

Βελτιστοποίηση και εξοικονόμηση ενέργειας σε υφιστάμενα συστήματα καύσης με χρήση σύγχρονων ερευνητικών εργαλείων.

1. Εισαγωγή.

Συστήματα καύσης πολυφασικών (κυρίως διαφασικών) ροών, αναφέρονται στην ύπαρξη στερεών σωματιδίων ή σταγονιδίων ή φυσαλίδων (διακριτή φάση) σε μάζα υγρού ή αερίου ρευστού ή φλόγας (συνεχής φάση). Συναντώνται σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες, όπως:

- Καύση στερεών κόκκων π.χ. σε κλίβανο, σε βιομηχανική εστία, σε ρευστοποιημένη κλίνη.

- Εξάτμιση και καύση σταγόνων υγρού καυσίμου, π.χ. σε θαλάμους καύσης λεβήτων, θερμικών μηχανών, μηχανών εσωτερικής καύσης κλπ.

- Σήρανση με εκνέφωση, όπου ένα διασκορπιζόμενο υλικό σε υγρή μορφή ή με μεγάλο ποσοστό υγρασίας, έρχεται σε επαφή με θερμά αέρια, ξηραίνεται και το προϊόν κατακάθεται στη βάση του ξηρατήρα με μορφή πούδρας.

- Αφαίρεση στερεών ρύπων από αέρια διεργασίας, πριν καταλήξουν στην ατμόσφαιρα (π.χ. κινλάνες).

- Πνευματική μεταφορά (μεταφορά με αέριο ή υγρό μέσο).

Στο άρθρο αυτό, παρουσιάζονται συνοπτικά αποτελέσματα ερευνητικών έργων, που εκπονούνται ή έχουν πρόσφατα ολοκληρωθεί στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης, το οποίο είναι υπό θεσμοθέτηση και λειτουργεί αυτόνομα από το 1988 ως μη θερμοθετημένο εργαστήριο, στην περιοχή Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων του Τμήματος Μηχανολόγων - Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα βασικής έρευνας στην περιοχή των διαφασικών ροών και της καύσης, η οποία πραγματοποιείται, τόσο με πειραματικές όσο και με υπολογιστικές μεθόδους. Τα συμπεράσματα εφαρμόζονται άμεσα σε βιομηχανικές διεργασίες. Τα πειράματα πραγματοποιούνται σε απλές - βασικές γεωμετρίες, με χρήση οπτικών, μη παρεμβατικών μετρητικών τεχνικών, όπως

είναι η ανεμομετρία Laser Doppler και η ανεμομετρία φάσης Doppler. Παράλληλα, έχει αναπτυχθεί υπολογιστική μέθοδος (κώδικας 2PHASE) για την προσομοίωση τυρβωδών διαφασικών σωματιδιακών ροών υγρού - στερεού και αερίου - στερεού, με ταυτόχρονη καύση αερίων καυσίμων.

2. Σύντομη παρουσίαση μεθοδολογιών.

Στις βιομηχανικές διεργασίες με συστήματα διαφασικών ροών και καύσης, όπως αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι αναγκαία η μέτρηση ή/και η προσομοίωση των χαρακτηριστικών του πεδίου, για την ρύθμιση παραμέτρων της ροής που επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων και την κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα, σε ένα κινλάνο μέσω της μέτρησης ή της υπολογιστικής πρόλεξης του πεδίου ροής του ρευστού και των σωματιδίων, μπορεί να ελεγχθεί η ρύπανση της ατμόσφαιρας αλλά και ο βαθμός απόδοσης, σε περίπτωση μεταφοράς βιομηχανικού υλικού (π.χ. τοιμέντο), χρησιμοποιώντας ως ανάδραση (feedback), τις τιμές των μετρήσεων/ πρόλεξεων σε σύστημα αυτομάτου ελέγχου της διεργασίας.

Αναπροσωπευτική παρουσίαση συγχρόνων υπολογιστικών μεθοδολογιών, που χρησιμοποιούνται στις ενεργειακές διεργασίες, γίνεται στο άρθρο του καθ. Γ. Μπεργιλέ, που προηγείται του παρόντος. Περιοριζόμαστε εδώ στην παρουσίαση μόνο των αντιστοιχών παραματικών μεθοδολογιών.

2.1. Πειραματικές Μεθοδολογίες.

Βασικά μεγέθη που χρειάζεται να μετρηθούν σε μια διαφασική ροή, είναι η ταχύτητα των σωματιδίων, σταγόνων ή φυσαλίδων (διακριτή φάση), η ταχύτητα ρευστού (συνεχής φάση), το μέγεθος σωματιδίων και η συγκέντρωση σωματιδίων ή ροή μάζας. Επί πλέον, σε ένα σύστημα καύσης, απαιτούνται μετρήσεις του θερμοκρασιακού πεδίου, του ρυθμού ανάμειξης και καύσης του μείγματος

καυσίμου και οξειδωτικού και της σύστασης, συγκέντρωσης και ρυθμού παραγωγής των απαερίων (ρύπων).

Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραπάνω χαρακτηριστικών, έχουν γίνει με το χρόνο ταχύτερες, πιο ακριβείς αλλά και πιο σύνθετες. Στην περιοχή των συστημάτων καύσης και διαφασικών ροών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στον ταυτόχρονο προσδιορισμό συνδυασμού μεγεθών, όπως ταυτόχρονη μέτρηση της ταχύτητας και θερμοκρασίας ρευστού, του μεγέθους της ταχύτητας καθώς και της συγκέντρωσης σωματιδίων. Τα όργανα για την πραγματοποίηση των παραπάνω μετρήσεων, είναι σύνθετα και απαιτούν ειδικευμένο προσωπικό για την χρήση τους.

Οπτικές μη παρεμβατικές μετρητικές τεχνικές, βρίσκουν σήμερα ευρεία εφαρμογή στην μέτρηση μεγεθών της ροής, όπως το μέγεθος, η συγκέντρωση και η ροή μάζας σωματιδίων, η ταχύτητα, η θερμοκρασία κ.α., καθώς παρέχουν το πλεονέκτημα της μη διαταραχής της ροής και του φαινομένου. Ως προς την χωρική ανάλυση για την μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων, μπορούν να ορισθούν τρεις διαφορετικές μετρητικές προσεγγίσεις:

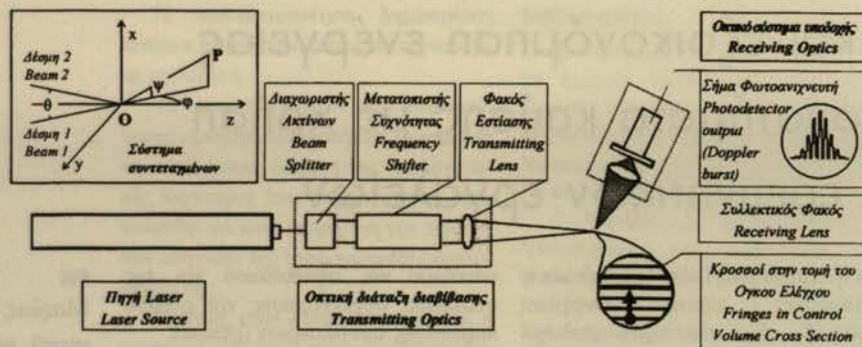
- Τοπικές μετρητικές τεχνικές, όπως η Ανεμομετρία Laser Doppler (Laser Doppler Anemometry - L.D.A), η Ανεμομετρία Φάσης Doppler (Phase Doppler Anemometry - P.D.A) και η Ταχυμετρία Σκιάς Doppler (Shadow Doppler Velocimetry - S.D.V.).

- Διδιάστατες τεχνικές, όπως η Ταχυμετρία Εικόνας Σωματιδίων (Particle Image Velocimetry - P.I.V) και τεχνικές αξονικής οπτικοποίησης.

- Τεχνικές πλήρους οπτικοποίησης του πεδίου ροής, όπως φωτισμός του πεδίου ροής με φύλλο φωτός laser, φωτισμός με διάχυτο φως, η μέθοδος Σκιαγράφησης (Shadowgraph), η μέθοδος Schlieren κλπ.

της

Μαρίας Φούντη,
αναπλ. καθηγήτριας
Τμ. Μηχανολόγων
Μηχανικών Ε.Μ.Π.



Σχήμα 1: Τυπική διάταξη ανεμομέτρου διπλής ακτίνας.

Σύγχρονες οπτικές μέθοδοι για την μέτρηση κατανομής μεγέθους σωματιδίων, είναι η μέθοδος ανεμομετρίας φάσης Doppler - η οποία δύναται να παρέχει ταυτόχρονα και πληροφορίες για την ταχύτητα των σωματιδίων - και η μέθοδος σκέδασης με χρήση laser, Laser Diffraction Method (LDM). Και οι παραπάνω δύο μέθοδοι, είναι μη παρεμβατικές και βασίζονται στα φαινόμενα σκέδασης, ανάκλασης και διάθλασης, τα οποία προκαλούνται από την συνάντηση φωτονίων με στερεά σωματίδια (σταγόνες ή φυσαλίδες). Σε σύγκριση με μηχανικές μεθόδους, οι οπτικές μέθοδοι, απαιτούν μικρούς χρόνους για την ανάλυση των δειγμάτων, δεν απαιτούν συγκριτική ρύθμιση και μπορούν να παρέχουν αποτελέσματα με καλή ακρίβεια.

Η Ανεμομετρία Laser Doppler, βασίζεται στην μετατόπιση Doppler της συχνότητας του φωτός, το οποίο σκεδάζεται από μικρά σωματίδια που κινούνται μέσα σε μια ροή. Χρησιμοποιώντας πολύ μικρά σωματίδια, που ακολουθούν

πιστά την ροή, μπορεί να καθορισθεί η ταχύτητα του ρευστού. Σε διαφανείς ροές, όπου συνυπάρχουν σωματίδια/φυσαλίδες διαφορετικού μεγέθους, μπορεί να καθορισθεί και να διακριθεί η ταχύτητα, τόσο της συνεχούς όσο και της διάσπαρτης φάσης, με κατάλληλα διαμορφωμένα συστήματα.

Προκειμένου να επιτευχθούν μετρήσιμες συχνότητες, απαιτείται η συμβολή δύο κυμάτων φωτός, με διαφορετικές διαδρομές. Στην πιο κοινή διάταξη (ανεμομέτρο δύο ακτίνων, Σχήμα 1) δύο ακτίνες laser, εστιάζονται στο σημείο μέτρησης. Ένας φακός υποδοχής συλλέγει το φως που σκεδάζεται από τα σωματίδια που διέρχονται από την τομή των δύο ακτίνων, σ' έναν φωτοανιχνευτή (συνήθως έναν φωτοπολλαπλασιαστή, ή μια φωτοδιόδο χιονοστιβάδας). Η επεξεργασία των σημάτων, επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους, όπως η καταμέτρηση συχνότητων ή τεχνικές που βασίζονται στον ταχύ μετασχηματισμό Fourier (F.F.T.). Τα σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας, επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας, ακόμα και από σήματα χαμηλής ποιότητας (π.χ. υψηλού θορύβου, χαμηλής έντασης) και υψηλής συχνότητας (π.χ. 150 MHz). Η μέτρηση και των τριών συστατικών της ταχύτητας, είναι δυνατή με την χρησιμοποίηση πολυακτινικών συστημάτων. Η προβλεπόμενη αύξηση της χρήσης των διόδων laser, θα οδηγήσει σε πιο εύχρηστα και ελαφριά συστήματα, ενισχύοντας

την εφαρμογή αυτών των τεχνικών.

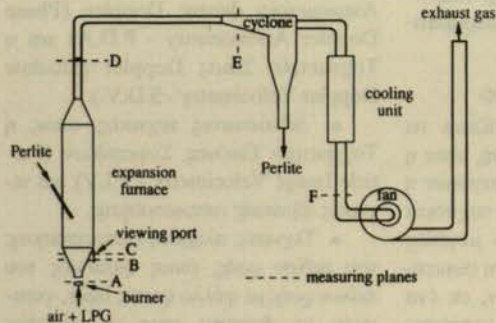
Η ανεμομετρία φάσης Doppler, επεκτείνει την ικανότητα του συστήματος L.D.A. σε ταυτόχρονες μετρήσεις ταχύτητας και μεγέθους των σκεδαζόντων σωματιδίων. Η πιο κοινή διάταξη, είναι αυτή που μοιράζεται το ίδιο σύστημα οπτικών διαβίβασης, με το σύστημα δύο ακτίνων του L.D.A. Το οπτικό σύστημα υποδοχής, περιλαμβάνει δύο τουλάχιστον φωτοανιχνευτές μ' έναν κοινό φακό, του οποίου η θέση υπαγορεύεται από την εκτελούμενη μέτρηση. Το σκεδαζόμενο φως από τον όγκο μέτρησης, συλλέγεται από έναν μόνο φακό υποδοχής και εστιάζεται σε ένα χωρικό φίλτρο, το οποίο έχει συνήθως την μορφή κατακόρυφης σχισμής και είναι κοινό για όλους τους χρησιμοποιούμενους φωτοανιχνευτές. Κάθε φωτοανιχνευτής, χάρη στη χρησιμοποίηση κατάλληλης διάταξης μάσκας, δέχεται φως από μία ξεχωριστή περιοχή του φακού υποδοχής. Οι δύο αυτές οπές, απέχουν συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους.

Οι τεχνικές αυτές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την ανάλυση συστημάτων καύσης και διαφανικών ροών, για δύο λόγους. Πρώτον, διότι είναι μη παρεμβατικές και δεν αλλοιώνουν την ροή, στην οποία το κυρίαρχο πρόβλημα είναι η αλληλεπίδραση της συνεχούς φάσης με το ξένο σώμα, που αποτελεί η διάσπαρτη φάση και δεύτερον, διότι δίνουν ταυτόχρονα πληροφορίες για την ταχύτητα των δύο φάσεων και για το μέγεθος και τη συγκέντρωση της διάσπαρτης φάσης. Το γεγονός ότι παρέχουν ακριβείς τοπικές μετρήσεις με υψηλή απόκριση συχνότητας, τους δίνει σημαντικό πλεονέκτημα στην έρευνα ρευστών-ροών. Επίσης, η αξιοπιστία, η ευκολία στην χρήση, καθώς και η αντοχή που παρουσιάζουν τα σύγχρονα όργανα, καθιστούν αυτές τις μεθόδους εφαρμόσιμες πλέον και στο βεβαρημένο και απαιτητικό περιβάλλον μιας βιομηχανίας.

3. Αποτελέσματα ερευνητικών δραστηριοτήτων.

3.1. Μελέτη και βελτιστοποίηση διεργασίας διάγνωσης περλίτη σε βιομηχανικούς φούρνους.

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος, διερευνήθηκε η καύση σε κάβετες βιομηχανικές εστίες και έγινε προσομοίωση της λειτουργίας βιομηχανικής εστίας, που χρησιμοποιείται στη διεργα-



Σχήμα 2: Τυπική μονάδα διάγνωσης περλίτη.

οία διόγκωσης περιλίτη.

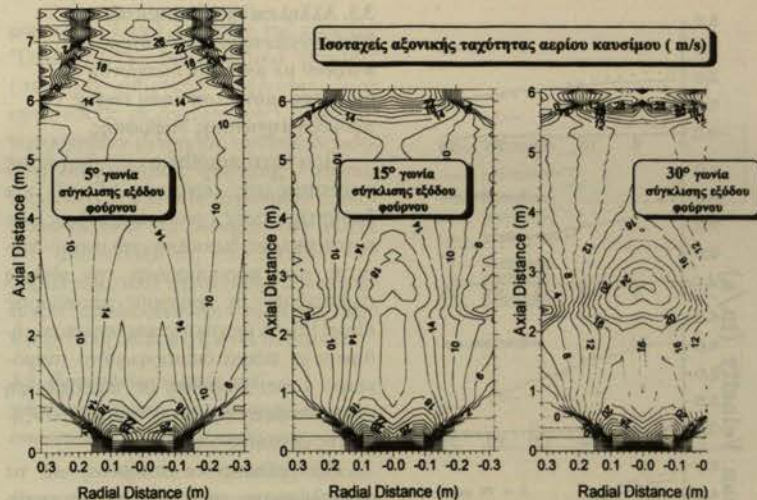
Η διόγκωση του περιλίτη, επιτυγχάνεται με απότομη θέρμανσή του, σε κατάλληλο σημείο της περιοχής μαλακάνσεως, που κυμαίνεται από 871 °C έως 1093 °C (ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε κάλιο και νάτριο). Η διόγκωση γίνεται συνήθως, σε κατακόρυφους σταθερούς φούρνους (Σχήμα 2). Ο καυστήρας τοποθετείται στη βάση του φούρνου. Το καύσιμο είναι συνήθως πετρέλαιο ή LPG. Τα καυσαέρια διαφεύγουν ανερχόμενα από την κορυφή της στήλης του φούρνου. Ο περιλίτης τροφοδοτείται από πλευρικά σημεία του φούρνου, πάνω από τον καυστήρα. Έτσι, ο περιλίτης καθώς θερμαίνεται, διογκώνεται και μεταφέρεται από τα ανερχόμενα καυσαέρια, προς την έξοδο του φούρνου.

Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας 2PHASE [1] για τη προσομοίωση της καύσης και την κίνηση των σωματιδίων στο φούρνο διόγκωσης. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας διόγκωσης, προέκυψαν από μετρήσεις και χρησιμοποιήθηκαν ως συνθήκες εισόδου, για τη μοντελοποίηση της καύσης, της διεργασίας διόγκωσης των σωματιδίων του περιλίτη, καθώς και την πρόβλεψη των τροχιών του περιλίτη, εντός της εστίας.

Αναπτύχθηκε μοντέλο καύσης με χρήση του Eddy Mixing Control Model για τον προσδιορισμό του ρυθμού αντίδρασης της καύσης [2]. Λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά θερμότητας με αεριοβολία και συναγωγή στα συστατικά του αερίου μίγματος (καύσιμο, οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμός) και στα διακριτά σωματίδια. Η διόγκωση κάθε διακριτού σωματιδίου, λαμβάνει χώρα κατά την διάρκεια της κίνησής του μέσα στον φούρνο διόγκωσης. Για την μοντελοποίηση της διόγκωσης, λαμβάνεται υπόψη η χημική σύσταση του περιλίτη και η σταδιακή μεταβολή της κατανομής της θερμοκρασίας εντός του σωματιδίου, λόγω αγωγής, συναγωγής και αεριοβολίας.

Έγινε πρόβλεψη του πεδίου ταχύτητων (Σχήμα 3) [3,4], θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων για διάφορες γεωμετρικές και συνθήκες λειτουργίας του φούρνου διόγκωσης. Με βάση τους υπολογισμούς, παρουσιάστηκαν στατιστικά αποτελέσματα παραγωγής διογκωμένου περιλίτη για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του φούρνου διόγκωσης.

Οι προβλέψεις παραγωγής, συγκρίθηκαν με επιτυχία με πειραματικά δεδο-



Σχήμα 3: Ισοταχείς αξονικών ταχυτήτων για τρεις διαφορετικές γωνίες εξόδου του φούρνου διόγκωσης περιλίτη.

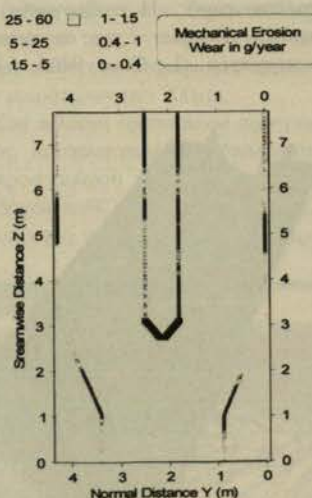
μένα και αποδείχθηκε ότι το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε, δύναται να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση της διεργασίας διόγκωσης περιλίτη, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και την αύξηση της παραγωγής.

3.2. Χαρακτηριστικά μεταφοράς κονιοποιημένου λιγνίτη στους αγωγούς προσαγωγής σε ΑΗΣ.

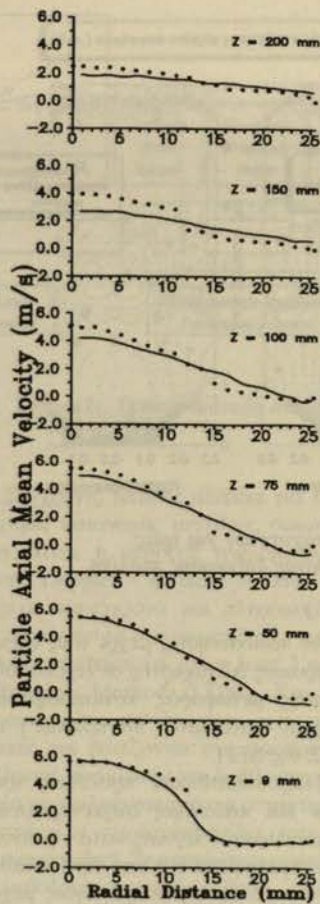
Στην συγκεκριμένη μελέτη, εξετάστηκε το τμήμα από την κατάθλιψη του

μύλου κονιοποίησης, μέχρι τους φηγοκεντρικούς διαχωριστές σε διχλωτούς σχετούς μεταφοράς κονιοποιημένου στερεού καυσίμου ("παντελόνια") σε ΑΗΣ της ΔΕΗ.

Παρουσιάστηκαν προλέξεις τροχιών και κατανομή συγκεντρώσεων κονιοποιημένου λιγνίτη, κατά την πνευματική μεταφορά του από την κατάθλιψη του μύλου αμμοπαραγωγού, μέχρι τους καυστήρες, Σχήμα 4 [5]. Ο σχετός εισαγωγής του κονιοποιημένου καυσίμου, προσομοιάζεται ως διακλάδωση με σύστημα ομοκέντρων αγωγών. Η έμφαση δίδεται στην πρόβλεψη του ποσοστού της μηχανικής διάβρωσης που προκαλείται στα διάφορα τμήματα του αγωγού προσαγωγής καυσίμου, λόγω της σύγκρουσης του κονιοποιημένου λιγνίτη με τα τοιχώματα των αγωγών. Χρησιμοποιήθηκε ο εμπειρικός τύπος των Tabakoff and Hamed (1977), που συσχετίζει την διάβρωση με το μέτρο και την γωνία της ταχύτητας πρόσπτωσης, καθώς και με το υλικό των σωματιδίων και του σωλήνα. Το μοντέλο προσομοίωσε στον διαφανικό κώδικα 2PHASE. Από την υπολογιστική προσομοίωση της αερομεταφοράς του κονιοποιημένου λιγνίτη, προέκυψε ότι η μέγιστη φθορά, παρουσιάζεται στο σημείο όπου ο σχετός διακλαδίζεται σε δύο σκέλη. Η θέση αυτή της μέγιστης φθοράς, δικαιολογείται από το γεγονός ότι, στην περιοχή αυτή, η καμπυλότητα των γραμμών ροής της αέριας φάσης



Σχήμα 4: Πρόβλεψη μηχανικής διάβρωσης σε διχλωτούς σχετούς μεταφοράς κονιοποιημένου στερεού καυσίμου σε ΑΗΣ της ΔΕΗ.



Σχήμα 5: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε αγωγό με απότομη αύξηση.

(μίγμα καυσαερίων και θερμού αέρα), είναι αυξημένη. Συνεπώς, τα σωματίδια του λιγνίτη, αδυνατούν λόγω της αδρανείας τους να ακολουθήσουν την καμπυλότητα αυτή και καταλήγουν να συγκροτούνται με μεγάλη ταχύτητα, πάνω στα τοιχώματα του οχετού. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και σε άλλα σημεία των οχετών. Γενικά, τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν:

α) τη σημασία της δυνατότητας πρόληψης της μηχανικής διάβρωσης, έτσι ώστε, να προληφθεί καταστροφή των αγωγών και να γίνει έγκαιρη αντικατάστασή τους,

β) ότι η διαμόρφωση της γεωμετρίας των αγωγών, είναι καθοριστική για την κατανομή της ροής μάζας του κοινοποιημένου καυσίμου, με άμεσες επιπτώσεις στη λειτουργία της εστίας.

3.3. Αλληλεπίδραση σωματιδίων αξονοσυμμετρικές ροές υγρού - στερεού με απότομη διεύρυνση διατομής - μοντελοποίηση τύρβης - πρόλεξη μηχανικής διάβρωσης.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας της συνεχούς (diesel) και διακριτής φάσης (γυάλινες χάνδρες), σε εργαστηριακή διαφανή ροή υγρού-στερεού, που προσομοιώνει την κίνηση σωματιδίων σε αγωγούς μεταφοράς diesel [6]. Οι μετρήσεις παραγματοποιήθηκαν με ειδικά διαμορφωμένο ανεμόμετρο Laser-Doppler, σε κατακόρυφη αξονοσυμμετρική ροή με απότομη αύξηση της διατομής του αγωγού.

Εξετάσθηκαν οι συνέπειες και τα αποτελέσματα της αύξησης του αριθμού των διασωματιδιακών συγκρούσεων, που προκαλούνται μεταξύ των σωματιδίων υπό συνθήκες ημι-πυκνής διαφανής ροής (3% και 5% ογκομετρική πλήρωση). Μετρήθηκε το μήκος επανακόλλησης της περιοχής ανακυκλοφορίας της ροής και τα χαρακτηριστικά της διασποράς των σωματιδίων.

Το ανεμόμετρο Laser-Doppler που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ταχύτητας, περιλαμβάνει ένα 50 mW He-Ne laser, έναν TSI οπτικό ρυθμιστή με διπλά κύτταρα Bragg για μετατόπιση συχνότητας και σύστημα φακών εστίασης. Ένας φακός συλλογής και μία φωτοδίοδος χιονοσταβάδας, χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή του σκεδαζομένου φωτός. Η επεξεργασία των σημάτων Doppler έγινε σε ψηφιακό καταγραφέα (Le-Croy 9400 A) με

συχνότητα ψηφιοποίησης 12.5 MHz. Ο υπολογισμός της συχνότητας κάθε σήματος, επετεύχθη με χρήση λογισμικού με ταχύ μετασχηματισμό Fourier (FFT). Οι φάσεις διαχωρίστηκαν με συνεχή έλεγχο του εύρους των σημάτων, καθώς τα μεγαλύτερα στερεά σωματίδια, αποδίδουν σήματα υψηλότερου εύρους από τα μικρότερα σωματίδια, που ακολουθούν πιστά την υγρή φάση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα, έδειξαν ότι τα σωματίδια καινούνται με υψηλότερες αρνητικές ταχύτητες απ' ό,τι το μεταφέρον ρευστό μέσα στην περιοχή της ζώνης ανακυκλοφορίας. Αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων, προκαλεί αύξηση της διακύμανσης τους στην περιοχή ανακυκλοφορίας και κυρίως, στα τοιχώματα του σωλήνα, όπου τα μεγέθη της τύρβης τείνουν να διατηρήσουν τις μονοφασικές τιμές τους. Η διασπορά των σωματιδίων επηρεάζεται από αυξήσεις της συγκέντρωσής τους στον κεντρικό πυρήνα της ροής, κοντά στο επίπεδο εισόδου και κατά την διεύθυνση της ροής, στην περιοχή επανακόλλησης της ροής. Αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων, προκάλεσε μεταβολή του σημείου επανακόλλησης, σε σχέση με την μετρούμενη τιμή για την αντίστοιχη μονοφασική ροή

Αξιολογήθηκε η συμπεριφορά τριών μοντέλων τύρβης [7], του βασικού μοντέλου δύο εξισώσεων (Standard k-ε), του τροποποιημένου μοντέλου RNG του βασικού k-ε, μοντέλο δύο-κλιμάκων k-ε, (two-scale model) και του μοντέλου ανώτερης τάξης, το οποίο υπολογίζει τάσεις Reynolds, (Reynolds Stress Model των Launder Reece and Rodi). Η απόδοση των παραπάνω μοντέλων τύρβης, κρίθηκε σε σχέση με τις παραμέτρους μη-ισορροπίας η και kp/kt , τη μέση παραμόρφωση της ροής (mean strain of the flow), S και τον τυρβώδη αριθμό Reynolds, Ret. Συγκρίνοντας τις πειραματικές και υπολογιστικές τιμές των η, Ret and S, αποδεικνύεται ότι μόνο τα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά της ροής δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το μοντέλο δύο-κλιμάκων k-ε βασίζεται στον ρεαλιστικό -από φυσικής άποψης- διαχωρισμό του φάσματος της τύρβης, σε περιοχές παραγωγής και καταστροφής τύρβης και αποδεικνύεται ότι έχει τη δυνατότητα πρόλεξης των



Σχήμα 6: Ενδεικτικές τροχιές σωματιδίων.

παραπάνω παραμέτρων, με τη μεγαλύτερη ακρίβεια ανάμεσα στα μοντέλα δύο εξισώσεων. Το μοντέλο υψηλότερης τάξης, παράγει αποτελέσματα με τη μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά είναι κατά μέσο όρο, περίπου, πέντε φορές πιο αργό από τα μοντέλα δύο εξισώσεων.

Έγινε πρόλεξη του διαφαικού πεδίου ροής [8] diesel-σωματιδίων γναλιού και σύγκριση των υπολογισμών με τις πειραματικές μετρήσεις (Σχήμα 5 και 6). Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του κώδικα 2PHASE (Euler - Lagrange) [8] και θεωρήθηκαν οι δυνάμεις διατμητικής άνωσης, περιστροφικής άνωσης (rotational lift), αεροδυναμικής αντίστασης και βαρύτητας, οι επιδρούσες επάνω σε ένα σωματίδιο. Μοντελοποιήθηκε η διάχυση των σωματιδίων λόγω τύρβης και οι συγκρούσεις σωματιδίων με τα τοιχώματα του αγωγού. Οι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση τροποποιημένου μοντέλου $k - \epsilon$, το οποίο λαμβάνει υπόψη του την καμπυλότητα των γραμμών της ροής. Οι αρχικές συνθήκες του πεδίου ροής, που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς, βασίστηκαν στα πειραματικά αποτελέσματα.

Αναπτύχθηκε πρωτότυπο υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης διαφαικής ροής, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις διασωματιδιακές συγκρούσεις και στήριζεται στην ταυτόχρονη παρακολούθηση όλων των σωματιδίων που κινούνται μέσα στο πεδίο. Από την εφαρμογή του μοντέλου, προέκυψε ότι, η προσομοίωση των διασωματιδιακών συγκρούσεων, βοηθά στην ορθότερη εκτίμηση των τυρβωδών διαταραχών της ταχύτητας των σωματιδίων.

Έγινε εκτίμηση μηχανικής διάβρωσης, που υφίστανται τα τοιχώματα αγωγών μεταφοράς υγρών καυσίμων, λόγω των συγκρούσεων των περιεχομένων στερεών σωματιδίων, με τα τοιχώματα αυτά [9]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το σημείο επανακόλλησης της ροής, ουσιαστικά καθορίζει την κατανομή της διάβρωσης κατά μήκος του τοιχώματος.

3.4. Πειραματική διερεύνηση κίνησης σωματιδίων σε μοντέλο μύλου κωνιοποίησης λιγνίτη.

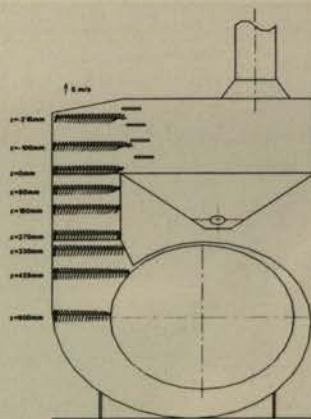
Πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση [10, 11] σωματιδιακής κίνησης σε μοντέλο μύλου κωνιοποίησης λιγνίτη, με χρήση του συστήματος ανε-

μομετρίας Laser Doppler της εταιρίας "DANTEC" με την ονομασία "flowlite" (σύστημα οπίσθιας σκέδασης, μιας συνιστώσας με οπτικές ίνες). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συνθηκών εισόδου, σωματιδιακής φόρτισης / συγκεντρώσεων και πεδίου ταχυτήτων σε διάφορα επίπεδα και διατομές του μύλου. Τα αποτελέσματα, πιστοποιούν τα χαρακτηριστικά της κίνησης των σωματιδίων και υποδεικνύουν περιοχές όπου η μηχανική διάβρωση είναι αυξημένη.

3.5. Προσομοίωση ροής και χαρακτηριστικών διαχωρισμού σωματιδίων σε δοχεία καθίζησης.

Σε συστήματα πνευματικής αερομεταφοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία για τη μεταφορά κοινωδών υλικών, οι κόκκοι του υλικού βρίσκονται σε αιώρηση, "παρασυρόμενοι" από ρεύμα αερίου, το οποίο κινείται εντός κλειστού αγωγού. Κατά τη διάλυση ενός διαφαικού μείγματος από ένα δοχείο καθίζησης, η ταχύτητα του ρευστού μειώνεται, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε τα σωματίδια, κινούμενα κατά κύριο λόγο υπό την επίδραση του πεδίου βαρύτητας, να εγκαταλείπουν την κύρια ροή, "καθίζοντας" στον πυθμένα του δοχείου, ενώ το ρευστό εξέρχεται από την άνω πλευρά του. Βασικά πλεονεκτήματα των δοχείων καθίζησης, είναι η φθηνή και απλή κατασκευή τους και η χαμηλή πτώση πίεσης που επιβάλλουν στο ρεύμα των αερίων. Σημαντικότερο μειονέκτημά τους, εντοπίζεται στην μειωμένη ικανότητα διαχωρισμού σωματιδίων μικρότερων των 200 μm .

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος, πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση του πεδίου ροής σε ένα δοχείο καθίζησης, με στόχο την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του, προ-



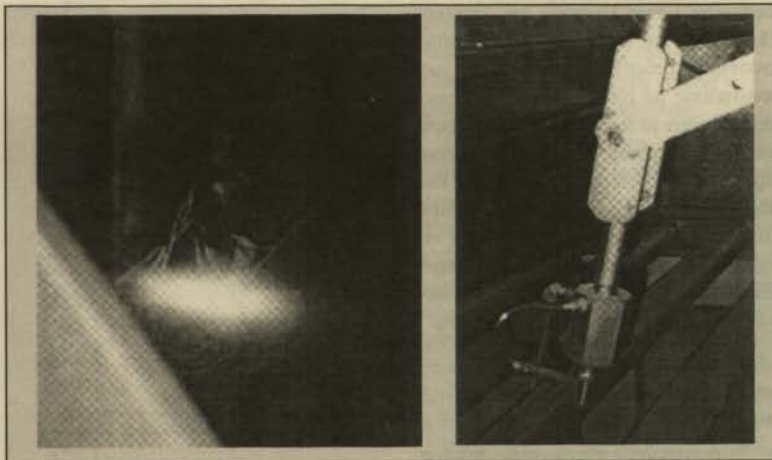
Σχήμα 7: Μετρήσεις διανυσμάτων ταχύτητας σε μοντέλο μύλου κωνιοποίησης.

κειμένου να καλύπτει τις απαιτήσεις συγκεκριμένης βιομηχανικής εφαρμογής διαχωρισμού των "μεγάλων" σωματιδίων από ένα ρεύμα πνευματικής αερομεταφοράς κόκκων διογκωμένου περλίτη.

Οι αριθμητικοί υπολογισμοί έγιναν με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικότερων λειτουργικών χαρακτηριστικών του δοχείου και την παραμετρική μελέτη αυτών, στοχεύοντας στην βελτιστοποίηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του. Σχεδιάστηκε δοχείο καθίζησης βαρυνικού διαχωρισμού στερεών σωματιδίων, το οποίο είναι ικανό να "συγκρατεί" κόκκους διαμέτρου άνω του 1 mm, ενώ οι μικρότεροι εξέρχονται από τη συσκευή, αιωρούμενοι σε ρεύμα αερομεταφοράς. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση του σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών συγκράτησης του δοχείου καθίζησης και πρόκειται να επα-



Σχήμα 8: Τροχιές σωματιδίων εντός δοχείου καθίζησης.



Σχήμα 9: Διάταξη διεργασίας για επιφανειακή κατεργασία ή κοπή στερεών επιφανειών.

ληφθούν με παραματικά δεδομένα από την βιομηχανική εγκατάσταση.

3.6. Βιομηχανικές φλόγες προανάμιξης τύπου δέσμης με πρόσκρουση σε στερεή επιφάνεια.

Μελετήθηκαν βιομηχανικές φλόγες προανάμιξης τύπου δέσμης με πρόσκρουση σε στερεή επιφάνεια, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος της Μονάδας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών (καθ. Ν. Μαρκάτος). Η συγκεκριμένη διεργασία (Σχήματα 9 και 10) χρησιμοποιείται ευρύτατα για την επιφανειακή κατεργασία ή κοπή στερεών επιφανειών. Ενώ η ροή έχει μελετηθεί εκτενώς την τελευταία δεκαετία, η καύση υπό πρόσκρουση είναι αντικείμενο τρέχουσας έρευνας.

Εξετάστηκε υπολογιστικά η επίδραση της πίεσης και της γωνίας πρόσκρουσης στην απόδοση της συγκεκριμένης διεργασίας. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η αλληλεπίδραση των μηχανισμών (χημική αντίδραση και τυρβώδης ανάμιξη), που ελέγχουν την καύση αερίου μίγματος τύπου προανάμιξης, σε διαφορετικές ολικές πιέσεις.

Η μαθηματική θεμελίωση, περιλαμβάνει την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων διατήρησης συνέχειας, ορμής, ενέργειας και χημικών συστατικών, με χρήση των ακολούθων μοντέλων: Χρησιμοποιείται το τυρβώδες μοντέλο RNG k-ε, ενώ η καύση περιλαμβάνει και τους δύο βασικούς μηχανισμούς που ελέγχουν το φαινόμενο, δηλαδή την τυρ-

βώδη ανάμιξη, με χρήση του μοντέλου διάσπασης των δινών Eddy-Break-up και τη χημική αντίδραση, με χρήση χημικής κινητικής πρώτης τάξης κατά Arrhenius, ενώ λαμβάνεται υπόψη και η τοπική οβέση της φλόγας, εξ' αιτίας της μεγάλης καμπυλότητας των γραμμών ροής, με ανάπτυξη ενός μοντέλου που βασίζεται σε πειραματικές μετρήσεις και η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, με χρήση του μοντέλου των έξι ανηρμένων ροών. Σε κάθε υπολογιστικό κελί, ο ελάχιστος ρυθμός είναι αυτός που ελέγχει την καύση. Η επίλυση γίνεται με χρήση μεθοδολογίας όγκων πεπερασμένου ελέγχου (κώδικας PHOENICS), ενώ οι προβλέψεις συγκρίνονται με πειράματα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

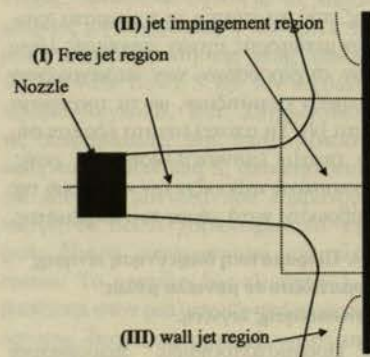
Η αύξηση της πίεσης του μίγματος των αναδρόντων από 0.1 σε 0.5 MPa (Σχήμα 11) [12,13,14,15] οδηγεί τη φλόγα σε μείωση του πάχους της και της ταχύτητας διάδοσής της, σε αλλαγή της βαρύτητας των μηχανισμών ελέγχου της καύσης με αύξηση της επίδρασης του μηχανισμού της τυρβώδους ανάμιξης των μεγίστων θερμοκρασιών και ρυθμών καύσης. Σε ατμοσφαιρική πίεση 0.1 MPa ένα σημαντικό μέρος της καύσης ελέγχεται από τη χημική αντίδραση ενώ η καύση λαμβάνει μέρος κατά μήκος όλου του θαλάμου καύσης. Με αύξηση της πίεσης σε 0.3 MPa η καύση συρρικνώνεται προς την είσοδο του θαλάμου καύσης, ενώ ο μηχανισμός της χημικής αντίδρασης, ελέγχει λιγότερο την καύση, δηλαδή γίνεται σημαντικός ο μηχανισμός της τυρβώδους ανάμιξης.

Παρατηρείται αύξηση των μεγίστων τιμών θερμοκρασίας και ρυθμών καύσης, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Περαιτέρω αύξηση της πίεσης στα 0.5 και 0.7 MPa, οδηγεί την καύση σε πλήρη έλεγχο από τον μηχανισμό της τυρβώδους ανάμιξης και σε περαιτέρω συρρίκνωση της φλόγας προς την είσοδο του θαλάμου καύσης, με αντίστοιχη αύξηση των μεγίστων τιμών θερμοκρασίας και ρυθμών καύσης.

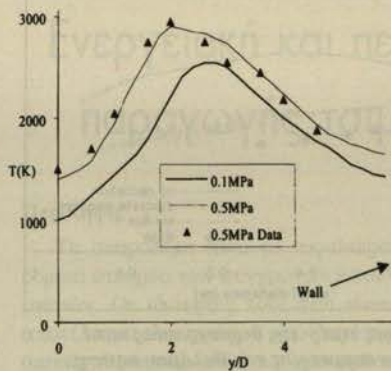
Βασικό συμπέρασμα είναι ότι, οι δύο τελευταίες περιπτώσεις, δίνουν ίδιας τάξης μέγεθος ρυθμών καύσης, το οποίο αντιστοιχεί και σε ίδια σχεδόν κατανομή θερμοκρασιών, δηλαδή δεν βελτιώνεται η απόδοση της καύσης με περαιτέρω των 0.7 MPa πίεση, διότι από την ολική πίεση αυτή και μετά, η φλόγα είναι πάντα ελεγχόμενη από τον μηχανισμό της τυρβώδους ανάμιξης.

Η αλλαγή της γωνίας από 90° σε 30° οδηγεί σε μείωση των θερμοκρασιών κοντά στην στερεή επιφάνεια, διότι η μη συμμετρία της φλόγας και των γραμμών ροής, αυξάνει τοπικά την οβέση της φλόγας.

Τέλος, αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο καύσης προανάμιξης, για τη μελέτη φλόγας, τύπου δέσμης, με πρόσκρουση σε στερεή επιφάνεια γρανίτη. Για να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές δομές της τυρβώδους φλόγας που μπορεί να προκύψουν εξαιτίας της πρόσκρουσης (τρεις βασικοί τύποι φλογών: παχιές φλόγες, φλόγες που ανήκουν στην ενδιάμεση περιοχή, με ζαρωμένο μέτωπο και φλόγες ζαρωμένες), χρησιμοποιείται το μαθηματικό θεώρημα KPP, το οποίο συνδέει τη βασική παράμετρο, τυρβώδη ταχύτητα καύσης, με την πρώτη παράγωγο του



Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση της ροής.



Σχήμα 11: Επίδραση της πίεσης στην κατανομή θερμοκρασιών κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της δέσμης.

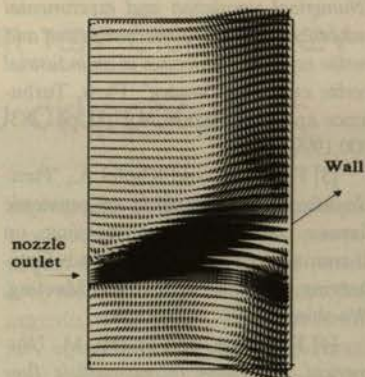
μέσου ρυθμού καύσης ως προς μία μεταβλητή ένδειξη, που είναι η συγκέντρωση καυσίμου. Η έκφραση στη συνέχεια της τυρβώδους ταχύτητας καύσης, συναρτήσει των δύο χαρακτηριστικών κλιμάκων χρόνου, που δηλώνουν και τους δύο βασικούς μηχανισμούς που ελέγχουν την καύση, δηλαδή της χαρακτηριστικής κλιμακίας χρόνου της χημικής αντίδρασης καύσης και της κλιμακίας χρόνου ζωής των χαρακτηριστικά μεγάλων δινών, δίνει με ολοκλήρωση την τελική έκφραση του μέσου ρυθμού καύσης, συναρτήσει του αριθμού Damkohler, Da , που είναι ο χαρακτηριστικός αριθμός που εκπαίει την εσωτερική δομή της φλόγας, βάσει του διαγράμματος Borghi.

Το συγκεκριμένο μοντέλο καύσης, χρησιμοποιείται μαζί με το τυρβώδες μοντέλο δύο εξισώσεων RNG k-ε, το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία των έξι ανηγμένων ροών και μοντέλο που υπολογίζει τοπικά τη θβέση της φλόγας, για την πρόγνωση της βιομηχανικής διεργασίας, όπου φλόγα προσκρούει σε στερεή επιφάνεια γρανίτη υπό ορθή γωνία (Σχήμα 12). Χρησιμοποιούνται δύο υπερστοιχειομετρικά μίγματα αναδρώντων προπανίου-οξυγόνου και φυσικού-αερίου οξυγόνου και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και οι δύο φλόγες που προκύπτουν από την πρόσκρουση, ανήκουν στην περιοχή των ζαρωμένων φλογών, δηλαδή ο βασικός μηχανισμός που ελέγχει την καύση είναι η τυρβώδης ανάμειξη, ενώ οι κατανομές θερμοκρασιών και μέσων ρυθμών καύ-

σης των δύο μιγμάτων, προκύπτουν παρόμοιες.

3.7. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία σε βιομηχανικούς φούρνους φυσικού αερίου.

Η μελέτη της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, με χρήση υπολογιστικών μεθόδων, σε φούρνους καύσης αερίων καυσίμων, αποτελεί το θέμα της εργασίας. Τα περισσότερα μοντέλα ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται σε υπολογιστικούς κώδικες καύσης, έχουν συγκριθεί σε διάσπατες κυρίως γεωμετρίες, χωρίς την ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή ή/και χωρίς τον υπολογισμό της χημικής αντίδρασης καύσης. Η ταυτόχρονη επίλυση ροής, καύσης με χρήση δύο μοντέλων υπολογισμού της θερμικής ακτινοβολίας, το μοντέλο των έξι ανηγμένων ροών (six-flux model) και το μοντέλο διακριτής μεταφοράς (discrete transfer model), αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας. Τα αποτελέσματα [16,17] με χρήση των δύο μοντέλων ακτινοβολίας, στην πρόγνωση θερμοκρασιών και θερμοροών σε ένα φούρνο καύσης φυσικού-αερίου (Σχήμα 13), συγκρίνονται μεταξύ τους και με πειραματικά δεδομένα, αλλά και με την περίπτωση όπου, δεν λαμβάνεται υπόψη ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας. Τα αποτελέσματα (Σχήματα 14, 15), δείχνουν ότι πρέπει αρχικώς να μην αμελείται η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, σε περιπτώσεις καύσης αερίων καυσίμων, διότι η κατανομή θερμοκρασιών που προκύπτει, διαφέρει σημαντικά από την πραγματική. Τα αποτελέσματα με χρήση και των δύο μοντέλων ακτινοβολίας, βελτίωσαν σημαντικά τις προβλέψεις και συγκεκριμένα: Οι τιμές της θερμοκρασίας αυξήθηκαν στην περιοχή της ζώνης αντίδρασης, ενώ μειώθηκαν στις υπόλοιπες περιοχές μέσα στον φούρνο, ιδιαίτερα κοντά στα τοιχώματα, σε συμφωνία με τα πειράματα, συρρικνώθηκε η περιοχή

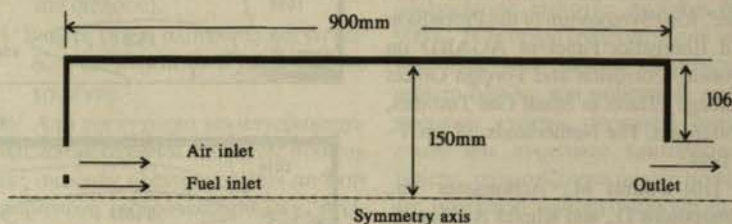


Σχήμα 11: Διανύσματα ταχύτητας.

όπου εμφανίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες, ενώ τετραπλασιάστηκε η θερμοροή από τα πλευρικά τοιχώματα του φούρνου, μειώνοντας σημαντικά τις τιμές θερμοκρασίας στη συγκεκριμένη περιοχή. Η απόδοση των δύο μοντέλων ακτινοβολίας, είναι παρόμοια, ενώ η συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις, κρίνεται πολύ καλή. Προτείνεται σε περιπτώσεις καύσης αερίων καυσίμων, η χρήση του μοντέλου των έξι ανηγμένων ροών, το οποίο είναι πιο απλό στην εγκατάσταση και χρήση του, σε υπολογιστικούς κώδικες καύσης, από το μοντέλο διακριτής μεταφοράς, για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία.

4. Βιβλιογραφία.

- [1] Κλίπφελ, Α., "Ανάπτυξη Υπολογιστικών Εργαλείων Προσομείωσης Διφασικών Ροών Και Καύσης Με Στόχο Την Βελτιστοποίηση Βιομηχανικών Διεργασιών. Εφαρμογή Και Εμβάθυνση Στη Διεργασία Διόγκωσης Περίληψη", Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, 1999.
- [2] Klipfel, A., Founti, M., Zahringer, K., Martin, J.P., and Petit, J.P.,



Σχήμα 13: Γεωμετρία του θαλάμου καύσης.

"Numerical simulation and experimental validation of the turbulent combustion and perlite expansion processes in an industrial perlite expansion furnace", Flow, Turbulence and Combustion, vol. 60, pp. 283-300, 1999.

[3] Founti M. and Klipfel A., "Particle-induced erosion wear in axis-symmetric furnace configurations", Symposium on Erosion-Processes, ASME Fluids Engineering Division - Summer Meeting, Washington DC, June 1998.

[4] Klipfel, A. and Founti, M., "Numerical simulation of gas-particle flow coupled by momentum, turbulence and thermal effects in vertical industrial furnaces", 3rd International Conference on Multi-phase Flow, Palais des Congres de Lyon, Lyon, France, June 8-12, 1998 (proceedings in CD).

[5] Founti M. and Klipfel A., "Numerical Simulation of Pneumatic Transport of Pulverised lignite and Induced Erosion Wear in the Distribution Ducts from the Mills to the Furnace Burners in Large Power Plants", Erosion Processes, ASME FED - Vol. 236, pp. 71 - 724, 1996.

[6] Founti, M., Achimastos, Th., and Klipfel, A., "Effects of increasing particle loading in an axisymmetric, vertical, liquid-solid sudden expansion flow", Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, vol. 121, pp. 171-178, March 1999.

[7] Koronaki, E. D., Liakos, H. H., Founti, M. A and Markatos, N. C., "Numerical study of turbulent diesel flow in a pipe with a sudden expansion", accepted for publication in Applied Mathematical Modelling, 2000.

[8] Founti, M. and Klipfel, A., "Experimental and Computational Investigations of Nearly Dense Two-Phase Sudden Expansion Flows", Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 17, issue 1-2, pp. 27-36, May 1998.

[9] Founti M. and Klipfel A., "Investigation of mechanical erosion in fuel pipelines", 83rd Symposium of the Propulsion and Energetics Panel of AGARD on Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Small Gas Turbines, Rotterdam, The Netherlands, 18, pp. 1 - 7, 1994.

[10] Founti M., Achimastos Th., Dimopoulos D., and Klipfel A., "Experimental Investigation Of Particle Motion In A Model Of A Beater Wheel Mill", Laser

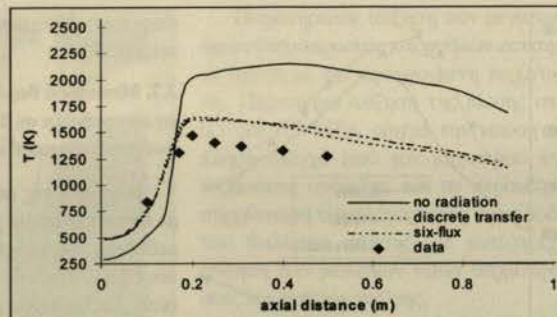
Anemometry & Experimental & Numerical Flow Visualization, ASME FED - vol. 239, pp. 67 - 74, 1996.

[11] Founti M., Achimastos Th. and Dimopoulos D., "Experimental Investigation and Visualisation of Particle Motion In A Model Of A Beater Wheel Mill", 8th International Symposium On Applications Of Laser Techniques To Fluid Mechanics, Vol. II, paper 8.5.1 - 8.5.7, Lisbon, Portugal, 1996.

[12] Liakos, H.H., Founti, M. A. and Markatos N.C., "Modeling of stretched natural gas diffusion flames", Applied Mathematical Modelling, vol. 24, issues 5-6, pp. 419-435, May 2000.

[13] Liakos, H.H., Koukou, M. K., Founti, M.A. and Markatos N.C., "Effects of Pressure and Impingement Angle in Flaming Processes" accepted for publication in Canadian Journal of Chemical Engineers, vol. 78, pp. 1-8, August 2000.

[14] Liakos, H.H., Founti, M.A. and Markatos N.C., "Energy Savings And Environmental Impacts From Fuel Substitution In Premixed Flame Processes", 5th Intern. Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Po, July 1999 also accepted for publi-



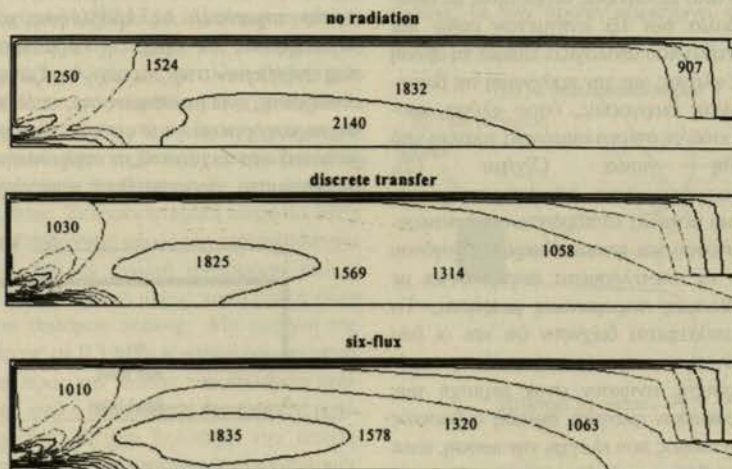
Σχήμα 14: Μέσες τιμές της θερμοκρασίας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του θαλάμου καύσης.

cation in Intern. Journal on Environmental Combustion Technologies, in press, 2000.

[15] Liakos, H.H., Founti, M.A. and Markatos N.C., "The effect of pressure in industrial propane-oxygen flames" accepted for publication in Intern. Journal of Energy Research, 2000.

[16] Keramida, E.P., Liakos, H.H., Founti, M.A., Boudouvis, A.G. and Markatos N. C., "Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, issue 10, pp.1801-1809, 15 May 2000.

[17] Keramida, E.P., Liakos, H.H., Founti, M.A., Boudouvis, A.G. and Markatos N. C., "The discrete transfer radiation model in a natural gas-fired furnace", accepted for publication in Intern. Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000.



Σχήμα 15: Ισοϋψείς σταθερής θερμοκρασίας.