18	20.66	20.16	19.74	19.23
100	1.000	21.74	21.22	20.72	20.23	19.71	19.21	18.69

<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je00019a016>

## ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Επιφανειακή τάση για SDS

<b>liquid</b>	<b>Surface tension (mN/m)</b>
Water	71,27
SDS solution (0,5 CMC)	22,02
SDS solution (1 CMC)	21,81
SDS solution (1,5 CMC)	21,6

1 CMC= 2,75 g/L

<http://www.sciencedirect.com/science>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104179