

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΚΑΝΑΛΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Ν.Α. Βλάχος, Α.Α. Μουζά, Σ.Β. Παράς, Α.Ι. Καράμπελας
*Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών και
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Παν. Θυρίδα 455, 54006 Θεσ/νίκη*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή συνοψίζονται οπτικές παρατηρήσεις του φαινομένου της “πλημμύρισης” σε ροή νερού/αέρα κατ’ αντιρροή. Η διφασική ροή αναπτύσσεται σε κανάλι από Plexiglas ορθογωνικής διατομής (150X10mm) και ύψους 70cm. Ο αέρας εισέρχεται στο τμήμα των μετρήσεων από τον πυθμένα της διάταξης, αφού διέλθει από ειδικό κατανεμητή, για να εξασφαλιστεί η ομαλή ροή του. Η υγρή φάση εισέρχεται και εξέρχεται από τον αγωγό μέσω ειδικών πορωδών τοιχωμάτων ώστε να μην δημιουργούνται διαταραχές.

Οι οπτικές παρατηρήσεις της ροής και της εξέλιξης του φαινομένου της πλημμύρισης επιτρέπουν να διερευνηθεί κατά πόσον η πλημμύριση οφείλεται σε “μετεωρισμό” ενός κύματος (wave levitation) ή σε συμπαρασυρμό (entrainment) σταγόνων από την επιφάνεια κυμάτων, τα οποία εμφανίζονται κοντά στην είσοδο του υγρού. Φαίνεται ότι σε κανάλια με μικρό διάκενο, ο πρώτος μηχανισμός είναι αυτός που προκαλεί την πλημμύριση. Για σχετικά μικρές παροχές υγρού, οι οποίες έχουν και πρακτικό ενδιαφέρον, τα δεδομένα συσχετίζονται με μια εξίσωση τύπου Wallis.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ

Η εργασία αυτή αποτελεί μέρος ερευνητικού προγράμματος για τη μελέτη της αντιρροής υγρού/αερίου σε κατακόρυφους αγωγούς ορθογωνικής διατομής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατανόηση (και ανάπτυξη μεθόδων ή συσχετισμών για πρόβλεψη) του φαινομένου της “πλημμύρισης” (flooding) σε αγωγούς (κανάλια) που διαμορφώνονται από δύο επίπεδες παράλληλες πλάκες με μικρό μεταξύ τους διάκενο. Ο τεχνολογικός στόχος, ο οποίος αποτελεί κίνητρο για την εκπόνηση αυτής της μελέτης, είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ειδικών εναλλακτών διφασικής ροής και συμπυκνωτών τύπου πλακών (compact/plate condensers), οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ελκυστικοί για πλήθος εφαρμογών.

Ως κρίσιμη ταχύτητα πλημμύρισης ορίζεται η ταχύτητα του αερίου πέραν της οποίας αναστρέφεται η ροή του κατερχόμενου υγρού. Το όριο αντιρροής (counter-current flow limitation-CCFL) προσδιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα του αερίου στην οποία οι δύο φάσεις μπορεί να ρέουν κατ’ αντιρροή. Ως γνωστόν, η πλημμύριση δημιουργεί σοβαρά λειτουργικά προβλήματα, όπως αύξηση της πτώσης πίεσης, παρεμπόδιση της ανόδου των ατμών και διαταραχές της ροής.

Η εμφάνιση της πλημμύρισης, εκτός από τις ταχύτητες και τις φυσικές ιδιότητες των δύο φάσεων, επηρεάζεται σημαντικά [1,2,3] από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής (είδος διατομής, διαστάσεις και κλίση του αγωγού, διαμόρφωση εισόδου των φάσεων). Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί *δύο μηχανισμοί* ως υπεύθυνοι για την πλημμύριση: α) Διαμόρφωση ενός σχετικά μεγάλου κύματος στο κατώτερο τμήμα του αγωγού και μετατόπισή του προς τα πάνω, λόγω της ασκούμενης οπισθέλκουσας από τη ροή του αερίου. β) Αποκοπή σταγονιδίων από μεγάλα κύματα (κοντά στην είσοδο του υγρού) και συμπαρασυρμός τους από το αέριο. Η συντριπτική πλειοψηφία των μέχρι σήμερα πειραμάτων έχει γίνει σε αγωγούς κυκλικής διατομής, όπου για σχετικά μικρές διαμέτρους ($D < 50\text{mm}$) φαίνεται ότι επικρατεί ο πρώτος μηχανισμός [4]. Πρόσφατα, οι Watson et al [3], κάνοντας πειράματα σε αγωγούς διαμέτρου 26 και 82mm, έδειξαν ότι για μικρή διάμετρο (δηλ. 26mm) η πλημμύριση προκαλείται από “μετεωρισμό” ενός κύματος (μηχανισμός α), ενώ για μεγάλες διαμέτρους κυρίως από συμπαρασυρμό σταγόνων.

Ενδιαφέρουσα για την παρούσα εργασία είναι η μελέτη του Biage [1], όπου χρησιμοποιήθηκε ένα όμοιου τύπου κανάλι με διάκενο 25mm και διατομή 250X25mm. Ο μηχανισμός (β) αναφέρεται ότι επικρατούσε σε αυτή την περίπτωση. Είναι φανερό, επομένως, ότι δεν έχει διευκρινισθεί επαρκώς η επίδραση της γεωμετρίας και ιδιαίτερα της χαρακτηριστικής διάστασης (διακένου) στην πλημμύριση.

Ο πλέον διαδεδομένος συσχετισμός για την έναρξη της πλημμύρισης είναι ο προταθείς από τον Wallis [5]:

$$\sqrt{U_G^*} + C_1 \sqrt{U_L^*} = C_2 \quad (1)$$

$$\text{όπου } U_G^* = U_G \sqrt{\frac{\rho_G}{gD(\rho_L - \rho_G)}} \quad \text{και} \quad U_L^* = U_L \sqrt{\frac{\rho_L}{gD(\rho_L - \rho_G)}}$$

U_G και U_L είναι οι φαινομενικές ταχύτητες της αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα και D η διάμετρος του αγωγού. Οι σταθερές C_1 και C_2 παίρνουν τιμές μεταξύ 0.75 και 1.0. Σημειώνεται ότι η διάμετρος του αγωγού εμφανίζεται στο συσχετισμό (Εξ.1), ενώ οι σταθερές C_1 και C_2 εμπεριέχουν την επίδραση όλων των υπολοίπων παραμέτρων.

Για να συμπεριλάβουν τις ιδιότητες των ρευστών οι Pushkina & Sorokin [6] πρότειναν τη χρήση ενός αριθμού Kutateladze για τον προσδιορισμό του σημείου πλημμύρισης:

$$Ku_G = U_G \left[\frac{\rho_G^2}{g\sigma(\rho_L - \rho_G)} \right]^{0.25} = C_5 \quad (2)$$

όπου σ η διεπιφανειακή τάση και C_5 σταθερά ίση με 3.2. Ο συσχετισμός αυτός δεν περιέχει την φαινομενική ταχύτητα της υγρής φάσης και ως εκ τούτου προβλέπει μια σταθερή ταχύτητα πλημμύρισης για το αέριο, ανεξάρτητη από την παροχή του υγρού. Αργότερα, άλλοι ερευνητές [3] βελτίωσαν τον παραπάνω συσχετισμό, ώστε να περιέχει την παροχή της υγρής φάσης και προέκυψε η εξίσωση:

$$\sqrt{Ku_G^*} + C_3 \sqrt{Ku_L^*} = C_4 \quad (3)$$

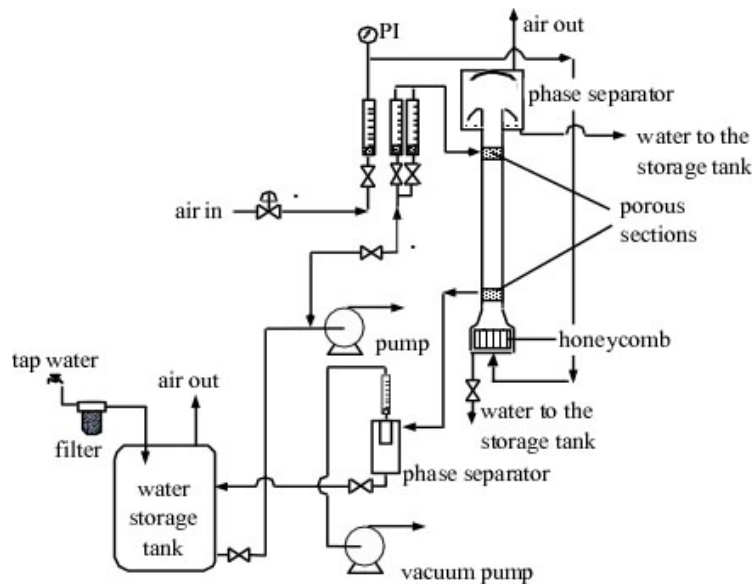
όπου τα Ku_L^* και Ku_G^* ορίζονται κατ' αναλογία με την Εξ. 2, ενώ τυπικές τιμές για τα C_3 ,

C_4 είναι 1.0 και 1.79 αντίστοιχα. Γενικά θεωρείται ότι ο συσχετισμός του Wallis (Εξ.1) είναι κατάλληλος για αγωγούς μικρής διαμέτρου, ενώ οι συσχετισμοί που χρησιμοποιούν τον αριθμό Kutateladze βρίσκουν εφαρμογή σε αγωγούς μεγάλης διαμέτρου [3].

Η επίδραση της διαμέτρου του αγωγού εξετάστηκε από τους Jayanti et al [4] με χρήση κωδίκων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD), οι οποίοι έδειξαν ποιοτικά ότι οι ασκούμενες επί ενός κύματος δυνάμεις είναι αρκετές για να προκαλέσουν το μετεωρισμό του, δηλαδή την έναρξη της πλημμύρισης, σε αγωγούς μικρής διαμέτρου. Για μεγαλύτερους αγωγούς ο συμπαρασυρμός σταγονιδίων προηγείται της καθήλωσης του κύματος και είναι η αιτία έναρξης της πλημμύρισης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα πειράματα έγιναν στη διάταξη του Σχήματος 1. Η διφασική ροή αναπτύσσεται σε κατακόρυφο κανάλι ορθογωνικής διατομής (10X150mm) και ύψους 70cm κατασκευασμένο από Plexiglas, ώστε να επιτρέπει οπτικές παρατηρήσεις και άλλες μετρήσεις. Ο αέρας εισέρχεται από το κάτω μέρος, διαμέσου κατάλληλα διαμορφωμένης εισόδου, ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητάς του. Φιλτραρισμένο νερό εισάγεται από το πάνω μέρος του καναλιού και απομακρύνεται στο κάτω μέρος διαμέσου πορωδών τοιχωμάτων. Η ποσότητα του αέρα που απομακρύνεται μαζί με το νερό διαχωρίζεται σε διαχωριστή φάσεων και μετρείται, ώστε να υπολογίζεται η πραγματική παροχή του αέρα στο τμήμα μέτρησης της συσκευής. Το νερό συγκεντρώνεται σε δοχείο 50l και ανακυκλοφορεί. Στην κορυφή του καναλιού υπάρχει διαχωριστής όπου το νερό συλλέγεται για ανακύκλωση ενώ ο αέρας απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1. Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.

Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει ικανοποιητικό έλεγχο των συνθηκών του πειράματος και μπορεί να θεωρηθεί ως μία εξιδανικευμένη περίπτωση ενός στοιχείου από μία διάταξη εναλ-

λάκτη με “πλάκες”. Τα πειράματα έγιναν σε συνθήκες περιβάλλοντος και οι παροχές του νερού κυμάνθηκαν από 20 έως 300 l/h. Για να βελτιωθεί η διαβρεκτικότητα της επιφάνειας του Plexiglas, ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της υγρής στιβάδας, προηγήθηκε ειδική κατεργασία της επιφάνειας με *silica sol*.

Η διαδικασία των πειραμάτων προβλέπει την αρχική δημιουργία της ομοιόμορφης στιβάδας του υγρού και ακολούθως τη βαθμιαία αύξηση της παροχής του αέρα μέχρι να παρατηρηθεί η έναρξη της πλημμύρισης, δηλαδή η κατάσταση εκείνη όπου το υγρό αρχίζει να ρέει κατά τη διεύθυνση της ροής του αέρα. Για την καλύτερη παρατήρηση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα σχετικά υψηλής ταχύτητας (50 frames/sec).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑ

Ο κύριος σκοπός των πειραμάτων ήταν να μελετηθεί η ροή υγρού/αερίου κατ’ αντιρροή σε κανάλι με μικρό διάκενο (10mm) μεταξύ των παραλλήλων πλακών και να εξακριβωθεί με τη βοήθεια οπτικών παρατηρήσεων ο μηχανισμός έναρξης της πλημμύρισης, ο οποίος δεν έχει μελετηθεί επαρκώς σε τέτοιες γεωμετρίες. Τα πειράματα έδειξαν ότι ένα συνεκτικό κύμα, που καλύπτει σχεδόν όλο το πλάτος του καναλιού, “καθηλώνεται” αρχικά από τον αέρα κοντά στην έξοδο του υγρού (στο κάτω μέρος του καναλιού) και ακολούθως μεταφέρεται ταχύτατα πάνω από την είσοδο του υγρού. Αυτό χαρακτηρίζεται ως η έναρξη της πλημμύρισης. Τότε το εισερχόμενο στο κανάλι υγρό κινείται προς τα πάνω σε ομορροή με τον αέρα, ενώ μικρή ποσότητά του, κυρίως από τα άκρα του καναλιού, μπορεί να διαφεύγει προς τα κάτω. Η έναρξη της πλημμύρισης διαπιστώνεται επίσης από τη ραγδαία αύξηση της πτώσης πίεσης στον αγωγό, η οποία καταγράφεται συνεχώς.

Για σχετικά μικρές παροχές υγρού ($Q_L < 30 \text{ l/h}$), η κρίσιμη ταχύτητα πλημμύρισης, U_G , αυξάνεται με την ελάττωση της παροχής του υγρού και τα δεδομένα περιγράφονται ικανοποιητικά από το συσχετισμό Wallis (Εξ. 1). Για σχετικά μεγάλες παροχές υγρού, η κρίσιμη ταχύτητα πλημμύρισης ($U_G \approx 8.5 \text{ m/s}$) τείνει να είναι ανεξάρτητη της παροχής του υγρού. Το συμπέρασμα αυτό είναι σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Pushkina & Sorokin [6]. Για να εξηγηθεί αυτή η τάση σημειώνεται ότι οι Karapantsios et al. [7], μελετώντας λεπτές στιβάδες υγρού σε κατακόρυφη ελεύθερη ροή, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το ύψος των κυμάτων τείνει να μένει αμετάβλητο για σχετικά μεγάλες παροχές υγρού. Ίσως, επομένως, γιαυτό η κρίσιμη ταχύτητα πλημμύρισης τείνει να είναι περίπου σταθερή και ανεξάρτητη της παροχής του υγρού, για μεγάλες παροχές υγρού.

Πρόσθετες λεπτομερείς μετρήσεις (τοπικών ταχυτήτων, διατμητικών τάσεων υγρού/ στερεού καθώς και διακυμάνσεων της υγρής στιβάδας) αναμένεται να δώσουν επαρκή στοιχεία για πληρέστερη κατανόηση και προσομοίωση του φαινομένου.

Ευχαριστίες: Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια προγράμματος (JOE3-CT97-0062) υποστηριζόμενου από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Biage M. *Doctoral Thesis, Inst. Nat. Polytechnique de Grenoble, France* (1989).
- [2] Zapke A. & Kroeger D.G., *Int. J. Multiphase Flow* . **22**:461 (1996).
- [3] Watson M.J., Paras S.V. & Hewitt G.F. *Int. J. Multiphase Flow* (accepted for publication) (1998).
- [4] Jayanti S., Tokarz A. & Hewitt G.F. *Int. J. Multiphase Flow*. **22**:307 (1996).
- [5] Wallis G.B. *AEEW - R123 (AEE Winfrith Report)* (1961).
- [6] Pushkina O.L. & Sorokin Y.L., *Heat Transfer-Soviet Research*. **1** (1969).
- [7] Karapantsios T.D., Paras S.V. & Karabelas A.J. *Int. J. Multiphase Flow* **15**:1 (1989).