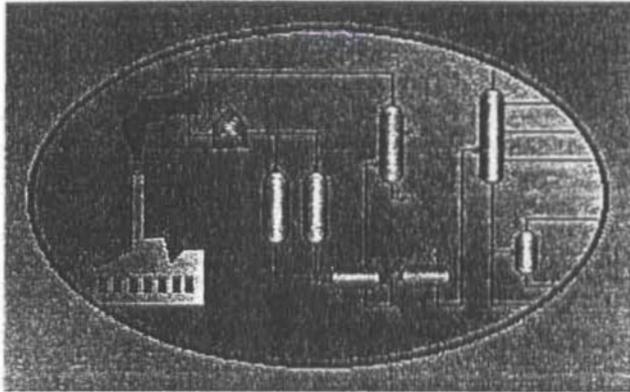


**1ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ  
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**



**ΠΑΤΡΑ 29-31 ΜΑΪΟΥ**

**ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΤΕΣ**

Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών

Τμήμα Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Πανελλήνιος Σύλλογος Χημικών Μηχανικών

ΕΙΧΗΜΥΘ/ΠΤΕ

ΕΠΤΧΗΔ/ΠΤΕ

**ΧΟΡΗΓΟΙ**

Επιτροπή Ερευνών Α.Π.Θ.

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΕΙΧΗΜΥΘ/ΠΤΕ

ΕΠΤΧΗΔ/ΠΤΕ

Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων Α.Ε.

Ελληνικά Διυλιστήρια Ασπροπύργου

ΛΑΥΡΗΑΡΜ S.A.

ΤΙΤΑΝ Α.Ε.

# ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΓΩΓΟ

Ν.Α. Βλάχος, Σ.Β. Παράς και Α.Ι. Καράμπελας

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Παν. Θερ. 455,  
54006 Θεσσαλονίκη, και Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών

## Περίληψη

Αντικείμενο μελέτης είναι η διαχωρισμένη διφασική ροή αερίου/υγρού με εκνέφωση (stratified/atomization). Μετρήθηκαν βασικά ρευστοδυναμικά χαρακτηριστικά όπως περιφερειακές κατανομές του πάχους της υγρής στοιβάδας και της διατμητικής τάσης υγρού/τοιχώματος αγωγού, καθώς και η κατανομή της αξονικής ταχύτητας στην αέρια φάση. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο οριζόντια πειραματικά συστήματα ροής με αγωγούς εσ. διαμέτρου 50.8 και 24mm. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των παραπάνω πειραματικών δεδομένων επιτρέπουν τη λεπτομερέστερη κατανόηση της ροής. Οπτικές παρατηρήσεις της διεπιφάνειας αερίου/υγρού επιβεβαιώνουν ότι η μορφή της είναι κοίλη και αποκλίνει σημαντικά από το επίπεδο σχήμα, το οποίο συνήθως υποτίθεται στη βιβλιογραφία. Ένα σημαντικό νέο αποτέλεσμα είναι ότι η μέση τιμή της διατμητικής τάσης υγρού/τοιχώματος μειώνεται στην περιφερειακή κατεύθυνση, κατά μήκος της οποίας μειώνεται σταδιακά και το πάχος της υγρής στοιβάδας. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, προσδιορίζεται ο συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας αερίου/υγρού, για τον οποίο προτείνεται ένας εμπειρικός συσχετισμός. Τέλος αναπτύσσεται ένα σχετικά απλό μονοδιάστατο μοντέλο πρόβλεψης της πτώσης πίεσης, της συγκράτησης υγρού και της μέσης τιμής της διατμητικής τάσης στο τμήμα της περιφέρειας του αγωγού που διαβρέχεται από τη συνεχή υγρή φάση.

## Εισαγωγή

Η διαχωρισμένη ροή αερίου/υγρού με εκνέφωση εμφανίζεται σε ενδιάμεσες παροχές αερίου, μεταξύ "ομαλής διαχωρισμένης" και "δακτυλιοειδούς" ροής. Βασικά χαρακτηριστικά της, όπως ο συμπαρασυρισμός μέρους του υγρού στην αέρια φάση με μορφή σταγονιδίων και η κυματοειδής υγρή στοιβάδα στον πυθμένα του αγωγού, χαρακτηρίζουν και τις δύο γειτονικές περιοχές ροής. Το πρότυπο αυτό ροής, παρουσιάζει όχι μόνο πρακτικό ενδιαφέρον αλλά προσφέρεται και για διακρίβωση των μηχανισμών που διέπουν την περιπλοκότερη δακτυλιοειδή ροή.

Η διαχωρισμένη ροή, ιδιαίτερα για μικρή πάχη υγρής στοιβάδας, δεν έχει μελετηθεί επαρκώς, και μοντέλα για την προσομοίωσή της παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα [4]. Ένα από αυτά είναι ότι η διατμητική τάση υγρού/τοιχώματος θεωρείται αμετάβλητη περιφερειακά ([12], [6]). Επίσης η ροή της κάθε φάσης περιγράφεται συνήθως από τις αντίστοιχες μέσες τιμές ταχύτητας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της διεπιφάνειας αερίου/υγρού στη διαμόρφωση των πεδίων ροής. Στις μέχρι τώρα υπολογιστικές προσπάθειες, η μορφή της διεπιφάνειας θεωρείται επίπεδη και όχι κοίλη ([1], [9]), όπως συμβαίνει ιδιαίτερα σε αγωγούς μικρής διαμέτρου και για υγρά μικρού ξώδους. Στην παρούσα εργασία, με βάση λεπτομερείς μετρήσεις, επιδιώκεται άρση των παραπάνω απλοποιητικών παραδοχών και μια πιο ρεαλιστική περιγραφή της ροής.

## Περιγραφή πειραματικών συστημάτων και μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο οριζόντια συστήματα διφασικής ροής με αγωγούς εσ. διαμέτρου 50.8 και 24mm, κοντά σε ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης και στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος [5].

Στο πειραματικό σύστημα με αγωγό των 50.8mm μετρήθηκαν το πάχος υγρής στοιβάδας και η διατμητική τάση υγρού/τοιχώματος αγωγού (στις  $0^\circ$  και  $45^\circ$ ), η πτώση πίεσης και η κατανομή της αξονικής ταχύτητας στην αέρια φάση. Η ροή αναπτύσσεται σε ένα οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα μήκους 16m, για πλήρη διαμόρφωση. Το διφασικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αέρας/νερό.

Στο πειραματικό σύστημα με οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 24mm έγιναν κυρίως μετρήσεις (με ειδική ηλεκτρο-



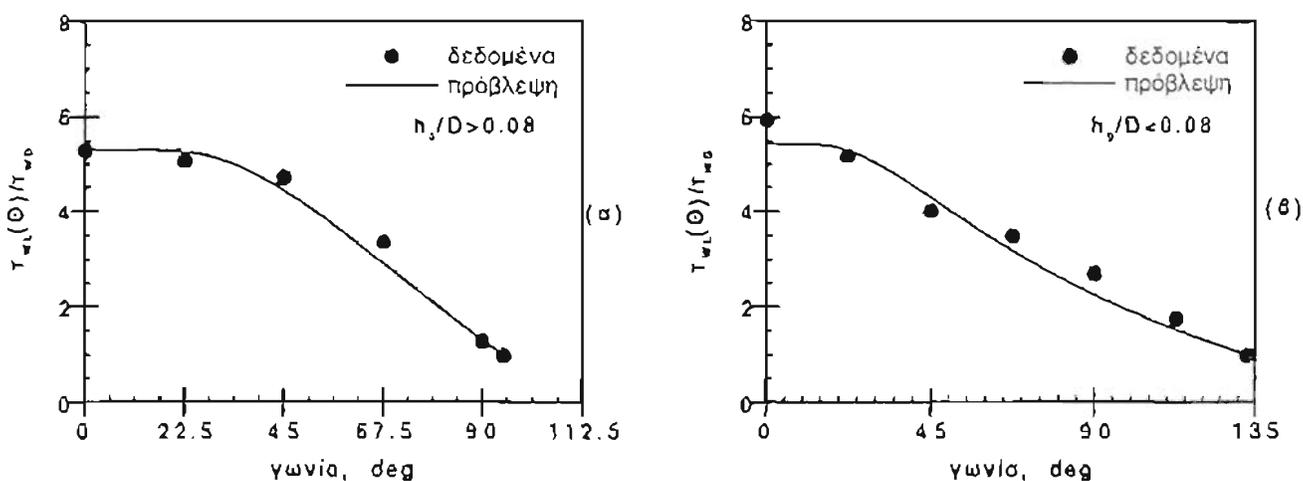
οποίες φτάνει η λεπτή υγρή στοιβάδα, μεγάλα διεπιφανειακά κύματα. Για στοιβάδες υγρού με σχετικά μεγαλύτερο πάχος ( $h_0/D > 0.08$ ), η μέση τιμή της διατμητικής τάσης διατηρείται περίπου σταθερή για  $\theta = 0^\circ$  μέχρι  $45^\circ$ , ενώ μειώνεται πέρα από αυτή την περιοχή. Η ύπαρξη επαρκούς πάχους υγρής στοιβάδας με μεγάλα διεπιφανειακά κύματα μέχρι περίπου τις  $45^\circ$ , αιτιολογεί τη διατήρηση μιας σχετικά σταθερής και υψηλής τιμής διάτμησης. Πάνω από  $45^\circ$  η διατμητική τάση μειώνεται καθώς μειώνεται σημαντικά το πάχος του υγρού. Η σχέση εξάρτησης μεταξύ του πάχους υγρής στοιβάδας και της διατμητικής τάσης διαπιστώθηκε και από τους Paras et al [10], μέσω των κατανομών πυκνότητας πιθανότητας των δύο αυτών μεγεθών, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους.

Αξιοποιώντας τις μετρήσεις της διατμητικής τάσης υγρού/τοιχώματος σε διάφορες θέσεις στην περιφέρεια του αγωγού των 24mm, προτείνεται η ακόλουθη εκθετική σχέση, η οποία εκφράζει την περιφερειακή κατανομή της  $\tau_{wL}(\theta)$  που περιγράφεται παραπάνω:

$$\frac{\tau_{wL}(\theta)}{\tau_{wG}} = 1 + \left( \frac{\tau_{wL0}}{\tau_{wG}} - 1 \right) \left\{ 1 - \exp\left(-m \frac{\theta - \Theta}{\Theta}\right) \right\} \quad (1)$$

όπου  $\tau_{wL0}$  η διατμητική τάση υγρού/τοιχώματος στον πυθμένα του αγωγού,  $\theta$  η γωνία μέχρι την οποία το τοίχωμα του αγωγού διαβρέχεται από τη συνεχή υγρή φάση (Σχήμα 1),  $m$  μία παράμετρος προσαρμογής που εξαρτάται από τις ταχύτητες των δύο φάσεων [5] και  $\tau_{wG}$  η διατμητική τάση αερίου/τοιχώματος (ορίζεται από την εξ. 4). Η διατμητική τάση  $\tau_{wG}$  θεωρείται ότι είναι σταθερή σε ολόκληρη την περίμετρο του αγωγού που έρχεται σε επαφή με την αέρια φάση (PG) και ίση με την τιμή της διατμητικής τάσης υγρού/τοιχώματος στη γωνία  $\theta$ .

Στο Σχήμα 2 φαίνεται η περιφερειακή κατανομή του  $\tau_{wL}(\theta)$  αδιαστατοποιημένου με το  $\tau_{wG}$ , για πείραμα με: (α)  $h_0/D > 0.08$ , όπου η διατμητική τάση διατηρείται σταθερή μέχρι περίπου τις  $45^\circ$  και (β)  $h_0/D < 0.08$ , όπου η τάση μειώνεται σταδιακά μακριά από τον πυθμένα του αγωγού. Οι γραμμές του σχήματος βασίζονται στην εξ. (1).



Σχήμα 2. Περιφερειακή κατανομή της  $\tau_{wL}(\theta)$  αδιαστατοποιημένης με την  $\tau_{wG}$ , για πείραμα με: (α)  $h_0/D > 0.08$  και (β)  $h_0/D < 0.08$ .

Προσδιορισμός διεπιφανειακού συντελεστή τριβής: Για τη διαχωρισμένη διφασική ροή με εκνέφωση ο διεπιφανειακός συντελεστής τριβής,  $f_i$ , προσδιορίζεται μέσω μιας υπολογιστικής διαδικασίας που περιλαμβάνει την ταυτόχρονη επίλυση των μονοδιάστατων ισοζυγίων ορμής για την υγρή και την αέρια φάση:

$$-A_L \left( \frac{dP}{dx} \right) - \tau_{wL} P_L + \tau_i S_i = 0 \quad (2)$$

$$-A_G \left( \frac{dP}{dx} \right) - \tau_{wG} P_G - \tau_i S_i = 0 \quad (3)$$

όπου  $A$  η επιφάνεια κάθε φάσης,  $P$  το τμήμα της περιμέτρου του αγωγού που είναι σε επαφή με κάθε φάση,  $S_i$  το μήκος της διεπιφάνειας αερίου/υγρού,  $\tau_w$  η διατμητική τάση στο τοίχωμα του αγωγού και  $\tau_i$  η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια αερίου/υγρού. Οι δείκτες  $L$  και  $G$  αναφέρονται στην υγρή και αέρια φάση, αντίστοιχα.

Στην ανάλυση θεωρείται ότι η διεπιφάνεια αερίου/υγρού έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1, όπου ορίζονται επίσης οι γεωμετρικές παράμετροι  $A_L$ ,  $A_G$ ,  $P_L$ ,  $P_G$  και  $S_i$ . Οι παραπάνω παράμετροι υπολογίζονται από τις μετρημένες τιμές του πάχους της υγρής στοιβάδας στον πυθμένα του αγωγού,  $h_0$ , τη συγκράτηση του υγρού,  $e_L$  όπως αυτή προβλέπεται από το μοντέλο ARS των Hart et al [8] και τις τιμές της γωνίας  $\theta$  που προκύπτουν από τις

οπτικές παρατηρήσεις. Το μήκος της διεπιφάνειας,  $S_i$ , προσεγγίζεται ικανοποιητικά λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς το ευθύγραμμο τμήμα CD αντί για το τόξο CD (Σχήμα 1). Ο όρος  $\tau_i S_i$  προκύπτει από το ισοζύγιο ορμής για την υγρή φάση χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πάχους υγρής στοιβάδας, διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια υγρού/τοιχώματος αγωγού (εξ. 1) και πτώσης πίεσης που προέκυψαν από τις μετρήσεις της παρούσας μελέτης.

Η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια αερίου/τοιχώματος αγωγού,  $\tau_{wG}$ , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή τριβής,  $f_G$ , και τη φαινομενική ταχύτητα του αέρα,  $U_G$ , σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_{wG} = f_G \rho_G U_G^2 / 2 \quad (4)$$

όπου  $f_G = 0.046 Re_G^{-0.2}$ . Χρησιμοποιώντας την εξ. (4) και τα πειραματικά δεδομένα της πτώσης πίεσης, ο όρος  $\tau_i S_i$  μπορεί επίσης να υπολογισθεί και από το ισοζύγιο ορμής για την αέρια φάση. Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο τιμών του γινομένου  $\tau_i S_i$ , οι οποίες διαφέρουν περίπου 10%. Τελικώς χρησιμοποιείται μία μέση τιμή του όρου αυτού για τον υπολογισμό της διεπιφανειακής διατμητικής τάσης,  $\tau_i$ . Η τελευταία εκφράζεται με όρους του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής,  $f_i$ , και της φαινομενικής ταχύτητας του αέρα,  $U_G$ :

$$\tau_i = f_i \rho_G U_G^2 / 2 \quad (5)$$

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3, για τη διαχωρισμένη ροή με εκνέφρωση, όλα τα δεδομένα του συντελεστή τριβής, και για τα δύο σιτημάτα ροής που εξετάσθηκαν, συσχετίζονται ικανοποιητικά (μέγιστη απόκλιση <15%) με τη σχέση:

$$f_i = 0.024 \varepsilon_L^{0.35} Re_L^{0.18} \quad (6)$$

όπου  $Re_L$ : ο αριθμός Reynolds της υγρής φάσης, βασισμένος στη φαινομενική ταχύτητα του υγρού και στη διάμετρο του αγωγού. Η επίδραση της παροχής του αέρα στο  $f_i$  εκφράζεται έμμεσα στην εξ. (6) μέσω της συγκράτησης του υγρού  $\varepsilon_L$ .

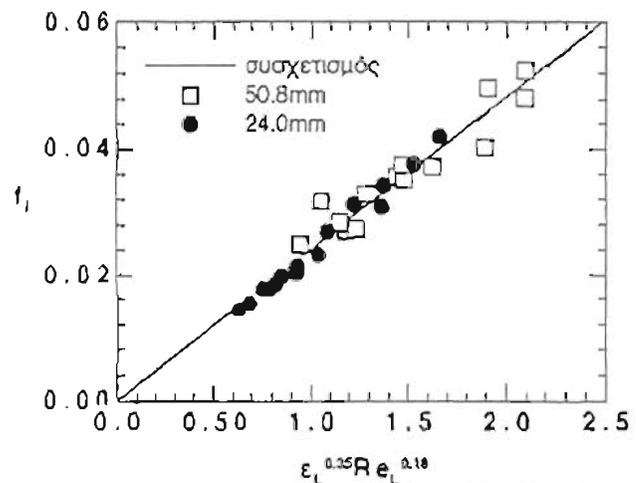
**Τοπικές ταχύτητες στην αέρια φάση:** Για την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων της ταχύτητας θεωρείται ότι η αέρια φάση ρέει σε ένα αγωγό, ο οποίος έχει λεία την πάνω επιφάνεια, ενώ η κάτω επιφάνειά του καλύπτεται από μια στοιβάδα υγρού που κινείται αργά σε σχέση με τον αέρα. Επομένως σε ότι αφορά τη ροή του αέρα, η κυματοειδής διεπιφάνεια αέρα/νερού θεωρείται *τραχεία*. Ετσι η κατανομή της αξονικής ταχύτητας δίνεται από τις ακόλουθες αδιάστατες λογαριθμικές σχέσεις που προτάθηκαν για την τυρβώδη μονοφασική ροή [11]:

$$u^+ = 5.5 + 5.75 \log(y^+) \quad (\text{λείο τοίχωμα αγωγού}) \quad (7)$$

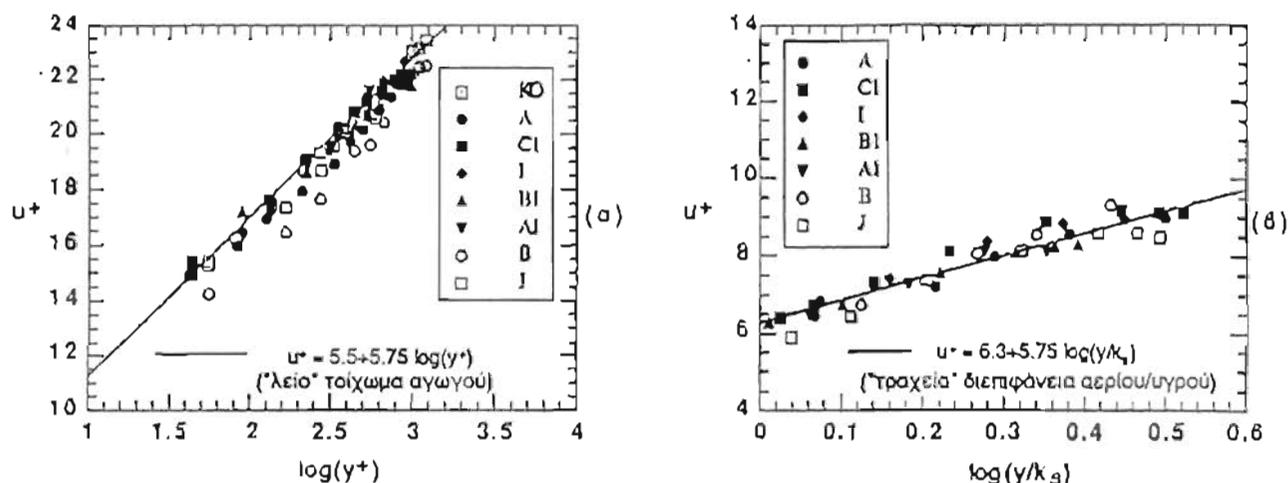
$$u^+ = B + 5.75 \log(y/k_s) \quad (\text{τραχεία διεπιφάνεια αέρα/νερού}) \quad (8)$$

όπου:  $u^+ = u/u^*$ ,  $y^+ = yu^*/\nu$ ,  $u$  η τοπική μέση αξονική ταχύτητα,  $y$  η κατακόρυφη απόσταση από το τοίχωμα του αγωγού,  $k_s$  η φαινόμενη διεπιφανειακή τραχύτητα,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του αέρα και  $u^*$  η ταχύτητα τριβής διαφορετική για κάθε μία από τις παραπάνω δύο εκφράσεις. Η σταθερά  $B$  είναι συνάρτηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Για τα πειραματικά μας δεδομένα και για πλήρως τραχεία επιφάνεια, λαμβάνει την τιμή 6.3 (Σχήμα 4).

Τα πειραματικά δεδομένα της ταχύτητας, για όλα τα πειράματα, προσαρμόζονται αρκετά καλά ( λάθος 10%) με τις παραπάνω δύο εκφράσεις, τόσο για το λείο πάνω τοίχωμα του αγωγού όσο και για την τραχεία διεπιφάνεια αέρα/νερού (Σχήμα 4). Οι τιμές της ταχύτητας τριβής,  $u^*$ , για την εξ. (8)-δηλαδή για την περίπτωση της τραχείας διεπιφάνειας-, προκύπτουν από το διεπιφανειακό συντελεστή τριβής,  $f_i$ . Ο συντελεστής τριβής προσδιορίζεται με την υπολογιστική διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω. Η φαινόμενη διεπιφανειακή τραχύτητα εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κυμάτων της διεπιφάνειας και τη διάλειαση [5]. Ανάλογες λογαριθμικές εκφράσεις έχουν χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές ([7], [2]) για την περιγραφή του πεδίου ροής στην αέρια φάση.



Σχήμα 3. Συσχέτιση του διεπιφανειακού συντελεστή τριβής με τον αριθμό  $Re$  της υγρής φάσης και τη συγκράτηση του υγρού.



Σχήμα 4. Κατανομή της αξονικής ταχύτητας στην αέρια φάση κοντά: (α) στο "λείο" πάνω τοίχωμα του αγωγού (εξ. 7) και (β) στην "τραχεία" διεπιφάνεια αερίου/υγρού (εξ. 8).

### Μοντέλο πρόβλεψης χαρακτηριστικών ροής

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα απλό φαινομενολογικό μοντέλο πρόβλεψης της πτώσης πίεσης, της συγκράτησης του υγρού και της μέσης διατμητικής τάσης στην περιφέρεια του αγωγού που διαβρέχεται από την υγρή φάση. Για την υπολογιστική διαδικασία που ακολουθείται, η οποία βασίζεται στην ταυτόχρονη επίλυση των μονοδιάστατων ισοζυγίων ορμής για την υγρή και την αέρια φάση (εξ. 2 και 3), χρειάζονται δεδομένα που αφορούν τις συνθήκες ροής ( $U_G$ ,  $U_L$ ), τις ιδιότητες των δύο φάσεων και τη διάμετρο του αγωγού. Οι πτώσεις πίεσης της υγρής και της αέριας φάσης,  $(dP/dx)_L$  και  $(dP/dx)_G$  αντίστοιχα, θεωρείται ότι οφείλονται αποκλειστικά στις τριβές και ότι είναι ίσες μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα των προβλέψεων αντιπαραβάλλονται για τη διαχωρισμένη διαφασική ροή με ή χωρίς εκνέφωση, με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις σε οριζόντιους αγωγούς εσ. διαμέτρου 24 και 50.8mm (παρούσα εργασία) και 25.2 και 95.3mm [3]. Για μικρούς εξόδους υγρά η μορφή της διεπιφάνειας αερίου/υγρού αποκλίνει σημαντικά από το επίπεδο σχήμα. Μόνο στην περίπτωση ροής σε αγωγούς μεγάλης διαμέτρου (ή μέσης διαμέτρου για χαμηλές όμως ταχύτητες αέρα) η παραπάνω παραδοχή είναι ρεαλιστική, όπως άλλωστε προκύπτει από τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των προβλέψεων του μοντέλου.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, για τα δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις στον αγωγό των 50.8mm και για ταχύτητες αέρα  $U_G < 15\text{m/s}$  ή στον αγωγό των 95.3mm, γίνεται η παραδοχή της επίπεδης διεπιφάνειας. Υποθέτοντας ότι για τις συνθήκες ροής που εξετάζονται, το πάχος της υγρής στοιβάδας στον πυθμένα του αγωγού,  $h_0$ , βρίσκεται σε μία περιοχή τιμών [ $0.1\text{mm} < h_0 < (D/2 - 1)\text{mm}$ ], αναζητείται με τη μέθοδο της διχοτόμησης Bolzano, εκείνη η τιμή του  $h_0$  για την οποία μηδενίζεται η διαφορά των πτώσεων πίεσης στις δύο φάσεις,  $(dP/dx)_G - (dP/dx)_L$ .

Για τον υπολογισμό των πτώσεων πίεσης ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Βήμα 1<sup>ο</sup>: με βάση το  $h_0$  υπολογίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι (Σχήμα 1) και η συγκράτηση του υγρού, όπως επίσης και οι μέσες πραγματικές ταχύτητες των δύο φάσεων.
- Βήμα 2<sup>ο</sup>: υπολογίζεται η διατμητική τάση αερίου/τοιχώματος αγωγού,  $\tau_{wG}$ , εφαρμόζοντας την εξ. (4).
- Βήμα 3<sup>ο</sup>: από την εξ. (5), προσδιορίζεται η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια αερίου/υγρού,  $\tau_i$ , χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο στην παρούσα εργασία συσχετισμό για το διεπιφανειακό συντελεστή τριβής,  $f_i$ .
- Βήμα 4<sup>ο</sup>: από το ισοζύγιο ορμής για την αέρια φάση (εξ. 3), υπολογίζεται η πτώση πίεσης,  $(dP/dx)_G$ .
- Βήμα 5<sup>ο</sup>: η μέση διατμητική τάση στην περιφέρεια του αγωγού που διαβρέχεται από τη συνεχή υγρή φάση,  $\tau_{wL}$ , προκύπτει από την ολοκλήρωση της εξ. (1).
- Βήμα 6<sup>ο</sup>: από το ισοζύγιο ορμής για την υγρή φάση (εξ. 2), υπολογίζεται η πτώση πίεσης,  $(dP/dx)_L$ .

Για τα δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις στους αγωγούς μικρής εσωτερικής διαμέτρου, 24 και 25.2mm, καθώς και στον αγωγό των 50.8mm (για ταχύτητες αέρα  $U_G > 15\text{m/s}$ ), θεωρείται ότι η μορφή της διεπιφάνειας αερίου/υγρού είναι κοίλη. Ξεκινώντας από την υπόθεση ότι για τις συνθήκες ροής που εξετάζονται, η συγκράτηση του υγρού,  $e_L$ , βρίσκεται σε μία περιοχή τιμών [ $0.1\% < e_L < 25\%$ ], αναζητείται με τη μέθοδο της

διχοτόμησης Βολζαρο, εκείνη η τιμή του  $\epsilon_L$  για την οποία μηδενίζεται η διαφορά των πτώσεων πίεσης στις δύο φάσεις,  $(dP/dx)_G - (dP/dx)_L$ . Για τον υπολογισμό τους ακολουθούνται τα εξής βήματα:

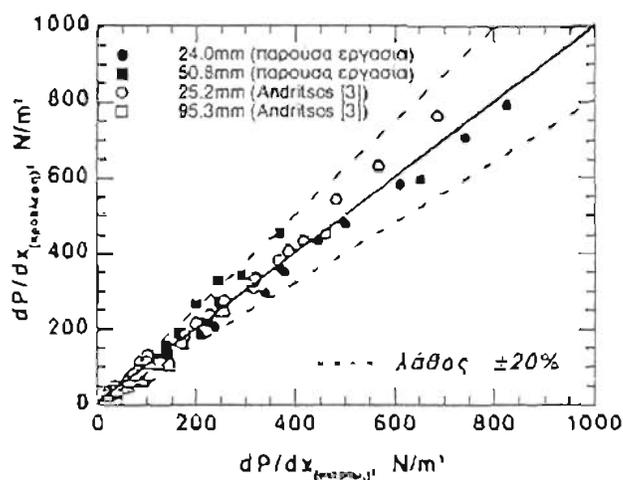
- Βήμα 1<sup>ο</sup>: με βάση το  $\epsilon_L$  υπολογίζονται οι μέσες πραγματικές ταχύτητες των δύο φάσεων και η γωνία  $\theta$  [8].
- Βήμα 2<sup>ο</sup>: εκτιμάται το πάχος της υγρής στοιβάδας στον πυθμένα του αγωγού,  $h_0$  από την ακόλουθη εξίσωση [5]:

$$h_0 = 1.5D \frac{U_L^{0.35}}{U_G^{0.65}} \quad (9)$$

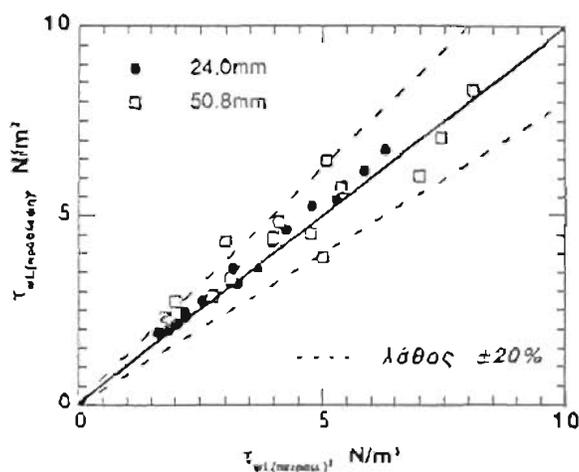
- Βήμα 3<sup>ο</sup>: με βάση τα  $\epsilon_L$ ,  $\theta$  και  $h_0$  προσδιορίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι.

Στη συνέχεια για τον υπολογισμό των πτώσεων πίεσης ακολουθούνται τα προηγούμενα βήματα 2-6.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5 όπου συμπεριλαμβάνονται τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας και της [3], παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία ανάμεσα στις υπολογιζόμενες και στις πειραματικές τιμές (σφάλμα < 20%). Το Σχήμα 6 παρουσιάζει την πρόβλεψη του μοντέλου για τη μέση τιμή της διατμητικής τάσης στο τμήμα της περιφέρειας του αγωγού που διαβρέχεται από τη συνεχή υγρή φάση. Η παρατηρούμενη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της εργασίας αυτής είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική (σφάλμα < 20%). Για την εξεταζόμενη περιοχή ροής δεν έχουν δημοσιευθεί στη βιβλιογραφία αντίστοιχα δεδομένα. Στα Σχήματα 7 και 8 οι προβλέψεις του μοντέλου για τη συγκρότηση υγρού και την πτώση πίεσης συγκρίνονται με τις αντίστοιχες προβλέψεις του μοντέλου ARS των Han et al [8]. Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μοντέλων, τόσο για τα νέα πειραματικά δεδομένα όσο και για τα δεδομένα του Andritsos [3]. Πρέπει να τονισθεί ότι το μοντέλο ARS θεωρείται ότι αποτελεί μία από τις πλέον αξιόπιστες υπολογιστικές διαδικασίες στη συγκεκριμένη περίπτωση.



Σχήμα 5. Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών πτώσης πίεσης.



Σχήμα 6. Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών της μέσης διατμητικής τάσης στο τμήμα της περιφέρειας του αγωγού που διαβρέχεται από την υγρή φάση.

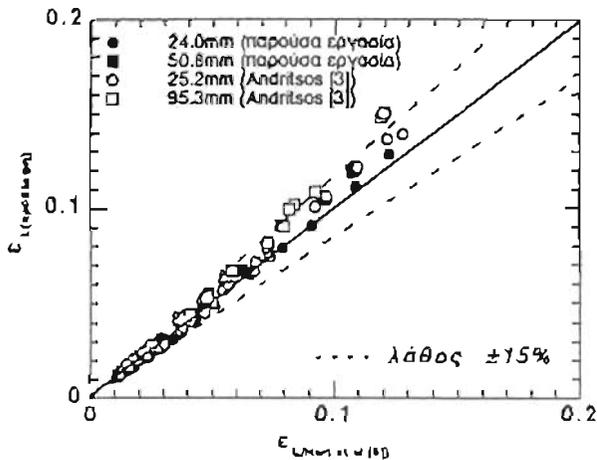
## Συμπεράσματα

Για σχετικά χαμηλές παροχές υγρού και για υγρά μικρού ξλώδους, όπως αυτά της παρούσας εργασίας, αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα πάνω από  $U_G = 10 \text{ m/s}$  παρατηρείται μετάπτωση από τη διαχωρισμένη ροή με κυματισμούς στην περιοχή ροής με εκνέφωση. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτού του προτύπου ροής είναι:

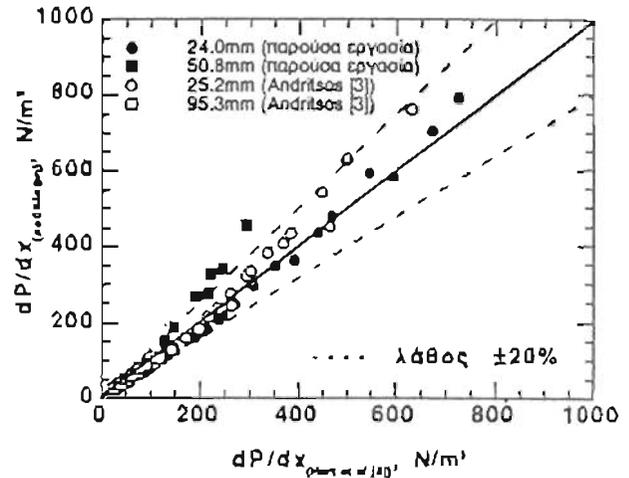
- η παρουσία κυμάτων μεγάλου πλάτους (large amplitude roll or disturbance waves) στη διεπιφάνεια αερίου/υγρού,
- η έναρξη της εκνέφωσης, η οποία συνδέεται άμεσα με τα διεπιφανειακά κύματα διαταραχής, καθώς τα σταγονίδια του υγρού που εισέρχονται στην αέρια φάση αποσπώνται από τις κορυφές αυτών των κυμάτων και
- η δραστική αλλαγή της μορφής της διεπιφάνειας αερίου/υγρού, από επίπεδη σε κοίλη, ενώ παράλληλα παρατηρείται "αναρρόχιση" της συνεχούς υγρής φάσης στα πλευρικά τοιχώματα του αγωγού.

Στη μελέτη των χαρακτηριστικών της υγρής στοιβάδας δίνεται έμφαση στην περιφερειακή κατανομή τους. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα που προκύπτει αναφορικά με τη μέση χρονική τιμή της διατμητικής τάσης, είναι ότι παρατηρείται σημαντική μείωσή της στην περιφερειακή κατεύθυνση, η οποία συνδέεται με αντίστοιχη μείωση του πάχους της υγρής στοιβάδας, μακριά από τον πυθμένα του αγωγού. Μόνο για την περίπτωση στοιβάδων υγρού με σχετικά μεγάλο πάχος, η μέση τιμή της τάσης διατηρείται περίπου σταθερή για  $\theta = 0^\circ$  έως  $45^\circ$ . Η ανάπτυξη μιας αξιόπιστης μεθόδου για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής της διεπιφάνειας αερίου/υγρού,  $f_f$ , αποτελεί ένα

από τα κυριότερα προβλήματα στη διαμόρφωση μοντέλων για τη διαχωρισμένη διφασική ροή [3]. Στην παρούσα εργασία ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται με βελτιωμένη ακρίβεια. Οι τοπικές μετρήσεις της αξονικής ταχύτητας στην αέρια φάση εφαρμόζοντας την ανεμομετρία Laser Doppler, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες καθώς ελάχιστα τέτοια δεδομένα υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Γνωστές λογαριθμικές σχέσεις που περιγράφουν την κατανομή της ταχύτητας για τυρβώδη μονοφασική ροή, προβλέπουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα της εργασίας αυτής, όχι μόνο κοντά στην κορυφή του αγωγού αλλά και στην περιοχή σχετικά κοντά στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού.



Σχήμα 7. Σύγκριση των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών συγκράτησης υγρού με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο ARS των Hart et al [8].



Σχήμα 8. Σύγκριση των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών πτώσης πίεσης με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο ARS των Hart et al [8].

Αξιοποιώντας τα παραπάνω συμπεράσματα και τους προτεινόμενους συσχετισμούς, αναπτύσσεται ένα φαινομενολογικό μοντέλο πρόβλεψης της πτώσης πίεσης, της συγκράτησης υγρού και της μέσης τιμής της διαμητρικής τάσης υγρού/τοιχώματος. Το μοντέλο είναι εύχρηστο και έχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας. Συμφωνεί με τις προβλέψεις του μοντέλου ARS των Hart et al [8] για την πτώση πίεσης και τη συγκράτηση του υγρού και προβλέπει ικανοποιητικά τα δεδομένα πτώσης πίεσης του Andritsos [3].

## Βιβλιογραφία

1. AGRAWAL, S.S., GREGORY, G.A. & GOVIER, G.W. An analysis of horizontal stratified two phase flow in pipes. *Can J. Chem. Eng.* 51, 280-286, 1973.
2. ΑΚΑΙ, Μ., ΙΝΟΥΕ, Α. & ΑΟΚΙ, Σ. The prediction of stratified two-phase flow with a two-equation model of turbulence. *Int. J. Multiphase Flow* 7, 21-39, 1981.
3. ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ, Ν. Effect of pipe diameter and liquid viscosity on horizontal stratified flow. Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, 1986.
4. ΑΝΔΡΙΤΣΟΣ, Ν. & ΗΑΝΡΑΤΤΥ, Τ.Ι. Influence of interfacial waves in stratified gas-liquid flows. *AIChE J.* 33, 3, 444-454, 1987.
5. ΒΛΑΧΟΣ, Ν.Α. Μελέτη διαχωρισμένης διφασικής ροής με εκνέφωση σε οριζόντιο αγωγό. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1997.
6. FISHER, S.A. & PEARCE, D.L. A theoretical model for describing horizontal annular flows. *Two-phase Momentum, Heat and Mass transfer in Chemical, Process and Energy Engineering Systems*. Durst, Tsklaun & Afgan 1, 327-337, 1979.
7. ΗΑΝΡΑΤΤΥ, Τ.Ι. & ΕΝΓΕΝ, Ι.Μ. Interaction between a turbulent air stream and a moving water surface. *AIChE J.* 3, 299-304, 1957.
8. HART, J., HAMERSMA, P.J. & FORTUYN, J.M.H. Correlations predicting frictional pressure drop and liquid holdup during horizontal gas-liquid pipe flow with a small liquid holdup. *Int. J. Multiphase Flow* 15, 6, 947-964, 1989.
9. KOWALSKI, J.E. Wall and interfacial shear stress in stratified flow in a horizontal pipe. *AIChE J.* 33, 2, 274-281, 1987.
10. ΠΑΡΑΣ, Σ.Β., ΒΛΑΧΟΣ, Ν.Α. & ΚΑΡΑΒΕΛΑΣ, Α.Ι. Liquid layer characteristics in stratified-atomization flow. *Int. J. Multiphase Flow* 20, 5, 939-956, 1994.
11. SCHLICHTING, H. Boundary layer theory, 4<sup>th</sup> edn. McGraw-Hill, New York, 1960.
12. ΤΑΓΓΕΛ, Υ. & ΔΟΥΚΛΕΡ, Α.Ε. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE J.* 22, 47-55, 1976.