



ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ Ι & ΙΙ

Εργαστηριακή Άσκηση 1: ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑ ΚΛΙΝΗ

Σκοπός

Η πειραματική μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης κλινών σωματιδίων και ο προσδιορισμός των ρευστοδυναμικών χαρακτηριστικών τους.

Θεωρία

Ρευστοποίηση καλείται η μετατροπή ενός στρώματος ακίνητων σωματιδίων σε στρώμα αιωρούμενων σωματιδίων υπό την επενέργεια ενός υγρού ή ενός αερίου εφόσον η ταχύτητα του ρευστού ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή. Το στρώμα των αιωρούμενων σωματιδίων ονομάζεται ρευστοποιημένη κλίνη και συμπεριφέρεται ως ένα ρευστό με μεγάλο ιξώδες.

Βασικό πλεονέκτημα των ρευστοποιημένων κλινών έναντι των μόνιμων κλινών, είναι η έντονη ανάμειξη των σωματιδίων και του ρευστού που έχει ως αποτέλεσμα όλη η επιφάνεια των σωματιδίων να έρχεται σε επαφή με το ρευστό, ώστε αν παράγεται θερμότητα (π.χ. εξώθερμη αντίδραση) να μη σχηματίζονται «θερμά σημεία». Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ρυθμός πραγματοποίησης της επιδιωκόμενης διεργασίας να είναι πολλαπλάσιος εκείνου μιας μόνιμης κλίνης. Ευνοϊκότερη περιοχή μεγέθους σωματιδίων για εφαρμογή της ρευστοποίησης είναι εκείνη των 10 έως 200 μm .

Ανάλογα με τη πυκνότητα των σωματιδίων και το είδος του ρευστού παρατηρούνται δύο είδη ρευστοποίησης:

- Ομοιόμορφη ρευστοποίηση: Τα σωματίδια κινούνται ως ανεξάρτητα σώματα κατά τυχαίες διευθύνσεις διαμέσου όλου του όγκου του υγρού. Η κίνηση γίνεται εντονότερη με αύξηση της ταχύτητας αλλά η μέση πυκνότητα της κλίνης είναι ίδια παντού για δεδομένη ταχύτητα. Σε μεγάλες ταχύτητες η κλίνη εμφανίζει μεγάλη διαστολή.
- Ανομοιόμορφη ρευστοποίηση: Συνήθως δημιουργούνται φουσαλίδες ρευστού στις οποίες δεν συναντώνται σωματίδια και μόνο ένα μικρό κλάσμα του ρευστού ρέει στα κανάλια των σωματιδίων. Αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο λόγω διακυμάνσεων στην πτώση πίεσης και την εύκολη παράσυρση των σωματιδίων.

Για το προσδιορισμό του είδους της ρευστοποίησης λαμβάνεται υπόψη τόσο ο αριθμός Reynolds όσο και ο αριθμός Froude.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της διεργασίας της ρευστοποίησης είναι:

- Ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης u_{ϕ}^* : η φαινόμενη ταχύτητα τη στιγμή που αρχίζει η αληθής ρευστοποίηση.
- Ταχύτητα παράσυρσης u_{ϕ}° : η φαινόμενη ταχύτητα στην οποία τα σωματίδια αρχίζουν να συμπαρασύρονται από το ρευστό με αποτέλεσμα η κλίνη να παύει να υφίσταται.

- Πορώδες κλίνης ε : το κλάσμα του όγκου του στρώματος το οποίο είναι ελεύθερο σωματιδίων ($= 1 - V_s/V$). Η τιμή εξαρτάται από το σχήμα και τη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων αλλά και από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του στρώματος των στερεών.
- Ελάχιστο πορώδες ε^* : το πορώδες του στρώματος όταν αρχίζει η αληθής ρευστοποίηση. Εξαρτάται από το είδος του υλικού και γενικά αυξάνεται με την ελάττωση του μεγέθους των σωματιδίων.
- Πτώση πίεσης ΔP : Όταν ένα ρευστό περνά από στρώμα στερεών παρατηρείται πτώση πίεσης. Τη στιγμή που ξεκινά η ρευστοποίηση η πτώση πίεσης δίνεται από την εξίσωση : $\Delta P/l^* (\text{βαθμίδα πίεσης}) = g (1 - \varepsilon) (\rho_s - \rho)$.
- Ύψος κλίνης l : Το ύψος της κλίνης στα διάφορα στάδια ρευστοποίησης

Η διεργασία της ρευστοποίησης αποτυπώνεται από τα ακόλουθα διαγράμματα:

- Πτώσης πίεσης συναρτήσει της φαινόμενης ταχύτητας
- Ύψος κλίνης συναρτήσει της φαινόμενης ταχύτητας

Η βασική εξίσωση που εφαρμόζεται στην έναρξη της ρευστοποίησης είναι η εξίσωση Ergun. Για σφαιρικά σωματίδια ισχύει: $\Delta P/\rho = l^*/d_s [(1 - \varepsilon^*)/\varepsilon^{*3}] [150(1 - \varepsilon^*)/Re^* + 1,75] u_\varphi^{*2}$

Όπου:

ΔP : πτώση πίεσης

ρ : πυκνότητα ρευστού

ρ_s : πυκνότητα σωματιδίου

d_s : διάμετρος σωματιδίου

ε : πορώδες κλίνης

l : ύψος κλίνης

Re : αριθμός Reynolds

u_φ : φαινόμενη ταχύτητα

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

V : όγκος κλίνης

V_s : συνολικός όγκος σωματιδίων κλίνης

Στο σημείο έναρξης της ρευστοποίησης και ανάλογα με το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) η εξίσωση Ergun μετασχηματίζεται αντίστοιχα στις εξισώσεις Kozeny – Carman, και Blake – Palmer.

Οι ρευστοποιημένες κλίνες βρίσκουν εφαρμογή σε:

- Φυσικές διεργασίες (ανάμειξη, θέρμανση ή ξήρανση σωματιδίων),
- Χημικές διεργασίες (καταλυτικές χημικές αντιδράσεις),
- Μεταλλουργία (φρύξη, εναλλαγή θερμότητας),
- Μεταφορά στερεών.

Πειραματικό μέρος

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από

- Φυσητήρα για τη διοχέτευση του ρευστού (αέρα) στο σύστημα
- Ρυθμιστή της παροχής του αέρα
- Ροόμετρο καταγραφής της παροχής του αέρα
- Σταθερή κλίνη σωματιδίων που βρίσκεται σε κατακόρυφο σωλήνα από plexiglass
- Κατανομέα αέρα στο πυθμένα του σωλήνα
- Μανόμετρα καταγραφής της πτώσης πίεσης στο σωλήνα κατά μήκος της κλίνης
- Κυκλώνα για το διαχωρισμό των σωματιδίων (που παρασύρονται) από τον αέρα
- Δοχείο συλλογής σωματιδίων
- Ηλεκτρονικό κύκλωμα με Η/Υ για τη καταγραφή και απεικόνιση των μετρήσεων της ροής και της πτώσης πίεσης του αέρα.

Αρχικά τίθεται σε λειτουργία το ηλεκτρονικό κύκλωμα με τον Η/Υ και στη συνέχεια ρυθμίζεται η παροχή του αέρα που διοχετεύεται στο σύστημα. Μετά τον απαιτούμενο χρόνο ισοροπίας του συστήματος μας καταγράφετε με τη βοήθεια του Η/Υ η παροχή του αέρα, η πίεση του αέρα πριν και μετά τη κλίνη των σωματιδίων και η διαφορά τους (πτώση πίεσης). Το ίδιο επαναλαμβάνεται για διαφορετικές τιμές παροχής του αέρα. Σημειώνεται ότι το πείραμα επαναλαμβάνεται δύο φορές, μία για αυξανόμενες και μία για ελαττούμενες τιμές παροχής.

Τεχνικά Δεδομένα

- Είδος σωματιδίων: άμμος
- Μάζα σωματιδίων: $m=0.5 \text{ kg}$
- Πυκνότητα σωματιδίων: $\rho=2900 \text{ kg/m}^3$
- Διάμετρος σωματιδίων: $d_s = 655 \text{ }\mu\text{m}$
- Ύψος στρώματος άμμου: 2.2 cm
- Περίμετρος στήλης: 43 cm

Ζητούμενα

1. Μεθοδολογικό διάγραμμα ροής και ο ράνων όπου θα απεικονίζονται και θα αναγράφονται αναλυτικά όλα τα «στοιχεία» της πειραματικής διάταξης.
2. Η διαγραμματική απεικόνιση της πτώσης πίεσης σε συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα για
 - 2.1. όλες τις τιμές παροχής
 - 2.2. αυξανόμενες τιμές παροχής
 - 2.3. ελαττούμενες τιμές παροχήςΝα γίνει σύγκριση των δύο τελευταίων διαγραμμάτων με βάση τη θεωρία της ρευστοποίησης.
3. Να υπολογιστεί η ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης και το ελάχιστο πορώδες της κλίνης με βάση το διάγραμμα 2.1. Το τελευταίο να συγκριθεί με βιβλιογραφικές αναφορές.
4. Ποια η θεωρητική ταχύτητα έναρξης ρευστοποίησης θεωρώντας ως ελάχιστο πορώδες το αρχικό πορώδες της μόνιμης κλίνης;
5. Να προσδιοριστεί το είδος της ρευστοποιημένης κλίνης (ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη)

χρησιμοποιώντας τον αριθμό Froude.

6. Εφόσον το είδος της ρευστοποίησης προκύψει «ανομοιόμορφη» να προσδιορίσετε τα μεγέθη που θα μπορούσαν να μεταβληθούν ώστε να οδηγηθούμε σε «ομοιόμορφη» ρευστοποίηση.
7. Η διαγραμματική απεικόνιση του πορώδους της κλίνης σωματιδίων σε συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα, θεωρώντας ότι έχετε ομοιόμορφη ρευστοποίηση.
8. Η διαγραμματική απεικόνιση του ύψους της κλίνης σε συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα θεωρώντας ότι το εμβαδό της εγκάρσιας τομής της κλίνης δε μεταβάλλεται με το ύψος.

Βιβλιογραφία

1. McCabe W.L., Smith J.C. and Harriott P., *Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής*, 6η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
2. Παπαϊωάννου Α., *Μηχανική των Ρευστών II*, εκδόσεις Δ. Μαυρομάτη, 1996.