

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΔΕΣΜΩΝ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Ε. Σταπουτζής, Κ. Υάκινθος, Δ. Τσιπιάς, Α. Γούλας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Θυρ. 443, Θεσσαλονίκη 540 06

Δ. Βαλουγεώργης, Α. Γκίκας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Βόλος 383 34

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

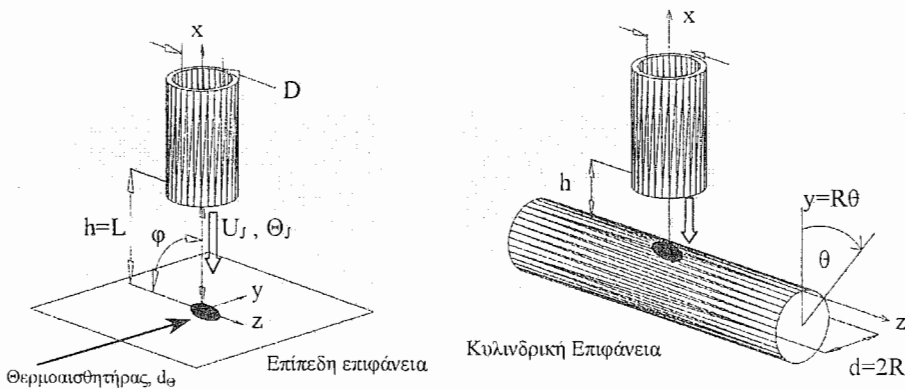
Τα φαινόμενα μεταφοράς ορμής, θερμότητας και μάζας που προκαλούνται από την πρόσπτωση μιας αξονοσυμμετρικής δέσμης σε μια επίπεδη και μια κυρτή επιφάνεια μελετώνται πειραματικά. Γίνεται επίσης και σύντομη σύγκριση με αποτελέσματα από το εμπορικό λογισμικό CFD FLUENT. Οι συντελεστές μεταφοράς παρουσιάζονται βελτιωμένοι για αποστάσεις επιφάνειας – στομίου δέσμης της τάξης του μήκους του δυναμικού πυρήνα. Στην περιοχή του σημείου ανακοπής οι κυρτές επιφάνειες παρουσιάζουν καλύτερους συντελεστές μεταφοράς. Οι μέγιστοι συντελεστές μεταφοράς μπορεί να εμφανισθούν και σε μικρές αποστάσεις από το σημείο ανακοπής της ροής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανία διεργασιών χρησιμοποιεί εκτεταμένα δέσμες ρευστού που προσπίπτουν σε στερεές επιφάνειες. Η πρόσπτωση αυτή μπορεί να είναι ηθελημένη, όπως στην ξήρανση ή θέρμανση επιφανειών με πολλαπλές δέσμες σε διάφορες γωνίες [1] ή ακούσια όπως σε θαλάμους καύσης [2], σε χώρους με στόμια κλιματισμού. Κατά την αλληλεπίδραση του ροϊκού πεδίου της δέσμης με την επιφάνεια (επίπεδη ή καμπύλη) είναι δυνατόν να συμβαίνουν φαινόμενα μεταφοράς ορμής, θερμότητας μάζας [3], [4]. Στην τελευταία περίπτωση μπορεί επίσης να προκαλείται φθορά της επιφάνειας, επικάλυψη σωματιδίων στην επιφάνεια που μεταφέρονται με το ρευστό ή εξάχνωση μέρους της επιφάνειας. Οι μέγιστες τιμές των συντελεστών μεταφοράς, Σ , που τείνουν να αυξάνονται με τον αριθμό Reynolds, απαντώνται στην περιοχή ανακοπής της ροής [5]. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στην επίδραση που ασκούν η γεωμετρία (γωνία πρόσπτωσης, εγκάρσια απόσταση, καμπυλότητα επιφάνειας) και οι ροϊκές συνθήκες (αριθμός Reynolds) κατά κύριο λόγο στον συντελεστή μεταδόσης θερμότητας (για θερμαινόμενη επιφάνεια πρόσπτωσης). Τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχετικές βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά ελπίζεται ότι θα συμβάλλουν και στην καλύτερη προσομοίωση με αριθμητικά μοντέλλα. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκαν ιδιαίτερα ευαίσθητα μεγέθη της ροής, όπως η πίεση του σημείου ανακοπής και της γύρω περιοχής του και η διανομή ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής. Μερικά από τα μεγέθη αυτά συγκρίθηκαν με εκείνα που προέκυψαν από προσομοίωση της ροής με τον κώδικα FLUENT. Ο στόχος ήταν η μελλοντική δημιουργία πιο αξιόπιστων συνοριακών συνθηκών στην περιοχή ανακοπής για την βελτίωση των μοντέλων CFD. Για να εξετασθεί η επίδραση της καμπυλότητας της επιφάνειας στο Σ χρησιμοποιήθηκαν μια επίπεδη πλάκα και η επιφάνεια ενός κυλίνδρου.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το Σχ.1 δείχνει διαγραμματικά την πειραματική διάταξη μεταφοράς θερμότητας, που αποτελείται από ένα σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου $D = 24\text{mm}$ για την δημιουργία της δέσμης



Σχήμα 1. Διάταξη προσπίπτουσας δέσμης και επιφανείων

(κεντρική ταχύτητα εξόδου = U_j) και μια επίπεδη πλάκα 2×2.5 m ή ένα κυκλικό κύλινδρο εξωτερικής διαμέτρου $d = 60$ mm σαν προσπίπτουσες επιφάνειες (απο αλουμίνιο).

Για τα πειράματα μετάδοσης θερμότητας με πρόσπτωση δέσμης χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δυο αισθητήρες θερμοροής (με ηλεκτρική αντίσταση και θερμοστοιχεία επιφανείας) διαμέτρων 8 και 4mm κατασκευασμένοι στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών του Τμήματος Μηχανολόγων ΑΠΘ [6].

Η μεταφορά μάζας μελετήθηκε σε δεξαμενή νερού με μεταφερόμενη τράπεζα (towing tank) στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών του Τμήματος Μηχανολόγων ΑΠΘ. Μια τυρβώδης δέσμη νερού κατευθυνόταν προς επιφάνεια που ήταν καλυμμένη με ομοιόμορφη στρώση υδροδιαλυτού υδροχρώματος. Ο ρυθμός με τον οποίο διαλυόταν και παρασυρόταν το υδρόχρωμα από την δέσμη συνδέθηκε με την ικανότητα της δέσμης για μεταφορά μάζας.

Η φθορά απόξεσης κυλινδρικών δοκιμίων αλουμινίου ($D = 25$ mm) με δέσμη αέρα - σωματιδίων κορουνοΐου (οξειδίων αλουμινίου) μέσης διαμέτρου 200 μm έγινε σε ειδικό θάλαμο αμμοβολής [7] του Εργαστηρίου Μεταλλογνώσιας του Τμήματος Μηχανολόγων ΑΠΘ.

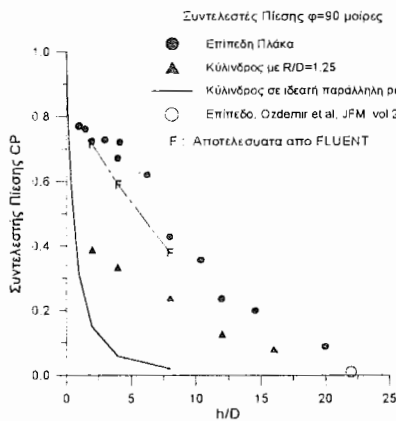
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μέτρηση ταχυτήτων και πιέσεων. Σύγκριση με αποτελέσματα CFD.

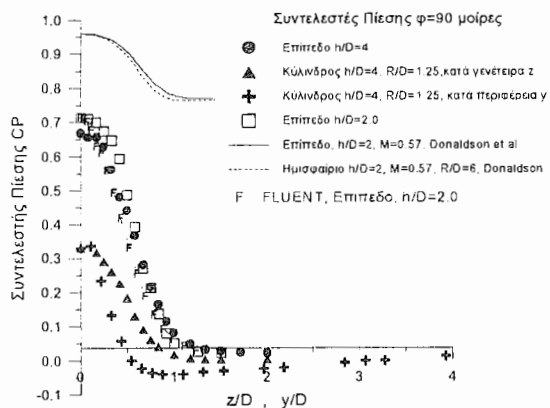
Στο Σχ. 2 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή στατικής πίεσης στο σημείο ανακοπής, $C_{PA} = (p_A - p_{\text{περιφ}}) / \frac{1}{2} \rho U_j^2$, συναρτήσει της απόστασης, h , της κάθετα προσπίπτουσας δέσμης από την επιφάνεια (επίπεδη ή καμπύλη). Ο αριθμός $Re = U_j D / \nu$ ήταν 75 000 και η ροή ισόθερμη ($\Theta_j = \Theta_{\text{περιφ}} = \Theta_{\text{wall}} \approx 24^\circ \text{C}$). Θ_j και Θ_{wall} ήταν αντίστοιχα οι θερμοκρασίες στο στόμιο εξόδου (κεντρική γραμμή) και της επιφάνειας του θερμοαισθητήρα.

Επειδή αφ' ενός η αδιαστατοποίηση γίνεται με την κεντρική ταχύτητα της δέσμης, U_j , και η ταχύτητα της αδιατάρακτης δέσμης μειώνεται με την απόσταση από το στόμιο, παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή πίεσης C_p είναι μικρότερες του 1.0 (η τιμή που θα αναμενόταν για προσπίπτουσα ομοιόμορφη παράλληλη ροή, δείχνεται επίσης στο Σχ. 2). Για τον ίδιο λόγο ο C_p μειώνεται καθώς η απόσταση από το τοίχωμα h/D αυξάνει. Στην αρχή ($h/D \leq 6$) η μείωση είναι αργή και κατόπιν γίνεται εντονότερη, αφού η επιφάνεια είναι πλέον σε αποστάσεις πέραν του δυναμικού πυρήνα της δέσμης, όταν αυτή θα ήταν αδιατάρακτη ($x/D \geq 10$). Υπάρχει αισθητή διαφορά στην πίεση ανακοπής (για την ίδια απόσταση h/D) μεταξύ επίπεδης και καμπύλης επιφάνειας (κύλινδρος με $2R/D = d/D = 2.5$). Οι τιμές του C_p για καμπύλη επιφάνεια είναι οι μικρότερες επειδή δίνεται δυνατότητα πιο γρήγορης εκτόνωσης της δέσμης του ρευστού πάνω στην καμπύλη επιφάνεια. Για μεγάλες τιμές h/D , οι τιμές του C_p για

επίπεδη ή καμπύλη επιφάνεια τείνουν να συγκλίνουν λόγω της σημαντικής αύξησης του εύρους της δέσμης πριν την πρόσπτωση. Οι τιμές του C_p υπολογισμένες από το Λογισμικό Ρευστοδυναμικής FLUENT [8] είναι σε καλή ($h/D < 5$) έως μέτρια συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές. Αν λοιπόν η βελτιστοποίηση στοχεύει στην διατήρηση υψηλών πιέσεων, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι η δέσμη θα πρέπει να απέχει από τις επιφάνειες αποστάσεις h της τάξης μεγέθους του μήκους του δυναμικού πυρήνα, κατά προτίμηση $h \leq 6D$). Το Σχ. 3 παρουσιάζει την διανομή των στατικών πιέσεων πάνω στις προσπίπτουσες επιφάνειες για $\phi = 90^\circ$. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη τιμή του C_p εμφανίζεται στο «γεωμετρικό» σημείο ανακοπής A, δηλαδή στην τομή του κεντρικού άξονα του στομίου της δέσμης με την επιφάνεια. Η κατάσταση είναι διαφορετική όταν η δέσμη προσπίπτει υπό γωνία $\phi \neq 90^\circ$ ή όταν είναι διαταγμένη ασύμμετρα ως προς τον κεντρικό άξονα του κυλινδρικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα αυτά θα παρουσιαστούν σε άλλη εργασία. Η πτώση του C_p με την απόσταση από το σημείο ανακοπής είναι πιο απότομη, όσο μικρότερο είναι το h/D . Οι καμπύλες αλλά κυρτές ως προς την ροή επιφάνειες χαρακτηρίζονται γενικά από διανομή χαμηλότερων πιέσεων είτε σε πρακτικά ασυμπίεστη ροή, όπως η παρούσα, είτε σε συμπίεστη ($Mach = 0.57$ [5]). Οι κοίλες επιφάνειες [5] παρουσιάζουν υψηλότερες πιέσεις από εκείνες των επιπέδων επιφανειών. Η συμπεριφορά των διανομών C_p του κυλινδρικού μοντέλου κατά μήκος της γενέτειρας (z) δια του σημείου ανακοπής A και επί της περιφέρειας ($y = R\theta$, Σχ. 1) είναι συμβατή με τα προαναφερθέντα. Δηλαδή κατά μήκος της γενέτειρας (που είναι πιο κοντά στην έννοια της «επίπεδης» επιφάνειας) οι πιέσεις είναι υψηλότερες από ότι κατά μήκος της περιφέρειας («καμπύλη» επιφάνεια). Πρακτικά σε μια διάμετρο στομίου ($y = z \approx 1D$) από το σημείο ανακοπής η πίεση έχει προσεγγίσει εκείνη του περιβάλλοντος ($C_p \rightarrow 0$), αλλά υπάρχει και περίπτωση εμφάνισης αρνητικών C_p , όπως σε ένα κυκλικό κύλινδρο σε παράλληλη ροή. Φυσικά οι μεταβολές του C_p σχετίζονται και με το h/D , όπως και στο Σχ. 2. Οι υπολογισμένες τιμές είναι πάλι σε καλή έως μέτρια συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές. Σε άλλη εργασία θα δοθούν αναλυτικότερα οι λόγοι διαφωνίας των πειραματικών από τα CFD αποτελέσματα.



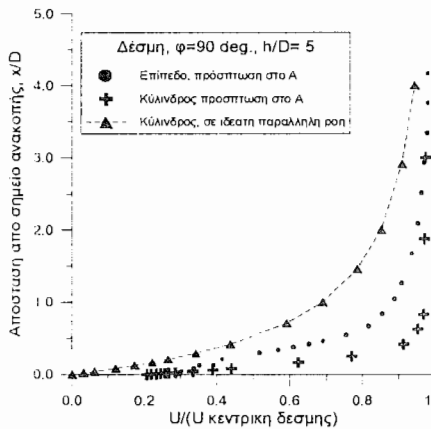
Σχήμα 2. Στατική πίεση στο σημείο ανακοπής A



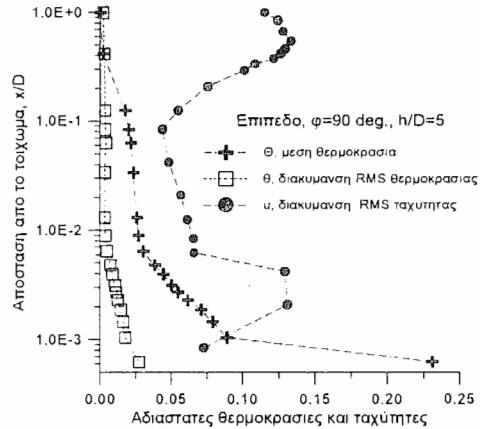
Σχήμα 3. Διανομή στατικών πιέσεων στις επιφάνειες πρόσπτωσης

Συμπερασματικά, εάν επιχειρείται βελτιστοποίηση με στόχο την διατήρηση υψηλών πιέσεων σε κάποια προσπίπτουσα επιφάνεια, τότε για αποστάσεις, h , της τάξεως του μήκους του δυναμικού πυρήνα, οι συνιστώμενες περιοχές θα πρέπει να απέχουν αποστάσεις περίπου $1D$ από το αντίστοιχο σημείο ανακοπής. Αντιστρόφως, οι περιοχές σχετικά χαμηλών και ομοιόμορφων πιέσεων θα πρέπει να εκτείνονται πέραν των δυο περίπου διαμέτρων στομίου (z ,

$y \geq 2D$). Παρ' ότι στην παρούσα μελέτη δεν εξετάστηκαν οι διακυμάνσεις της πίεσης, p' , αναφέρεται ότι αυτές έχουν όλο και μεγαλύτερη μέση τετραγωνική τιμή στο σημείο ανακοπής A καθώς το h/D αυξάνει [5] πέραν του δυναμικού πυρήνα ($h/D \geq 6$), παραμένουν όμως χαμηλότερες (έως και 50%) των p'_{RMS} μιας αδιατάρακτης δέσμης στις αντίστοιχες θέσεις x/D . Επομένως χαμηλές διακυμάνσεις πίεσης διασφαλίζονται για μικρά h/D . Ας σημειωθεί ότι για περιοχές μακριά από τα σημεία ανακοπής, αύξηση των διακυμάνσεων της επιφανειακής πίεσης οδηγεί σε αύξηση των αντίστοιχων τοπικών συντελεστών μετάδοσης θερμότητας [9]. Οι διανομές των μέσων ταχυτήτων, U , (διεύθυνση x) επί της γραμμής ανακοπής για κάθετη πρόσπτωση και $h/D = 5.0$ φαίνονται στο Σχ. 4. Η αντίστοιχη μεταβολή της διακύμανσης της ταχύτητας u_{RMS} φαίνεται στο Σχ. 5. Και οι δυο ταχύτητες έχουν αδιαστατοποιηθεί με την κεντρική ταχύτητα της δέσμης, U_j . Παρατηρείται ότι ο ρυθμός της μείωσης της μέσης ταχύτητας καθώς προσεγγίζεται το σημείο ανακοπής είναι εντονότερος για την κυλινδρική επιφάνεια, πλην όμως σε απόλυτες τιμές οι μέσες ταχύτητες είναι υψηλότερες για την κυλινδρική επιφάνεια λόγω του μικρότερου εμποδίου που παρουσιάζει στην ροή της δέσμης.



Σχήμα 4. Διανομή μέσων ταχυτήτων επι της γραμμής ανακοπής



Σχήμα 5. Διανομή μέσων θερμοκρασιών και διακυμάνσεων θερμοκρασιών και ταχυτήτων στην γραμμή ανακοπής

Η διακύμανση της ταχύτητας πολύ κοντά στο επίπεδο τοίχωμα (Σχ. 5) παρουσιάζει δυο τοπικές εξάρσεις πριν, για μεγάλες αποστάσεις x/D , εξισωθεί με την διακύμανση της ταχύτητας κοντά στο στόμιο (δηλ. για $x/D = h/D = 5$, που δεν φαίνεται όμως στο Σχ. 5 λόγω του περιορισμού της κλίμακας). Η τάση της u_{RMS} να ελαττωθεί για πολύ μικρές αποστάσεις από το τοίχωμα είναι αναμενόμενη. Σημασία για την μετάδοση θερμότητας έχει η αρχική της τιμή (στο στόμιο). Για σταθερό h/D , μεγαλύτερες τιμές u_{RMS} οδηγούν σε μεγαλύτερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στο σημείο ανακοπής [5]. Παρόμοια είναι και η επίδραση της κλίσης της ταχύτητας V της παράλληλης προς το τοίχωμα, κατά την διεύθυνση y , δηλ.

$\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=0}$, που εκφράζει και την τοπική διατμητική τάση τοιχώματος τ_w . Όπως διαφαίνεται από

τα Σχ. 4 και 5, η επίδραση της προσπίπτουσας επιφάνειας στην ταχύτητα της επερχόμενης δέσμης γίνεται αισθητή σε περίπου απόσταση $1D$ από την επιφάνεια, ή με άλλα λόγια, σε περίπου 20% του h . Οι Donaldson et al. [5] αναφέρουν περίπου την ίδια τιμή για απόσταση $h = 10D$. Επομένως για αποστάσεις τοιχώματος-στόμιου της τάξης του μήκους του δυναμικού

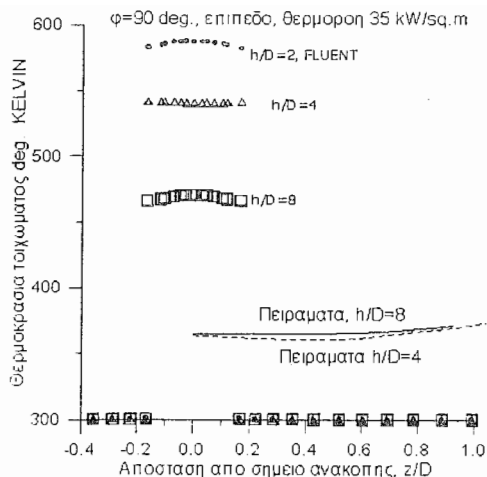
πυρήνα, η προσπίπτουσα επιφάνεια κάνει την παρουσία της αισθητή αρκετά αργά σε αποστάσεις από το στόμιο της τάξης του $x = 20\% h$.

3.2. Μέτρηση θερμοκρασιών και μετάδοσης θερμότητας.

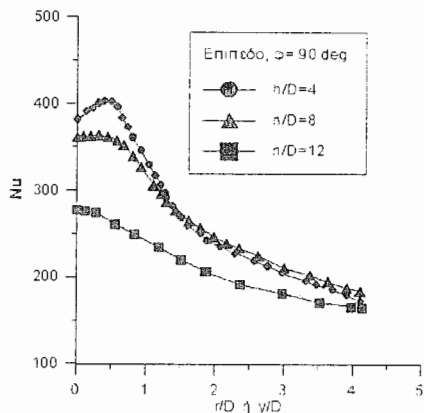
Η κατανομή της αδιάστατης μέσης θερμοκρασίας $\Theta_{\Delta\Delta} = \frac{\Theta - \Theta_{jet}}{\Theta_{wall} - \Theta_{jet}}$ πάνω στην γραμμή

ανακοπής φαίνεται στο Σχ. 5 και η κατανομή της απόλυτης θερμοκρασίας Θ πάνω στην επιφάνεια στο Σχ. 6. $\Theta_{jet} (\approx \Theta_{\text{περιβ}})$ είναι η μέση θερμοκρασία της εξερχόμενης δέσμης και Θ_{wall} η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας στο σημείο ανακοπής A (δηλ. η μέση επιφανειακή θερμοκρασία του θερμοαισθητήρα όπως αυτή δίνεται από τον μέσο όρο τεσσάρων περιφερειακά διατεταγμένων επιφανειακών θερμοστοιχείων). Η θερμοροή ήταν 35 kW/m^2 και κατεβλήθη προσπάθεια να περιορισθεί μόνο στην επιφάνεια του θερμοαισθητήρα που ήταν θερμικά μονωμένος από την υπόλοιπη επίπεδη επιφάνεια (πλάκα αλουμινίου). Καθώς η επιφάνεια προσεγγίζεται, η θερμοκρασία $\Theta_{\Delta\Delta}$ αυξάνει έως ότου αποκτήσει την τιμή 1.0 ακριβώς πάνω στην επιφάνεια (δεν φαίνεται στο Σχ. 5 λόγω περιορισμού της κλίμακας). Η πολύ απότομη αύξηση συμβαίνει εξαιρετικά εγγύς του τοιχώματος, πράγμα που υποδηλώνει ένα πολύ λεπτό θερμικό οριακό στρώμα μετά το σημείο ανακοπής. Κάποια σχετικά αργή αύξηση της θερμοκρασίας για $0.001 \leq x/D \leq 0.01$ συμπίπτει με την έξαρση της έντασης της τύρβης $u_{RMS,\Delta\Delta}$ καθώς και της θερμοκρασίας τύρβης $\vartheta_{RMS,\Delta\Delta}$ αδιαστατοποιημένης σαν $\vartheta_{RMS} / (\Theta_{wall} - \Theta_{jet})$. Οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι σημαντικά μικρότερες των αντίστοιχων ταχυτήτων και οι δυο όμως τείνουν να μηδενιστούν πάνω στο τοίχωμα. Στο Σχ. 6 γίνεται σύγκριση των διανομών της απόλυτης μέσης θερμοκρασίας (σε $^{\circ}\text{K}$) για διάφορα h/D όπως επίσης και σύγκριση των υπολογισμένων με το λογισμικό FLUENT και των αντίστοιχων μετρημένων τιμών. Μια πρώτη διαπίστωση είναι ότι οι μετρημένες τιμές είναι πολύ χαμηλότερες των υπολογισμένων. Οι λόγοι για την απόκλιση αυτή εξηγούνται σε άλλη εργασία [8] και αφορούν την μοντελοποίηση με CFD αλλά και πιθανον απώλεια θερμότητας υπό την περιοχή του θερμοαισθητήρα που είναι κάτω από την επίπεδη (θερμικά μονωμένη) επιφάνεια καθώς και με αγωγιμότητα σε ακτινική διεύθυνση παράλληλα προς την επιφάνεια.

Περισσότερο αντιπροσωπευτική για την μελέτη της μετάδοσης θερμότητας εξ αιτίας της δέσμης θα ήταν μια πειραματική διάταξη με σταθερή θερμοροή σε ολόκληρη την πλάκα (ή τον κυλινδρό) και η ψύξη με μια ισόθερμη δέσμη. Κάτι τέτοιο όμως θα ήταν πολύ δαπανηρότερο από πειραματική άποψη και δεν προτιμήθηκε στην παρούσα εργασία. Το Σχ. 6 επίσης δείχνει ότι σύμφωνα με τους υπολογισμούς η ψύξη του θερμοαισθητήρα είναι καλύτερη καθώς η απόσταση αυξάνει πέραν του $h/D = 8$ ενώ τα πειράματα δείχνουν ότι η καλύτερη ψύξη επιτυγχάνεται για $4 \leq h/D \leq 8$. Τα αποτελέσματα του CFD περιορίζουν τις υψηλές θερμοκρασίες μόνο στην περιοχή του θερμοαισθητήρα, σύμφωνα με την οριακή συνθήκη ότι όλα τα άλλα τοιχώματα είναι αδιαβατικά, θα έπρεπε όμως το οριακό στρώμα που δημιουργείται ακτινικά γύρω από τον θερμοαισθητήρα στην περιοχή της δέσμης τοιχώματος (wall jet) να μεταδώσει θερμότητα με συναγωγή σε μια ευρύτερη περιοχή. Αυτό γίνεται αντιληπτό στα πειραματικά αποτελέσματα, όπου η ανύψωση της θερμοκρασίας διατηρείται σε ευρύτερη περιοχή ($|r/D| \approx 2$). Τέλος, επισημαίνεται ότι στα πειράματα που διεξήχθησαν γινόταν η μετακίνηση της δέσμης σε διάφορες θέσεις και ο θερμοαισθητήρας παρέμενε σταθερός. Τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά εάν υπήρχε πυκνό δίκτυο θερμοστοιχείων γύρω από τον θερμοαισθητήρα για την μέτρηση θερμοκρασιών επιφανείας σε κάθε θέση r , y ή z . Η διανομή μετάδοσης της θερμότητας πάνω στην επίπεδη πλάκα φαίνεται στο Σχ. 7 για κάθετη πρόσπτωση και $h/D = 4, 8, 12$. Ο ρυθμός αυτός εκφράζεται από ένα αριθμό Nusselt, που εδώ ορίζεται σαν $Nu = Q / (\lambda A (\partial\Theta / \partial x)_{x=0})$ όπου Q ($= 1.75 \text{ Watt}$) η θερμική ισχύς στον θερμοαισθητήρα, λ η θερμική αγωγιμότητα του αέρα ($= 0.0257 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$), A η επιφάνεια



Σχήμα 6. Μέσες θερμοκρασίες σε επίπεδη επιφάνεια



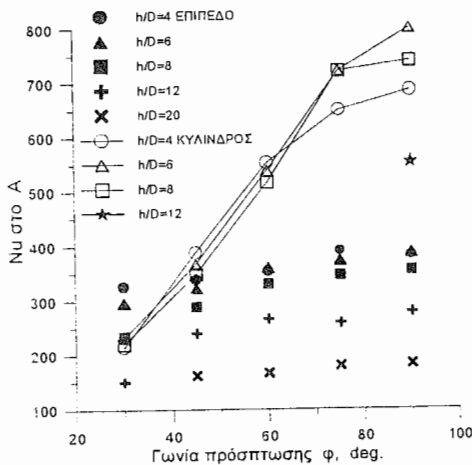
Σχήμα 7. Μεταβολή του αριθμού Nu σε επίπεδη επιφάνεια

στην οποία γίνεται η θερμική συναγωγή ($= \pi d_\theta^2/4$, όπου $d_\theta = 8, 4$ mm οι διάμετροι των θερμοαισθητήρων για επίπεδη πλάκα και κύλινδρο αντίστοιχα) και $d\theta/dx$ μια θερμοκρασιακή κλίση πάνω στην επιφάνεια. Η εύρεση του $d\theta/dx$ απαιτεί την πλήρη μέτρηση του θερμοκρασιακού οριακού στρώματος, πράγμα πολύ δύσκολο στην παρούσα περίπτωση. Για τον λόγο αυτό ο $Nu = (d\theta/dx)_{x=0} = (\theta_{wall} - \theta_{jet})/d\theta$. Οι αριθμοί Nu που προκύπτουν δεν είναι συμβατοί με αυτούς της βιβλιογραφίας, αλλά χρησιμεύουν για την σύγκριση της συμπεριφοράς της επίπεδης πλάκας και του κυλίνδρου. Έτσι λοιπόν το Σχ. 7 δείχνει ότι ο Nu δεν γίνεται πάντοτε μέγιστος ακριβώς στο σημείο ανακοπής (βλ. περίπτωση $h/D = 4$), πιθανώς επειδή στο A η διατμητική τάση, που συμβαδίζει γενικά με τον Nu, είναι μηδέν. Άλλοι λόγοι μπορεί να σχετίζονται με την χωρική δομή της τύρβης στην γειτονία του A. Παρόμοια συμπεριφορά αναφέρεται και από τους Cooper et al. [10]. Το Σχ. 8 παρουσιάζει την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης στον Nu του σημείου ανακοπής για επίπεδο και κύλινδρο. Σε όλες τις περιπτώσεις ο κεντρικός άξονας της δέσμης διέρχεται από τον θερμοαισθητήρα στο A. Για κάθετη πρόσπτωση, ο Nu γίνεται μέγιστος για $h/D \approx 6$. Για άλλες γωνίες ο Nu μπορεί να γίνει μέγιστος για διαφορετικό h/D και μάλιστα μπορεί να είναι και μεγαλύτερος από τον Nu για $\phi = 90^\circ$ (π.χ. για επίπεδη πλάκα και $\phi = 75^\circ$ ο Nu αποκτά την μέγιστη τιμή του αλλά για $h/D = 4$ και όχι 6 όπως στην περίπτωση $\phi = 90^\circ$). Παρόμοια συμβαίνουν και για κυκλικό κύλινδρο, για τον οποίο οι αριθμοί Nu εμφανίζονται αυξημένοι (σύμφωνα όμως με τον ορισμό που διατυπώθηκε προηγουμένως). Φαίνεται λοιπόν, πως για περιοχές πολύ κοντά στο σημείο ανακοπής, η κύρτωση της επιφάνειας οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης της θερμότητας. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με την διαπιστωμένη [5] αυξανόμενη κλίση της ταχύτητας παράλληλα στο τοίχωμα αλλά κοντά στο σημείο ανακοπής, δηλ. $(\partial V/\partial r)_{r \rightarrow 0}$ καθώς η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας στο A μικραίνει. Όπως προαναφέρθηκε, η κλίση αυτή σχετίζεται με την t_w και τον Nu.

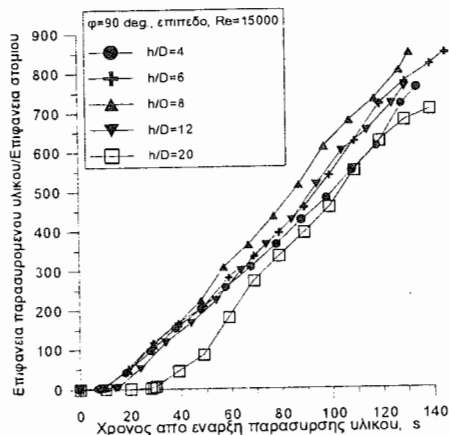
3.3. Μεταφορά μάζας με διάλυση από προσπίπτουσα δέσμη σε επίπεδο.

Η μεταφορά μάζας συσχετίστηκε με την διάλυση υδροχρώματος, που είχε αποθεθεί ομοιόμορφα σε επίπεδη επιφάνεια, εξαιτίας προσπίπτουσας δέσμης νερού. Τα πειράματα διεξήχθησαν μέσα σε μεγάλη δεξαμενή νερού και σε αριθμό $Re_j = 15000$. Η επίπεδη επιφάνεια του υδροχρώματος A_γ ήταν κυκλική, είχε διάμετρο $D_\gamma = 110$ mm, η δε διάμετρος του στομίου της δέσμης ήταν $D = 3.5$ mm. Στις εικόνες 1A και 1B φαίνεται η ποσότητα του υδροχρώματος

που έχει διαλυθεί (άσπρος κεντρικός δίσκος) για κάθετη πρόσπτωση με $h/D = 6$ και 20 ύστερα από έκθεση στην δέσμη για 59 sec και στις δυο περιπτώσεις. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών για διάφορες αποστάσεις και χρόνους παρουσιάζονται στο Σχ. 9.



Σχήμα 8. Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στον Nu στο σημείο ανακοπής Α

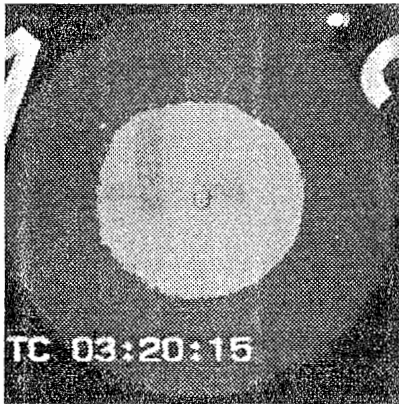


Σχήμα 9. Επίδραση της θέσης της δέσμης και του χρόνου έκθεσης στην μεταφορά μάζας

Οι μετρήσεις αυτές είναι στην ίδια λογική με εκείνες της μετάδοσης θερμότητας, δηλ. το μέγιστο της παρασυρόμενης μάζας συμβαίνει στην περιοχή $h/D = 8$, ενώ για χαμηλότερες ή υψηλότερες τιμές η μεταφορά είναι ασθενέστερη. Το γεγονός ότι εμφανίζεται ως βέλτιστη η τιμή $h/D = 8$ αντί της τιμής 6 (μετάδοση θερμότητας) μπορεί να οφείλεται στο ότι εδώ αποτιμάται η συνολική μεταφερόμενη μάζα σαν συνάρτηση του χρόνου και όχι σαν σταθερή μέση τιμή όπως στο θερμικό φαινόμενο. Επίσης φαίνεται ότι για μεγάλες αποστάσεις h/D όπου η δέσμη έχει αναπτυχθεί (π.χ. $h/D = 20$) η μεταφορά μάζας αρχικά καθυστερεί, κατόπιν προσεγγίζει τους ρυθμούς μεταφοράς για μικρά h/D (μεταφορά μέσω του δυναμικού πυρήνα) ενώ για μεγάλους χρόνους η μεταφορά μάζας εξασθενεί (δηλ. δεν παρασύρεται περαιτέρω μάζα με τον χρόνο). Φυσικά παρόμοια συμπεριφορά θα υπήρχε και για μικρότερα h/D αν η έκταση του δίσκου με το υδρόχρωμα ήταν μεγαλύτερη. Το γεγονός ότι στην εικόνα 1B η αλλαγή του χρώματος από τον κεντρικό δίσκο προς τα έξω γίνεται σταδιακά, υποδηλώνει ότι η ανεπτυγμένη δέσμη ($h/D = 20$) αφαιρεί υλικό πιο ομοιόμορφα από ότι μια εγγύς τοποθετημένη δέσμη ($h/D < 10$). Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στις περιπτώσεις όπου δεν είναι επιθυμητή η δημιουργία ισχυρών κλίσεων μεταφοράς μάζας στην ακτινική διεύθυνση.

3.4. Μεταφορά μάζας με φθορά απόξεσης (erosion) από προσπίπτουσα δέσμη σε κυλινδρικό δοκίμιο.

Η μεταφορά μάζας σχετίστηκε με το βάθος απόξεσης πάνω σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου $d = 25\text{mm}$. Η δέσμη αέρα προερχόταν από ειδικά σχεδιασμένο στόμιο με διάμετρο $D = 8\text{mm}$ και περιείχε κόκκους κορουνδίου μέσης διαμέτρου $200\ \mu\text{m}$. Ο αριθμός $Re_j = 36000$ (βασισμένος στην ταχύτητα του αέρα). Τα σωματίδια κορουνδίου είχαν πυκνότητα $3170\ \text{kg/m}^3$ και η παροχή τους ήταν $0.00185\ \text{kg/s}$. Τα πειράματα αυτά έγιναν στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Τμήματος Μηχανολόγων του ΑΠΘ. Στις εικόνες 2A και 2B εμφανίζεται η έκταση φθοράς (άσπρη περιοχή στο κέντρο της εικόνας) για $h/D = 8$ και $h/D = 16$ μετά από 16 min έκθεση στην διφασική αυτή ροή. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 9. Η



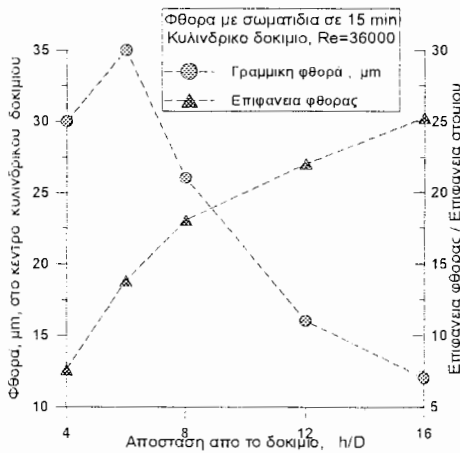
Παρασυρομένο υλικό για καθετη πρόσπτωση σε επίπεδο, $h/D=6$, 59 sec

Εικόνα 1A



Παρασυρομένο υλικό για καθετη πρόσπτωση σε επίπεδο, $h/D=20$, 59 sec.

Εικόνα 1B



Σχήμα 10. Επίδραση της θέσης της δέσμης στην φθορά δοκιμίου στο A και στην συνολική έκταση φθοράς

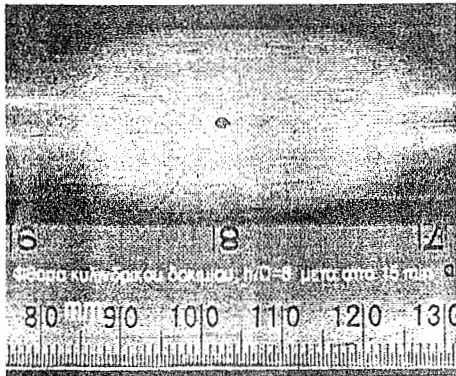
φθορά στο κέντρο του δοκιμίου στο σημείο ανακοπής μετρήθηκε από ειδική συσκευή μεγάλης

ακρίβειας. Παρατηρείται, όπως και στην περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας ότι το μέγιστο βάθος φθοράς εμφανίζεται για αποστάσεις $h/D \approx 6.0$. Αφ' ετέρου, η έκταση φθοράς προς το παρόν εκτιμήθηκε από την γενικώτερη αλλαγή του χρώματος του δοκιμίου. Προφανώς για ακριβέστερα συμπεράσματα χρειάζεται η μέτρηση του βάθους φθοράς σε ολόκληρο το δοκίμιο, πράγμα που δεν αναφέρεται στην παρούσα εργασία. Η ένταση της φθοράς αυξάνει με το h/D επειδή παρέχεται δυνατότητα στην δέσμη να διευρυνθεί πριν πλησιάσει το δοκίμιο.

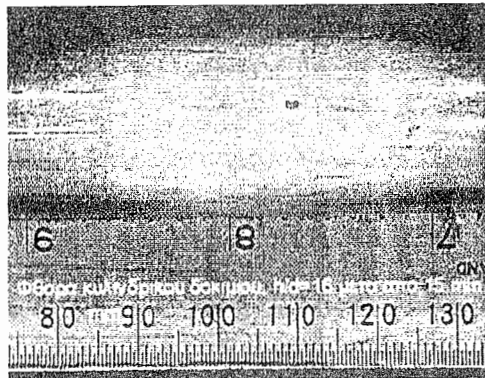
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

- Τα φαινόμενα μεταφοράς που προκαλούνται από αξονοσυμμετρικές δέσμες είναι εντονότερα σε αποστάσεις της τάξης μεγέθους του δυναμικού πυρήνα της δέσμης.
- Αυξημένοι ρυθμοί μεταφοράς στην επιφάνεια μπορούν να συμβαίνουν σε μικρή απόσταση από το σημείο ανακοπής.
- Μέγιστοι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας συμβαίνουν σε γωνίες πρόσπτωσης 75° έως 90° (κάθετη πρόσπτωση). Η ένταση της τύρβης και η δομή στην περιοχή του σημείου ανακοπής παίζουν ρόλο για την μεταφορά μάζας μέσω διάλυσης ή φθοράς. Επίσης παίζουν σημαντικό ρόλο οι πυκνότητες και οι συστάσεις των υλικών. Τα ανωτέρω δεν αλλάζουν στο πεδίο τιμών Re που εξετάστηκαν (15000 έως 75000).
- Οι κυρτές επιφάνειες παρουσιάζουν αυξημένους ρυθμούς μεταφοράς γύρω από την περιοχή του σημείου ανακοπής.

- ο Διαπιστώθηκε καλή συμφωνία των πειραματικών με υπολογιστικά αποτελέσματα από το λογισμικό FLUENT για πιέσεις και πολύ μέτρια συμφωνία για μετάδοση θερμότητας.



Εικόνα 2Α



Εικόνα 2Β

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Koopman R.N. Sparrow E.M. 1976 " Local and average transfer coefficients due to an impinging row of jets " Int. J. Heat Mass Transfer vol 19 pp 673-683
- [2] Popiel C.O. Meer van der T.H. Hoogendoorn C.J. 1980 " Convective heat transfer on a plate in an impinging round hot gas jet of low Reynolds number " Int. J. Heat Mass Transfer vol 23 pp 1055-1068
- [3] Foss J.F. Kleis S.J. 1976 " Mean flow characteristics for the oblique impingement of an axisymmetric jet " AIAA J. vol 14 No 6 pp 705-706
- [4] Ozdemir B. Whitelaw J.H. 1992 " Impingement of an axisymmetric jet on unheated and heated flat plates " Journ. Fluid Mech. vol. 240, pp 503-532
- [5] Donaldson C.D. Snedeker R.S. Margolis D.P " 1971 "A study of free jet impingement". Parts 1. and 2 " J. Fluid Mech. vol 45 . pp 281-319, pp 477-512
- [6] H. Stapountzis, A. Goulas, " S. Seitani, G. Xenopoulos, C. Salpistis, V. Zavalkou 1997 "Heat transfer of inclined impinging jets" , Proc. Eurotherm Seminar No 55, Santorini, Greece, K. Papailiou (Editor).
- [7] Καρροφύλης Γ. 1997 "Ανάπτυξη αντιδιαβρωτικών πολυστοιχειακών επιφανειακών επιστρώσεων", Διδ. Διατριβή, ΑΠΘ, Τμήμα Μηχανολόγων, Εργαστ. Μεταλλογνωσίας.
- [8] Ghikas A., Yakinthos K., Valougeorgis D., Stapountzis H. 1999 "Impingement of a circular jet on a heated flat surface" FLUENT Users Seminar, Sheffield, UK, Sept. 16-17.
- [9] Igarashi T. 1984 " Correlation between heat transfer and fluctuating pressure in separated region of a circular cylinder " Int. J. Heat Mass Transfer vol 27 No 6 pp 927-937
- [10] Cooper D., Jackson D.C., Launder B.E., Liao G.X., 1993, "Impinging Jet Studies for Turbulence Model Assessment, Part I, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 36, pp. 2675-2684, Part II., vol. 36, pp. 2685-2697