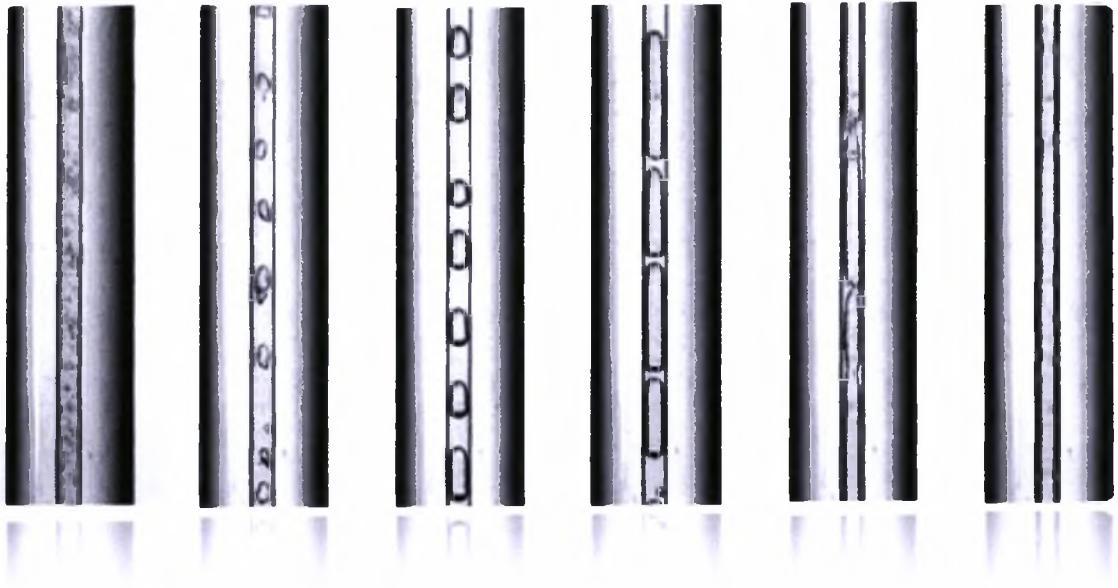


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥΣ
ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ



ΕΚΠΟΝΗΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ

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

ΒΟΛΟΣ 2007



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

Αριθ. Εισ.: 5339/1
Ημερ. Εισ.: 25-05-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2007
ΑΘΑ

© 2007 Αθανασιάδης Κωνσταντίνος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 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
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Τρίτος Εξεταστής Δρ. Μιχάλης Βλαχογιάννης
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ.Νικόλαο Ανδρίτσο για την πολύ καλή συνεργασία του και την υπομονή του. Ο κ.Ανδρίτσος μου έδειξε τα βήματα ώστε να φέρω τελικά σε πέρας την πτυχιακή μου εργασία.

Πολλά ευχαριστώ χρωστάω στον κ.Μιχάλη Βλαχογιάννη για την πολύ σημαντική του βοήθεια κατά την κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Χωρίς τη βοήθεια του, η διάταξη δεν είχε ακόμα στηθεί.

Δεν μπορώ να ξεχάσω τον Σαράντη Πανταζή, τον Βαγγέλη Τζανιδάκη καθώς και την Κατερίνα Δράκου για την προθυμία τους να με βοηθήσουν σε διάφορα θέματα της διπλωματικής.

Από την άλλη πλευρά θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Κατσαούνη Βαγγέλη, Αντώνη Γούλα, Χάρη Αργυρίου και Γιώργο (Σάββα) Ζήση για όλα αυτά τα χρόνια που περάσαμε στο Βόλο.

Πάνω από όλους, θέλω να εκφράσω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη στους γονείς μου Νεόφυτο και Ρούλα και στις αδερφές μου Δέσποινα και Στέλλα για την ψυχολογική και οικονομική τους ενίσχυση όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η διφασική ροή σε κανάλια μικρής διατομής ή σε αγωγούς μικρής διαμέτρου βρίσκει καθημερινά περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Οι σημαντικότερες από αυτές αφορούν προς το παρόν τον τομέα της μηχανολογίας. Οι εξατμιστήρες με μικρά κανάλια και οι εναλλάκτες πλακών-πτερυγίων αποτελούν κάποιες από τις πιο γνωστές εφαρμογές της. Έχουν κατασκευαστεί αντλίες μικρής διαμέτρου που χρησιμοποιούνται για ραδιενεργά ή διαβρωτικά αέρια ενώ τα συστήματα ψύξης των ηλεκτρονικών και οι εξατμιστήρες κυψελίδων καυσίμου συμπεριλαμβάνουν επίσης τη ροή σε κανάλια μικρής διαμέτρου. Μπορούμε να συναντήσουμε τη ροή σε minichannels και σε άλλους τομείς εκτός της μηχανολογίας (άλλες φορές σε ευρέως χρησιμοποιούμενα και άλλες φορές μόνο σε πειραματικά συστήματα).

Σε λίγες μόνο περιπτώσεις μπορεί να γίνει η αποδοχή ότι η ροή είναι μονοφασική. Είτε λόγω της ύπαρξης κάποιου αερίου είτε λόγω συμπύκνωσης ή εξάτμισης, η ροή συμπεριλαμβάνει συνήθως δύο φάσεις.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η κατακόρυφη διφασική ροή αέρα-νερού σε κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου 5.4 mm. Οι βασικοί στόχοι της διπλωματικής εργασίας είναι οι εξής:

- Η δημιουργία ενός χάρτη ροής με βάση τις πειραματικές μετρήσεις
- Η αναλυτική περιγραφή των καθεστώτων ροής που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του πειράματος
- Η ανασκόπηση των μοντέλων ροής που απαντώνται στη βιβλιογραφία για την πρόβλεψη της μετάπτωσης από ένα καθεστώς ροής σε άλλο καθώς και της πτώσης πίεσης για κανονικούς αγωγούς

- Η ανασκόπηση των αντίστοιχων μοντέλων ροής για αγωγούς μικρής διαμέτρου
- Η δημιουργία χαρτών ροής με βάση τα ευρέως αποδεκτά μοντέλα για ροή σε κανονικούς αγωγούς και η σύγκριση τους με τον πειραματικό χάρτη ροής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	.....
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	.....1
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	.....5
2.2 ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΑΓΩΓΟ.....	.....7
2.3 ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ.....	.....10
2.4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΘΕΣΤΩΤΟΣ ΡΟΗΣ.....	.....12
2.5 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΩ ΡΟΗ-ΜΟΝΤΑΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ.....	.....13
2.6 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΝΩ ΡΟΗ.....	.....22
2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΕΝΟΥ.....	.....24
2.7.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ ΡΟΗΣ.....	.....25
2.7.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ.....	.....27
2.8 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΣΕ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	.....30
2.9 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ.....	.....31
2.9.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ.....	.....39
2.9.2 ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ.....	.....44
2.9.3 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ.....	.....45
2.10 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΙΞΩΔΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	.....47
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	.....50

3.2 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	52
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	
4.1 ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ.....	53
4.2 ΠΡΟΤΥΠΑ ΡΟΗΣ.....	55
4.2.1 ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΡΟΗ.....	55
4.2.2 ΑΝΑΜΕΙΚΤΗ ΡΟΗ.....	57
4.2.3 ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗΣ ΡΟΗ.....	59
4.2.4 ΡΟΗ ΜΕ ΔΙΑΣΚΟΡΠΙΣΜΕΝΕΣ ΦΥΣΑΛΙΔΕΣ.....	59
4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΤΑΙΤΕΛ, DUKLER ΚΑΙ BARNEA.....	61
4.3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	61
4.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ 2 ΧΑΡΤΩΝ.....	64
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	65
6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69
I. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	72

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Πολυφασική ροή είναι η ταυτόχρονη ροή δύο ή περισσότερων φάσεων. Με τον όρο φάση αναφερόμαστε στις τρεις καταστάσεις της ύλης (αέρια, υγρή, στερεή). Η πολυφασική ροή μπορεί να δημιουργείται είτε με φυσικό τρόπο είτε τεχνητά ενώ η πιο απλή μορφή της περιλαμβάνει τη ροή μόνο δύο φάσεων (διφασική ροή). Στη παρούσα εργασία θα μελετήσουμε τη διφασική ροή νερού-αέρα.

Οι πολυφασικές ροές συμπεριλαμβάνονται σε πολυάριθμες βιομηχανικές διεργασίες και συμβάλλουν στην ανάπτυξη πολλών φυσικών φαινομένων. Στην πραγματικότητα κάθε τεχνολογία διεργασίας πρέπει να συμφωνεί με τις αρχές των πολυφασικών ροών, από τη λειτουργία των αντλιών και των στροβίλων (κυρίως σε περίπτωση υποπίεσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία φουσαλίδων) στις διεργασίες παρασκευής χαρτοπολτού. Η ποσότητα των κοκκοειδών υλικών (όπως κάρβουνα, ορυκτά, δημητριακά κ. λ. π.) που μεταφέρονται κάθε χρόνο είναι τεράστια και σε πολλά στάδια η ροή τους είναι απαραίτητη. Είναι φανερό ότι, η ικανότητα της πρόβλεψης της συμπεριφοράς της ροής είναι πολύ σημαντική. Για παράδειγμα η ροή του μελανιού σε έναν εκτυπωτή είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας για την ποιότητα και την ταχύτητα του.

Πολυφασικές ροές μπορούμε φυσικά να δούμε και στο περιβάλλον μέσω του χιονιού, της ομίχλης, των σύννεφων και πολλών άλλων φυσικών φαινομένων. Επίσης, βασικές βιολογικές ροές, όπως η ροή του αίματος, ανήκουν επίσης στην κατηγορία των πολυφασικών ροών. Επομένως οι τελευταίες απασχολούν και την ιατρική επιστήμη κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

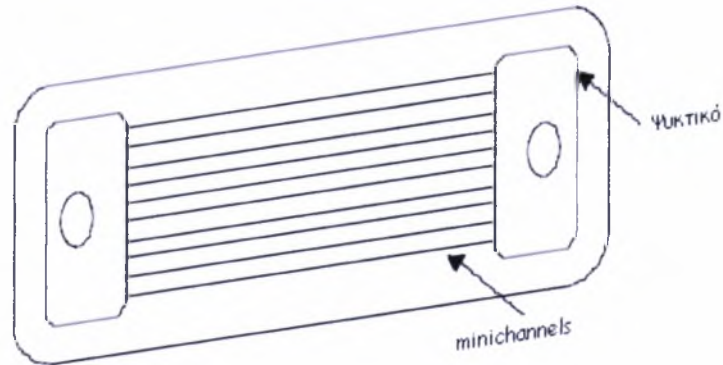
καθώς συναντώνται σε πολλές ιατρικές εφαρμογές όπως για παράδειγμα την διαδικασία της λιθοτριψίας.

Όσον αφορά τον τομέα της μηχανολογίας που μας ενδιαφέρει περισσότερο οι εφαρμογές είναι πολλές και σημαντικές. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε τις διεργασίες θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού καθώς και τη λειτουργία των εναλλακτών θερμότητας και των ατμοστροβίλων. Συνδυασμό οριζόντιας και κάθετης ροής συναντούμε στη μεταφορά φυσικού αερίου και πετρελαίου. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε συχνά τριφασική ροή (νερό-πετρέλαιο-αέριο).

Σημαντικές είναι και οι εφαρμογές της πολυφασικής ροής στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν οι κυψελίδες καυσίμου και οι γεωθερμικές στήλες κατά τη χρήση των οποίων έχουμε κατακόρυφη προς τα άνω διφασική ροή.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πολλαπλασιαστεί οι εφαρμογές της διφασικής ροής σε αγωγούς μικρής διαμέτρου. Εφαρμογές της μπορούμε να συναντήσουμε ακόμα και στον τομέα της βιολογίας και της ιατρικής. Προς το παρόν, το κύριο πεδίο εφαρμογής της είναι ο τομέας της μηχανολογίας και πιο συγκεκριμένα κυρίως οι διεργασίες εναλλαγής θερμότητας.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση εξατμιστήρα με παράλληλα mini- ή micro-channels.

Στόχος της εργασίας είναι η ανασκόπηση (και η αξιολόγηση) των μοντέλων διαφασικής ροής που απαντώνται στη βιβλιογραφία για τη πρόβλεψη της μετάπτωσης από ένα καθεστώς ροής σε άλλο, της πτώσης πίεσης και των θερμικών χαρακτηριστικών του εκάστοτε συστήματος. Αν οι προβλέψεις δεν είναι σωστές, το σύστημα μπορεί να καταναλώνει μεγαλύτερη ενέργεια ή μπορεί η τελική του απόδοση να είναι μικρότερη. Παραδείγματος χάριν, αν σχεδιάσουμε έναν εξατμιστήρα έχοντας προβλέψει τη μισή από την πραγματική πτώση πίεσης, η απόδοση του θα είναι πολύ χαμηλότερη συγκριτικά με ενός μεγαλύτερου. Από την άλλη, αν προβλέψουμε τη διπλάσια πτώση πίεσης, θα χρησιμοποιήσουμε τελικά έναν μεγάλο εξατμιστήρα, ενώ έχουμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε ένα πιο συμπαγή με λιγότερους ή πιο κοντούς σωλήνες.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί τα τελευταία χρόνια με τη μελέτη της διαφασικής ροής σε μικρούς αγωγούς (minichannels). Ωστόσο μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποιο ευρέως αποδεκτό μοντέλο ροής ικανό να προβλέπει με ακρίβεια την κατανομή των φάσεων και την πτώση πίεσης. Η δυσκολία στην εύρεση ενός ευρέως αποδεκτού κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

μοντέλου ροής για αγωγούς μικρής διαμέτρου έγκειται κυρίως στην αυξημένη επίδραση της επιφανειακής τάσης. Για αυτόν το λόγο η χρησιμοποίηση των κλασικών μοντέλων ροής (για κανονικούς αγωγούς) για πρόβλεψη σε αγωγούς μικρής διαμέτρου δεν αποφέρει ακριβή αποτελέσματα.

Ένα ακόμα πρόβλημα που προστίθεται είναι η μεγαλύτερη δυσκολία κατά την ταυτοποίηση (ή αναγνώριση) του προτύπου ροής. Κάποιοι ερευνητές έχουν σχεδιάσει ανόμοιους χάρτες ροής αν και τα πειράματα τους διεξήχθησαν υπό παρόμοιες συνθήκες.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Μοντελοποίηση και Πρόβλεψη της Ροής

Το κύριο ζητούμενο σε μοντέλα ροής για διυλιστήρια, αγωγούς πετρελαίου και γεωθερμικές στήλες είναι η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης, της κατανομής των φάσεων και των θερμικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Αν οι προβλέψεις δεν είναι σωστές οι κυριότερες συνέπειες μπορεί να είναι υπερβολική κατανάλωση ενέργειας ή μικρότερη απόδοση του εκάστοτε συστήματος.

Όπως είναι γνωστό, σωστές και ακριβείς προβλέψεις για τη μονοφασική ροή μπορούν να γίνουν μόνο για στρωτή ροή, για πολύ μικρούς αριθμούς Re και σε απλές γεωμετρίες. Όταν ο αριθμός Re αυξάνεται σε τιμές πρακτικών εφαρμογών, ακριβείς προβλέψεις δεν μπορούν πλέον να γίνουν και ο μόνος τρόπος είναι εμπειρικές σχέσεις.

Επομένως δεν πρέπει να μας ξαφνιάζει το γεγονός ότι οι πολυφασικές ροές με παραμορφώσιμες διεπιφάνειες, ικανές να διαμορφωθούν κατά άπειρους τρόπους αποτελούν ένα δύσκολο πρόβλημα προς επίλυση. Προς το παρόν, η αναλυτική επίλυση τους είναι εφικτή μόνο σε ιδανικές συνθήκες (π.χ. στρωτή ροή πάνω από ένα απομονωμένο σφαιρικό μόριο, ένα σταγονίδιο ή μια φυσαλίδα). Στις περισσότερες περιπτώσεις η πολυφασική ροή είναι τυρβώδης και χαοτική. Η ανάλυση και η μοντελοποίηση της βασίζεται κατά κύριο λόγο σε εμπειρικές σχέσεις και επομένως η αξιοπιστία των προβλέψεων κρίνεται από την αξιοπιστία των εμπειρικών σχέσεων.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Αντιμετωπίζοντας το περίπλοκο πρόβλημα της πρόβλεψης της πολυφασικής ροής, ερευνητές αποφάσισαν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα πιο πρακτικά. Τα τελευταία 50 χρόνια έχουν γίνει πολλά οπτικά πειράματα και οι ροές έχουν παρατηρηθεί και ταξινομηθεί.

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής υγρού-αερίου 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. Η δημιουργία ενός συγκεκριμένου καθεστώτος ροής εξαρτάται από τις συνθήκες της ροής (παροχές, πίεση) και της μεταφοράς θερμότητας, από τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων (πυκνότητες, ιξώδη, διατμητική τάση), καθώς και από τη γεωμετρία του αγωγού (σχήμα διατομής, κλίση, ισοδύναμη διάμετρος). Μία μέθοδος για την απεικόνιση της μετάπτωσης από ένα καθεστώς ροής σε άλλο αποτελούν οι λεγόμενοι χάρτες καθεστώτων ροής, οι οποίοι συζητιούνται παρακάτω.

Οι πρώτες εργασίες στον προσδιορισμό των περιοχών ροής βασίζονταν κυρίως σε οπτικές παρατηρήσεις. Αργότερα ο προσδιορισμός αυτός βοηθήθηκε με φωτογράφιση, βιντεοσκόπηση και πλήθος πειραματικών μεθόδων.

Στη βιβλιογραφία μπορούμε να συναντήσουμε μεγάλο αριθμό ορισμών καθεστώτων ροής, κάτι που προφανώς αποτελεί συνέπεια της υποκειμενικής φύσης των ορισμών. Άλλοι λόγοι για τη σύγχυση που επικρατεί είναι τα πολλά ονόματα για το ίδιο καθεστώς και η ύπαρξη υβριδικών καθεστώτων ροής, καθεστώτων δηλαδή που βρίσκονται στο στάδιο μετάπτωσης από ένα καθεστώς σε άλλο.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.2 Καθεστώτα Ροής σε Κατακόρυφο Αγωγό

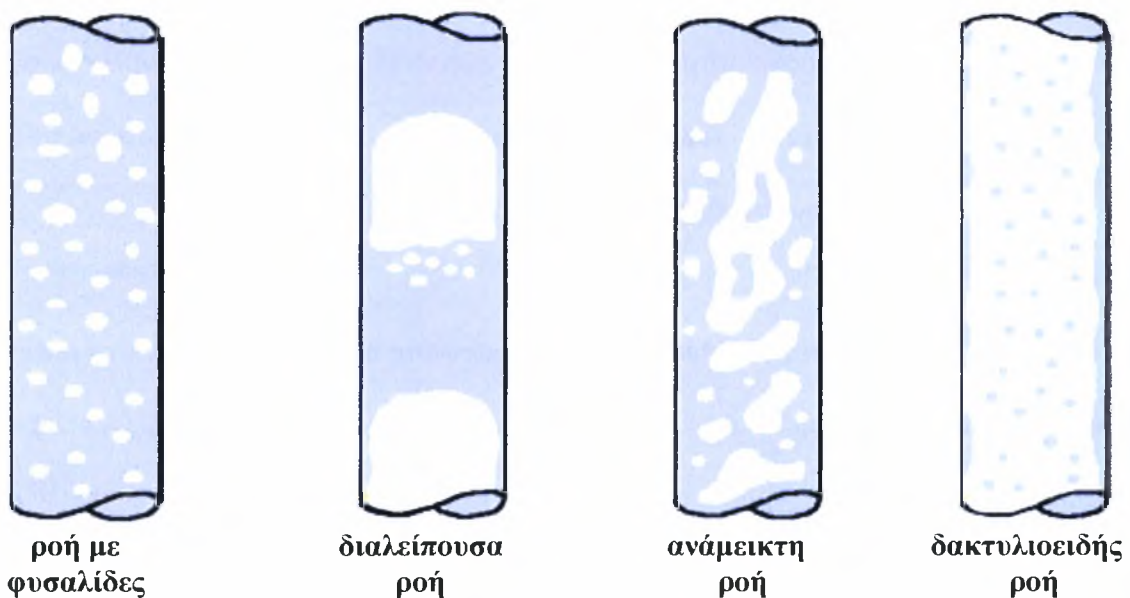
Η κατακόρυφη διφασική ροή προς τα πάνω (vertical upward flow) σε κυλινδρικό αγωγό συναντάται σε πλείστες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στην άντληση πετρελαίου και φυσικού αερίου, στην παραγωγή ατμού, στις διεργασίες κλιματισμού, σε χημικές διεργασίες και σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση των καθεστώτων ροής που παρατηρούνται στη κατακόρυφη διφασική ροή προς τα πάνω. Αν και έχουν παρουσιαστεί πολλά καθεστώτα ροής, τα πλέον αποδεκτά από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι τα εξής (Taitel et al, 1980, Barnea and Taitel, 1986). Τα καθεστώτα αυτά παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2.2.

Ροή με φυσαλίδες (bubble flow): Η αέρια φάση είναι διανεμημένη στη μορφή μικρών ευδιάκριτων φυσαλίδων μέσα σε συνεχή υγρή φάση. Η ροή χαρακτηρίζεται απλά ως ροή με φυσαλίδες σε χαμηλές ροές υγρού και ως ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες (**dispersed bubble**) σε μεγαλύτερες ροές υγρού. Ωστόσο η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη δεν είναι πάντα εύκολο να παρατηρηθεί.

Διαλείπουσα ροή (slug flow): Το μεγαλύτερο μέρος του αερίου βρίσκεται σε σχήμα-βλήματος φυσαλίδες, οι οποίες έχουν διάμετρο περίπου ίση με τη διάμετρο του σωλήνα και κινούνται προς τα πάνω (φυσαλίδες Taylor). Οι φυσαλίδες Taylor χωρίζονται από συνεχείς υγρές μάζες που μπορεί να περιέχουν σταγονίδια. Μεταξύ των φυσαλίδων Taylor και των τοιχωμάτων του αγωγού, το υγρό ρέει προς τα κάτω σε μορφή υγρού φιλμ. Όταν η ροή είναι σχετικά αργή, τα όρια μεταξύ της υγρής και της αέριας κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

φάσης είναι ξεκάθαρα και δεν περιέχονται φυσαλίδες στην υγρή μάζα. Σ' αυτή την περίπτωση η ροή χαρακτηρίζεται πολλές φορές ως **plug** ή **ήπια-διαλείπουσα**. Αν το κλάσμα κενού ξεπεράσει περίπου την τιμή 0.4 τότε μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ασταθής (**unstable slug**) καθώς χάνει πολλά χαρακτηριστικά της (Costigan and Whalley, 1996). Είναι δύσκολο ωστόσο να ξεχωρίσουμε τη μετάπτωση από τη μία κατάσταση στην άλλη.



Σχήμα 2.2 Τα κυριότερα καθεστώτα ροής για ροή προς τα πάνω σε κατακόρυφο αγωγό.

Ανάμεικτη ροή (churn flow): Είναι παρόμοια με τη διαλείπουσα ροή, όμως είναι περισσότερο χαοτική και αφρίζουσα. Οι φυσαλίδες Taylor στενεύουν και χάνουν το σχήμα τους. Η συνέχεια της υγρής μάζας ανάμεσα στις φυσαλίδες καταστρέφεται εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης αερίου. Παράλληλα η υγρή μάζα πέφτει. Η ταλαντωτική της κίνηση είναι χαρακτηριστική για την ανάμεικτη ροή. Για μεγαλύτερες

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

ροές, η ροή γίνεται ακόμα περισσότερο χαοτική και χαρακτηρίζεται ως αφρίζουσα (**froth flow**).

Δακτυλιοειδής ροή (annular flow): Η ροή αυτή χαρακτηρίζεται από τη συνέχεια της αέριας φάσης κατά μήκος του σωλήνα στον πυρήνα. Η υγρή φάση κινείται προς τα πάνω κατά κύριο λόγο στη μορφή κυματοειδούς υμένα, αλλά και σε μορφή σταγονιδίων στον αέριο πυρήνα. Με μεγάλη αύξηση του ρυθμού ροής του αερίου, το υγρό φιλμ λεπταίνει συνεχώς και αυξάνεται ο αριθμός των σταγονιδίων στον πυρήνα. Τελικά, εξαφανίζεται εντελώς και επικρατεί η λεγόμενη ομιχλώδης ροή (**mist flow**). Αξίζει να σημειωθεί ότι η δακτυλιοειδής ροή είναι το κυρίαρχο καθεστώς ροής στους εξατμιστήρες και στους αγωγούς φυσικού αερίου.

Ροή περιορισμένων φυσαλίδων (confined Bubble): Παρατηρείται μόνο κατά τη ροή σε αγωγούς πολύ μικρής διαμέτρου (Chen et al., 2005). Η βασική διαφορά αυτού του προτύπου ροής με τη διαλείπουσα ροή είναι ότι εν αντιθέσει με τις φυσαλίδες Taylor τα κάτω άκρα των φυσαλίδων είναι σχεδόν επίπεδα.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

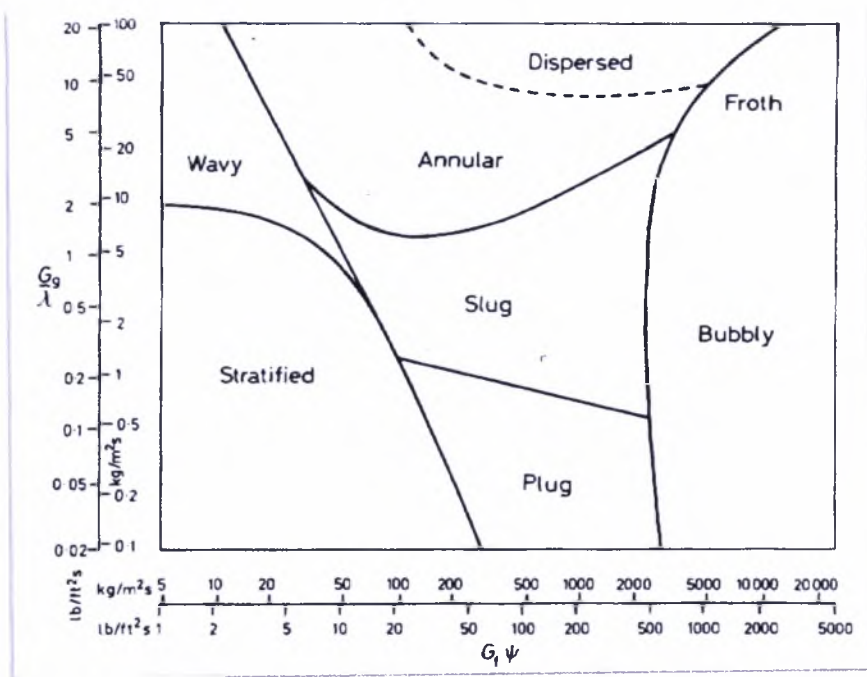
2.3 Χάρτες Καθεστώτων Ροής

Για την πρόβλεψη των προτύπων ροής, ερευνητές προσπάθησαν να σχεδιάσουν ακριβείς διδιάστατους χάρτες ροής. Η σχεδίαση προϋποθέτει τον εντοπισμό του συστήματος στο χάρτη και την εφαρμογή των συσχετίσεων του εκάστοτε καθεστώτος ροής. Για τη σχεδίαση των χαρτών χρησιμοποιούνται δύο είδη συντεταγμένων.

Κάποιοι χάρτες σχεδιάζονται έχοντας στους άξονες τους παραμέτρους όπως η φαινομενική ή η μαζική φαινομενική ταχύτητα. Ωστόσο τα αποτελέσματα της εφαρμογής των με διαστάσεων συντεταγμένων υστερούν σε ακρίβεια καθώς είναι δύσκολο μέσω δύο μόνο παραμέτρων να αποτυπώσουν τη μετάβαση από το ένα πρότυπο ροής στο άλλο. Οι χάρτες αυτοί συνεχίζουν να σχεδιάζονται από κάποιους ερευνητές κυρίως εξαιτίας της απλότητάς τους.

Χάρτες που βασίζονται σε αδιάστατες συντεταγμένες είναι σήμερα πιο συνηθισμένοι. Παράμετροι που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ο αριθμός Re , ο αριθμός Fr , η παροχή υγρού και αερίου καθώς και οι ογκομετρικές παροχές. Η ακρίβεια των αδιάστατων χαρτών είναι συνήθως μεγαλύτερη συμπεριλαμβάνοντας περισσότερες παραμέτρους και όντας γενικότεροι. Ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι σε θέση να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια τα σύνορα των προτύπων ροής (η δυσκολία έγκειται στην ανεύρεση των κατάλληλων αδιάστατων παραμέτρων). Τέλος, το εύρος των πληροφοριών που μπορεί να μας δώσει ένας χάρτης είναι περιορισμένο αφού εξαρτάται από τον αριθμό των πειραμάτων σύμφωνα με τα οποία σχεδιάστηκε. Ένας από τους πρώτους χάρτες που σχεδιάστηκε είναι ο χάρτης του Baker, που σχεδιάστηκε για οριζόντια διφασική ροή υγρού-αερίου και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{0.075} \right) \left(\frac{\rho_L}{62.3} \right) \right]^{1/2} \quad \Psi = \frac{73.0}{\sigma} \left[\left(\frac{\mu_L}{1.0} \right) \left(\frac{62.3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3}$$

Σχήμα 2.3 Χάρτης καθεστώτων ροής για οριζόντια ροή (Baker, 1955).

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.4 Ανίχνευση Καθεστώτος Ροής

Η πειραματική ανίχνευση των καθεστώτων ροής και των συνόρων μετάβασης βασίζεται στα προκαθορισμένα πρότυπα ροής. Ωστόσο όσο καλά και αν είναι ορισμένα τα πρότυπα ροής, εξαιτίας της πολυπλοκότητας και της ταχύτητας της ροής, η ανίχνευση είναι συνήθως δύσκολη. Οι ροές σε ένα μεγάλο εύρος πρακτικών εφαρμογών είναι τόσο γρήγορες και χαοτικές που οι πειραματικές τους παρατηρήσεις είναι δύσκολο να ερμηνευθούν. Είναι σημαντικό ότι η μετάβαση μεταξύ των διαφόρων καθεστώτων ροής είναι συνήθως μια σταδιακή διαδικασία και τα σύνορα μετάβασης δεν μπορούν να καθοριστούν πάντα με ακρίβεια. Παρακάτω παρουσιάζονται οι 2 ίσως πιο διαδεδομένοι τρόποι ανίχνευσης της ροής.

Όταν έχουμε τη δυνατότητα να έχουμε οπτική επαφή με τη ροή, ο πιο εύκολος τρόπος ανίχνευσης είναι η οπτική παρατήρηση. Όταν η ροή εξελίσσεται γρήγορα απαιτείται η χρήση υψηλής ταχύτητας φωτογραφικής μεθόδου. Η μέθοδος αυτή ωστόσο κατηγορείται ως υποκειμενική.

Μια μέθοδος που είναι περισσότερο αντικειμενική και λειτουργεί ακόμα και όταν δεν έχουμε οπτική επαφή με τη ροή είναι η αγωγιμομετρική. Η αγωγιμότητα μπορεί να μετρηθεί για την κάθετη ροή (για την οριζόντια ροή είναι απαραίτητη η χρήση τουλάχιστον τριών ηλεκτροδίων) με ένα ηλεκτρόδιο πάνω στο τοίχωμα του αγωγού και ένα μέσα στη ροή ή με δύο ηλεκτρόδια στη ροή. Το υγρό δίνει υψηλό σήμα εξόδου ενώ το αέριο σχεδόν μηδενικό. Το ηλεκτρόδιο στο τοίχωμα του αγωγού σχεδιάζεται ώστε να ανιχνεύει οποιαδήποτε επιφανειακή υγρασία στην εσωτερική περιφέρεια του αγωγού. Σκοπός του δεύτερου μετρητικού στο κέντρο του αγωγού είναι η ανίχνευση φυσαλίδων. Εφόσον το μετρητικό έχει πολύ μικρό μέγεθος, μπορεί εύκολα να δει ακόμα και πολύ κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

μικρές φυσαλίδες δίνοντας μηδενικό σήμα εξόδου. Το σήμα των μετρητικών μας δίνει πολύ σημαντικές πληροφορίες για την ανίχνευση του καθεστώτος ροής.

2.5 Κατακόρυφη Προς τα Άνω Ροή - Μοντελοποίηση των Μεταπτώσεων στα Διάφορα Καθεστώτα Ροής

Ροή με φυσαλίδες: Όταν υπάρχει χαμηλή ροή αερίου σε μεγάλης διαμέτρου ($D > 5$ cm) κάθετες στήλες, η αέρια φάση διανέμεται σε διακριτές φυσαλίδες. Η διάμετρος των φυσαλίδων εξαρτάται από τον τρόπο εισαγωγής και δημιουργίας τους.

Σε ροές που εξελίσσονται αργά επικρατεί η ροή με φυσαλίδες όταν η διάμετρος του σωλήνα ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$D > 19.01 \left[\frac{(\rho_L - \rho_G) \sigma}{\rho_L^2 g} \right]^{1/2} \quad (\text{Taitel et al., 1980}) \quad (2.1)$$

Η σχέση αυτή δεν ισχύει για διαμέτρους μικρότερες των 5 cm. Σε μικρές διαμέτρους επικρατεί η διαλείπουσα ροή και ροή με φυσαλίδες μπορούμε να έχουμε μόνο στην περίπτωση μεγάλης φαινομενικής ταχύτητας του υγρού (στη μορφή διασκορπισμένων φυσαλίδων).

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Μετάβαση από ροή με φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή: Έρευνες σχετικά με την κίνηση των φυσαλίδων έχουν δείξει ότι όταν η διάμετρος των φυσαλίδων είναι πολύ μικρή, οι φυσαλίδες συμπεριφέρονται σαν άκαμπτες σφαίρες κινούμενες κάθετα και ευθύγραμμα. Ωστόσο όταν η διάμετρος τους είναι μεγαλύτερη (π.χ. 0.3 cm για νερό-αέρα σε χαμηλή πίεση), οι φυσαλίδες αρχίζουν να χάνουν το σχήμα τους και πλέον η προς τα άνω κίνηση δεν είναι ευθύγραμμη αλλά ταλαντωτική και ο όρος της τυχειότητας εξαιτίας της γρηγορότερα εξελισσόμενης ροής αποκτά μεγαλύτερη σημασία. Οι φυσαλίδες συγκρούονται και συγχωνεύονται δημιουργώντας τις φυσαλίδες παρόμοιες με τις φυσαλίδες Taylor που έχουμε περιγράψει. Με αύξηση του u_{GS} και ενώ βρισκόμαστε σε χαμηλά επίπεδα των u_{LS} , η πυκνότητα των φυσαλίδων αυξάνεται ραγδαία και φτάνουμε σε κάποιο σημείο όπου οι διασκορπισμένες φυσαλίδες είναι τόσο συμπυκνμένες ώστε συμβαίνουν συγκρούσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα την απότομη αύξηση του ρυθμού συσσωρεύσεων σε μεγαλύτερες φυσαλίδες και συνεπώς την μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή.

Σύμφωνα με πειράματα για να συμβεί αυτή η μετάβαση το κλάσμα κενού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.25 και 0.30.

Η μέση πραγματική ταχύτητα ανύψωσης των αέριων φυσαλίδων u_G συσχετίζεται με την φαινομενική ταχύτητα αερίου u_{GS} με τη σχέση:

$$u_G = \frac{u_{GS}}{\alpha} \quad (2.2)$$

όπου α είναι το κλάσμα κενού

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Παρόμοια, η μέση πραγματική ταχύτητα του υγρού u_L συσχετίζεται με την φαινομενική ταχύτητα υγρού u_{LS} με τη σχέση:

$$u_L = \frac{u_{LS}}{1-\alpha} \quad (2.3)$$

Ονομάζουμε u_0 την ταχύτητα ανύψωσης των αέριων φυσαλίδων σε σχέση με τη μέση ταχύτητα υγρού. Μπορούμε να υπολογίσουμε το u_0 ως εξής:

$$\frac{u_{GS}}{\alpha} - \frac{u_{LS}}{1-\alpha} = u_0 \rightarrow u_{LS} = u_{GS} \frac{1-\alpha}{\alpha} - (1-\alpha)u_0 \quad (2.4)$$

Έχει αποδειχθεί από τον Harmathy (1960) ότι η ταχύτητα u_0 σχετικά μεγάλων φυσαλίδων δεν είναι ευαίσθητη σε αλλαγές του μεγέθους της φυσαλίδας και δίνεται από τη σχέση:

$$u_0 = 1.53 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (2.5)$$

όπου σ είναι η επιφανειακή τάση

Αντικαθιστώντας τη (2.5) στη (2.4) και θεωρώντας ότι η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή συμβαίνει για $\alpha=0.25$ παίρνουμε την τελική εξίσωση:

$$u_{LS} = 3.0u_{GS} - 1.15 \left[\frac{g\sigma(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (\text{Taitel et al., 1980}) \quad (2.6)$$

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Μετάβαση από διαλείπουσα σε ανάμεικτη ροή: Με την αύξηση του ρυθμού εισαγωγής του αέρα, μειώνεται όπως είναι φυσικό και η πυκνότητα της υγρής μάζας ανάμεσα στις φυσαλίδες Taylor. Αν ξεπεράσουμε μια προκαθορισμένη τιμή θα λάβει χώρα και η μετάπτωση στην ανάμεικτη ροή. Κατά την ανάμεικτη ροή, οι φυσαλίδες Taylor έχουν χάσει τη μορφή τους. Ο αυξημένος ρυθμός εισαγωγής αέρα προκαλεί ασυνέχεια στις υγρές μάζες που βρίσκονται ανάμεσα στις φυσαλίδες Taylor. Οι τελευταίες χάνουν την ισορροπία τους, συσσωρεύονται και υψώνονται ξανά από την αέρια φάση. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της ανάμεικτης ροής είναι η ταλαντωτική πάνω-κάτω κίνηση του υγρού φιλμ και των υγρών μαζών.

Σύμφωνα με τους Dukler και Taitel, η μετάπτωση συμβαίνει όταν η απόσταση μεταξύ δύο φυσαλίδων Taylor είναι τόσο μικρή ώστε οι δίνες αποκόλλησης στον απόρου είναι δυνατόν να καταστρέψουν τη «γέφυρα» μεταξύ των φυσαλίδων.

Μια χαρακτηριστική εικόνα διαλείπουσας ροής φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Η υγρή μάζα μπορεί να διαιρεθεί στην περιοχή αποκόλλησης, στη μεταβατική και στην αναπτυγμένη περιοχή. Φυσαλίδες εισέρχονται στη μεταβατική περιοχή από την περιοχή αποκόλλησης κοντά στον άξονα του αγωγού και διαχέονται σε όλο το σωλήνα. Με την αύξηση του ρυθμού ροής της αέριας φάσης, επεκτείνεται η περιοχή αποκόλλησης και η ροή γίνεται περισσότερο τυρβώδης. Η έκταση της αναπτυγμένης περιοχής μειώνεται σταδιακά και το σχετικό μήκος της υγρής μάζας, $\beta_s = \left(\frac{L_s}{L_u} \right)$, μειώνεται. Το κλάσμα κενού μεγιστοποιείται στην περιοχή αποκόλλησης ενώ το β_s παίρνει την ελάχιστη τιμή του. Υπό αυτές τις συνθήκες, μια μικρή αύξηση του ρυθμού εισαγωγής αερίου θα έχει και ως αποτέλεσμα τη μετάπτωση στην ανάμεικτη ροή.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Σύμφωνα με πειράματα, όταν το σχετικό μήκος της υγρής μάζας είναι περίπου ίσο με 0.15, ικανοποιούνται συνήθως οι συνθήκες μετάπτωσης.

Σύμφωνα με τους Brauner και Barnea (1977) η μετάπτωση συμβαίνει κατά τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση φυσαλίδων στην υγρή μάζα ($\alpha_s = 0.52$).

Επομένως δύο πολύ σημαντικά κριτήρια είναι τα εξής:

$$\begin{aligned} \alpha_s &\geq 0.52 \\ \beta_s &\leq 0.15 \end{aligned} \quad (\text{Chen and Brill, 1997}) \quad (2.7)$$

θεωρούμε ότι η ροή των δύο ρευστών είναι σταθερή. Επομένως:

$$\alpha_{TB} u_{TB} - (1 - \alpha_{TB}) u_F = u_{SG} + u_{SL} = u_M \quad (2.8)$$

όπου u_M είναι η ολική ταχύτητα του μίγματος.

Όταν η φυσαλίδα είναι αρκετά μεγάλη το ισοζύγιο μάζας αέρα στη φυσαλίδα μπορεί να γραφτεί ως:

$$u_{SG} = \alpha_{TB} (1 - \beta_s) u_{TB} + \alpha_s \beta_s (u_{SG} + u_{SL}) \quad (2.9)$$

όπου u_{TB} είναι η ταχύτητα του αέρα στη φυσαλίδα

Ένα ισοζύγιο αέριας φάσης με σημείο αναφοράς τις εν κινήσει φυσαλίδες Taylor ταχύτητας u_T , μας δίνει την εξίσωση:

$$\alpha_s (u_T - u_M) = \alpha_{TB} (u_T - u_{TB}) \quad (2.10)$$

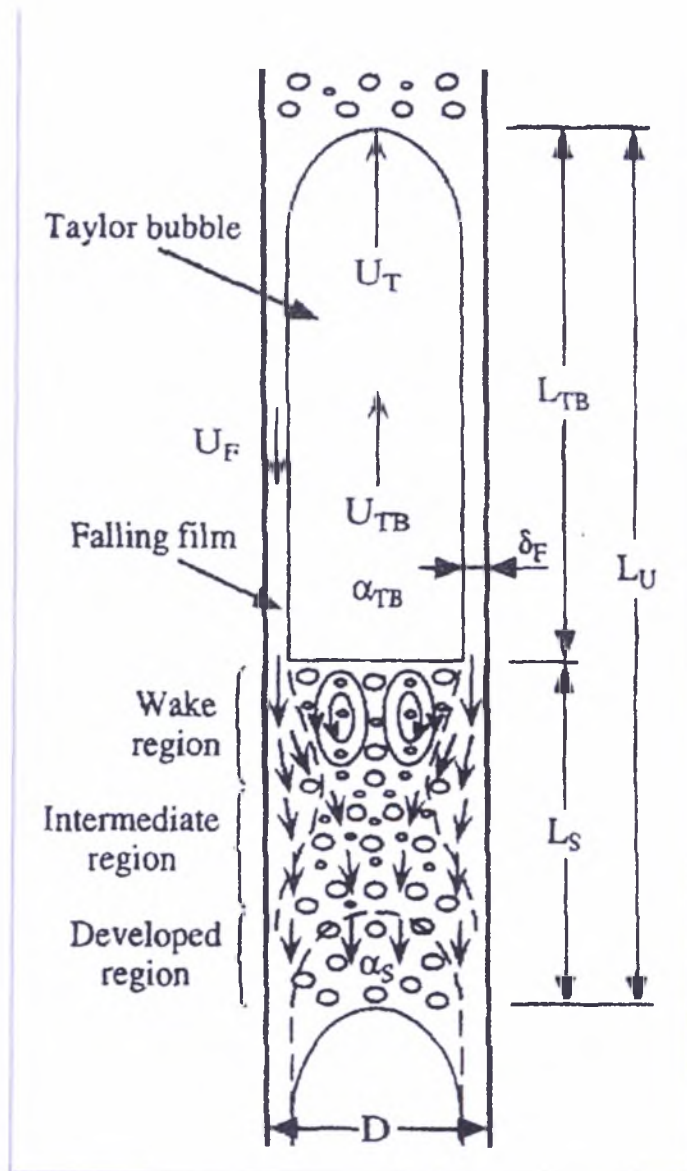
Η ταχύτητα μετάπτωσης των φυσαλίδων μπορεί να εκτιμηθεί από την ευρέως αποδεκτή εξίσωση του Nicklin:

$$u_T = 1.2 u_M + 0.35 \left[\frac{gD(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{1/2} \quad (\text{Nicklin et al., 1962}) \quad (2.11)$$

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Σε περίπτωση αδυναμίας υπολογισμού της ταχύτητας των φυσαλίδων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση μετάβασης του Taitel και των συνεργατών του (1980) σύμφωνα με την οποία ανάμεικτη ροή έχουμε όταν:

$$Le / D = 40.6 \left(\frac{U_{GS} + U_{LS}}{\sqrt{gD}} + 0.22 \right) \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.4 Μετάπτωση από τη διαλείπουσα στην ανάμεικτη ροή (Chen and Brill,1997).

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Μετάπτωση από ροή με φυσαλίδες ή διαλείπουσα ροή σε ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες: Για τη μετάβαση σε ροή με φυσαλίδες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αδιάστατη σχέση των Taitel et al. (1980) που συνδέει τις παροχές με τις ιδιότητες των ρευστών και τις διαστάσεις των αγωγών στους οποίους λαμβάνει τελικά χώρα το φαινόμενο της τυρβώδους διασποράς των φυσαλίδων:

$$U_{LS} + U_{GS} = 4.0 \left\{ \frac{D^{0.429} (\sigma / \rho_L)^{0.089}}{\nu_L^{0.072}} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{0.446} \right\} \quad (2.13)$$

όπου ν_L το κινηματικό ιξώδες του υγρού.

Μετάπτωση από ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες σε ανάμεικτη ροή: Σε μεγάλες παροχές αερίου το κλάσμα κενού μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{u_{GS}}{u_{GS} + u_{LS}} \quad (2.14)$$

Όταν $\alpha \geq 0.52$ δεν είναι δυνατόν να υπάρξει ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες και συνεπώς έχουμε μετάβαση σε ανάμεικτη ροή.

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Μετάπτωση στη δακτυλιοειδή ροή: Για υψηλές ροές αερίου, η ροή γίνεται δακτυλιοειδής. Το υγρό φιλμ ρέει προς τα πάνω παρακείμενο στο τοίχωμα του αγωγού και η αέρια φάση ρέει στο κέντρο του σωλήνα περιέχοντας υγρά σταγονίδια. Η προς τα άνω κίνηση του υγρού φιλμ που αντιτίθεται στη δύναμη της βαρύτητας είναι αποτέλεσμα της ταχύτατης κίνησης του αερίου πυρήνα. Το φιλμ έχει κυματοειδή επιφάνεια και τα κύματα έχουν την τάση να καταστραφούν και να εισέλθουν ως σταγονίδια στον αέριο πυρήνα. Ωστόσο συνεχίζουν να κινούνται προς τα πάνω εξαιτίας της διάτμησης και της οπισθέλκουσας δύναμης (στα κύματα και τα σταγονίδια).

Σύμφωνα με έρευνες, δακτυλιοειδής ροή μπορεί να υπάρξει μόνο σε περίπτωση που η ροή του αερίου πυρήνα είναι ικανή να σηκώσει τα περιεχόμενα σταγονίδια. Διαφορετικά, τα σταγονίδια θα πέσουν και θα επανέλθουμε σε διαλείπουσα ή ανάμεικτη ροή.

Από την ισορροπία μεταξύ δυνάμεων οπισθέλκουσας δύναμης και βαρύτητας στη σταγόνα μπορούμε να υπολογίσουμε την ελάχιστη δυνατή ταχύτητα αερίου, ικανή να μην αφήσει τα σταγονίδια να πέσουν.

$$\frac{1}{2} c_d \left(\pi \frac{d^2}{4} \right) \rho_G u_G^2 = \left(\pi \frac{d^3}{6} \right) g (\rho_L - \rho_G) \rightarrow \quad (2.15)$$

$$u_G = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{g (\rho_L - \rho_G) d}{\rho_G C_d} \right]^{1/2}$$

Ο Hinze (1955) έδειξε ότι η μέγιστη σταθερή διάμετρος των σταγονιδίων είναι:

$$d = K \frac{\sigma}{\rho_G u_G^2} \quad (2.16)$$

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Όπου K είναι ο αριθμός Weber ο οποίος παίρνει τιμές ανάμεσα στο 20 και το 30 για σταγονίδια που σταδιακά επιταχύνουν.

Επομένως από τις (2.15) και (2.16):

$$u_G = \left(\frac{4K}{3C_d} \right)^{1/4} \frac{[\sigma g (\rho_L - \rho_G)]^{1/4}}{\rho_G^{1/2}} \quad (2.17)$$

Εάν το u_G έχει μικρότερη τιμή από την τιμή που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση, τότε δεν είναι δυνατόν να υπάρξει σταθερή δακτυλιοειδής ροή.

Από τον Turner (1969) επιλέχθηκαν οι τιμές $K=30$ και $C_d=0.44$. Το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι ευαίσθητο στην επιλογή αυτών των τιμών καθώς εμφανίζονται σε δυνάμεις του $1/4$.

Είναι χαρακτηριστικό κατά τη δακτυλιοειδή ροή ότι, το υγρό φιλμ είναι λεπτό ακόμα και για υψηλές παροχές υγρού. Επομένως μπορούμε να αντικαταστήσουμε στη σχέση (2.17) την ταχύτητα αερίου u_G με τη φαινομενική ταχύτητα u_{GS} και αντικαθιστώντας τις τιμές του Turner να πάρουμε την τελική σχέση μετάπτωσης:

$$\frac{u_{GS} \rho_G^{1/2}}{[\sigma g (\rho_L - \rho_G)]^{1/4}} = 3.1 \quad (2.18)$$

Το κριτήριο αυτό δείχνει ότι, η μετάπτωση στη δακτυλιοειδή ροή είναι ανεξάρτητη από την παροχή υγρού και τη διάμετρο του αγωγού.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

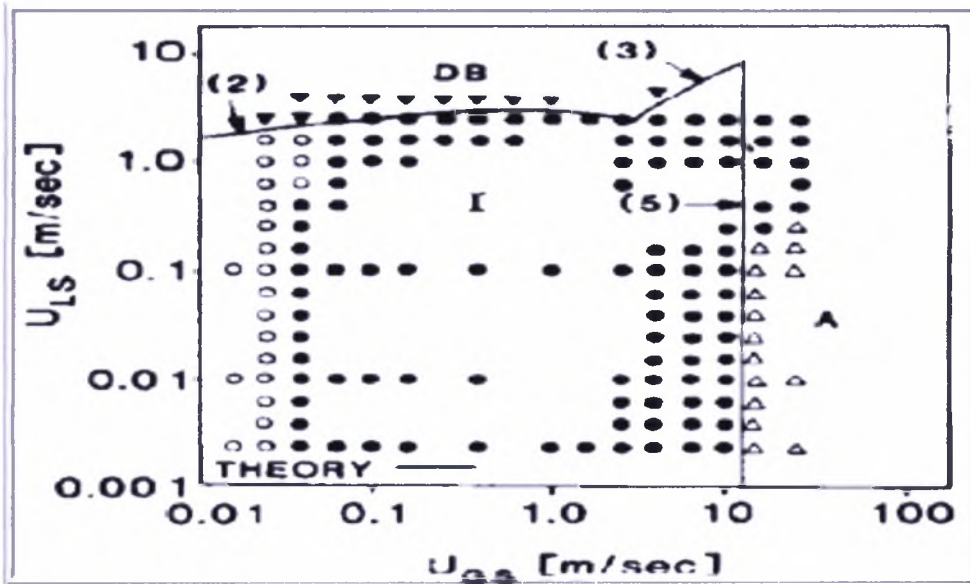
2.6 Κατακόρυφη Κεκλιμένη Προς τα Άνω Ροή

Πολλοί ερευνητές επιδιώκουν σήμερα την ανάπτυξη μοντέλων ροής που θα ανταποκρίνονται σε όλες τις γωνίες κλίσης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο φαντάζει προς το παρόν δύσκολο. Έτσι, οι περισσότεροι ερευνητές σχεδιάζουν πειραματικές συσκευές με μεταβαλλόμενη κλίση, παίρνουν μετρήσεις και σχεδιάζουν χάρτες προτύπων ροής για συγκεκριμένες γωνίες. Τα μοντέλα που έχουμε στη διάθεση μας ανταποκρίνονται είτε στην οριζόντια είτε στην κατακόρυφη ροή.

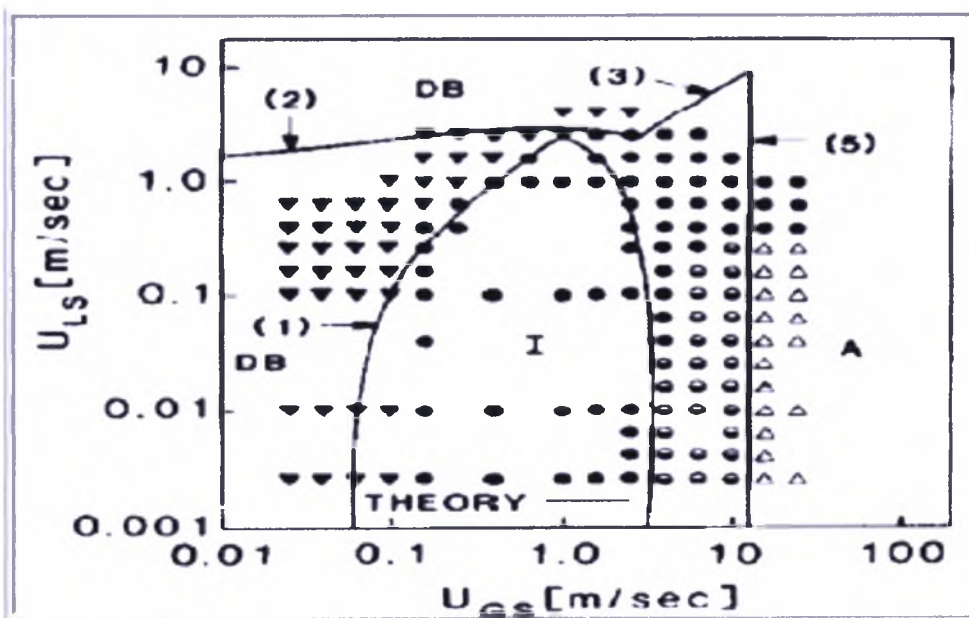
Επομένως το μόνο που μπορούμε να κάνουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι να περιγράψουμε κάποιες στοιχειώδεις διαφορές ανάμεσα στην κατακόρυφη, οριζόντια και κεκλιμένη ροή. Όπως έχουμε πει στην κατακόρυφη ροή, εφόσον έχουμε χαμηλή ροή αέριας φάσης και ικανοποιείται η σχέση (2.1) έχουμε ροή με φυσαλίδες. Ωστόσο σύμφωνα με πειράματα που έχουν γίνει, αν στρέψουμε τον αγωγό κατά μια γωνία, η ροή με φυσαλίδες που παρατηρείται σε μικρές ροές υγρής φάσης περιορίζεται. Σε υψηλές παροχές υγρού, η τύρβη προκαλεί διασπορά και παρατηρείται πάντα σε κάποια περιοχή το πρότυπο των διασκορπισμένων φυσαλίδων. Όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 2.5 η περιοχή των φυσαλίδων περιορίζεται κατά πολύ σε σχέση με το Σχήμα 2.6 όπου ο αγωγός είναι κατακόρυφος. Σύμφωνα με τους Barnea και Taitel, η γωνία κάτω από την οποία η ροή με φυσαλίδες εξαφανίζεται κυμαίνεται από 50° έως 70° .

Σε γωνίες μικρότερες των 70° η ανάμεικτη ροή περιορίζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή των χαρτών. Τέλος, σε αντίθεση με την οριζόντια ροή, μικρές αλλαγές στην κλίση κατακόρυφων ροών δεν αποφέρουν μεγάλες αλλαγές στα σύνορα των προτύπων ροής.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



Σχήμα 2.5 Πρότυπα ροής, κεκλιμένη προς τα άνω ροή με κλίση 50°, διάμετρος αγωγού 5.1cm, (Taitel et al.,1983).



Σχήμα 2.6 Πρότυπα ροής, κατακόρυφη προς τα άνω ροή, διάμετρος αγωγού 5.1cm, (Taitel et al.,1983).

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

□ STRATIFIED SMOOTH (SS)	} STRATIFIED (S)
■ STRATIFIED WAVY (SW)	
○ ELONGATED BUBBLE (EB)	} INTERMITTENT (I)
● SLUG (SL)	
● CHURN (CH)	
△ ANNULAR, ANN./DISP (AD)	} ANNULAR (A)
▲ WAVY ANNULAR (AW)	
▼ DISPERSED BUBBLE (DB)	
(NUMBER IN PARENTHESIS REFERS TO EQUATION NUMBERS IN TEXT)	

2.7 Υπολογισμός Πτώσης Πίεσης και Κλάσματος Κενού

Ο ακριβής υπολογισμός της διφασικής πτώσης πίεσης συμβάλλει τα μέγιστα στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση πολλών συστημάτων. Ένας λανθασμένος υπολογισμός θα έχει ενδεχομένως οικονομικές και λειτουργικές συνέπειες.

Για την πτώση πίεσης έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές συσχετίσεις από πολλούς ερευνητές. Ανάλογα με τη μορφή της ροής μπορούμε να εφαρμόσουμε είτε το μοντέλο της ομογενούς είτε το μοντέλο της διαχωρισμένης ροής. Αν το πρότυπο ροής αλλάζει κατά μήκος του αγωγού θα υπολογίσουμε την συνολική πτώση πίεσης χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό των 2 μοντέλων.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.7.1 Μοντέλο Ομογενούς Ροής

Η αποδοχή του μοντέλου της ομογενούς ροής μας διευκολύνει πολύ στον υπολογισμό της συνολικής πτώσης πίεσης. Η συνολική πτώση πίεσης είναι το άθροισμα πτώσης πίεσης λόγω βαρύτητας Δp_{static} , επιτάχυνσης Δp_{acc} και τριβών Δp_{frict} .

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{acc} + \Delta p_{frict} \quad (2.19)$$

Η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας ισούται:

$$\Delta p_{static} = \rho_H g H \sin \theta \quad (2.20)$$

όπου H είναι το ύψος, θ η γωνία σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα.

Η ομογενής πυκνότητα ρ_H υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_H = \rho_L (1 - \alpha) + \rho_G \alpha \quad (2.21)$$

όπου ρ_G και ρ_L είναι αντίστοιχα οι πυκνότητες της αέριας και της υγρής φάσης.

Το κλάσμα κενού συνδέεται με την ποιότητα $\left(x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_{total}} \right)$ του ρευστού με τη σχέση:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_G (1-x) \rho_G}{u_L x \rho_L} \right)} \quad (2.22)$$

Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης ανά μονάδα μήκους του σωλήνα ισούται με:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{acc} = \frac{d(\dot{m}_{total} / \rho_H)}{dz} \quad (2.23)$$

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Ο πιο δύσκολα υπολογίσιμος όρος είναι η πτώση πίεσης λόγω τριβών, όπου πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής τριβών διφασικής ροής f_{fp} . Για σταθερή ροή ισούται με:

$$\Delta p_{frict} = \frac{2f_{fp}L\dot{m}_{total}^2}{d_i\rho_{fp}} \quad (2.24)$$

Ο συντελεστής τριβής μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με τον αριθμό Re από την εξίσωση του Blasius:

$$f_{fp} = \frac{0.079}{Re^{0.25}} \quad (2.25)$$

όπου ο αριθμός Re ισούται με:

$$Re = \frac{\dot{m}_{total}d_i}{\mu_{fp}} \quad (2.26)$$

Το ιξώδες για τον υπολογισμό του αριθμού Re μπορεί να επιλεγθεί ως το ιξώδες της υγρής φάσης ή να υπολογιστεί ως ο μέσος όρος των δύο φάσεων.

$$\mu_{fp} = x\mu_G + (1-x)\mu_L \quad (2.27)$$

Οι συσχετίσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως όταν έχουμε ροή με φυσαλίδες και μπορούμε να θεωρήσουμε το ρευστό ομογενές.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.7.2 Μοντέλο Διαχωρισμένης Ροής

Η συνολική πτώση πίεσης ισούται ξανά με το άθροισμα των ίδιων 3 όρων.

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{acc} + \Delta p_{frict}$$

Η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας ισούται με:

$$\Delta p_{static} = \rho_{tp} g H \sin \theta \quad (\sin \theta = 1 \text{ για κατακόρυφο αγωγό})$$

Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης αντανακλά τη μεταβολή στην κινητική ενέργεια και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta p_{acc.} = \dot{m}_{total}^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_G \alpha} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_G \alpha} \right]_{in} \right\} \quad (2.28)$$

όπου \dot{m}_{total} είναι η συνολική παροχή και χ είναι η ποιότητα του αερίου.

Το διαχωρισμένο μοντέλο θεωρεί ότι οι δύο φάσεις είναι τεχνητά διαχωρισμένες σε δύο ρεύματα που ρέουν σε δύο αγωγούς. Η περιοχή των δύο αγωγών εξαρτάται από το κλάσμα κενού, α . Υπάρχουν αρκετοί τρόποι υπολογισμού του κλάσματος κενού. Παραθέτουμε την εξίσωση του Steiner (1993):

$$\alpha = \frac{x}{\rho_G} \left[\left(1 + 0.12(1-x) \right) \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right) + \frac{1.18(1-x) \left[g \sigma (\rho_L - \rho_G) \right]^{0.25}}{\dot{m}_{total}^2 \rho_L^{0.5}} \right]^{-1} \quad (2.29)$$

κατακόρυφη διασπαστική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Η πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα του αερίου στη είσοδο και την έξοδο του αγωγού.

Οι πρώτες αναλύσεις για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης λόγω τριβών παρουσιάστηκαν από τους Lockhart και Martinelli (1949) και έπειτα ακολούθησαν άλλοι ερευνητές. Οι βασικές εξισώσεις είναι ανεξάρτητες από το καθεστώς ροής και υποθέτουν ότι οι ταχύτητες των φάσεων παραμένουν σταθερές.

Παραθέτουμε τη μέθοδο του Friedel (1979).

$$\Delta p_{frict} = \Delta p_L \Phi_{fr}^2 \quad (2.30)$$

όπου το Δp_L υπολογίζεται για την υγρή φάση ως:

$$\Delta p_L = 4 f_L \left(\frac{L}{d_i} \right) \dot{m}_{total}^2 (1-x)^2 \left(\frac{1}{2\rho_L} \right) \quad (2.31)$$

Ο συντελεστής τριβής υγρού και ο «υγρός» αριθμός Re υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$f = \frac{0.079}{Re^{0.25}}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_{total} d_i}{\mu}$$

χρησιμοποιώντας το δυναμικό ιξώδες του υγρού. Ο πολλαπλασιαστής Φ ισούται με:

$$\Phi_{fr}^2 = E + \frac{3.24FH}{Fr_H^{0.045} We_L^{0.035}} \quad (2.32)$$

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Οι παράμετροι Fr_H , F , H και E υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$Fr_H = \frac{\dot{m}_{total}^2}{gd_i \rho_H^2} \quad (2.33)$$

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L f_G}{\rho_G f_L} \quad (2.34)$$

$$F = x^{0.78} (1-x)^{0.224} \quad (2.35)$$

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.7} \quad (2.36)$$

ο υγρός αριθμός We προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$We_L = \frac{\dot{m}_{total}^2 d_i}{\sigma \rho_H} \quad (2.37)$$

όπου χρησιμοποιείται η ομογενής πυκνότητα ρ_H :

$$\rho_H = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right)^{-1}$$

Όταν $\frac{\mu_L}{\mu_G} \leq 1000$, η μέθοδος του Friedel κρίνεται ως ικανοποιητική. Σε

διαφορετική περίπτωση μπορούμε να εφαρμόσουμε κάποια από τις άλλες μεθόδους που έχουν προταθεί.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.8 Εξάρτηση από τη Διάμετρο σε Μεγάλους Αγωγούς

Πολλές φορές ακόμα και αν μπορούμε να προβλέψουμε τα όρια μετάπτωσης και την πτώση πίεσης σε τάξης μερικών εκατοστών αγωγούς, η εφαρμογή σε μεγαλύτερες διαμέτρους μπορεί να μας οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Η μεγάλη διάμετρος του αγωγού μπορεί να επηρεάσει τα πρότυπα ροής και τα σύνορα ανάμεσα τους. Μπορούμε να σημειώσουμε τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

1. η διαλείπουσα ροή που καλύπτει συνήθως το μεγαλύτερο μέρος των χαρτών ροής ουσιαστικά δεν υπάρχει σε μεγάλες διαμέτρους. Οι φυσαλίδες που σχηματίζονται μέσω της συγχώνευσης στους μεγάλο διαμέτρου αγωγούς είναι ασταθείς και δεν έχουν όλα τα χαρακτηριστικά των φυσαλίδων Taylor αν και το σχήμα τους είναι παρόμοιο. Η συγκέντρωση των φυσαλίδων αυτών αυξάνεται συνεχώς. Οι φυσαλίδες συγχωνεύονται και δημιουργούν κυματισμούς στο κέντρο του αγωγού. Αν η ροή είναι ταχύτατα εξελισσόμενη, οι κυματισμοί μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα τη μετάπτωση στην ανάμεικτη ή τη δακτυλιοειδή ροή. Η μεγαλύτερη διάμετρος στην οποία μπορούν να εμφανιστούν φυσαλίδες Taylor είναι 2-4 inch. (P.F.Pickering et al.,2001)
2. έχουμε περιγράψει παραπάνω το μηχανισμό μετάπτωσης από τη διαλείπουσα στην ανάμεικτη ροή μέσω της καταστροφής της συνέχειας των υγρών μαζών που παίζουν το ρόλο της γέφυρας. Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσει υπό κανονικές συνθήκες σε μεγάλο διαμέτρου αγωγούς

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

3. κατά τη δακτυλιοειδή ροή, σύμφωνα με πειράματα (Azzopardi,1983) σε αγωγούς 5inch. οι κυματισμοί στο υγρό φιλμ δείχνουν διακριτοί και έχουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τους κυματισμούς σε μικρότερες διαμέτρους

2.9 Ροή σε Αγωγούς Μικρής Διαμέτρου

Έχουμε προαναφέρει ότι, η διφασική ροή σε αγωγούς μικρής διαμέτρου βρίσκει καθημερινά νέες εφαρμογές και η έρευνα της αποκτά συνεχώς μεγαλύτερη βαρύτητα. Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική αναφορά στη ροή στους μικρής διαμέτρου αγωγούς και παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα ενός πειράματος του Chen και των συνεργατών του.

Είναι απαραίτητο να αναφέρουμε αρχικώς ότι η ταξινόμηση σε ροές σε αγωγούς κανονικής διαμέτρου, "minichannels" και "microchannels" δεν έχει ακόμα πλήρως καθοριστεί. Προς το παρόν, η έλλειψη συμφωνίας κάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων δύσκολη, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά ρευστά ή/και όταν οι πειραματικές συνθήκες είναι διαφορετικές. Στο παρελθόν θεωρούσαν απλά οι μηχανικοί τους τάξεως χιλιοστού αγωγούς ως μικρής διαμέτρου. Ωστόσο, σήμερα πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι το κριτήριο πρέπει να βασίζεται σε συνδυασμό της διαμέτρου του αγωγού και των θερμοδραυλικών ιδιοτήτων του ρευστού.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Σύμφωνα με τους Kew και Cornwell (1997), τα χαρακτηριστικά ροής και μεταφοράς θερμότητας της διφασικής ροής είναι διαφορετικά όταν ικανοποιείται η ανίσωση:

$$Co = \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g D^2} \right)^{1/2} > 0.5 \quad (2.38)$$

Παραδείγματος χάριν, όταν $Co > 0.5$ παρουσιάζεται η ροή των περιορισμένων φυσαλίδων και διαμορφώνει ένα χαρακτηριστικό καθεστώς ροής στους μικρής διαμέτρου αγωγούς.

Οι Brauner και Moalem-Maron (1992) πρότειναν τον αντίστοιχο αριθμό Eötvös ως κριτήριο.

$$E\ddot{o} = (2\pi)^2 \sigma \Delta\rho g D^2 \quad (2.39)$$

Ανέφεραν ότι, όταν $E\ddot{o} > 1$ η επιφανειακή τάση αποκτά πολύ μεγάλη βαρύτητα και το γεγονός αυτό σηματοδοτεί παράλληλα τη ροή διαμέσου μικρών αγωγών. Ο Triplett (1999) και οι συνεργάτες του κατέληξαν μετά από πειράματα ότι η διαστρωματωμένη ροή είναι αδύνατη όταν $E\ddot{o} > 100$.

Τέλος, ο Akbar (2003) συνοψίζοντας τις προηγούμενες έρευνες πρότεινε τον αριθμό Bond.

$$Bo = (\Delta\rho g D^2 / \sigma)^{1/2} < 0.3 \quad (2.40)$$

όταν $Bo < 0.3$ τα διάφορα καθεστώτα ροής παύουν να είναι ευαίσθητα στον προσανατολισμό του αγωγού.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Ο πίνακας 1. παρουσιάζει τα διαφορετικά αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη τα 3 ανωτέρω κριτήρια (την κριτική διάμετρο κατά την οποία η συμπεριφορά της ροής παρουσιάζει απόκλιση από την συμπεριφορά σε "κανονικό" αγωγό).

Πίνακας 1. Τα διαφορετικά κριτήρια για τους μικρούς αγωγούς.

Parameters	Air/water R134a			
Pressure (MPa)	0.10	0.60	1.00	1.40
Temperature (°C)	25.0	21.6	39.4	52.5
Surface tension	7.20E-02	8.39E-03	6.15E-03	4.61E-03
Gas density	1.185	29.04	49.06	70.7
Liquid density	997.0	1218.2	1148.3	1090.2
Gravitational acceleration	9.81	9.81	9.81	9.81
	Critical diameter (mm)			
Criterion based on $E\delta = 1$	17.1	5.3	4.7	4.3
Criterion based on $Co = 0.5$	5.4	1.7	1.5	1.4
Criterion based on $E\delta = 100$	1.71	0.53	0.47	0.43
Criterion based on $Bo = 0.3$	0.81	0.25	0.23	0.20

Όπως μπορούμε να δούμε ανάμεσα στις διαμέτρους υπάρχει ένα πολύ μεγάλο χάσμα, το οποίο γίνεται ακόμα μεγαλύτερο όταν συμπεριλαμβάνεται το κριτήριο $E\delta=1$. Για παράδειγμα, για μείγμα νερού-αέρα σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα κριτήρια μας δίνουν ένα εύρος από 0.81 έως 17.1 mm. Επιπλέον, η διάμετρος που ανταποκρίνεται στο κριτήριο $Co = 0.5$ είναι 6.66 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κριτηρίου $Bo=0.3$.

Είναι φανερή η ανάγκη για την εντατικοποίηση της έρευνας με σκοπό την σαφέστερη ταξινόμηση σε κανονικούς και μικρού μεγέθους αγωγούς.

Η διάκριση μεταξύ των καναλιών μικρών διαμέτρων, minichannels και microchannels βασισμένη στα αποτελέσματα μεταφοράς θερμότητας, δεν καθορίζεται

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

σαφώς στη βιβλιογραφία. Ο Kandlikar (όπως αναφέρει ο Chen) εξέτασε την εφαρμογή της ροής βρασμού σε κανάλια και συμπέρανε ότι 3 mm μπορεί να είναι το ελάχιστο όριο για τις υδραυλικές διαμέτρους συμβατικών εξατμιστήρων. Κανάλια με υδραυλική διάμετρο μεταξύ 200 μm και 3 mm θα μπορούσαν να θεωρηθούν "minichannels" και τέλος κανάλια με υδραυλική διάμετρο από 10 μm έως 200 μm θα μπορούσαν να θεωρηθούν "microchannels". Αυτή η ταξινόμηση είναι ωστόσο γενική και περαιτέρω έρευνα είναι αναγκαία.

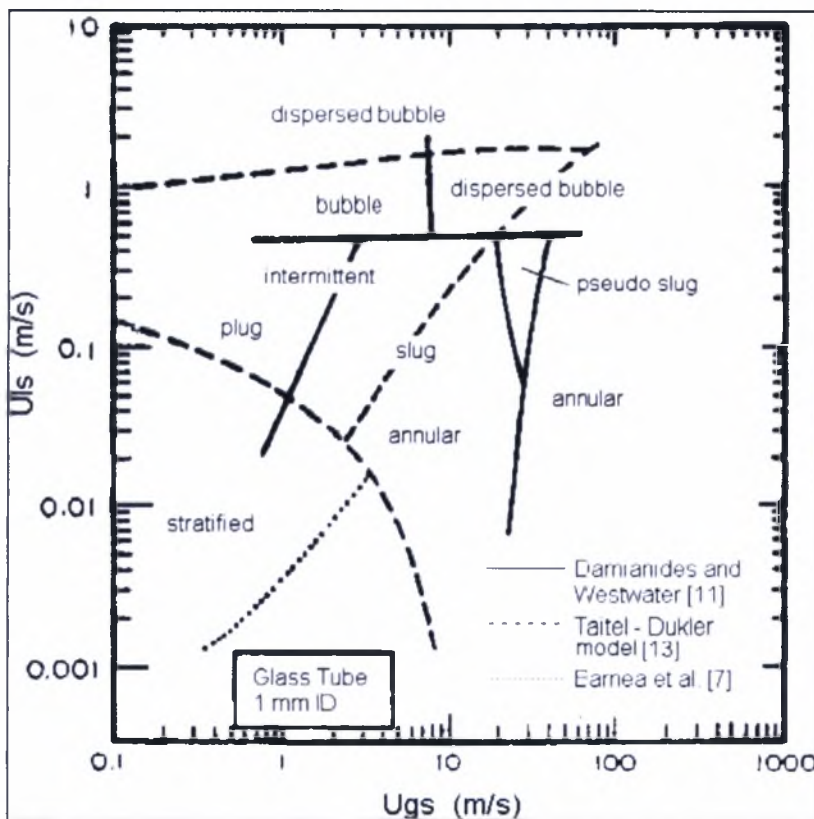
Ένα ακόμα σημαντικότερο πρόβλημα που προστίθεται σε όλα τα παραπάνω είναι η ασυμφωνία των ερευνητών κατά την ανίχνευση των καθεστώτων ροής. Κάποιοι χάρτες ροής που έχουν σχεδιαστεί από διαφορετικούς ερευνητές μπορεί να είναι ανόμοιοι αν και έχουν σχεδιαστεί κάτω από παρόμοιες συνθήκες.

Αν και έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος και είναι διαθέσιμα πολυάριθμα αποτελέσματα, η θεωρητική μελέτη των καθεστώτων ροής σε κανάλια μικρής διαμέτρου είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο. Δεν υπάρχει γενικό μοντέλο ή συσχέτιση για μικρά κανάλια που να έχει επικυρωθεί ή να θεωρείται ευρέως αποδεκτό.

Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να προβλέψουν τα καθεστάτα ροής σε μικρά κανάλια χρησιμοποιώντας τα μοντέλα ροών σε κανονικούς αγωγούς και τα αποτελέσματα τους απέκλιναν από τα πραγματικά. Οι Mishima και Habiki (1995) σχεδίασαν χάρτες ροής αέρα-νερού για διαμέτρους 1-4 mm σε κατακόρυφους αγωγούς και ατμοσφαιρικές συνθήκες με βάση δικά τους πειράματα. Συμπέραναν ότι το μοντέλο του Mishima-Ishii (1984) προέβλεπε σωστά τα σύνορα μετάβασης. Ωστόσο, πολλοί ερευνητές ήρθαν σε αντίθεση καθώς τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα για την πρόβλεψη της ροής σε κανονικούς αγωγούς δεν λάμβαναν υπόψη τη επίδραση της επιφανειακής τάσης.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Το Σχήμα 2.7 παρουσιάζει τον πειραματικό χάρτη ροής των Damianides και Westwater (1988) για ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό 1 mm σε σύγκριση με τα θεωρητικά μοντέλα των Taitel και Dukler (1976) και Barnea et al. (1983). Το γράφημα δείχνει καθαρά ότι, σε οριζόντιο αγωγό 1 mm όχι μόνο δεν υπάρχει διαστρωματωμένη ροή αλλά και η ακριβής πρόβλεψη όλων των μεταπτώσεων μέσω των κλασικών μοντέλων δεν είναι πολλές φορές εφικτή.



Σχήμα 2.7 Σύγκριση του πειραματικού χάρτη των Damianides και Westwater (1988) και των μοντέλων των Taitel και Dukler (1976) και Barnea et al. (1983).

Η ακριβής επιρροή της διαμέτρου των καναλιών αποτελεί ακόμα ένα θέμα συζήτησης και διαφωνιών. Το μόνο σίγουρο είναι ότι μια αλλαγή στη διάμετρο της τάξης κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

των 1-2 mm μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στα σύνορα μετάβασης ανάμεσα στα διάφορα πρότυπα ροής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος που διεξήγε ο Chen (2005) και οι συνεργάτες του. Χρησιμοποιήθηκαν κατακόρυφα κανάλια διαμέτρου 1.10, 2.01, 2.88 και 4.26 mm σε πιέσεις 6,10 και 14 bar (υπό αυτές τις πιέσεις αναπτύχθηκαν συνθήκες ροής βρασμού) ενώ επιλέχθηκε το ψυκτικό R134a ως το κύριο ρευστό. Παρατηρήθηκαν τα εξής καθεστάτα ροής: ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες, ροή με φυσαλίδες, ροή περιορισμένων φυσαλίδων, διαλείπουσα ροή, ανάμεικτη ροή, δακτυλιοειδής και ομιχλώδης ροή.

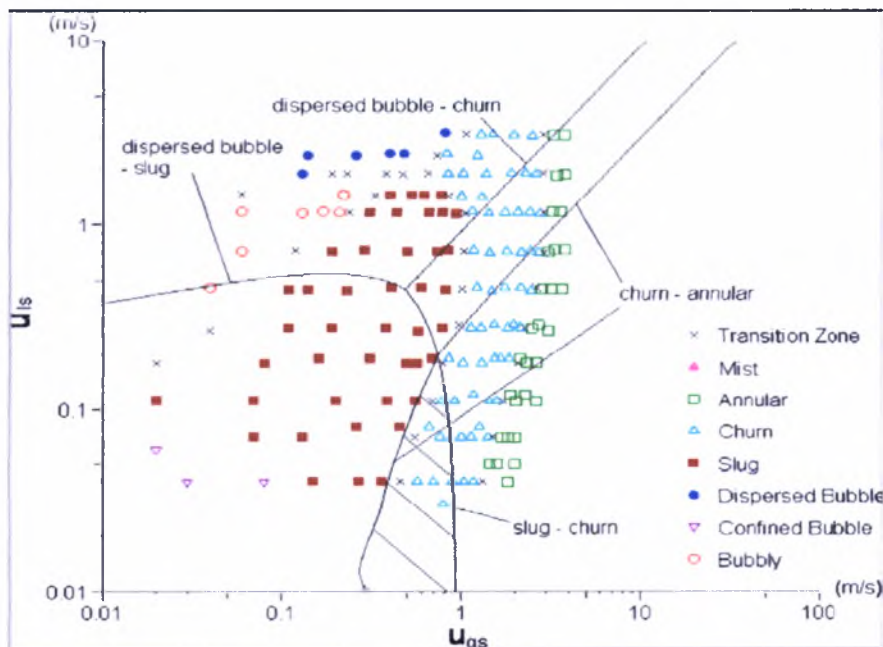
Η μετάβαση από τη δακτυλιοειδή στην ομιχλώδη ροή δεν παρατηρήθηκε στο κανάλι διαμέτρου 1.10 mm. Επιπλέον, το καθεστάτ των περιορισμένων φυσαλίδων παρατηρήθηκε μόνο στο κανάλι διαμέτρου 1.10 mm στα 6-14 bar και στο 2.01 mm κανάλι μόνο στα 6 bar. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι στους μικρούς αγωγούς και σε χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες υγρού, η επιφανειακή τάση απόκτα πολύ μεγάλη βαρύτητα. Με την αύξηση της u_{TS} η διεπιφάνεια υγρού-αερίου γίνεται περισσότερο ακανόνιστη και σταδιακά οι δυνάμεις αδράνειας και τριβής αντικαθιστούν την επιφανειακή τάση και γίνονται οι σημαντικότεροι παράγοντες στον καθορισμό των συνόρων ανάμεσα στα διάφορα καθεστάτα ροής..

Τα πρότυπα ροής στα κανάλια των 2.88 και 4.26 mm δεν παρουσίασαν πολλά κοινά στοιχεία με τα πρότυπα ροής σε μικρά κανάλια. Εν αντιθέσει, τα πρότυπα ροής σε διάμετρο 2.01 mm παρουσίασαν αρκετά στοιχεία μικρών καναλιών, δηλαδή η παρουσία της ροής περιορισμένων φυσαλίδων, το λεπτότερο υγρό φιλμ γύρω από τις φυσαλίδες Taylor και η λιγότερο χασοτική διεπιφάνεια υγρού-αερίου στην ανάμεικτη ροή. κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Επομένως, ίσως μια διάμετρος περίπου 2.00mm μπορεί να θεωρηθεί ως κρίσιμη διάμετρος για ψυκτικό R134a και με τις παρούσες συνθήκες.

Οι ερευνητές σχεδίασαν ακόμα χάρτες για όλα τους τα πειράματα. Οι χάρτες αυτοί έδειξαν ότι τα κλασικά μοντέλα για τους κανονικούς αγωγούς δεν είναι ικανά να προβλέψουν το πρότυπο ροής σε μικρούς αγωγούς (Σχήμα 2.8.). Ιδιαίτερα όσο μικραίνει η διάμετρος, η απόκλιση μεγαλώνει. Ένα ακόμα συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι με τη μείωση της διαμέτρου τα σύνορα μετάπτωσης από τη διαλείπουσα στην ανάμεικτη και από την ανάμεικτη στη δακτυλιοειδή μετακινούνται σε μεγαλύτερες ταχύτητες αερίου.

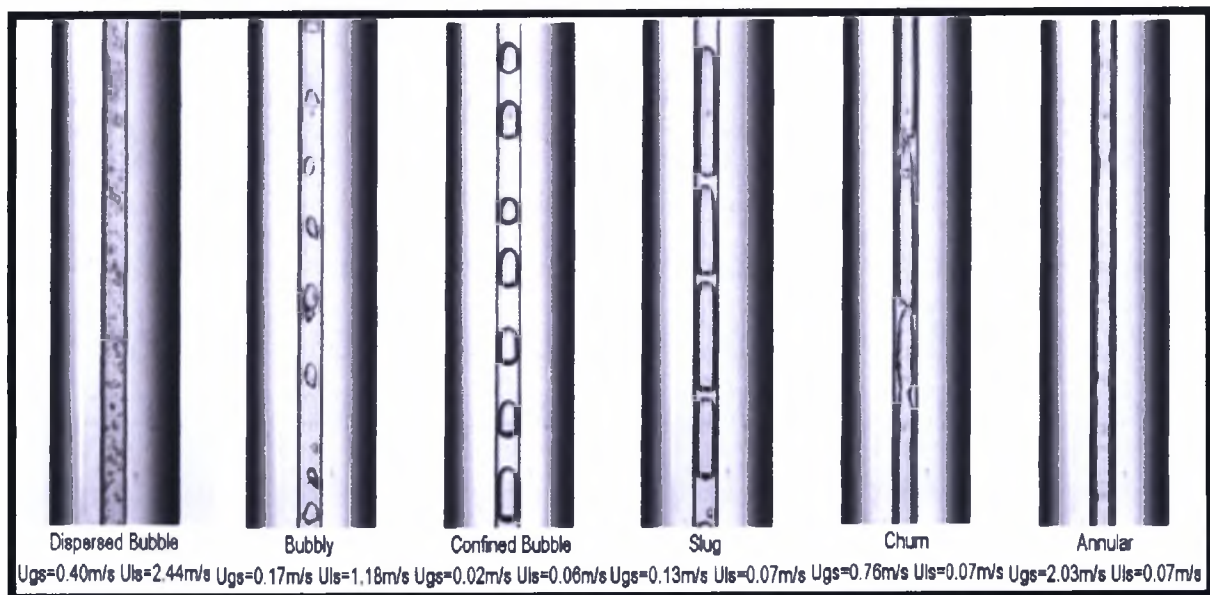
Τέλος, σύμφωνα με τους ερευνητές ο αδιάστατος αριθμός We είναι ίσως η πιο κατάλληλη παράμετρος για τη χρησιμοποίηση σε χάρτες ροής για ροή σε μικρά κανάλια. Αυτό μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω έρευνα στην περιοχή αυτή.



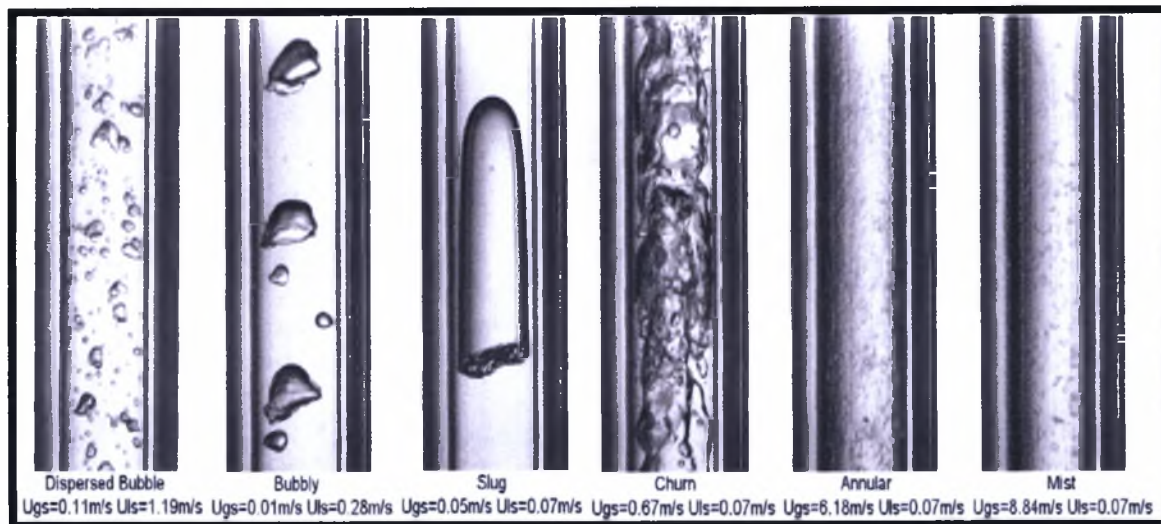
Σχήμα 2.8 Πειραματικός χάρτης ροής για ψυκτικό R134a σε κανάλι διαμέτρου 1.10 mm και πίεση 10 bar και σύγκριση με το κλασικό μοντέλο των Taitel et al. (Chen et al., 2005).

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου





Σχήμα 2.9 Τα πρότυπα ροής σε κανάλι διαμέτρου 1.10 mm και πίεση 10 bar (Chen et al., 2005).



Σχήμα 2.10 Τα πρότυπα ροής σε κανάλι διαμέτρου 4.26 mm και πίεση 10 bar (Chen et al., 2005).

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.9.1 Μοντελοποίηση των Μεταπτώσεων στα διάφορα Καθεστάτα Ροής για Αγωγούς Μικρότερης Διαμέτρου

Αρχικά είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι όσα μοντέλα ροής για αγωγούς μικρότερης διαμέτρου έχουν δημοσιευθεί μέχρι σήμερα υστερούν σίγουρα σε ακρίβεια. Το συγκεκριμένο για παράδειγμα μοντέλο προσφέρει αρκετή ακρίβεια σε αγωγούς 5 mm. Δεν γνωρίζουμε τι απόκλιση θα παρουσιάσει αν εφαρμοστεί σε minichannel. Είναι πολύ πιθανό ωστόσο τα αποτελέσματα στην περίπτωση αυτή να είναι ακριβέστερα των κλασικών μοντέλων για κανονικούς αγωγούς. Σκοπός της διεξαγωγής πολλών ερευνών είναι η πρόβλεψη της αυξανόμενης επιρροής της επιφανειακής τάσης στις μικρότερες διαμέτρους. Αυτό θα οδηγήσει και στη δημιουργία ακριβέστερων μοντέλων ροής.

Μετάπτωση από διασκορπισμένες φυσαλίδες σε ανάμεικτη ροή: Είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε αρχικά ότι απλή ροή με φυσαλίδες δε συναντούμε ποτέ σε αγωγούς μικρής διαμέτρου.

Οι Mishima και Habiki (1996) έδειξαν ότι το μοντέλο ολίσθησης (drift-flux model) μπορεί να προβλέψει σωστά τη μετάπτωση από το καθεστώς των διασκορπισμένων φυσαλίδων τόσο για κυκλικούς όσο και για ορθογωνικούς αγωγούς. Θα αναφερθούμε στη μελέτη τους αν και δε διαχωρίζουν τη ροή με φυσαλίδες από τη ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες.

Ο Wallis (1969) έχει διατυπώσει το συγκεκριμένο μοντέλο ως εξής:

$$u_G = \frac{U_{GS}}{\alpha} = C_0 (U_{GS} + U_{LS}) + V_{GU} \quad (2.41)$$

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

όπου C_0 είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από την κατανομή των φάσεων, και V_{GU} η ταχύτητα ολίσθησης της φυσαλίδας (drift velocity for bubble flow).

$$\text{Για κυλινδρικούς αγωγούς: } C_0 = 1 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (\text{Mishima and Ishii, 1984}) \quad (2.42)$$

Η V_{GU} υπολογίζεται από την εξής σχέση :

$$V_{GU} = (1 - \alpha)^{\frac{7}{4}} \sqrt{2} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.43)$$

όπου $\Delta \rho = (\rho_L - \rho_G)$ η διαφορά των πυκνοτήτων των δύο φάσεων και σ η επιφανειακή τάση του υγρού. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι ωστόσο το κλάσμα κενού.

Σύμφωνα με μια ημι-θεωρητική προσέγγιση των Radovcich και Moises (1962), η μετάπτωση συμβαίνει όταν αυξάνεται σε ένα μεγάλο βαθμό η συχνότητα των συγχωνεύσεων μεταξύ των φυσαλίδων. Απέδειξαν ότι το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν το κλάσμα κενού ισούται περίπου με 0.3. Οι Mishima και Ishii (1984) έκαναν μία γεωμετρική θεώρηση σύμφωνα με την οποία η ροή με φυσαλίδες γίνεται ασταθής επίσης όταν $\alpha \approx 0.3$.

Μετάπτωση από διαλείπουσα ροή σε ανάμεικτη ροή: Η φαινομενική ταχύτητα των φυσαλίδων U_{BS} μπορεί να υπολογιστεί από το συσχετισμό του Nicklin et al. (1962):

$$U_{BS} = \alpha [C_0 (U_{GS} + U_{LS}) + V_{GU}] \quad (2.44)$$

Το C_0 υπολογίζεται από τη σχέση (2.42).

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Όπου $V_{GU} = 0.35 \sqrt{\frac{(\Delta\rho g d_h)}{\rho_L}}$ (για τη διαλείπουσα ροή) και $\alpha = 1 - \delta \frac{4}{d_h}$

δ -πάχος υγρού υμένα, d_h -υδραυλική διάμετρος καναλιού

Το πάχος του υγρού υμένα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του Brotz (1954) ανεξάρτητα από το σχήμα των φυσαλίδων Taylor και της απόκλισης τους από τον κεντρικό άξονα του κυκλικού αγωγού.

Οι McQuillan και Whalley χρησιμοποιούν την εξίσωση συνέχειας που ακολουθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας πτώσης του υγρού υμένα U_{FS} :

$$U_{FS} = U_{BS} - (U_{GS} + U_{LS}) \quad (2.45)$$

Οι Jayanti και Hewitt (1992) βελτίωσαν το μοντέλο πλημμύρισης των McQuillan και Whalley (1985) χρησιμοποιώντας έναν πολλαπλασιαστή m (η παράμετρος αυτή δείχνει την επιρροή του μήκους και της διαμέτρου του αγωγού στο φαινόμενο της πλημμύρισης) και κατέληξαν στη συνθήκη μετάπτωσης:

$$\sqrt{U_{GS}^*} + m\sqrt{U_{LS}^*} \geq C \quad (2.46)$$

όπου $U_{GS}^* = U_{GS} \sqrt{\frac{\rho_G}{\Delta\rho g d_h}}$, $U_{LS}^* = U_{LS} \sqrt{\frac{\rho_L}{\Delta\rho g d_h}}$ και $m = L / d_h$

Το C είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από τις συνθήκες εισόδου/εξόδου καθώς και από το μήκος του καναλιού.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Μετάπτωση από διασκορπισμένες φυσαλίδες σε διαλείπουσα ροή: Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δύο μοντέλα για την πρόβλεψη της μετάβασης από το καθεστώς των διασκορπισμένων φυσαλίδων στη διαλείπουσα ροή. Θα αναφερθούμε στον εμπειρικό συσχετισμό των Weisman και Kang (1981). Σύμφωνα με το συσχετισμό αυτό τα σύνορα μετάπτωσης είναι ανεξάρτητα από την παροχή αερίου και η μετάπτωση θα συμβεί όταν:

$$\frac{\sqrt{\left| \frac{dp}{dx} \right|_{LS}}}{\Delta \rho g} = 1.7 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho d_h^2} \right)^2 \quad (2.47)$$

όπου $\left| \frac{dp}{dx} \right|_{LS}$ είναι η πτώση πίεσης ανά μονάδα μήκους σε περίπτωση μονοφασικής ροής υγρού.

$$\left| \frac{dp}{dx} \right|_{LS} = \frac{1}{2} \lambda_{LS} \frac{\rho_L U_{LS}^2}{d_h} \quad (2.48)$$

Όπου λ_{LS} είναι ο συντελεστής τριβής και μπορούμε να τον υπολογίσουμε μέσω του αριθμού Re για τυρβώδη ροή.

$$\lambda_{LS} = \frac{C_T}{\text{Re}_{LS}^{0.25}} \quad \text{και} \quad \text{Re}_{LS} = \frac{\alpha \rho_L U_{LS}}{\mu_L}$$

Η γεωμετρική παράμετρος C_T για τυρβώδη ροή εξαρτάται από την αντίστοιχη για τη στρωτή C_L . Υπάρχουν πίνακες C_L για διάφορα είδη καναλιών και τύπος του Sadatomi et al. (1982) με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε τελικά το C_T .

Τέλος, χρησιμοποιούνται οι διορθωτικοί παράγοντες Φ_1 για τη φαινομενική ταχύτητα αερίου και Φ_2 για τη φαινομενική ταχύτητα υγρού με σκοπό την ακριβέστερη

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

πρόβλεψη των συνόρων μετάπτωσης (μέσω της χρησιμοποίησης των ιδιοτήτων του ρευστού και των διαστάσεων του αγωγού).

$$\Phi_1 = 1 \quad (2.49)$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{\rho_L}{\rho_{sL}} \right)^{-0.33} \left(\frac{d_h}{d_{s1}} \right)^{0.16} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^{0.24}$$

όπου $d_{s1} = 25.4 \text{ mm}$, $\rho_{sL} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu_{sL} = 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$, $\sigma_s = 0.07 \text{ N/m}$

Για να βελτιώσουν την ακρίβεια αυτής της συνθήκης μετάπτωσης ο Wölk (1998) και οι συνεργάτες του πρότειναν μια μικρή τροποποίηση:

$$\sqrt{\left| \frac{dp}{dx} \right| LS} = 1.7 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho g d_h^2} \right)^{0.25} \left(\frac{0.65 U_{GS}}{C_0^3 V_{GL} + U_{GS}} \right)^{7/8} \quad (2.50)$$

$$\Phi_{2, \text{new}} = \Phi_2 \left(\frac{d_{s2}}{d_h} \right)^{0.33}$$

όπου $d_{s2} = 5.9 \text{ mm}$

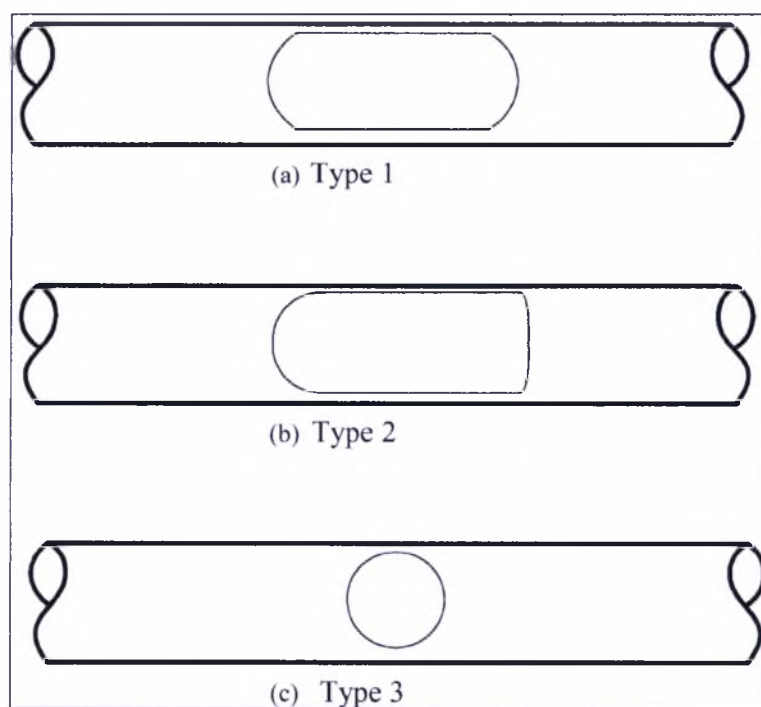
Σύμφωνα με τον Wölk η νέα συνθήκη μετάπτωσης προβλέπει καλύτερα τη μετάβαση από τη ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

2.9.2 Κεκλιμένη Ροή σε Αγωγούς Μικρής Διαμέτρου

Η κεκλιμένη ροή σε αγωγούς μικρής διαμέτρου εξαιτίας των πολλών δυσκολιών που παρουσιάζει δεν έχει ακόμα διερευνηθεί σε βάθος. Περαιτέρω έρευνα του τρόπου και της συχνότητας εμφάνισης όλων των προτύπων ροής είναι αναγκαία. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε απλώς κάποιες βασικές διαφορές των χαρακτηριστικών της κεκλιμένης ροής σε μικρούς αγωγούς σε σχέση με την κατακόρυφη και την οριζόντια ροή.

Σύμφωνα με πειράματα των Cheng και Lin (2001), το σχήμα και η θέση των φυσαλίδων κατά τη διαλείπουσα ροή επηρεάζονται περισσότερο από την κλίση και λιγότερο από τη διάμετρο του αγωγού. Τα σχήματα των φυσαλίδων που παρατηρήθηκαν αναπαριστώνται απλοποιημένα στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11 Σχήματα των φυσαλίδων κατά τη διαλείπουσα ροή (T.-W. Cheng et al., 2001).

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Για ένα πολύ μικρό κανάλι ($D=2$ mm), το πρώτο σχήμα κυριαρχεί ανεξάρτητα από τη γωνία κλίσης και την παροχή του αερίου. Το δεύτερο επικρατεί συνήθως σε μεγαλύτερες διαμέτρους και μικρότερες ταχύτητες αερίου ενώ το τρίτο υπάρχει μόνο σε μεγάλες διαμέτρους ($D=8$ mm) σε γωνίες κλίσης από 30° έως 45° .

Παρατηρήσεις δείχνουν ότι, σε κεκλιμένα κανάλια οι φυσαλίδες δεν είναι πάντα αξονοσυμμετρικές. Το πάχος του υγρού φιλμ δεν είναι ομοιόμορφο όπως στην περίπτωση της ροής σε οριζόντιο κανάλι. Σύμφωνα με τον Bendiksen (1984), η ακριβής θέση της φυσαλίδας στον αγωγό εξαρτάται από τον αριθμό Froude (Fr).

$$Fr = \frac{u_m}{(gD)^{1/2}} \quad \text{όπου } u_m = u_G + u_L$$

Αν $Fr < 1$, η φυσαλίδα αποκλίνει από τον άξονα και προσεγγίζει το πάνω τοίχωμα του αγωγού. Σε διαφορετική περίπτωση, η θέση της φυσαλίδας είναι αξονοσυμμετρική. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε κεκλιμένα minichannels η ταχύτητα ανύψωσης των φυσαλίδων κατά τη διαλείπουσα ροή είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την οριζόντια και την κατακόρυφη ροή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας και μάζας σε κεκλιμένα συστήματα αγωγών.

2.9.3 Πτώση Πίεσης σε Αγωγούς Μικρής Διαμέτρου

Η πτώση πίεσης σε αγωγούς μικρής διαμέτρου έχει μελετηθεί τα τελευταία χρόνια από πολλούς ερευνητές. Για τον υπολογισμό της πίεσης τριβής, έχει προτείνει ο Collier (1981) ένα συσχετισμό με την παράμετρο χ_u του Martinelli:

$$\frac{\Delta p_{TP}}{\Delta p_{LO}} = 1 + \frac{C}{\chi_u} + \frac{1}{\chi_u^2} \quad (2.51)$$

$$\chi_u = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.1}$$

Δp_{TP} είναι η πτώση πίεσης σε διαφασική ροή ενώ Δp_{LO} είναι η πτώση πίεσης σε μονοφασική υγρή ροή. Οι Lazarek και Black (1982) διαπίστωσαν ότι η αντικατάσταση του C με την τιμή 30 παρείχε αποτελέσματα που δεν απέκλιναν σημαντικά σε σχέση με τα πειραματικά.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να γίνει ακριβής πρόβλεψη της πτώσης πίεσης επιτάχυνσης σε μικρούς αγωγούς χρησιμοποιώντας το μοντέλο διαχωρισμένης ροής των Martinelli και Nelson (1948) και μία πολλαπλασιαστική παράμετρο K_{sa} .

$$\frac{\Delta p_{sa}}{G^2} = K_{sa} \left[\frac{\rho_L x_{ex}^2}{\rho_G \alpha_{ex}} + \frac{(1-x)^2}{1-\alpha_{ex}} - \frac{\rho_L x_m^2}{\rho_G \alpha_m} - \frac{(1-x_m)^2}{1-\alpha_m} \right] \quad (2.52)$$

Το K_{sa} είναι μια εμπειρική παράμετρος. Σύμφωνα με τους Lazarek και Black, για $K_{sa}=2.5$ η απόκλιση που παρουσιάζεται δεν ξεπερνάει ποτέ το 20%.

Τέλος, η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας υπολογίζεται από τη σχέση (2.20).

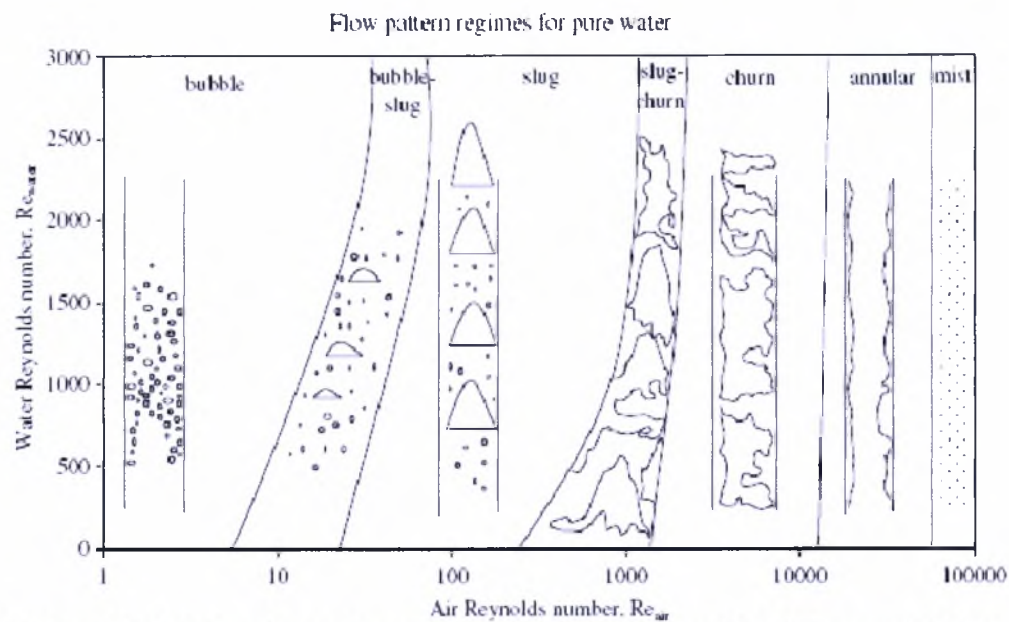
κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Η επιρροή της διαμέτρου στη διασπαστική πτώση πίεσης δεν έχει μέχρι σήμερα πλήρως αποσαφηνιστεί (οι παράμετροι που αναφέρθηκαν δεν εξαρτώνται άμεσα από την ακριβή διάμετρο) και αποτελεί αντικείμενο έρευνας.

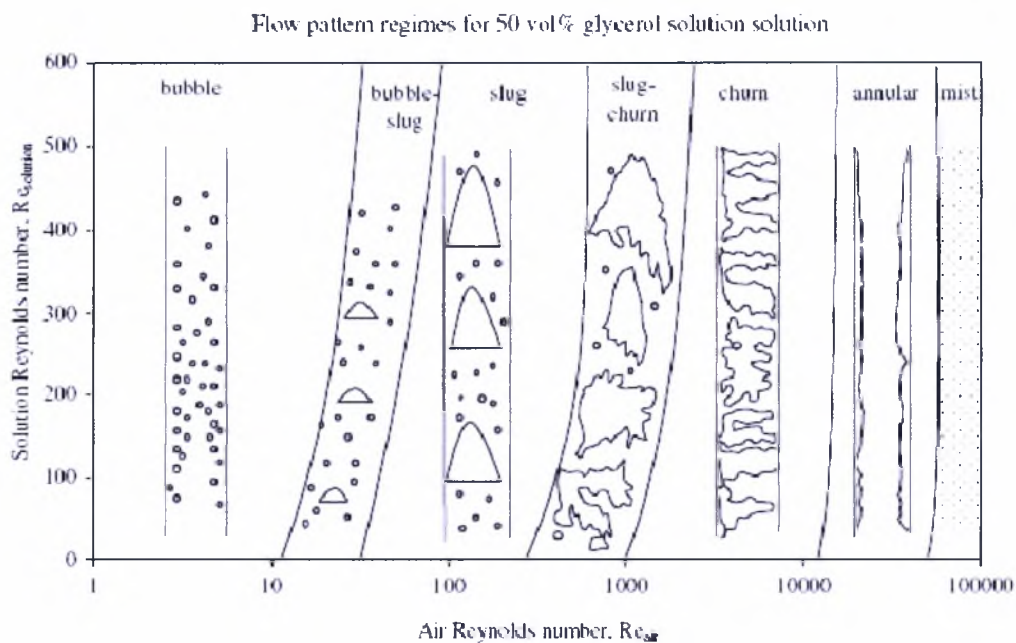
2.10 Εξάρτηση από το Ιξώδες των Ρευστών

Η επίδραση της αλλαγής του ιξώδους γίνεται κυρίως ορατή στην περιοχή ροής με φυσαλίδες, στην περιοχή μετάπτωσης από την ροή με φυσαλίδες στη διαλείπουσα ροή καθώς και στην περιοχή της διαλείπουσας ροής. Όπως μπορούμε να δούμε στα (Σχήματα.2.12.13.), οι περιοχές αυτές εμφανίζονται με την αύξηση του ιξώδους πιο εκτεταμένες. Σε μικρούς αριθμούς Re , η συγκέντρωση των φυσαλίδων σε σχέση με το καθαρό μίγμα αέρα-νερού είναι σαφώς μικρότερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται αντίστοιχα και ο αριθμός των συγχωνεύσεων που οδηγούν στη διαλείπουσα ροή. Η ροή κατά τη διάρκεια της ανάμεικτης και της δακτυλιοειδούς ροής είναι αρκετά τυρβώδης και έτσι η επίδραση του ιξώδους δεν είναι ιδιαίτερα αισθητή.

κατακόρυφη διασπαστική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



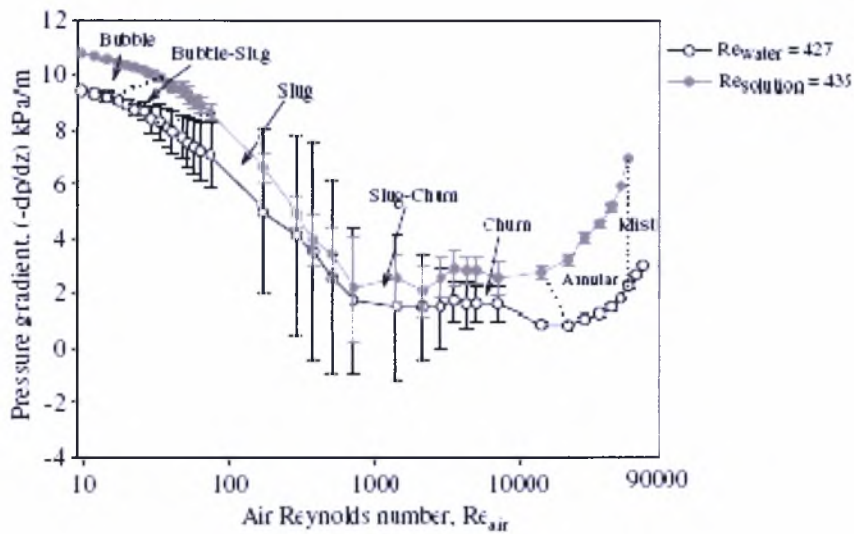
Σχήμα 2.12 Καθεστάτα ροής για μίγμα αέρα-νερό (Nan Da Hlaing et al.,2005).



Σχήμα 2.13 Καθεστάτα ροής για διάλυμα 50% γλυκερίνη-αέρα (Nan Da Hlaing et al.,2005).

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Σύμφωνα με τον Nan Da Hlaing et al. οι επιδράσεις του ιξώδους στη πτώση πίεσης είναι μικρές. Όπως μπορούμε να δούμε στο παρακάτω γράφημα, οι διακυμάνσεις στις μεταβολές πίεσης είναι μικρότερες κατά τη ροή διαλύματος γλυκερίνης-αέρα.



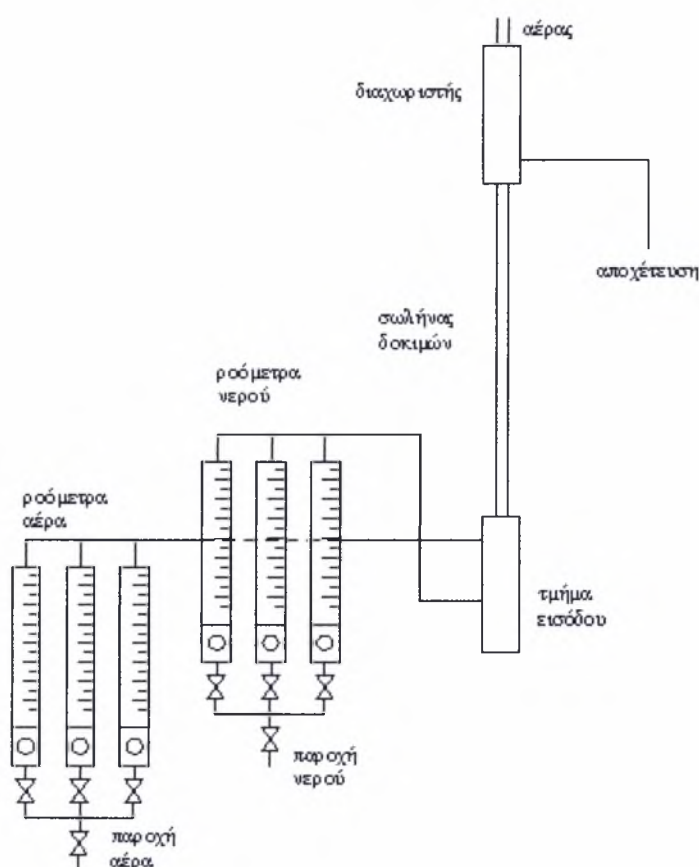
Σχήμα 2.14 Μεταβολή της πίεσης σε σχέση με τον αριθμό Re για καθαρό νερό και διάλυμα 50% γλυκερίνης (Nan Da Hlaing et al., 2005).

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διάταξη

3.1 Περιγραφή των βασικών Τμημάτων της Διάταξης

Μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη της διφασικής ροής σε κατακόρυφα κανάλια μικρής διαμέτρου φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη.

Για την κάλυψη όσον το δυνατό μεγαλύτερης περιοχής τιμών παροχής του αέρα και του νερού χρησιμοποιήσαμε κατά την εκτέλεση του πειράματος συνολικά **6** κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

ροόμετρα. Κάθε ροόμετρο λειτουργεί αξιόπιστα σε ένα εύρος τιμών από τη μέγιστη παροχή του έως το 10% της παροχής αυτής. Τα ροόμετρα του αέρα όπως και τα ροόμετρα του νερού είναι παράλληλα συνδεδεμένα. Έτσι, οι παροχές που μπορούμε να μετρήσουμε κυμαίνονται από 2 μέχρι 114 L/min για τον αέρα και 20 μέχρι 6300 ml/min για το νερό.

Το **τμήμα εισόδου** που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 δεν είναι τίποτα άλλο από δύο πλαστικά κανάλια κυκλικής διατομής διαμέσου των οποίων οι παροχές του αέρα και του νερού εισέρχονται στο σωλήνα δοκιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο παροχές κατά τη συνάντησή τους σχηματίζουν γωνία περίπου 90°.

Ο **σωλήνας δοκιμών** που χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη της διαφασικής ροής του αέρα με το νερό είναι από Plexiglas, έχει μήκος 90 cm και εσωτερική διάμετρο 5.4 mm.

Ο **διαχωριστής** είναι ένα κυλινδρικό δοχείο εσωτερικής διαμέτρου 7 cm και ύψους 35 cm. Ο πυθμένας του είναι κωνικού σχήματος για την καλύτερη συλλογή του νερού. Ο διαχωριστής συνδέεται μέσω τριών σωλήνων με το δίκτυο αποχέτευσης, όπου καταλήγει τελικά το νερό.

Τέλος, το νερό λαμβάνεται από το δίκτυο ύδρευσης και καταλήγει στο δίκτυο αποχέτευσης ενώ ο αέρας λαμβάνεται από το δίκτυο τροφοδοσίας και καταλήγει στο περιβάλλον.

Η παρατήρηση της ροής στο κανάλι έγινε με τη βοήθεια **ψηφιακής κάμερας**. Παράλληλα, με τη βοήθεια του υπολογιστή και του προγράμματος **Motion Scope** παρακολουθήσαμε με ακρίβεια όλα τα πρότυπα ροής που εμφανίστηκαν και

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

βιντεοσκοπήσαμε τη ροή σε διάφορες μορφές της. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αποτυπώσει έως και 1000 στιγμιότυπα το δευτερόλεπτο.

3.2 Διεξαγωγή του Πειράματος

Αρχικά, ρυθμίζοντας την βαλβίδα ενός από τα ροόμετρα του νερού στην επιθυμητή τιμή και ανοίγοντας την παροχή ύδρευσης σταθεροποιούμε την παροχή του νερού. Στη συνέχεια ανοίγουμε το μικρότερο ροόμετρο του αέρα (η παροχή του αέρα είναι πάντα ανοιχτή) για να πάρουμε τη μικρότερη δυνατή παροχή.

Τα δύο ρεύματα συναντώνται στο τμήμα εισόδου (υπό γωνία περίπου 90°) και οδηγούνται στο σωλήνα δοκιμών. Με τη βοήθεια της ψηφιακής κάμερας έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε τη ροή που δημιουργείται τελικά προς το τέλος του σωλήνα όταν οι συνθήκες είναι πλέον μόνιμες. Με τη βοήθεια του υπολογιστή έχουμε τη δυνατότητα γνωρίζοντας τις παροχές του νερού και του αέρα να παρακολουθούμε με ακρίβεια όλα τα πρότυπα ροής που επικρατούν στο σωλήνα δοκιμών και να καταγράφουμε οποιεσδήποτε λεπτομέρειες.

Το μίγμα νερού-αέρα καταλήγει στο διαχωριστή όπου ο αέρας διαφεύγει από την πάνω έξοδο στην ατμόσφαιρα ενώ το νερό καταλήγει στο δίκτυο αποχέτευσης.

Αλλάζουμε την παροχή του αέρα και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία μέχρι τη μέγιστη παροχή του αέρα που μπορούμε να υπολογίσουμε.

Στο πείραμα χρησιμοποιήσαμε παροχές νερού από 100 mL/min έως 3028 mL/min. Αντιστοίχως οι παροχές αέρα που χρησιμοποιήσαμε κυμάνθηκαν από 100 mL/min έως 34000 mL/min.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα Πειράματος

4.1 Χάρτης Καθεστώτων Ροής

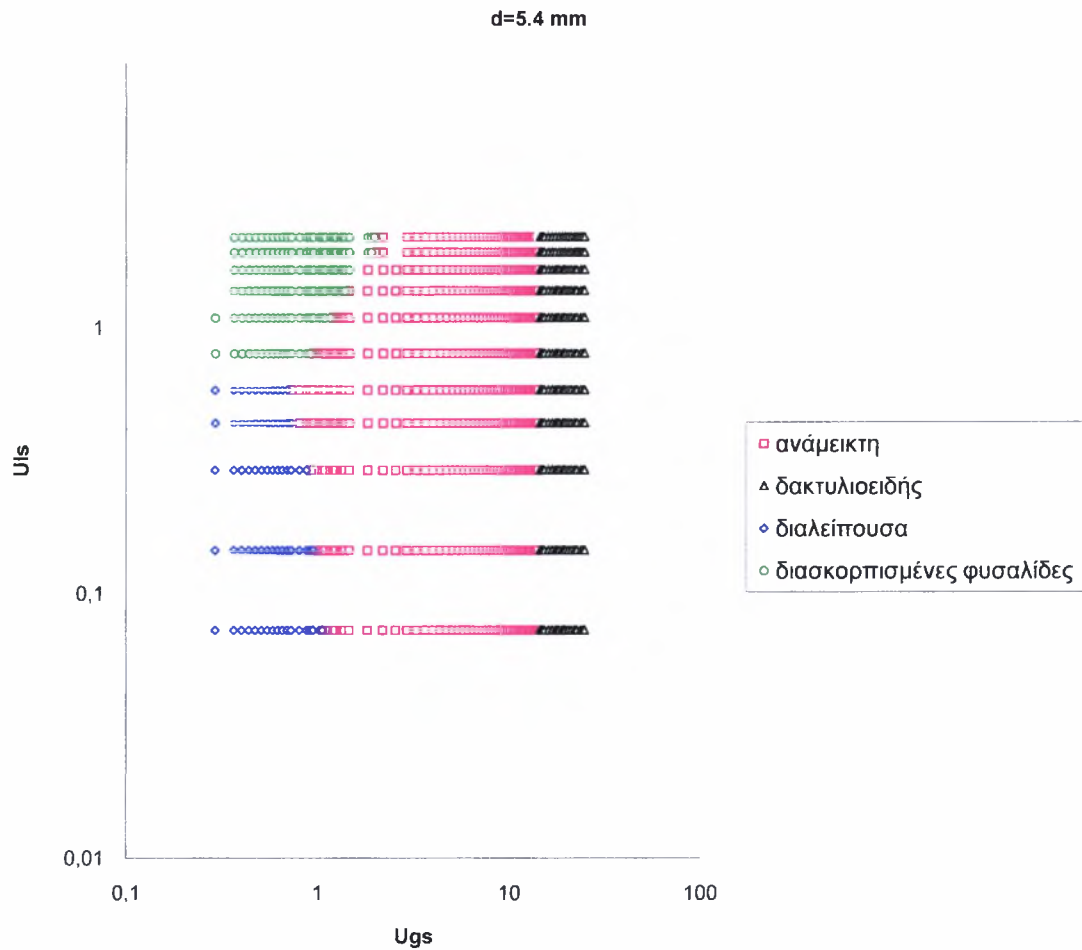
Ένας από τους βασικούς στόχους της διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία ενός χάρτη ροής για κατακόρυφη διφασική ροή αέρα-νερού (σε ατμοσφαιρικές συνθήκες) σε αγωγό διαμέτρου 5.4 mm. Για το λόγο αυτό εξετάσαμε περίπου 902 συνδυασμούς παροχών αέρα και νερού και προσπαθήσαμε με τη βοήθεια της κάμερας και του υπολογιστή να παρακολουθήσουμε και να καταγράψουμε το πρότυπο ροής που παρουσιαζόταν στο εσωτερικό του σωλήνα δοκιμών. Ο χάρτης ροής κατασκευάστηκε σε λογαριθμικό φύλλο (στον άξονα x καταγράφεται η φαινομενική ταχύτητα του αέρα και στον άξονα y η φαινομενική ταχύτητα του νερού). Οι εξισώσεις που συνδέουν τις ταχύτητες του αέρα και του νερού με τις ογκομετρικές παροχές των ροόμετρων είναι οι εξής:

$$u_{GS} = \frac{Q_g}{A} \quad u_{LS} = \frac{Q_l}{A}$$

όπου A είναι η διατομή του αγωγού

Η ανίχνευση των προτύπων ροής έγινε με γνώμονα την οπτική παρατήρηση και επομένως ο χάρτης ροής που έχουμε κατασκευάσει περιέχει και το στοιχείο της υποκειμενικότητας. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί η παρατήρηση σε αγωγούς μικρής διαμέτρου είναι περισσότερο περίπλοκη. Αυτό καθιστά την ανίχνευση δυσκολότερη και την πιθανότητα λάθους μεγαλύτερη.

Στον επόμενο χάρτη φαίνονται τα σημεία που εξετάσαμε και τα πρότυπα ροής που παρατηρήσαμε για κάθε συνδυασμό παροχών.
κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



Σχήμα 4.1 Χάρτης ροής για κατακόρυφη ροή νερού-αέρα σε αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 5.4 mm και ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Παραθέτουμε τα αναλυτικά αποτελέσματα για όλα τα σημεία που εξετάσαμε στο Παράρτημα Ι.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

4.2 Πρότυπα Ροής

Ένας ακόμα στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η λεπτομερής καταγραφή του τρόπου ανάπτυξης και των διαφόρων χαρακτηριστικών των προτύπων ροής που αναπτύχθηκαν στο σωλήνα δοκιμών.

4.2.1 Διαλείπουσα Ροή

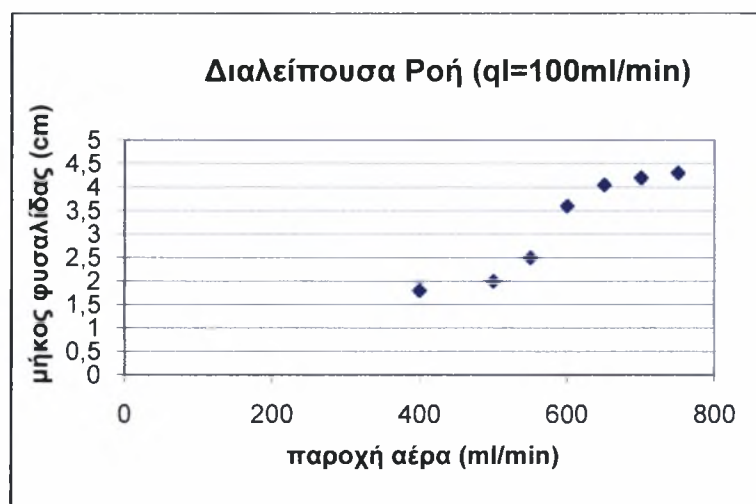
Η διαλείπουσα ροή μπορεί να εμφανιστεί αρχικά για ροές αέρα μικρότερες των 0.15 m/sec όταν η αντίστοιχη ταχύτητα του νερού δεν υπερβαίνει τα 0.04 m/sec. Ωστόσο σε μεγαλύτερες ταχύτητες νερού εμφανίζεται συνήθως όταν η ταχύτητα του αέρα ξεπεράσει τα 0.22 m/sec. Σε καμία περίπτωση δεν συναντήσαμε διαλείπουσα ροή για ταχύτητες αέρα μεγαλύτερες των 1.1 m/sec. Όσον αφορά τις ταχύτητες του νερού, η διαλείπουσα ή ροή με φυσαλίδες Taylor, όπως αλλιώς ονομάζεται, εμφανίζεται αρχικά σε πολύ μικρές ταχύτητες ενώ δεν μπορεί να υπάρξει όταν ξεπεράσουμε τα 0.73 m/sec.

Θα περιμέναμε ίσως ότι σε σταθερές συνθήκες όλες οι φυσαλίδες Taylor θα έχουν το ίδιο μήκος και θα ισαπέχουν. Ωστόσο κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Η ροή δεν είναι συνεχής, υπάρχουν περιοχές στις οποίες βλέπουμε πολλές φυσαλίδες και άλλες στις οποίες ρέει μόνο υγρό. Επιπλέον, ακόμα και σε μόνιμες συνθήκες όλες οι φυσαλίδες δεν έχουν το ίδιο μήκος.

Για συγκεκριμένη παροχή νερού, με αύξηση της παροχής του αέρα παρατηρήσαμε ότι συνεχώς αυξάνονταν το μέσο μήκος της φυσαλίδας Taylor, με αποτέλεσμα να χάνει το ελλειψοειδές της σχήμα.

Παράλληλα με τη βοήθεια της ψηφιακής κάμερας και του υπολογιστή, προσπαθήσαμε να καταγράψουμε τα μήκη των φυσαλίδων Taylor και να καταλήξουμε κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

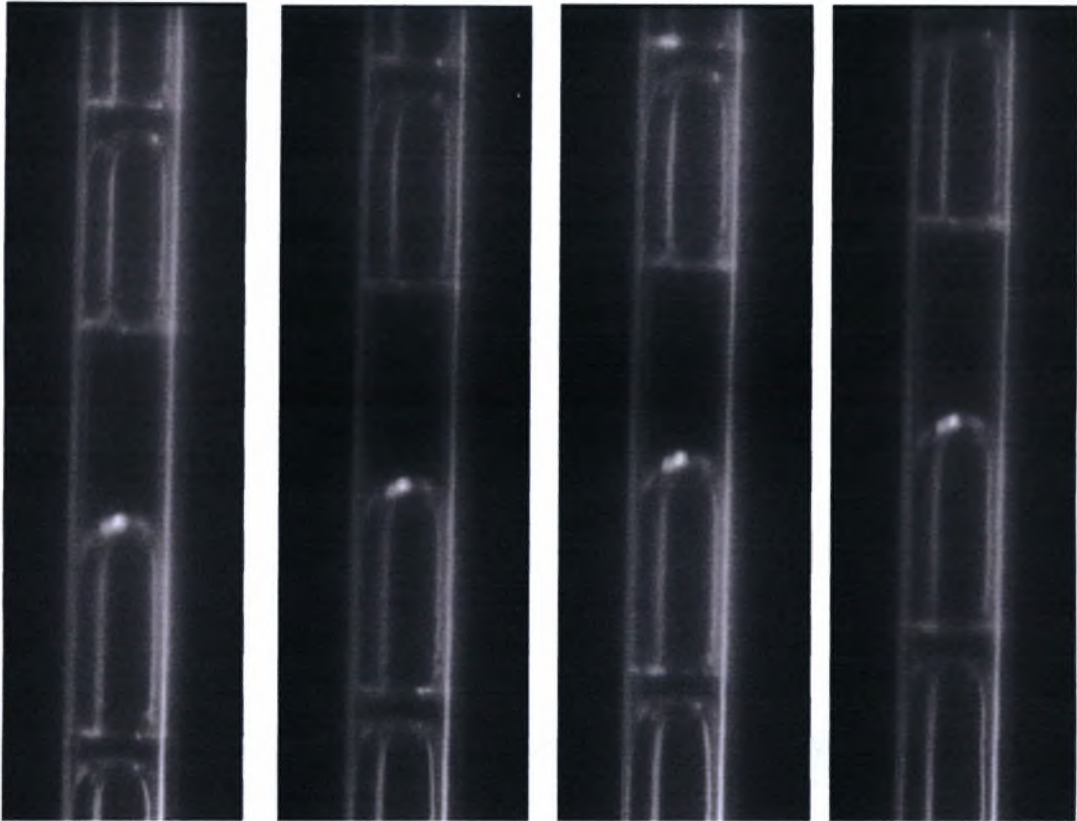
σε μια σχέση που συνδέει την παροχή του αέρα με το μήκος της φυσαλίδας. Ωστόσο, τα αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε δε μας επιτρέπουν να βγάλουμε ξεκάθαρα συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που αναπτύσσεται μια φυσαλίδα Taylor. Ενδεικτικά, παραθέτουμε το παρακάτω διάγραμμα το οποίο μας δείχνει το πώς αυξάνεται το μήκος της φυσαλίδας για σταθερή παροχή νερού ίση με 100 ml/min και για αυξανόμενη παροχή αέρα.



Σχήμα 4.2 Επίδραση της παροχής αέρα στο μήκος της φυσαλίδας Taylor.

Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε ότι τα όρια μεταξύ της ήπιας-διαλείπουσας (plug) και της διαλείπουσας ροής (slug) είναι στην πραγματικότητα αρκετά δύσκολο να ανιχνευθούν. Ενδεικτικά παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται η ροή στο σωλήνα δοκιμών για ταχύτητα νερού ίση με 0.07 m/sec και ταχύτητα αέρα 0.36 m/sec . Η ροή εξελίσσεται ακόμη αργά, δεν υπάρχουν μικρές φυσαλίδες στις υγρές μάζες και συνεπώς μπορούμε να θεωρήσουμε τη ροή στη συγκεκριμένη περίπτωση ως ήπια-διαλείπουσα.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



Σχήμα 4.3 Εξέλιξη της διαλείπουσας ροής σε μόνιμες συνθήκες 0.07 m/sec νερού και 0.36 m/sec αέρα.

4.2.2 Ανάμεικτη Ροή

Όπως είδαμε, η ανάμεικτη ροή καλύπτει μια τεράστια περιοχή στο χάρτη ροής. Η ροή αυτή παρατηρήθηκε σε ένα εύρος ταχυτήτων αέρα από 0.73 m/sec έως 14.56 m/sec και σε όλες τις ταχύτητες του νερού.

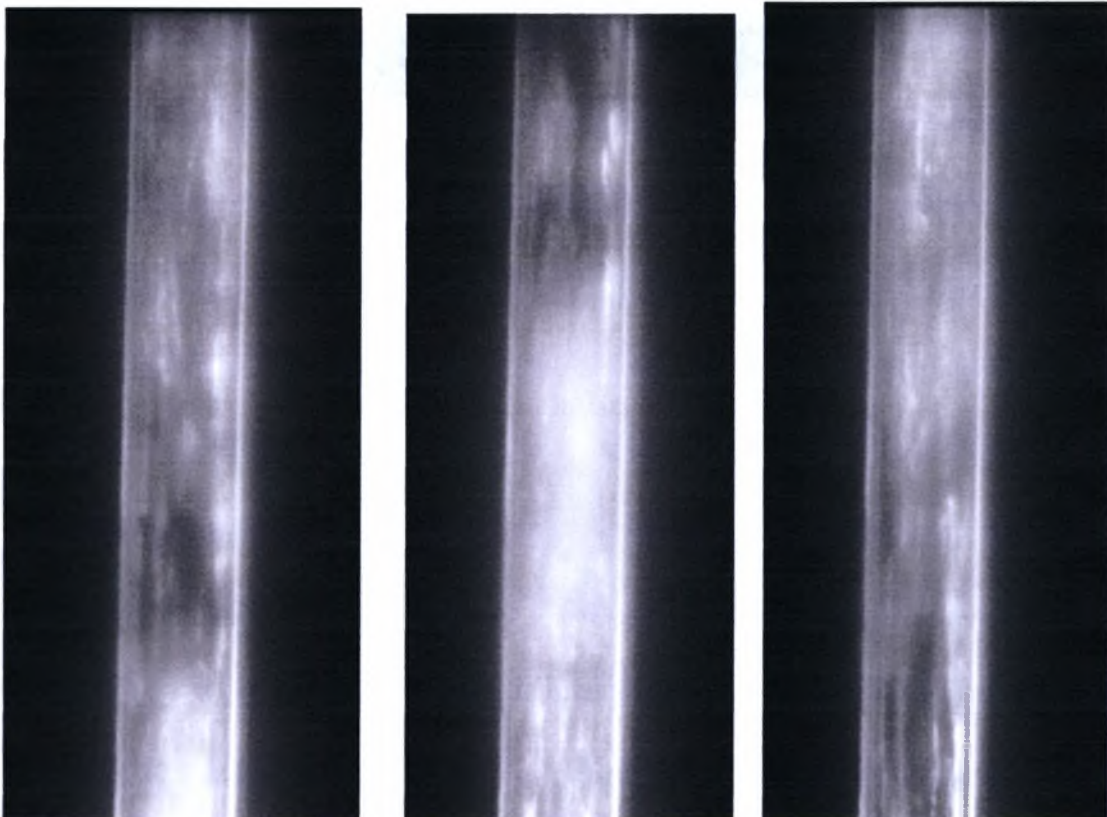
Με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα οι φυσαλίδες χάνουν το σχήμα τους. Στα πλευρά τους σχηματίζονται έντονοι κυματισμοί και το πάνω άκρο τους στενεύει. Όλα αυτά είναι σημάδια μετάπτωσης στην ανάμεικτη ροή.

Εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης αερίου, οι υγρές μάζες (οι οποίες διαχωρίζουν τις φυσαλίδες Taylor κατά τη διαλείπουσα ροή) χάνουν την ισορροπία τους κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

και κινούνται πάνω-κάτω. Για μεγαλύτερες ροές αερίου, η ροή είναι περισσότερο χαοτική και δυσκολότερα παρατηρήσιμη.

Είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε ότι η μετάπτωση από τη διαλείπουσα και τη ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες στην ανάμεικτη ροή είναι ένα μεταβατικό φαινόμενο (εκεί οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό η υποκειμενικότητα των παρατηρήσεων) και τα γεγονότα που παρουσιάζουμε στο χάρτη σαν γραμμές θα μπορούσαν να παρουσιαστούν σαν μικρές περιοχές.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ενδεικτικά η εξέλιξη της ανάμεικτης ροής σε ταχύτητα αέρα 2.4 m/sec και νερού 2.2 m/sec. Η ανάμεικτη ροή σε αυτή την περίπτωση αν και δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένη είναι όπως βλέπουμε χαοτική.



Σχήμα 4.4 Εξέλιξη της ανάμεικτης ροής σε μόνιμες συνθήκες ταχύτητα αέρα 2.4 m/sec και ταχύτητα νερού 2.2 m/sec. κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

4.2.3 Δακτυλιοειδής Ροή

Η δακτυλιοειδής ροή παρατηρήθηκε σε ταχύτητες αέρα μεγαλύτερες των 14.56 m/sec. Στην πραγματικότητα ακόμα και σε ταχύτητες 25 m/sec περίπου που ήταν σχεδόν οι μέγιστες που μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το φαινόμενο που παρατηρήσαμε δεν ήταν δακτυλιοειδής ροή με όλα τα χαρακτηριστικά της αλλά ένας συνδυασμός δακτυλιοειδούς και ανάμεικτης ροής.

Παρατηρήσαμε κατά τη ροή ότι σημαντικό μέρος του υγρού έρεε προς τα πάνω στη μορφή κυματοειδούς φιλμ (αυτό είναι και το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της δακτυλιοειδούς ροής) ενώ στον αέριο πυρήνα δεν υπήρχαν σταγονίδια αλλά υγρές μάζες παρόμοιες με αυτές της ανάμεικτης ροής. Με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα έως τα 25 m/sec παρατηρήσαμε ότι αυξήθηκε η ταχύτητα και η συχνότητα εμφάνισης τους.

Διαπιστώσαμε με αυτόν τον τρόπο πως θα μπορούσε ίσως να υπάρξει ένα καθεστώς ροής που μπορεί να περιγράψει αυτά τα χαρακτηριστικά και να διευκολύνει τη δουλειά των ερευνητών όσον αφορά το σχεδιασμό των χαρτών. Η περιοχή που θα κάλυπτε αυτό το είδος ροής στους χάρτες σίγουρα δεν θα ήταν αμελητέα.

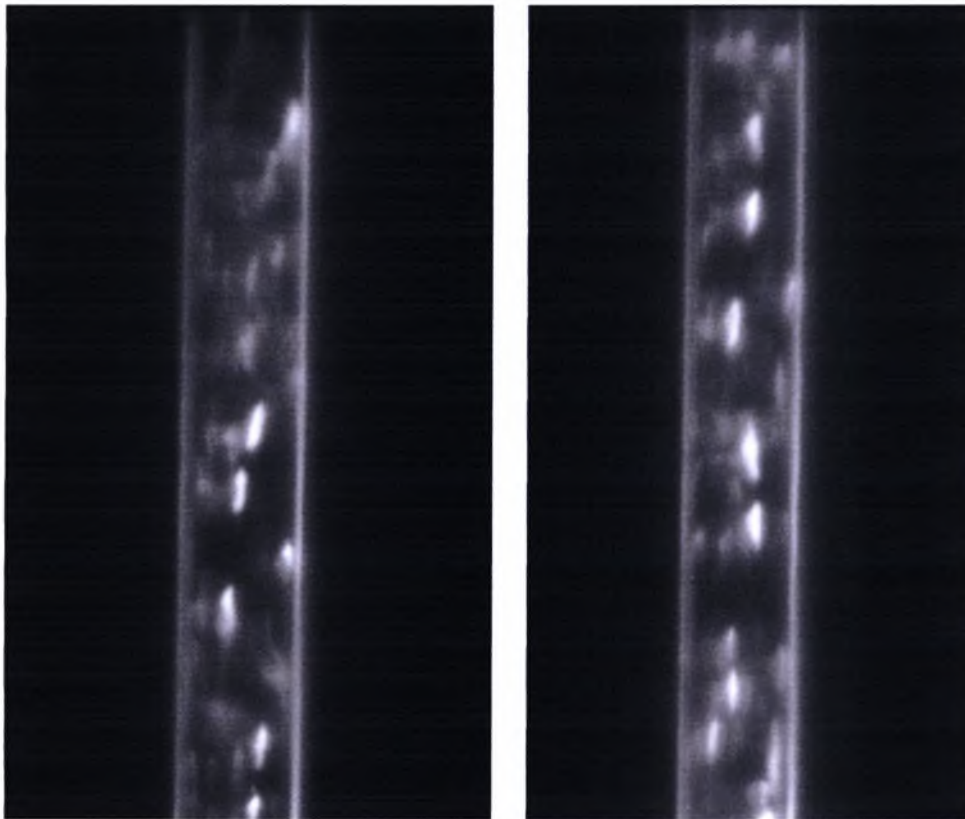
4.2.4 Ροή με Διασκορπισμένες Φυσαλίδες

Η ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες παρατηρήθηκε σε ταχύτητες νερού μεγαλύτερες των 0.73 m/sec και ροές αέρα μεταξύ 0.29 m/sec και 14.56 m/sec.

Σε χαμηλές παροχές αέρα η ροή δεν είναι συνεχής, οι φυσαλίδες έχουν πολύ μικρή διάμετρο και είναι περισσότερο διασκορπισμένες. Αξίζει να σημειωθεί ακόμα ότι

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

και σε μόνιμες συνθήκες όλες οι φυσαλίδες δεν έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Σε μεγαλύτερες παροχές αέρα η ροή είναι συνεχής και διακρίνουμε φυσαλίδες σε όλο το μήκος του σωλήνα δοκιμών. Από κάποιο σημείο και μετά εξαιτίας της μεγάλης αύξησης του κλάσματος κενού οι φυσαλίδες συγκρούονται και συγχωνεύονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μετάπτωση στην ανάμεικτη ροή. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται δύο φωτογραφίες ροής με διασκορπισμένες φυσαλίδες.



Σχήμα 4.5 Ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες σε μόνιμες συνθήκες ταχύτητα αέρα 0.51 m/sec και ταχύτητα νερού 1.93 m/sec.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

4.3 Σύγκριση των Πειραματικών Αποτελεσμάτων με το Μοντέλο Ροής των Taitel, Dukler και Barnea

Για να εξετάσουμε την αξιοπιστία του μοντέλου ροής των Taitel et al. σε αγωγούς διαμέτρου μεγαλύτερης των 5 mm κατασκευάσαμε ένα χάρτη ροής βασισμένο στο συγκεκριμένο μοντέλο που θεωρείται ίσως σήμερα το πιο αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα.

Σκοπός μας ήταν να δούμε τι προβλέπει ο θεωρητικός χάρτης ροής για τις μεταπτώσεις στα διάφορα πρότυπα ροής και να υπολογίσουμε τελικά τις αποκλίσεις από το δικό μας πειραματικό χάρτη. Αν οι αποκλίσεις αυτές είναι σημαντικές η διάμετρος των 5.4 mm θα πρέπει να θεωρείται στις δεδομένες συνθήκες «minichannel» (είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο ότι το συγκεκριμένο μοντέλο αποκλίνει σημαντικά όταν εφαρμόζεται σε κανάλια μικρής διαμέτρου) και θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τελικά κάποιο ειδικό μοντέλο ροής για μικρά κανάλια.

4.3.1 Θεωρητικός Χάρτης Ροής

Αρχικά υπενθυμίζουμε ότι το μοντέλο δεν προβλέπει τη ροή με φυσαλίδες σε μικρές διαμέτρους.

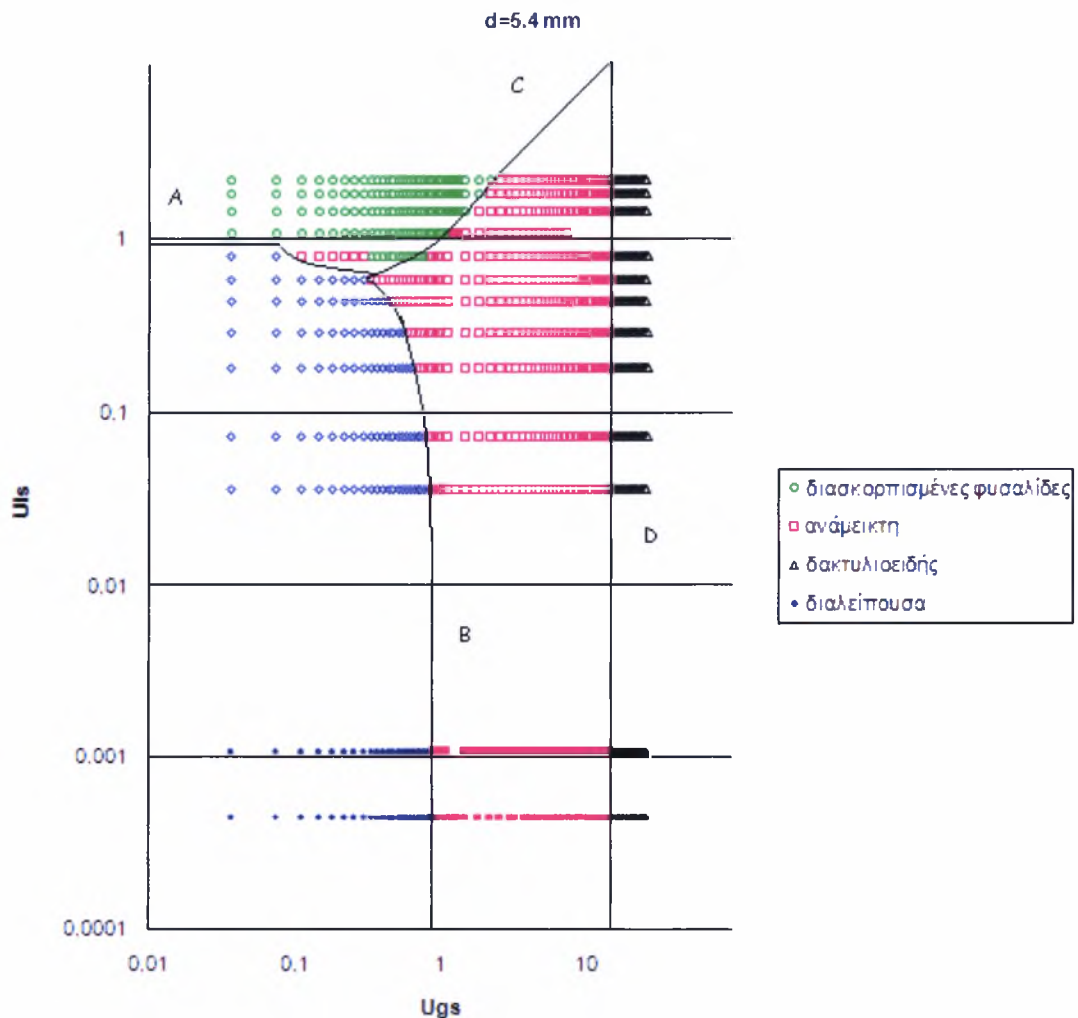
Για τη σχεδίαση του θεωρητικού χάρτη ροής χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σχέσεις:

- Για τη μετάβαση από τη διαλείπουσα στη ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.13) (καμπύλη A)
- Για τη μετάβαση από τη διαλείπουσα στην ανάμεικτη ροή χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.12) (καμπύλη B)

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

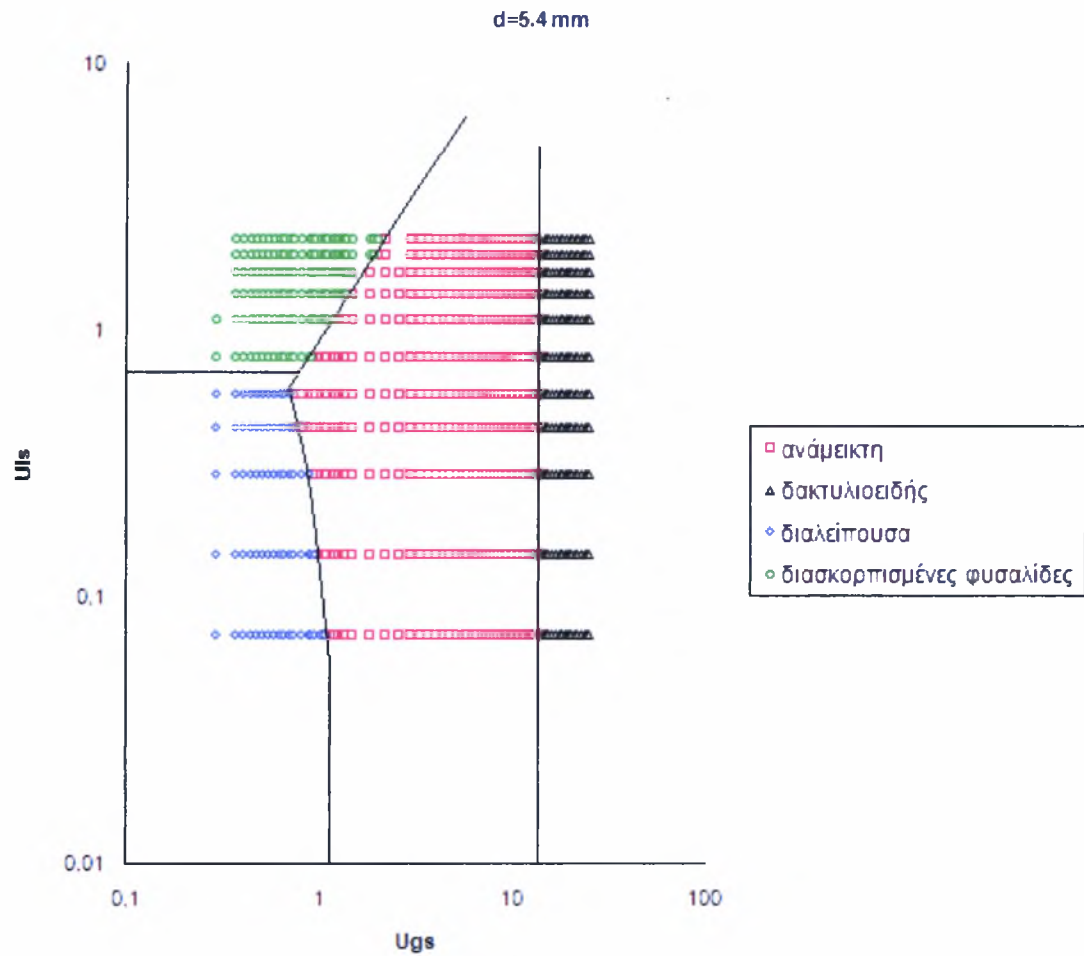
- Για τη μετάβαση από την ανάμεικτη στη δακτυλιοειδή ροή χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.18) (καμπύλη D)
- Τέλος, σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο ροής η μετάβαση από τη ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες στην ανάμεικτη ροή λαμβάνει χώρα όταν το κλάσμα κενού ξεπεράσει την τιμή 0.52.(σχέση 2.14) (καμπύλη C)

Στα δύο σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δύο χάρτες ροής:



Σχήμα 4.6 Χάρτης ροής σχεδιασμένος με βάση το μοντέλο ροής των Taitel et al.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου



Σχήμα 4.7 Χάρτης ροής σχεδιασμένος με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

4.3.2 Σύγκριση των Δύο Χαρτών

Αρχικά μπορούμε να δούμε ότι ο θεωρητικός χάρτης προβλέπει τη μετάβαση από τη διαλείπουσα στην ανάμεικτη ροή σε σχετικά χαμηλότερες παροχές αέρα. Ενδεικτικά για παροχή 100 mL/min νερού μετάβαση στην ανάμεικτη ροή έχουμε σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο σε παροχή αέρα 1150 mL/min ενώ σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα σε 1500 mL/min. Η απόκλιση σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης του 23% ενώ η μέγιστη για όλο το εύρος παροχών νερού προσεγγίζει το 45%.

Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τη μετάβαση από τη ροή με διασκορπισμένες φυσαλίδες στην ανάμεικτη ροή. Σε αυτήν την περίπτωση ωστόσο το θεωρητικό μοντέλο προβλέπει μεγαλύτερες παροχές αέρα. Η μέγιστη απόκλιση δεν ξεπερνάει το 20%.

Όσον αφορά τη μετάβαση στη δακτυλιοειδή ροή, οι πειραματικές παρατηρήσεις συμφωνούν με το θεωρητικό μοντέλο. Το μοντέλο δείχνει μετάβαση στη δακτυλιοειδή ροή όταν η ταχύτητα του αέρα ξεπεράσει τα 14.56 m/sec.

Τέλος, οι παρατηρήσεις μας έδειξαν ότι όταν η ταχύτητα του νερού ξεπερνούσε τα 0.73 m/sec συναντούσαμε από τη μικρότερη παροχή αέρα διασκορπισμένες φυσαλίδες. Σύμφωνα με το μοντέλο που μελετούμε η απαραίτητη ροή νερού για να συμβεί αυτό είναι περίπου 0.84 m/sec. Η απόκλιση σε αυτήν την περίπτωση δεν ξεπερνάει το 13%.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η μέση απόκλιση μεταξύ των δύο χαρτών είναι της τάξης του 25% με 30%. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι γενικά ανάμεσα στους δύο χάρτες υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Η παρούσα μελέτη της κατακόρυφης διφασικής ροής νερού-αέρα σε αγωγούς μικρής διαμέτρου είχε σαν σκοπό τη λεπτομερή παρατήρηση των προτύπων ροής και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο.

Για το λόγο αυτό κατασκευάσαμε την κατάλληλη πειραματική διάταξη χρησιμοποιώντας σωλήνα δοκιμών εσωτερικής διαμέτρου 5.4 mm. Κατασκευάσαμε ένα χάρτη ροής σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα και καταγράψαμε τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά όλων των προτύπων ροής που εμφανίστηκαν. Η ανίχνευση των διαφόρων προτύπων ροής έγινε με οπτική παρατήρηση με τη βοήθεια ψηφιακής κάμερας και υπολογιστή. Τέλος, έγινε σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με το μοντέλο των Taitel et al. (1980).

Τα κυριότερα συμπεράσματα που συνάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Έχει προαναφερθεί ότι η διεπιφάνεια υγρού-αερίου μπορεί να διαμορφωθεί κατά άπειρους τρόπους και να λάβει ένα πολύ μεγάλο αριθμό μορφών (προτύπων ροής). Η ασαφής ταξινόμηση τους έχει ως συνέπεια την καθημερινή δημοσίευση νέων ονομάτων προτύπων ροής. Στην παρούσα μελέτη προσπαθήσαμε να παρουσιάσουμε όλα τα πρότυπα ροής που έχουν δημοσιευθεί. Τα πρότυπα ροής που ανιχνεύθηκαν κατά τις πειραματικές παρατηρήσεις είναι τα εξής: διαλείπουσα ροή (slug flow), ήπια-διαλείπουσα ροή (plug flow), ροή με κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

διασκορπισμένες φυσαλίδες (dispersed bubble flow), ανάμεικτη ροή (churn flow) και δακτυλιοειδής ροή (annular flow)

- Για την κατασκευή του πειραματικού χάρτη ροής παρατηρήθηκαν περίπου 902 σημεία (δηλαδή 902 συνδυασμούς παροχών αέρα-νερού). Κατασκευάστηκε ένας θεωρητικός χάρτης σύμφωνα με το μοντέλο ροής των Taitel et al. και έγινε σύγκριση των δύο χαρτών. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία και η απόκλιση δεν ξεπερνά ποτέ το 45%. Επιπροσθέτως, μπορεί να λεχθεί ότι η παρούσα πειραματική διάταξη είναι σε θέση να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον, αφού ο χάρτης σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο δεν αποκλίνει σημαντικά από τον πειραματικό, η διάμετρος των 5.4 mm ίσως δεν θα πρέπει να θεωρείται μικρή στις συγκεκριμένες τουλάχιστον συνθήκες. Τέλος, το θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι σε θέση να δώσει σχετικά αξιόπιστες προβλέψεις για αγωγούς διαμέτρου μεγαλύτερης των 5 mm και ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- Έγινε προσπάθεια ώστε να γίνει λεπτομερής παρατήρηση και καταγραφή κάποιων λεπτομερειών που χαρακτηρίζουν τα πρότυπα ροής που εμφανίστηκαν στο σωλήνα δοκιμών. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 μια σειρά από φωτογραφίες που δείχνουν την εξέλιξη των διαφόρων φαινομένων. Παράλληλα έγινε μια προσπάθεια να καταγραφούν διάφορες χαρακτηριστικές παράμετροι των προτύπων ροής, όπως για παράδειγμα η εξάρτηση του μήκους της φυσαλίδας Taylor από την παροχή του αέρα.

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

Η διαφασική ροή σε αγωγούς μικρής διαμέτρου αποτελεί ακόμα παρθένο έδαφος για μελλοντικές έρευνες. Οι προτάσεις που γίνονται για μελλοντική εργασία είναι οι εξής:

- Έρευνα σε αγωγούς με διάμετρο μικρότερη των 3 mm. Εξέταση πιθανών νέων προτύπων ροής. Δημιουργία πειραματικών χαρτών, χαρτών σχεδιασμένων με βάση τα κλασικά μοντέλα για ροή σε κανονικούς αγωγούς και το μοντέλο που έχουμε παρουσιάσει στο δεύτερο κεφάλαιο για ροή σε αγωγούς μικρότερης διαμέτρου. Θα διαπιστώσουμε με αυτόν τον τρόπο αν η διάμετρος που θα εξετάσουμε μπορεί να θεωρηθεί ως «minichannel» και στην περίπτωση αυτή αν πράγματι το μοντέλο που παρουσιάσαμε μπορεί να μας δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση αυτού του μοντέλου προϋποθέτει τον προσδιορισμό κάποιων παραμέτρων που ίσως αποδειχθεί περίπλοκος
- Σχεδίαση χαρτών ροής με βάση τον αδιάστατο αριθμό We για τουλάχιστον δύο αγωγούς μικρής διαμέτρου. Ίσως διαπιστώσουμε έτσι αν ο αριθμός We είναι η κατάλληλη παράμετρος για την πρόβλεψη των μεταπτώσεων από το ένα καθεστώς στο άλλο σε minichannels
- Μελέτη της κεκλιμένης ροής σε αγωγούς μικρής διαμέτρου. Ισχύουν όσα ισχύουν σε κανονικές διαμέτρους; Για παράδειγμα περιορίζεται αισθητά η περιοχή της ανάμεικτης ροής και της ροής με διασκορπισμένες φυσαλίδες σε κλίσεις μικρότερες των 70°; Έχουμε για κλίση 50° μετάβαση από τη διαλείπουσα στη δακτυλιοειδή ροή;

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

- Έρευνα ενός νέου καθεστώτος ροής κύριο χαρακτηριστικό του οποίου θα είναι η ροή του υγρού προς τα πάνω σε μορφή κυματοειδούς φιλμ αλλά και σε μορφή υγρών μαζών με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε για ένα πολύ μεγάλο εύρος παροχών αέρα κατά τη μετάβαση από την ανάμεικτη στη δακτυλιοειδή ροή.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

- Akbar, M.K., Plummer, D.A., Ghiaasiaan, S.M., On gas–liquid two phase flow regimes in microchannels, *Int. J. Multiphase Flow* 29 855–865. (2003)
- Azzopardi, B.J., Gibbons, D.B. and Bott, T.R., Annular two phase flow in a large diameter tube. *Int. Conf. on Physical Modelling of Multiphase Flows*, Coventry, 1983
- Baker, O., Simultaneous flow of oil and gas. *Oil, Gas J.* Vol. 53, p 185, 1954.
- Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., Dukler, A.,E., Gas-liquid flow in inclined tubes: flow pattern transitions for upward flow, 1983
- Brauner, N., Moalem-Maron, D., Identification of the range of small diameter conduits, regarding two-phase flow pattern transitions, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 19 29–39 ,(1992)
- Brotz, W., Über die Vorausberechnung der Absorptionsgeschwindigkeit von Gasen in strömenden, Flüssigkeiten. *Chem. Engng Sci* 41, 159±163, 1954
- Chen, L., Tian, Y.S., Karayiannis, T.G., The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes, 2005
- Chen, X.,T., and Brill, J.,P., Slug to churn transition in upward vertical two-phase flow, Department of petroleum engineering, The University of Tulsa, Tulsa, U.S.A, 1997
- Collier, J.G., *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill, London. , 1981
- Costigan, G., and Whalley, P., B., Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows, Department of Engineering Science, University of oxford, U.K, 1996
- Harmathy, T.Z., Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent, *AICHE J.*, 6, 281 (1960)
- Hinze, J.O., Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes, *AICHE J.* 1, 289 (1955)
- Hsu, Y., and Graham, R., W., Transport processes in boiling and two-phase systems, 1986

κατακόρυφη διασπαστική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

- Jayanti, S., Hewitt, G.F., Prediction of the slug-to-churn flow transition in vertical two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow* 18, 847±860.,1992
- Kew, P.A., Cornwell, K., Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels, *Appl. Therm. Eng.* 17 (8–10), 705–715. (1997)
- Lazarek, G.M., and Black, S.H., “Evaporative Heat Transfer, Pressure Drop and Critical Heat Flux in a Small Diameter Vertical Tube with R-113.,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, No. 7, pp. 945-960. 1982
- McQuillan, K.W., Whalley, P.B., Flow patterns in vertical two-phase flow. *Int. J. Multiphase Flow* 11, 161±175., 1985
- Martinelli, R.C., and Nelson, D.B., “Prediction of Pressure Drop during Forced Convection Boiling of Water,” *ASME Transactions*, Vol. 70, 695-702.,1948
- Mishima, K., Hibiki, T., Some characteristics of air–water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase flow* 22 (4) 703–712. ,(1996)
- Mishima, K., Ishii, M., Flow regime transition criteria for upward twophase flow in vertical tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer* 27 (5) 723–737., (1984)
- Nan Da Hlaing, Sirivat, A., Siemanond, K., Wilkes, J., Vertical two-phase flow regimes and pressure gradients: Effect of viscosity, 2005
- Nicklin, D.J. and Davidson, J.F. the onset of instability in two-phase slug flow. Presented at a symposium on Two-phase flow, *Inst. Mech. Engrs.*, London, Paper No.4., (1962)
- Nicklin, D.J., Wilkes, J.O., Davidson, J.F., Two-phase flow in vertical tubes. *Trans. J. Chem. Engng* 40, 61±68.,1962
- Pickering, P., F., Hewitt, G., F., Watson, M., J., and Hale, C., P., The prediction of flows in production risers-truth&myth?, Department of chemical engineering @ chemical technology, imperial college of science, technology @ medicine, South Kensington, London, 2000
- Radovcich, N.A., Moises, R., The transition from two phase bubble to slug flow. MIT Report 7-7673-22., 1962

κατακόρυφη διαφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

- Sadatomi, Y., Sato, T., Saruwatari, S., Two-phase flow in vertical noncircular channels. Int. J. MultiphaseFlow 8, 641±655., 1982
- Taitel, Y., and Barnea, D., Modelling flow pattern transitions in two phase gas liquid flows, 1980
- Taitel, Y., Barnea, D., Dukler, A., E., Modelling Flow Pattern Transitions For Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes, 1980
- Turner, R.G., Hubbard, M.G., and Dukler, A.E., Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquid from gas wells, J. Petroleum Tech., 21, 1475, (1969)
- Wölk, G., Dreyer, M. and Rath, H.J., Flow patterns in small diameter vertical non-circular channels, 1999
- Wolverine, 2-phase flows
- Zhu, C., and Fan, L.-S., Principles of gas-solid flows, Cambridge series in chemical engineering, 1998

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι
ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	100	0,000	0,073	-
2	100	100	0,073	0,073	-
3	200	100	0,146	0,073	-
4	300	100	0,218	0,073	-
5	400	100	0,291	0,073	slug
6	500	100	0,364	0,073	slug
7	550	100	0,400	0,073	slug
8	600	100	0,437	0,073	slug
9	650	100	0,473	0,073	slug
10	700	100	0,510	0,073	slug
11	750	100	0,546	0,073	slug
12	800	100	0,582	0,073	slug
13	850	100	0,619	0,073	slug
14	900	100	0,655	0,073	slug
15	950	100	0,692	0,073	slug
16	1000	100	0,728	0,073	slug
17	1100	100	0,801	0,073	slug
18	1200	100	0,874	0,073	slug
19	1250	100	0,910	0,073	slug
20	1300	100	0,947	0,073	slug
21	1400	100	1,019	0,073	slug
22	1450	100	1,056	0,073	slug
23	1500	100	1,092	0,073	churn
24	1600	100	1,165	0,073	churn
25	1650	100	1,201	0,073	churn
26	1700	100	1,238	0,073	churn
27	1800	100	1,311	0,073	churn
28	1850	100	1,347	0,073	churn
29	1900	100	1,383	0,073	churn
30	2000	100	1,456	0,073	churn
31	2500	100	1,820	0,073	churn
32	3000	100	2,184	0,073	churn
33	3500	100	2,548	0,073	churn
34	4000	100	2,912	0,073	churn
35	4500	100	3,276	0,073	churn
36	5000	100	3,641	0,073	churn
37	5500	100	4,005	0,073	churn
38	6000	100	4,369	0,073	churn
39	6500	100	4,733	0,073	churn
40	7000	100	5,097	0,073	churn
41	7500	100	5,461	0,073	churn
42	8000	100	5,825	0,073	churn
43	8500	100	6,189	0,073	churn

κατακόρυφη διασπαστική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

44	9000	100	6,553	0,073	churn
45	9500	100	6,917	0,073	churn
46	10000	100	7,281	0,073	churn
47	10500	100	7,645	0,073	churn
48	11000	100	8,009	0,073	churn
49	11500	100	8,373	0,073	churn
50	12000	100	8,737	0,073	churn
51	12500	100	9,101	0,073	churn
52	13000	100	9,465	0,073	churn
53	13500	100	9,829	0,073	churn
54	14000	100	10,193	0,073	churn
55	14500	100	10,557	0,073	churn
56	15000	100	10,922	0,073	churn
57	15500	100	11,286	0,073	churn
58	16000	100	11,650	0,073	churn
59	16500	100	12,014	0,073	churn
60	17000	100	12,378	0,073	churn
61	17500	100	12,742	0,073	churn
62	18000	100	13,106	0,073	churn
63	18500	100	13,470	0,073	churn
64	19000	100	13,834	0,073	churn
65	19500	100	14,198	0,073	churn
66	20000	100	14,562	0,073	annular
67	20500	100	14,926	0,073	annular
68	21000	100	15,290	0,073	annular
69	22000	100	16,018	0,073	annular
70	23000	100	16,746	0,073	annular
71	24000	100	17,474	0,073	annular
72	24500	100	17,838	0,073	annular
73	25000	100	18,203	0,073	annular
74	26000	100	18,931	0,073	annular
75	26500	100	19,295	0,073	annular
76	27000	100	19,659	0,073	annular
77	28000	100	20,387	0,073	annular
78	29000	100	21,115	0,073	annular
79	30000	100	21,843	0,073	annular
80	31000	100	22,571	0,073	annular
81	32500	100	23,663	0,073	annular
82	33500	100	24,391	0,073	annular
83	34000	100	24,755	0,073	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	200	0,000	0,146	-
2	100	200	0,073	0,146	-
3	200	200	0,146	0,146	-
4	300	200	0,218	0,146	-
5	400	200	0,291	0,146	slug
6	500	200	0,364	0,146	slug
7	550	200	0,400	0,146	slug
8	600	200	0,437	0,146	slug
9	650	200	0,473	0,146	slug
10	700	200	0,510	0,146	slug
11	750	200	0,546	0,146	slug
12	800	200	0,582	0,146	slug
13	850	200	0,619	0,146	slug
14	900	200	0,655	0,146	slug
15	950	200	0,692	0,146	slug
16	1000	200	0,728	0,146	slug
17	1100	200	0,801	0,146	slug
18	1200	200	0,874	0,146	slug
19	1250	200	0,910	0,146	slug
20	1300	200	0,947	0,146	slug
21	1400	200	1,019	0,146	churn
22	1450	200	1,056	0,146	churn
23	1500	200	1,092	0,146	churn
24	1600	200	1,165	0,146	churn
25	1650	200	1,201	0,146	churn
26	1700	200	1,238	0,146	churn
27	1800	200	1,311	0,146	churn
28	1850	200	1,347	0,146	churn
29	1900	200	1,383	0,146	churn
30	2000	200	1,456	0,146	churn
31	2500	200	1,820	0,146	churn
32	3000	200	2,184	0,146	churn
33	3500	200	2,548	0,146	churn
34	4000	200	2,912	0,146	churn
35	4500	200	3,276	0,146	churn
36	5000	200	3,641	0,146	churn
37	5500	200	4,005	0,146	churn
38	6000	200	4,369	0,146	churn
39	6500	200	4,733	0,146	churn
40	7000	200	5,097	0,146	churn
41	7500	200	5,461	0,146	churn
42	8000	200	5,825	0,146	churn
43	8500	200	6,189	0,146	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

44	9000	200	6,553	0,146	churn
45	9500	200	6,917	0,146	churn
46	10000	200	7,281	0,146	churn
47	10500	200	7,645	0,146	churn
48	11000	200	8,009	0,146	churn
49	11500	200	8,373	0,146	churn
50	12000	200	8,737	0,146	churn
51	12500	200	9,101	0,146	churn
52	13000	200	9,465	0,146	churn
53	13500	200	9,829	0,146	churn
54	14000	200	10,193	0,146	churn
55	14500	200	10,557	0,146	churn
56	15000	200	10,922	0,146	churn
57	15500	200	11,286	0,146	churn
58	16000	200	11,650	0,146	churn
59	16500	200	12,014	0,146	churn
60	17000	200	12,378	0,146	churn
61	17500	200	12,742	0,146	churn
62	18000	200	13,106	0,146	churn
63	18500	200	13,470	0,146	churn
64	19000	200	13,834	0,146	churn
65	19500	200	14,198	0,146	churn
66	20000	200	14,562	0,146	annular
67	20500	200	14,926	0,146	annular
68	21000	200	15,290	0,146	annular
69	22000	200	16,018	0,146	annular
70	23000	200	16,746	0,146	annular
71	24000	200	17,474	0,146	annular
72	24500	200	17,838	0,146	annular
73	25000	200	18,203	0,146	annular
74	26000	200	18,931	0,146	annular
75	26500	200	19,295	0,146	annular
76	27000	200	19,659	0,146	annular
77	28000	200	20,387	0,146	annular
78	29000	200	21,115	0,146	annular
79	30000	200	21,843	0,146	annular
80	31000	200	22,571	0,146	annular
81	32500	200	23,663	0,146	annular
82	33500	200	24,391	0,146	annular
83	34000	200	24,755	0,146	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	400	0,000	0,291	-
2	100	400	0,073	0,291	-
3	200	400	0,146	0,291	-
4	300	400	0,218	0,291	-
5	400	400	0,291	0,291	slug
6	500	400	0,364	0,291	slug
7	550	400	0,400	0,291	slug
8	600	400	0,437	0,291	slug
9	650	400	0,473	0,291	slug
10	700	400	0,510	0,291	slug
11	750	400	0,546	0,291	slug
12	800	400	0,582	0,291	slug
13	850	400	0,619	0,291	slug
14	900	400	0,655	0,291	slug
15	950	400	0,692	0,291	slug
16	1000	400	0,728	0,291	slug
17	1100	400	0,801	0,291	slug
18	1200	400	0,874	0,291	slug
19	1250	400	0,910	0,291	churn
20	1300	400	0,947	0,291	churn
21	1400	400	1,019	0,291	churn
22	1450	400	1,056	0,291	churn
23	1500	400	1,092	0,291	churn
24	1600	400	1,165	0,291	churn
25	1650	400	1,201	0,291	churn
26	1700	400	1,238	0,291	churn
27	1800	400	1,311	0,291	churn
28	1850	400	1,347	0,291	churn
29	1900	400	1,383	0,291	churn
30	2000	400	1,456	0,291	churn
31	2500	400	1,820	0,291	churn
32	3000	400	2,184	0,291	churn
33	3500	400	2,548	0,291	churn
34	4000	400	2,912	0,291	churn
35	4500	400	3,276	0,291	churn
36	5000	400	3,641	0,291	churn
37	5500	400	4,005	0,291	churn
38	6000	400	4,369	0,291	churn
39	6500	400	4,733	0,291	churn
40	7000	400	5,097	0,291	churn
41	7500	400	5,461	0,291	churn
42	8000	400	5,825	0,291	churn
43	8500	400	6,189	0,291	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

44	9000	400	6,553	0,291	churn
45	9500	400	6,917	0,291	churn
46	10000	400	7,281	0,291	churn
47	10500	400	7,645	0,291	churn
48	11000	400	8,009	0,291	churn
49	11500	400	8,373	0,291	churn
50	12000	400	8,737	0,291	churn
51	12500	400	9,101	0,291	churn
52	13000	400	9,465	0,291	churn
53	13500	400	9,829	0,291	churn
54	14000	400	10,193	0,291	churn
55	14500	400	10,557	0,291	churn
56	15000	400	10,922	0,291	churn
57	15500	400	11,286	0,291	churn
58	16000	400	11,650	0,291	churn
59	16500	400	12,014	0,291	churn
60	17000	400	12,378	0,291	churn
61	17500	400	12,742	0,291	churn
62	18000	400	13,106	0,291	churn
63	18500	400	13,470	0,291	churn
64	19000	400	13,834	0,291	churn
65	19500	400	14,198	0,291	churn
66	20000	400	14,562	0,291	annular
67	20500	400	14,926	0,291	annular
68	21000	400	15,290	0,291	annular
69	22000	400	16,018	0,291	annular
70	23000	400	16,746	0,291	annular
71	24000	400	17,474	0,291	annular
72	24500	400	17,838	0,291	annular
73	25000	400	18,203	0,291	annular
74	26000	400	18,931	0,291	annular
75	26500	400	19,295	0,291	annular
76	27000	400	19,659	0,291	annular
77	28000	400	20,387	0,291	annular
78	29000	400	21,115	0,291	annular
79	30000	400	21,843	0,291	annular
80	31000	400	22,571	0,291	annular
81	32500	400	23,663	0,291	annular
82	33500	400	24,391	0,291	annular
83	34000	400	24,755	0,291	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	600	0,000	0,437	-
2	100	600	0,073	0,437	-
3	200	600	0,146	0,437	-
4	300	600	0,218	0,437	-
5	400	600	0,291	0,437	slug
6	500	600	0,364	0,437	slug
7	550	600	0,400	0,437	slug
8	600	600	0,437	0,437	slug
9	650	600	0,473	0,437	slug
10	700	600	0,510	0,437	slug
11	750	600	0,546	0,437	slug
12	800	600	0,582	0,437	slug
13	850	600	0,619	0,437	slug
14	900	600	0,655	0,437	slug
15	950	600	0,692	0,437	slug
16	1000	600	0,728	0,437	slug
17	1100	600	0,801	0,437	churn
18	1200	600	0,874	0,437	churn
19	1250	600	0,910	0,437	churn
20	1300	600	0,947	0,437	churn
21	1400	600	1,019	0,437	churn
22	1450	600	1,056	0,437	churn
23	1500	600	1,092	0,437	churn
24	1600	600	1,165	0,437	churn
25	1650	600	1,201	0,437	churn
26	1700	600	1,238	0,437	churn
27	1800	600	1,311	0,437	churn
28	1850	600	1,347	0,437	churn
29	1900	600	1,383	0,437	churn
30	2000	600	1,456	0,437	churn
31	2500	600	1,820	0,437	churn
32	3000	600	2,184	0,437	churn
33	3500	600	2,548	0,437	churn
34	4000	600	2,912	0,437	churn
35	4500	600	3,276	0,437	churn
36	5000	600	3,641	0,437	churn
37	5500	600	4,005	0,437	churn
38	6000	600	4,369	0,437	churn
39	6500	600	4,733	0,437	churn
40	7000	600	5,097	0,437	churn
41	7500	600	5,461	0,437	churn
42	8000	600	5,825	0,437	churn
43	8500	600	6,189	0,437	churn
44	9000	600	6,553	0,437	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

45	9500	600	6,917	0,437	churn
46	10000	600	7,281	0,437	churn
47	10500	600	7,645	0,437	churn
48	11000	600	8,009	0,437	churn
49	11500	600	8,373	0,437	churn
50	12000	600	8,737	0,437	churn
51	12500	600	9,101	0,437	churn
52	13000	600	9,465	0,437	churn
53	13500	600	9,829	0,437	churn
54	14000	600	10,193	0,437	churn
55	14500	600	10,557	0,437	churn
56	15000	600	10,922	0,437	churn
57	15500	600	11,286	0,437	churn
58	16000	600	11,650	0,437	churn
59	16500	600	12,014	0,437	churn
60	17000	600	12,378	0,437	churn
61	17500	600	12,742	0,437	churn
62	18000	600	13,106	0,437	churn
63	18500	600	13,470	0,437	churn
64	19000	600	13,834	0,437	churn
65	19500	600	14,198	0,437	churn
66	20000	600	14,562	0,437	annular
67	20500	600	14,926	0,437	annular
68	21000	600	15,290	0,437	annular
69	22000	600	16,018	0,437	annular
70	23000	600	16,746	0,437	annular
71	24000	600	17,474	0,437	annular
72	24500	600	17,838	0,437	annular
73	25000	600	18,203	0,437	annular
74	26000	600	18,931	0,437	annular
75	26500	600	19,295	0,437	annular
76	27000	600	19,659	0,437	annular
77	28000	600	20,387	0,437	annular
78	29000	600	21,115	0,437	annular
79	30000	600	21,843	0,437	annular
80	31000	600	22,571	0,437	annular
81	32500	600	23,663	0,437	annular
82	33500	600	24,391	0,437	annular
83	34000	600	24,755	0,437	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	800	0,000	0,582	-
2	100	800	0,073	0,582	-
3	200	800	0,146	0,582	-
4	300	800	0,218	0,582	-
5	400	800	0,291	0,582	slug
6	500	800	0,364	0,582	slug
7	550	800	0,400	0,582	slug
8	600	800	0,437	0,582	slug
9	650	800	0,473	0,582	slug
10	700	800	0,510	0,582	slug
11	750	800	0,546	0,582	slug
12	800	800	0,582	0,582	slug
13	850	800	0,619	0,582	slug
14	900	800	0,655	0,582	slug
15	950	800	0,692	0,582	slug
16	1000	800	0,728	0,582	churn
17	1100	800	0,801	0,582	churn
18	1200	800	0,874	0,582	churn
19	1250	800	0,910	0,582	churn
20	1300	800	0,947	0,582	churn
21	1400	800	1,019	0,582	churn
22	1450	800	1,056	0,582	churn
23	1500	800	1,092	0,582	churn
24	1600	800	1,165	0,582	churn
25	1650	800	1,201	0,582	churn
26	1700	800	1,238	0,582	churn
27	1800	800	1,311	0,582	churn
28	1850	800	1,347	0,582	churn
29	1900	800	1,383	0,582	churn
30	2000	800	1,456	0,582	churn
31	2500	800	1,820	0,582	churn
32	3000	800	2,184	0,582	churn
33	3500	800	2,548	0,582	churn
34	4000	800	2,912	0,582	churn
35	4500	800	3,276	0,582	churn
36	5000	800	3,641	0,582	churn
37	5500	800	4,005	0,582	churn
38	6000	800	4,369	0,582	churn
39	6500	800	4,733	0,582	churn
40	7000	800	5,097	0,582	churn
41	7500	800	5,461	0,582	churn
42	8000	800	5,825	0,582	churn
43	8500	800	6,189	0,582	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

44	9000	800	6,553	0,582	churn
45	9500	800	6,917	0,582	churn
46	10000	800	7,281	0,582	churn
47	10500	800	7,645	0,582	churn
48	11000	800	8,009	0,582	churn
49	11500	800	8,373	0,582	churn
50	12000	800	8,737	0,582	churn
51	12500	800	9,101	0,582	churn
52	13000	800	9,465	0,582	churn
53	13500	800	9,829	0,582	churn
54	14000	800	10,193	0,582	churn
55	14500	800	10,557	0,582	churn
56	15000	800	10,922	0,582	churn
57	15500	800	11,286	0,582	churn
58	16000	800	11,650	0,582	churn
59	16500	800	12,014	0,582	churn
60	17000	800	12,378	0,582	churn
61	17500	800	12,742	0,582	churn
62	18000	800	13,106	0,582	churn
63	18500	800	13,470	0,582	churn
64	19000	800	13,834	0,582	churn
65	19500	800	14,198	0,582	churn
66	20000	800	14,562	0,582	annular
67	20500	800	14,926	0,582	annular
68	21000	800	15,290	0,582	annular
69	22000	800	16,018	0,582	annular
70	23000	800	16,746	0,582	annular
71	24000	800	17,474	0,582	annular
72	24500	800	17,838	0,582	annular
73	25000	800	18,203	0,582	annular
74	26000	800	18,931	0,582	annular
75	26500	800	19,295	0,582	annular
76	27000	800	19,659	0,582	annular
77	28000	800	20,387	0,582	annular
78	29000	800	21,115	0,582	annular
79	30000	800	21,843	0,582	annular
80	31000	800	22,571	0,582	annular
81	32500	800	23,663	0,582	annular
82	33500	800	24,391	0,582	annular
83	34000	800	24,755	0,582	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	1100	0,000	0,801	-
2	100	1100	0,073	0,801	-
3	200	1100	0,146	0,801	-
4	300	1100	0,218	0,801	-
5	400	1100	0,291	0,801	dispersed bubble
6	500	1100	0,364	0,801	dispersed bubble
7	550	1100	0,400	0,801	dispersed bubble
8	600	1100	0,437	0,801	dispersed bubble
9	650	1100	0,473	0,801	dispersed bubble
10	700	1100	0,510	0,801	dispersed bubble
11	750	1100	0,546	0,801	dispersed bubble
12	800	1100	0,582	0,801	dispersed bubble
13	850	1100	0,619	0,801	dispersed bubble
14	900	1100	0,655	0,801	dispersed bubble
15	950	1100	0,692	0,801	dispersed bubble
16	1000	1100	0,728	0,801	dispersed bubble
17	1100	1100	0,801	0,801	dispersed bubble
18	1200	1100	0,874	0,801	dispersed bubble
19	1250	1100	0,910	0,801	dispersed bubble
20	1300	1100	0,947	0,801	churn
21	1400	1100	1,019	0,801	churn
22	1450	1100	1,056	0,801	churn
23	1500	1100	1,092	0,801	churn
24	1600	1100	1,165	0,801	churn
25	1650	1100	1,201	0,801	churn
26	1700	1100	1,238	0,801	churn
27	1800	1100	1,311	0,801	churn
28	1850	1100	1,347	0,801	churn
29	1900	1100	1,383	0,801	churn
30	2000	1100	1,456	0,801	churn
31	2500	1100	1,820	0,801	churn
32	3000	1100	2,184	0,801	churn
33	3500	1100	2,548	0,801	churn
34	4000	1100	2,912	0,801	churn
35	4500	1100	3,276	0,801	churn
36	5000	1100	3,641	0,801	churn
37	5500	1100	4,005	0,801	churn
38	6000	1100	4,369	0,801	churn
39	6500	1100	4,733	0,801	churn
40	7000	1100	5,097	0,801	churn
41	7500	1100	5,461	0,801	churn
42	8000	1100	5,825	0,801	churn
43	8500	1100	6,189	0,801	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

44	9000	1100	6,553	0,801	churn
45	9500	1100	6,917	0,801	churn
46	10000	1100	7,281	0,801	churn
47	10500	1100	7,645	0,801	churn
48	11000	1100	8,009	0,801	churn
49	11500	1100	8,373	0,801	churn
50	12000	1100	8,737	0,801	churn
51	12500	1100	9,101	0,801	churn
52	13000	1100	9,465	0,801	churn
53	13500	1100	9,829	0,801	churn
54	14000	1100	10,193	0,801	churn
55	14500	1100	10,557	0,801	churn
56	15000	1100	10,922	0,801	churn
57	15500	1100	11,286	0,801	churn
58	16000	1100	11,650	0,801	churn
59	16500	1100	12,014	0,801	churn
60	17000	1100	12,378	0,801	churn
61	17500	1100	12,742	0,801	churn
62	18000	1100	13,106	0,801	churn
63	18500	1100	13,470	0,801	churn
64	19000	1100	13,834	0,801	churn
65	19500	1100	14,198	0,801	churn
66	20000	1100	14,562	0,801	annular
67	20500	1100	14,926	0,801	annular
68	21000	1100	15,290	0,801	annular
69	22000	1100	16,018	0,801	annular
70	23000	1100	16,746	0,801	annular
71	24000	1100	17,474	0,801	annular
72	24500	1100	17,838	0,801	annular
73	25000	1100	18,203	0,801	annular
74	26000	1100	18,931	0,801	annular
75	26500	1100	19,295	0,801	annular
76	27000	1100	19,659	0,801	annular
77	28000	1100	20,387	0,801	annular
78	29000	1100	21,115	0,801	annular
79	30000	1100	21,843	0,801	annular
80	31000	1100	22,571	0,801	annular
81	32500	1100	23,663	0,801	annular
82	33500	1100	24,391	0,801	annular
83	34000	1100	24,755	0,801	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	1500	0,000	1,092	-
2	100	1500	0,073	1,092	-
3	200	1500	0,146	1,092	-
4	300	1500	0,218	1,092	-
5	400	1500	0,291	1,092	dispersed bubble
6	500	1500	0,364	1,092	dispersed bubble
7	550	1500	0,400	1,092	dispersed bubble
8	600	1500	0,437	1,092	dispersed bubble
9	650	1500	0,473	1,092	dispersed bubble
10	700	1500	0,510	1,092	dispersed bubble
11	750	1500	0,546	1,092	dispersed bubble
12	800	1500	0,582	1,092	dispersed bubble
13	850	1500	0,619	1,092	dispersed bubble
14	900	1500	0,655	1,092	dispersed bubble
15	950	1500	0,692	1,092	dispersed bubble
16	1000	1500	0,728	1,092	dispersed bubble
17	1100	1500	0,801	1,092	dispersed bubble
18	1200	1500	0,874	1,092	dispersed bubble
19	1250	1500	0,910	1,092	dispersed bubble
20	1300	1500	0,947	1,092	dispersed bubble
21	1400	1500	1,019	1,092	dispersed bubble
22	1450	1500	1,056	1,092	dispersed bubble
23	1500	1500	1,092	1,092	dispersed bubble
24	1600	1500	1,165	1,092	dispersed bubble
25	1650	1500	1,201	1,092	churn
26	1700	1500	1,238	1,092	churn
27	1800	1500	1,311	1,092	churn
28	1850	1500	1,347	1,092	churn
29	1900	1500	1,383	1,092	churn
30	2000	1500	1,456	1,092	churn
31	2500	1500	1,820	1,092	churn
32	3000	1500	2,184	1,092	churn
33	3500	1500	2,548	1,092	churn
34	4000	1500	2,912	1,092	churn
35	4500	1500	3,276	1,092	churn
36	5000	1500	3,641	1,092	churn
37	5500	1500	4,005	1,092	churn
38	6000	1500	4,369	1,092	churn
39	6500	1500	4,733	1,092	churn
40	7000	1500	5,097	1,092	churn
41	7500	1500	5,461	1,092	churn
42	8000	1500	5,825	1,092	churn
43	8500	1500	6,189	1,092	churn
44	9000	1500	6,553	1,092	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

45	9500	1500	6,917	1,092	churn
46	10000	1500	7,281	1,092	churn
47	10500	1500	7,645	1,092	churn
48	11000	1500	8,009	1,092	churn
49	11500	1500	8,373	1,092	churn
50	12000	1500	8,737	1,092	churn
51	12500	1500	9,101	1,092	churn
52	13000	1500	9,465	1,092	churn
53	13500	1500	9,829	1,092	churn
54	14000	1500	10,193	1,092	churn
55	14500	1500	10,557	1,092	churn
56	15000	1500	10,922	1,092	churn
57	15500	1500	11,286	1,092	churn
58	16000	1500	11,650	1,092	churn
59	16500	1500	12,014	1,092	churn
60	17000	1500	12,378	1,092	churn
61	17500	1500	12,742	1,092	churn
62	18000	1500	13,106	1,092	churn
63	18500	1500	13,470	1,092	churn
64	19000	1500	13,834	1,092	churn
65	19500	1500	14,198	1,092	churn
66	20000	1500	14,562	1,092	annular
67	20500	1500	14,926	1,092	annular
68	21000	1500	15,290	1,092	annular
69	22000	1500	16,018	1,092	annular
70	23000	1500	16,746	1,092	annular
71	24000	1500	17,474	1,092	annular
72	24500	1500	17,838	1,092	annular
73	25000	1500	18,203	1,092	annular
74	26000	1500	18,931	1,092	annular
75	26500	1500	19,295	1,092	annular
76	27000	1500	19,659	1,092	annular
77	28000	1500	20,387	1,092	annular
78	29000	1500	21,115	1,092	annular
79	30000	1500	21,843	1,092	annular
80	31000	1500	22,571	1,092	annular
81	32500	1500	23,663	1,092	annular
82	33500	1500	24,391	1,092	annular
83	34000	1500	24,755	1,092	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	1892,5	0,000	1,378	-
2	100	1892,5	0,073	1,378	-
3	200	1892,5	0,146	1,378	-
4	300	1892,5	0,218	1,378	-
5	400	1892,5	0,291	1,378	-
6	500	1892,5	0,364	1,378	dispersed bubble
7	550	1892,5	0,400	1,378	dispersed bubble
8	600	1892,5	0,437	1,378	dispersed bubble
9	650	1892,5	0,473	1,378	dispersed bubble
10	700	1892,5	0,510	1,378	dispersed bubble
11	750	1892,5	0,546	1,378	dispersed bubble
12	800	1892,5	0,582	1,378	dispersed bubble
13	850	1892,5	0,619	1,378	dispersed bubble
14	900	1892,5	0,655	1,378	dispersed bubble
15	950	1892,5	0,692	1,378	dispersed bubble
16	1000	1892,5	0,728	1,378	dispersed bubble
17	1100	1892,5	0,801	1,378	dispersed bubble
18	1200	1892,5	0,874	1,378	dispersed bubble
19	1250	1892,5	0,910	1,378	dispersed bubble
20	1300	1892,5	0,947	1,378	dispersed bubble
21	1400	1892,5	1,019	1,378	dispersed bubble
22	1450	1892,5	1,056	1,378	dispersed bubble
23	1500	1892,5	1,092	1,378	dispersed bubble
24	1600	1892,5	1,165	1,378	dispersed bubble
25	1650	1892,5	1,201	1,378	dispersed bubble
26	1700	1892,5	1,238	1,378	dispersed bubble
27	1800	1892,5	1,311	1,378	dispersed bubble
28	1850	1892,5	1,347	1,378	dispersed bubble
29	1900	1892,5	1,383	1,378	dispersed bubble
30	2000	1892,5	1,456	1,378	churn
31	2500	1892,5	1,820	1,378	churn
32	3000	1892,5	2,184	1,378	churn
33	3500	1892,5	2,548	1,378	churn
34	4000	1892,5	2,912	1,378	churn
35	4500	1892,5	3,276	1,378	churn
36	5000	1892,5	3,641	1,378	churn
37	5500	1892,5	4,005	1,378	churn
38	6000	1892,5	4,369	1,378	churn
39	6500	1892,5	4,733	1,378	churn
40	7000	1892,5	5,097	1,378	churn
41	7500	1892,5	5,461	1,378	churn
42	8000	1892,5	5,825	1,378	churn
43	8500	1892,5	6,189	1,378	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

44	9000	1892,5	6,553	1,378	churn
45	9500	1892,5	6,917	1,378	churn
46	10000	1892,5	7,281	1,378	churn
47	10500	1892,5	7,645	1,378	churn
48	11000	1892,5	8,009	1,378	churn
49	11500	1892,5	8,373	1,378	churn
50	12000	1892,5	8,737	1,378	churn
51	12500	1892,5	9,101	1,378	churn
52	13000	1892,5	9,465	1,378	churn
53	13500	1892,5	9,829	1,378	churn
54	14000	1892,5	10,193	1,378	churn
55	14500	1892,5	10,557	1,378	churn
56	15000	1892,5	10,922	1,378	churn
57	15500	1892,5	11,286	1,378	churn
58	16000	1892,5	11,650	1,378	churn
59	16500	1892,5	12,014	1,378	churn
60	17000	1892,5	12,378	1,378	churn
61	17500	1892,5	12,742	1,378	churn
62	18000	1892,5	13,106	1,378	churn
63	18500	1892,5	13,470	1,378	churn
64	19000	1892,5	13,834	1,378	churn
65	19500	1892,5	14,198	1,378	churn
66	20000	1892,5	14,562	1,378	annular
67	20500	1892,5	14,926	1,378	annular
68	21000	1892,5	15,290	1,378	annular
69	22000	1892,5	16,018	1,378	annular
70	23000	1892,5	16,746	1,378	annular
71	24000	1892,5	17,474	1,378	annular
72	24500	1892,5	17,838	1,378	annular
73	25000	1892,5	18,203	1,378	annular
74	26000	1892,5	18,931	1,378	annular
75	26500	1892,5	19,295	1,378	annular
76	27000	1892,5	19,659	1,378	annular
77	28000	1892,5	20,387	1,378	annular
78	29000	1892,5	21,115	1,378	annular
79	30000	1892,5	21,843	1,378	annular
80	31000	1892,5	22,571	1,378	annular
81	32500	1892,5	23,663	1,378	annular
82	33500	1892,5	24,391	1,378	annular
83	34000	1892,5	24,755	1,378	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	2271	0,000	1,654	-
2	100	2271	0,073	1,654	-
3	200	2271	0,146	1,654	-
4	300	2271	0,218	1,654	-
5	400	2271	0,291	1,654	-
6	500	2271	0,364	1,654	dispersed bubble
7	550	2271	0,400	1,654	dispersed bubble
8	600	2271	0,437	1,654	dispersed bubble
9	650	2271	0,473	1,654	dispersed bubble
10	700	2271	0,510	1,654	dispersed bubble
11	750	2271	0,546	1,654	dispersed bubble
12	800	2271	0,582	1,654	dispersed bubble
13	850	2271	0,619	1,654	dispersed bubble
14	900	2271	0,655	1,654	dispersed bubble
15	950	2271	0,692	1,654	dispersed bubble
16	1000	2271	0,728	1,654	dispersed bubble
17	1100	2271	0,801	1,654	dispersed bubble
18	1200	2271	0,874	1,654	dispersed bubble
19	1250	2271	0,910	1,654	dispersed bubble
20	1300	2271	0,947	1,654	dispersed bubble
21	1400	2271	1,019	1,654	dispersed bubble
22	1450	2271	1,056	1,654	dispersed bubble
23	1500	2271	1,092	1,654	dispersed bubble
24	1600	2271	1,165	1,654	dispersed bubble
25	1650	2271	1,201	1,654	dispersed bubble
26	1700	2271	1,238	1,654	dispersed bubble
27	1800	2271	1,311	1,654	dispersed bubble
28	1850	2271	1,347	1,654	dispersed bubble
29	1900	2271	1,383	1,654	dispersed bubble
30	2000	2271	1,456	1,654	dispersed bubble
31	2500	2271	1,820	1,654	churn
32	3000	2271	2,184	1,654	churn
33	3500	2271	2,548	1,654	churn
34	4000	2271	2,912	1,654	churn
35	4500	2271	3,276	1,654	churn
36	5000	2271	3,641	1,654	churn
37	5500	2271	4,005	1,654	churn
38	6000	2271	4,369	1,654	churn
39	6500	2271	4,733	1,654	churn
40	7000	2271	5,097	1,654	churn
41	7500	2271	5,461	1,654	churn
42	8000	2271	5,825	1,654	churn
43	8500	2271	6,189	1,654	churn
44	9000	2271	6,553	1,654	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

45	9500	2271	6,917	1,654	churn
46	10000	2271	7,281	1,654	churn
47	10500	2271	7,645	1,654	churn
48	11000	2271	8,009	1,654	churn
49	11500	2271	8,373	1,654	churn
50	12000	2271	8,737	1,654	churn
51	12500	2271	9,101	1,654	churn
52	13000	2271	9,465	1,654	churn
53	13500	2271	9,829	1,654	churn
54	14000	2271	10,193	1,654	churn
55	14500	2271	10,557	1,654	churn
56	15000	2271	10,922	1,654	churn
57	15500	2271	11,286	1,654	churn
58	16000	2271	11,650	1,654	churn
59	16500	2271	12,014	1,654	churn
60	17000	2271	12,378	1,654	churn
61	17500	2271	12,742	1,654	churn
62	18000	2271	13,106	1,654	churn
63	18500	2271	13,470	1,654	churn
64	19000	2271	13,834	1,654	churn
65	19500	2271	14,198	1,654	churn
66	20000	2271	14,562	1,654	annular
67	20500	2271	14,926	1,654	annular
68	21000	2271	15,290	1,654	annular
69	22000	2271	16,018	1,654	annular
70	23000	2271	16,746	1,654	annular
71	24000	2271	17,474	1,654	annular
72	24500	2271	17,838	1,654	annular
73	25000	2271	18,203	1,654	annular
74	26000	2271	18,931	1,654	annular
75	26500	2271	19,295	1,654	annular
76	27000	2271	19,659	1,654	annular
77	28000	2271	20,387	1,654	annular
78	29000	2271	21,115	1,654	annular
79	30000	2271	21,843	1,654	annular
80	31000	2271	22,571	1,654	annular
81	32500	2271	23,663	1,654	annular
82	33500	2271	24,391	1,654	annular
83	34000	2271	24,755	1,654	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	2649	0,000	1,929	-
2	100	2649	0,073	1,929	-
3	200	2649	0,146	1,929	-
4	300	2649	0,218	1,929	-
5	400	2649	0,291	1,929	-
6	500	2649	0,364	1,929	dispersed bubble
7	550	2649	0,400	1,929	dispersed bubble
8	600	2649	0,437	1,929	dispersed bubble
9	650	2649	0,473	1,929	dispersed bubble
10	700	2649	0,510	1,929	dispersed bubble
11	750	2649	0,546	1,929	dispersed bubble
12	800	2649	0,582	1,929	dispersed bubble
13	850	2649	0,619	1,929	dispersed bubble
14	900	2649	0,655	1,929	dispersed bubble
15	950	2649	0,692	1,929	dispersed bubble
16	1000	2649	0,728	1,929	dispersed bubble
17	1100	2649	0,801	1,929	dispersed bubble
18	1200	2649	0,874	1,929	dispersed bubble
19	1250	2649	0,910	1,929	dispersed bubble
20	1300	2649	0,947	1,929	dispersed bubble
21	1400	2649	1,019	1,929	dispersed bubble
22	1450	2649	1,056	1,929	dispersed bubble
23	1500	2649	1,092	1,929	dispersed bubble
24	1600	2649	1,165	1,929	dispersed bubble
25	1650	2649	1,201	1,929	dispersed bubble
26	1700	2649	1,238	1,929	dispersed bubble
27	1800	2649	1,311	1,929	dispersed bubble
28	1850	2649	1,347	1,929	dispersed bubble
29	1900	2649	1,383	1,929	dispersed bubble
30	2000	2649	1,456	1,929	dispersed bubble
31	2500	2649	1,820	1,929	dispersed bubble
32	2600	2649	1,893	1,929	dispersed bubble
33	2700	2649	1,966	1,929	churn
34	2800	2649	2,039	1,929	churn
35	3000	2649	2,184	1,929	churn
36	4000	2649	2,912	1,929	churn
37	4500	2649	3,276	1,929	churn
38	5000	2649	3,641	1,929	churn
39	5500	2649	4,005	1,929	churn
40	6000	2649	4,369	1,929	churn
41	6500	2649	4,733	1,929	churn
42	7000	2649	5,097	1,929	churn
43	7500	2649	5,461	1,929	churn
44	8000	2649	5,825	1,929	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

45	8500	2649	6,189	1,929	churn
46	9000	2649	6,553	1,929	churn
47	9500	2649	6,917	1,929	churn
48	10000	2649	7,281	1,929	churn
49	10500	2649	7,645	1,929	churn
50	11000	2649	8,009	1,929	churn
51	11500	2649	8,373	1,929	churn
52	12000	2649	8,737	1,929	churn
53	12500	2649	9,101	1,929	churn
54	13000	2649	9,465	1,929	churn
55	13500	2649	9,829	1,929	churn
56	14000	2649	10,193	1,929	churn
57	14500	2649	10,557	1,929	churn
58	15000	2649	10,922	1,929	churn
59	15500	2649	11,286	1,929	churn
60	16000	2649	11,650	1,929	churn
61	16500	2649	12,014	1,929	churn
62	17000	2649	12,378	1,929	churn
63	17500	2649	12,742	1,929	churn
64	18000	2649	13,106	1,929	churn
65	18500	2649	13,470	1,929	churn
66	19000	2649	13,834	1,929	churn
67	19500	2649	14,198	1,929	churn
68	20000	2649	14,562	1,929	annular
69	20500	2649	14,926	1,929	annular
70	21000	2649	15,290	1,929	annular
71	22000	2649	16,018	1,929	annular
72	23000	2649	16,746	1,929	annular
73	24000	2649	17,474	1,929	annular
74	25000	2649	18,203	1,929	annular
75	26000	2649	18,931	1,929	annular
76	27000	2649	19,659	1,929	annular
77	28000	2649	20,387	1,929	annular
78	29000	2649	21,115	1,929	annular
79	30000	2649	21,843	1,929	annular
80	31000	2649	22,571	1,929	annular
81	32000	2649	23,299	1,929	annular
82	33000	2649	24,027	1,929	annular
83	34000	2649	24,755	1,929	annular

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

	παροχή αέρα	παροχή νερού	φαινομενική ταχύτητα αέρα	φαινομενική ταχύτητα νερού	
A./A.	Qg (ml/min)	Ql (ml/min)	Ugs (m/sec)	Uls (m/sec)	πρότυπο ροής
1	0	3028	0,000	2,205	-
2	100	3028	0,073	2,205	-
3	200	3028	0,146	2,205	-
4	300	3028	0,218	2,205	-
5	400	3028	0,291	2,205	-
6	500	3028	0,364	2,205	dispersed bubble
7	550	3028	0,400	2,205	dispersed bubble
8	600	3028	0,437	2,205	dispersed bubble
9	650	3028	0,473	2,205	dispersed bubble
10	700	3028	0,510	2,205	dispersed bubble
11	750	3028	0,546	2,205	dispersed bubble
12	800	3028	0,582	2,205	dispersed bubble
13	850	3028	0,619	2,205	dispersed bubble
14	900	3028	0,655	2,205	dispersed bubble
15	950	3028	0,692	2,205	dispersed bubble
16	1000	3028	0,728	2,205	dispersed bubble
17	1100	3028	0,801	2,205	dispersed bubble
18	1200	3028	0,874	2,205	dispersed bubble
19	1250	3028	0,910	2,205	dispersed bubble
20	1300	3028	0,947	2,205	dispersed bubble
21	1400	3028	1,019	2,205	dispersed bubble
22	1450	3028	1,056	2,205	dispersed bubble
23	1500	3028	1,092	2,205	dispersed bubble
24	1600	3028	1,165	2,205	dispersed bubble
25	1650	3028	1,201	2,205	dispersed bubble
26	1700	3028	1,238	2,205	dispersed bubble
27	1800	3028	1,311	2,205	dispersed bubble
28	1850	3028	1,347	2,205	dispersed bubble
29	1900	3028	1,383	2,205	dispersed bubble
30	2000	3028	1,456	2,205	dispersed bubble
31	2500	3028	1,820	2,205	dispersed bubble
32	2600	3028	1,893	2,205	dispersed bubble
33	2700	3028	1,966	2,205	dispersed bubble
34	2800	3028	2,039	2,205	churn
35	3000	3028	2,184	2,205	churn
36	4000	3028	2,912	2,205	churn
37	4500	3028	3,276	2,205	churn
38	5000	3028	3,641	2,205	churn
39	5500	3028	4,005	2,205	churn
40	6000	3028	4,369	2,205	churn
41	6500	3028	4,733	2,205	churn
42	7000	3028	5,097	2,205	churn
43	7500	3028	5,461	2,205	churn
44	8000	3028	5,825	2,205	churn

κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

45	8500	3028	6,189	2,205	churn
46	9000	3028	6,553	2,205	churn
47	9500	3028	6,917	2,205	churn
48	10000	3028	7,281	2,205	churn
49	10500	3028	7,645	2,205	churn
50	11000	3028	8,009	2,205	churn
51	11500	3028	8,373	2,205	churn
52	12000	3028	8,737	2,205	churn
53	12500	3028	9,101	2,205	churn
54	13000	3028	9,465	2,205	churn
55	13500	3028	9,829	2,205	churn
56	14000	3028	10,193	2,205	churn
57	14500	3028	10,557	2,205	churn
58	15000	3028	10,922	2,205	churn
59	15500	3028	11,286	2,205	churn
60	16000	3028	11,650	2,205	churn
61	16500	3028	12,014	2,205	churn
62	17000	3028	12,378	2,205	churn
63	17500	3028	12,742	2,205	churn
64	18000	3028	13,106	2,205	churn
65	18500	3028	13,470	2,205	churn
66	19000	3028	13,834	2,205	churn
67	19500	3028	14,198	2,205	churn
68	20000	3028	14,562	2,205	annular
69	20500	3028	14,926	2,205	annular
70	21000	3028	15,290	2,205	annular
71	22000	3028	16,018	2,205	annular
72	23000	3028	16,746	2,205	annular
73	24000	3028	17,474	2,205	annular
74	25000	3028	18,203	2,205	annular
75	26000	3028	18,931	2,205	annular
76	27000	3028	19,659	2,205	annular
77	28000	3028	20,387	2,205	annular
78	29000	3028	21,115	2,205	annular
79	30000	3028	21,843	2,205	annular
80	31000	3028	22,571	2,205	annular
81	32000	3028	23,299	2,205	annular
82	33000	3028	24,027	2,205	annular
83	34000	3028	24,755	2,205	annular



κατακόρυφη διφασική ροή σε κυλινδρικούς αγωγούς μικρής διαμέτρου

