

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΟΔΡΑΣΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΟΜΟΡΡΟΗ ΑΕΡΙΟΥ-ΥΓΡΟΥ ΣΕ ΕΛΑΦΡΑ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Ι.Σ. Λιούμπας, Χ. Κολημένος, Σ.Β. Παράς

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της προσθήκης μικρών ποσοτήτων (μερικά ppm) επιφανειοδραστικών ουσιών στην υγρή φάση στη διφασική ομορροή. Από τις προκαταρκτικές μετρήσεις διαπιστώνονται οι σημαντικές αλλαγές που προκαλούνται τόσο στα πρότυπα ροής όσο και στα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας μετά την προσθήκη των επιφανειοδραστικών. Τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αναμένεται να συνεισφέρουν στην πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών που παρατηρούνται στη διφασική ομορροή αερίου-υγρού με την παρουσία μικρών ποσοτήτων πρόσθετων ουσιών.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ομορροή αέριας-υγρής φάσης σε ελαφρά κεκλιμένους κυλινδρικούς αγωγούς συναντάται σε εφαρμογές που σχετίζονται με τη μεταφορά ρευστών (π.χ. μεταφορά υδρογονανθράκων, γεωθερμικών ρευστών κλπ). Είναι γνωστό ότι κατά τη διφασική ομορροή η διεπιφάνεια υγρού-αερίου μπορεί να λάβει διάφορες μορφές, οι οποίες εξαρτώνται από τη γεωμετρία του συστήματος, καθώς και από τις παροχές και τις φυσικές ιδιότητες της υγρής και της αέριας φάσης. Η μορφή της διεπιφάνειας καθορίζει την περιοχή ροής (π.χ. διαχωρισμένη, δακτυλιοειδής), ενώ η μορφή και το πλήθος των κυματισμών της διεπιφάνειας επηρεάζουν σημαντικά τους συντελεστές μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας μεταξύ των φάσεων [1,2]. Έχει αποδειχθεί ότι κατά τη διφασική ομορροή η παρουσία μικρών ποσοτήτων (μερικά ppm) πρόσθετων ουσιών (additives) στο υγρό μειώνει το συντελεστή τριβής στα τοιχώματα του αγωγού [2,3,4], όταν το πεδίο ροής του υγρού είναι τυρβώδες, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού, και επομένως το απαιτούμενο πάχος και η διάμετρος των αγωγών. Ο μηχανισμός όμως με τον οποίο μικρές ποσότητες προσθέτων δρουν στα πρότυπα διφασικής ομορροής αέριας-υγρής φάσης δεν έχει ακόμα αποσαφηνιστεί πλήρως.

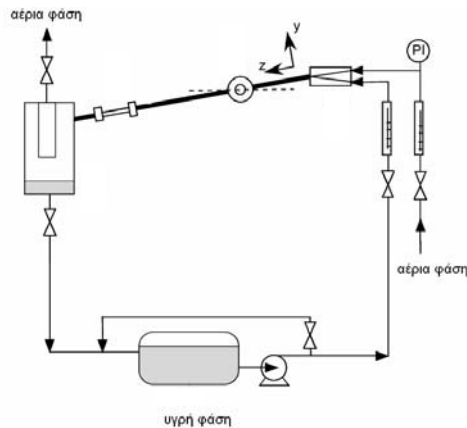
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο Εργαστήριό μας εξετάζεται εκτενώς η επίδραση μικρών ποσοτήτων μη ιονικών επιφανειοδραστικών πρόσθετων ουσιών (π.χ. Tween[®]-80, Triton X-100) στα χαρακτηριστικά της διφασικής ομορροής σε κεκλιμένους αγωγούς (με ανωφερή και κατωφερή κλίση). Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιούνται εκτός από νερό ύδρευσης, αραιά διαλύματα μη ιονικών επιφανειοδραστικών σε συγκεντρώσεις πολύ μικρότερης, ελαφρώς μεγαλύτερης καθώς και πολύ μεγαλύτερης από την κρίσιμη συγκέντρωση μικυλιοποίησης (CMC). Οι φυσικές ιδιότητες των διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες της υγρής φάσης.

	<i>index</i>	%, w/w	ρ , kg/m ³	σ , mN/m	μ , mPa.s
νερό	w	-	1000	72	1.00
υδατικό δ/μα Tween-80	T1	0.001	1000	70	1.02
υδατικό δ/μα Tween-80	T2	0.015	1000	53	1.03
υδατικό δ/μα Tween-80	T3	0.150	1000	45	1.02
υδατικό δ/μα Triton-X100	TR1	0.010	1000	48	1.02
υδατικό δ/μα Triton-X100	TR2	0.050	1000	33	1.03

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιείται αγωγός εσωτερικής διαμέτρου $D=24$ mm κατασκευασμένος από διαφανές υλικό (*Plexiglas*[®]) που επιτρέπει τις οπτικές παρατηρήσεις των περιοχών ροής (*Σχήμα 1*) για ένα εύρος φαινομενικών ταχυτήτων (παροχών) της υγρής ($U_{SL}=0-0.1$ m/s) και της αέριας ($U_{SG}=0-15$ m/s) φάσης. Η κλίση του αγωγού από το οριζόντιο επίπεδο, β , μεταβάλλεται από -3° (ανωφερής κλίση) ως 3° (κατωφερής κλίση). Για τη μέτρηση του τοπικού πάχους της υγρής στιβάδας χρησιμοποιείται η τεχνική ζεύγους παράλληλων συρμάτων (*parallel wire conductance probe method*) [2]. Η στατιστική επεξεργασία των χρονοσειρών του πάχους της υγρής στιβάδας επιτρέπει τον υπολογισμό των τοπικών μέσων χρονικών τιμών και των τυπικών αποκλίσεων του πάχους της υγρής στιβάδας καθώς και της ταχύτητας και της συχνότητας εμφάνισης των κυμάτων της διεπιφάνειας.

**Σχήμα 1.** Πειραματική διάταξη μελέτης των χαρακτηριστικών της διαφασικής ομορροής σε κεκλιμένο αγωγό.

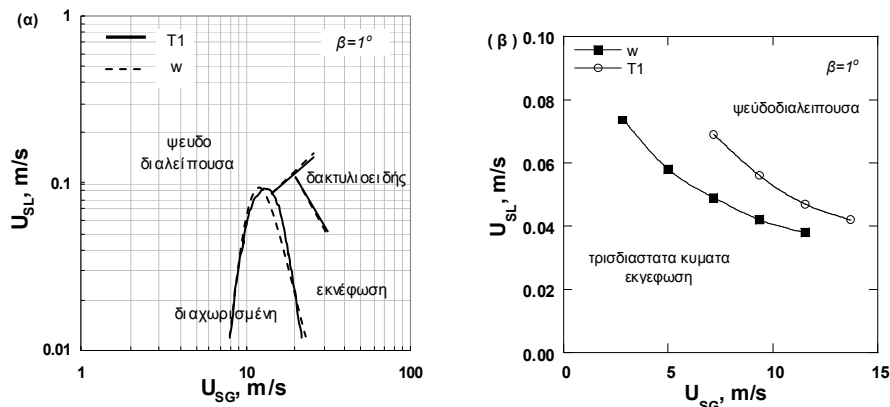
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

A. Οπτικές παρατηρήσεις

Στο *Σχήμα 2* συγκρίνονται τα όρια των περιοχών ροής για τη διαφασική ομορροή επιφανειοδραστικού (TI)-αέρα με αυτά για τη διαφασική ροή νερού-αέρα, για κλίση του αγωγού $\beta=1^\circ$, τόσο σε ανωφερείς όσο και κατωφερείς αγωγούς. Όταν ο αγωγός έχει ανωφερή κλίση, η προσθήκη μικρής ποσότητας επιφανειοδραστικού πρακτικά δεν αλλάζει τα όρια των περιοχών ροής. Αντίθετα, όταν ο αγωγός έχει κατωφερή κλίση, παρατηρείται ότι η προσθήκη μικρών ποσοτήτων επιφανειοδραστικού στο νερό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των πρώτων κυ-

μάτων μεγάλου πλάτους (*pseudo-slugs*) σε μεγαλύτερες παροχές υγρού. Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά αποδίδεται αποκλειστικά στον διαφορετικό μηχανισμό δημιουργίας των κυμάτων μεγάλου πλάτους. Με αφετηρία τη διαχωρισμένη ροή, δηλαδή για χαμηλές παροχές της αέριας φάσης, τα κύματα μεγάλου πλάτους (*pseudo-slugs*) είναι δυνατόν να δημιουργηθούν με τους δύο ακόλουθους μηχανισμούς [4]:

- Κατά τη ροή τόσο σε οριζόντιους αγωγούς όσο και σε αγωγούς με **κατωφερή** κλίση, έχει παρατηρηθεί ότι οι μικρές και μικρής συχνότητας διαταραχές της υγρής φάσης αναπτύσσονται σταδιακά και δημιουργούν μεγαλύτερα κύματα στη διεπιφάνεια. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός δημιουργίας των κυμάτων ακολουθεί το μοντέλο *Kelvin-Helmholtz*. Τέτοιου είδους κύματα είναι δυνατόν να συνεχίσουν να μεγαλώνουν, συσσωρεύοντας μπροστά τους την υγρή φάση, με τελικό αποτέλεσμα να φράσσουν τη διατομή του αγωγού, οπότε και δημιουργούνται τα πρώτα κύματα μεγάλου πλάτους (*pseudo-slugs*).
- Κατά τη ροή σε αγωγούς με **ανωφερή** κλίση, η υγρή φάση συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος του αγωγού, επειδή οι χαμηλές ταχύτητες της αέριας φάσης δεν επαρκούν για να ωθήσουν το υγρό ώστε να υπερνικήσει τη δύναμη της βαρύτητας. Αποτέλεσμα της συσσώρευσης του υγρού είναι η περιοδική διέλευση υγρών μαζών στον αγωγό (κύματα μεγάλου πλάτους).

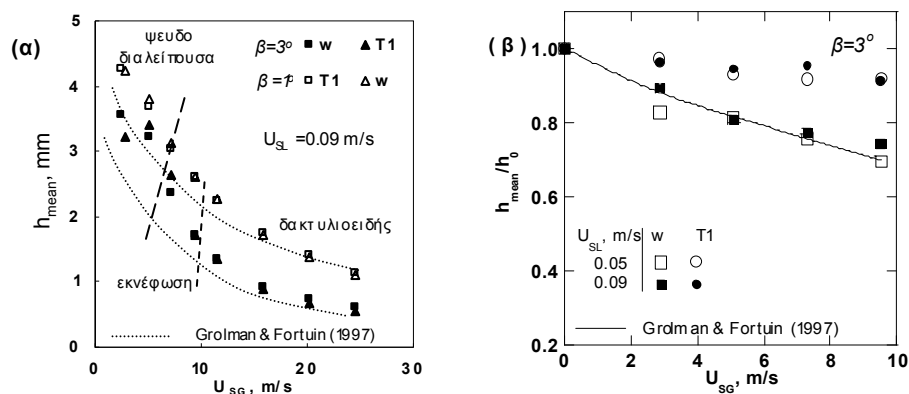


Σχήμα 2. Σύγκριση των περιοχών ροής για διφασική ροή επιφανειοδραστικού-αέρα και νερού-αέρα σε αγωγό με κλίση $\beta=1^\circ$ σε: α) ανωφερή και β) κατωφερή αγωγό.

B. Μετρήσεις πάχους υγρής στιβάδας

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου πάχους της υγρής στιβάδας, h_{mean} , ως προς την παροχή της αέριας φάσης για διάφορα ρευστά, σε κατωφερείς (Σχήμα 3α) και ανωφερείς (Σχήμα 3β) αγωγούς, όπου h_o είναι το μέσο πάχος της στιβάδας στην περίπτωση της μηδενικής παροχής αέριας φάσης. Παρατηρείται ότι για ροή σε ανωφερείς αγωγούς τα πειραματικά δεδομένα βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις προβλέψεις του θεωρητικού μοντέλου των Grolman και Fortuin [5] για όλες τις παροχές της υγρής και αέριας φάσης, για κάθε κλίση του αγωγού και για όλα τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν. Για την περίπτωση της ομορροής σε κατωφέρεις οι πειραματικές τιμές για το διάλυμα του επιφανειοδραστικού είναι μεγαλύτερες από αυτές του νερού και του θεωρητικού μοντέλου. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται [4] στην “αντίσταση” που εμφανίζει η διεπιφάνεια στην κίνηση της αέριας φάσης (εξαιτίας των μορίων του επιφανειοδραστικού που συγκεντρώνονται στη διεπιφάνεια της υγρής-αέριας φάσης) με αποτέλεσμα το πάχος της υγρής στιβάδας να μην ελαττώνεται τόσο όσο στην περίπτωση του

καθαρού νερού. Στην περίπτωση της διαφασικής ομορροής σε ανωφέρεις η επίδραση του επιφανειοδραστικού στο μέσο πάχος της στιβάδας είναι αμελητέο, πιθανόν εξαιτίας του διαφορετικού μηχανισμού με τον οποίο δημιουργούνται τα κύματα μεγάλου πλάτους. Επιπρόσθετα, τόσο από τις οπτικές παρατηρήσεις όσο και από τις μετρήσεις του μέσου πάχους της υγρής στιβάδας διαπιστώνεται ότι το διάλυμα του επιφανειοδραστικού εμφανίζει κύματα **μικρότερου** πλάτους και μικρότερης συχνότητας από αυτά του καθαρού νερού, για κάθε περιοχή ροής και ανεξάρτητα από την κλίση του αγωγού.



Σχήμα 3. Μεταβολή του μέσου πάχους στιβάδας με την παροχή της αέριας φάσης για διάφορα ρευστά και τυπικές παροχές της υγρής φάσης σε αγωγούς με: α) ανωφερή κλίση και β) κατωφερή κλίση. Σύγκριση με θεωρητικό μοντέλο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις οπτικές παρατηρήσεις (κατασκευή χαρτών περιοχών ροής), τις μετρήσεις και τη στατιστική ανάλυση του πάχους της υγρής στιβάδας διαπιστώνεται ότι η προσθήκη μικρής ποσότητας επιφανειοδραστικών ουσιών:

- σε **ανωφερείς** αγωγούς δεν επιφέρει μεταβολές στο χάρτη περιοχών ροής
- σε **κατωφερείς** αγωγούς επιφέρει μείωση του ύψους των κυμάτων, αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας και αλλαγές στα παρατηρούμενα πρότυπα ροής.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, που βρίσκεται σε εξέλιξη, αναμένεται να συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της διαχωρισμένης διαφασικής ομορροής παρουσία μικρών ποσοτήτων επιφανειοδραστικών ουσιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Manfield, P.D., Lawrence, C.J. and Hewitt, G.F., 1999 Drag reduction with additives in multiphase flow: a literature survey. *Multiphase Science and Technology*, 11, 197-221.
- [2] Lioumbas, J.S., Mouza, A.A. and Paras, S.V. 2006 Effect of surfactant additives on co-current gas-liquid downflow. *Chem. Eng. Sci.*, 61, 14, 4605-4616.
- [3] Κολημένος, Χ. 2007 Επίδραση επιφανειοδραστικών ουσιών κατά την ομορροή αερίου-υγρού σε ελαφρά κεκλιμένους αγωγούς *Διπλωματική Εργασία* στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ.
- [4] Lioumbas, J.S., Chatzidzafni, A. and Paras, S.V. 2006 Liquid layer characteristics in gas-liquid up-flow in slightly inclined pipes: Effect of surfactant additives. *CHISA 2006, 17th International Congress of Chemical and Process Engineering*, Prague, Czech Republic.
- [5] Grolman, E. and Fortuin, J.M.H., 1997 Liquid hold-up, pressure gradient and flow patterns in inclined gas-liquid pipe flow, *Exp. Thermal and Fluid Sc.*, 15, 174-182.