

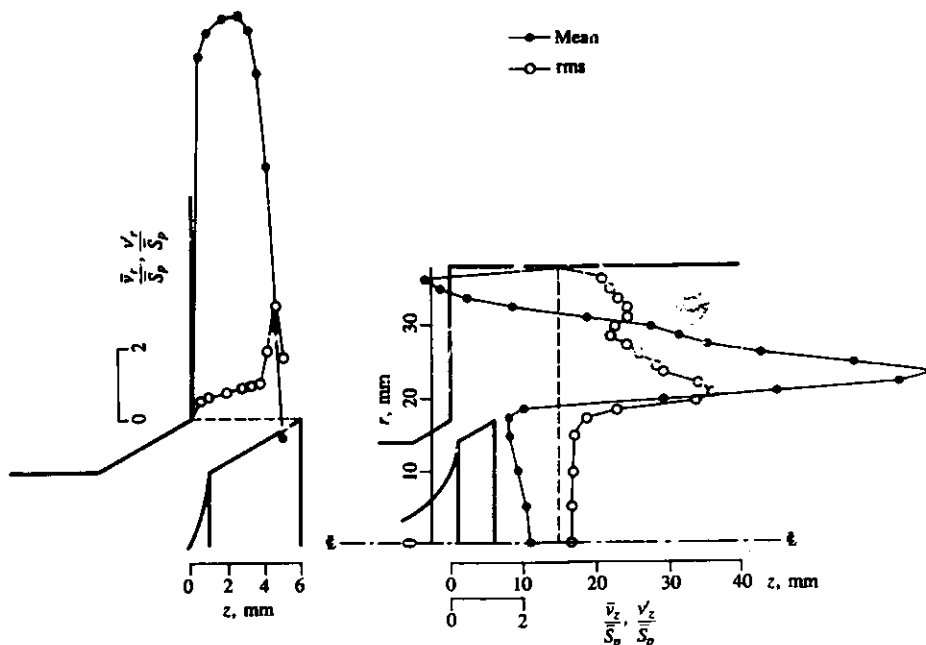
Ενότητα 6

Ροή της γόμωσης μέσα στον κύλινδρο

Η κίνηση των αερίων μέσα στον κύλινδρο της μηχανής είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που ελέγχουν την καύση στον βενζινοκινητήρα, και την ανάμιξη αέρα-καυσίμου στον κινητήρα diesel. Επίσης, έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μετάδοση θερμότητας. Στην ανάλυση αυτή, ενδιαφέρει τόσο η μέση ταχύτητα των αερίων, όσο και τα χαρακτηριστικά της τύρβης μέσα στον κύλινδρο. Το αρχικό ροϊκό πεδίο στον κύλινδρο δημιουργείται από τη διεργασία εισαγωγής. Στη συνέχεια μπορεί να βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό στη διάρκεια της συμπίεσης. Στην ενότητα αυτή θα εξεταστούν τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής μέσα στον κύλινδρο, και πώς επηρεάζονται αυτά από την κίνηση του εμβόλου και τις ροές μέσα από βαλβίδες ή θυρίδες.

6.1 Ροή του αερίου στον κύλινδρο μέσα από τη βαλβίδα εισαγωγής

Στον 4-χρονο κινητήρα, η διόδος μέσα από τη βαλβίδα εισαγωγής είναι αυτή που παρουσιάζει τις μέγιστες ταχύτητες ροής. Στη συνέχεια το αέριο εκτοξεύεται προς τον κύλινδρο με τη μορφή κωνικού πίδακα, με αξονικές και ακτινικές ταχύτητες μιά τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τη μέση ταχύτητα εμβόλου. Στο Σχ. 6.1 φαίνονται οι αξονικές και ακτινικές συνιστώσες της ροής κοντά στην έξοδο της βαλβίδας, μετρημένες στη διάρκεια της διεργασίας εισαγωγής, σε ένα ρυμουλκούμενο πειραματικό κινητήρα με διαφανή τοιχώματα και μία μόνο βαλβίδα τοποθετημένη στον άξονα του κυλίνδρου, με χρήση LDA.

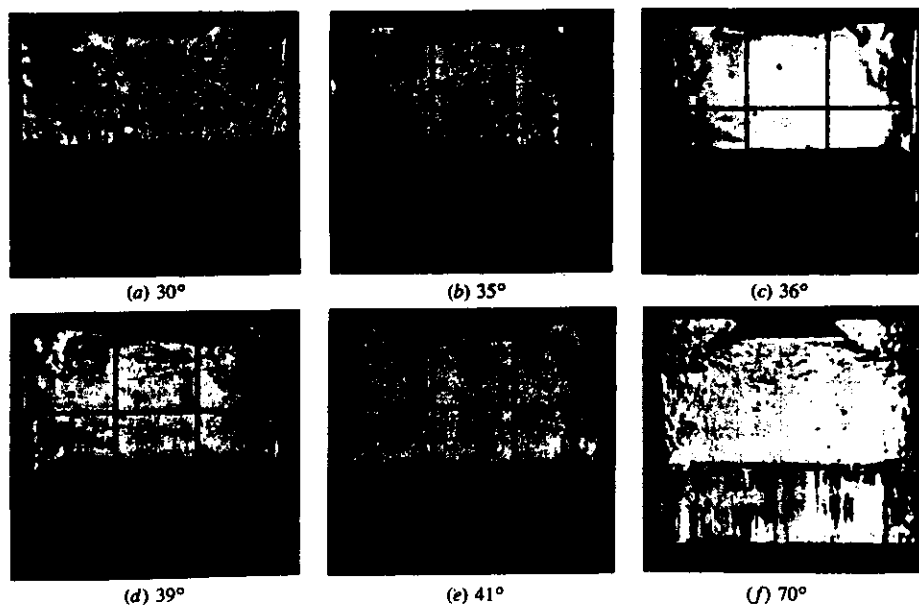


Radial mean velocity \bar{v}_r , and root mean square (rms) velocity fluctuations v'_r at the valve exit plane, and axial mean velocity \bar{v}_z and rms velocity fluctuation v'_z 15 mm below the cylinder head, at 36° ATC in model engine operated at 200 rev/min. Valve lift = 6 mm. Velocities normalized by mean piston speed.

Σχήμα 6.1

Ο πίδακας αποκολλάται από τα χείλη και την έδρα της βαλβίδας, παράγοντας διατμητικά οριακά στρώματα με μεγάλες βαθμίδες ταχύτητας, που δημιουργούν τύρβη. Η αποκόλληση αυτή δημιουργεί με τη σειρά της περιοχές ανάστροφης ροής κοντά στο τοίχωμα της κυλινδροκεφαλής κάτω από τη βαλβίδα, καθώς και στη γωνία ανάμεσα στο χιτώνιο και την κυλινδροκεφαλή.

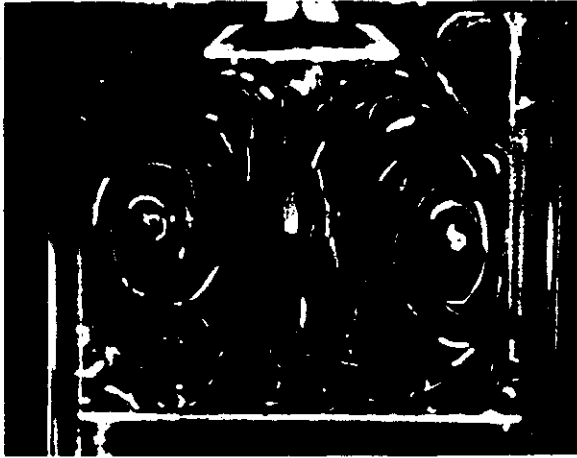
Η κίνηση του πίδακα εισερχόμενου αερίου μέσα στον κύλινδρο, φαίνεται στις φωτογραφίες schlieren του Σχ.6.2 (κινητήρας με διαφανή τοιχώματα). Ο κινητήρας έχει κύλινδρο τετραγωνικής διατομής, με δύο τοιχώματα από χαλαζία και δύο από λαμαρίνα, για να επιτρέψει τη φωτογράφιση. Η τεχνική schlieren αποτυπώνει τις περιοχές της ροής με σημαντικές βαθμίδες πυκνότητας, σαν ανοικτότερες ή σκοτεινότερες στο φιλμ. Στο συγκεκριμένο πείραμα, ο κινητήρας στραγγαλίζεται από την πεταλούδα του επιταχυντή σε πίεση εισαγωγής 0.5 bar, και ο πίδακας παρατηρείται στις 35° μετά το ΑΝΣ, μετά την έναρξη του εμβολισμού εισαγωγής, και αφού πρώτα παρατηρήθηκε ανάστροφη ροή παραμενοντος καυσαερίου προς την πολλαπλή εισαγωγής. Το πρόσθιο τμήμα του πίδακα μπορεί να παρατηρηθεί καθώς προωθείται από τη βαλβίδα προς τον κύλινδρο με σημαντική ταχύτητα. Μόλις ο πίδακας φτάσει στο τοίχωμα του κυλίνδρου ($\theta > 41^\circ$ μετά ΑΝΣ), το τοίχωμα ανακλά το μεγαλύτερο τμήμα του πίδακα προς το έμβολο. Υπάρχει όμως και ένα σημαντικό τμήμα που ρέει προς την κυλινδροκεφαλή. Είναι δε προφανής η τυρβώδης φύση του πίδακα.



Sequence of schlieren photographs of intake jet as it develops during intake stroke. Numbers are crank angle degrees after TC.

Σχήμα 6.2

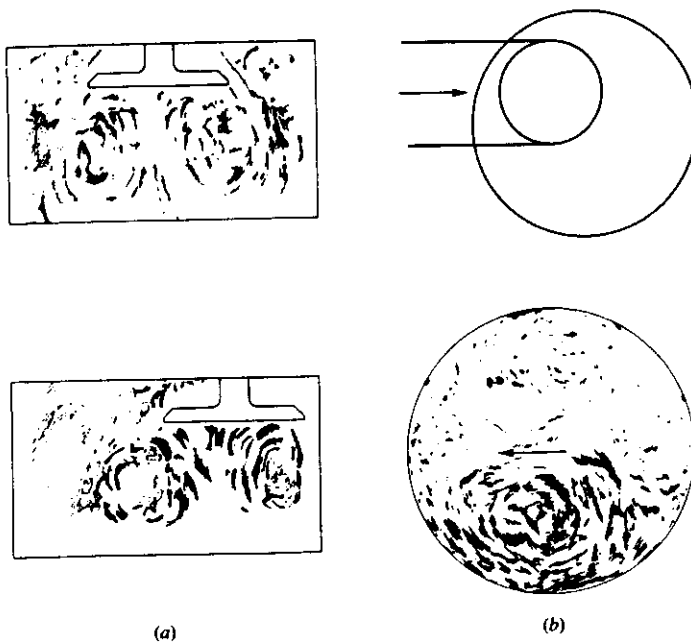
Η αλληλεπίδραση του πίδακα εισαγωγής με το τοίχωμα παράγει δίνες μεγάλης κλίμακας, που φαίνονται καλύτερα για αξονοσυμμετρική ροή. (βλ. φωτογραφία του Σχ.6.3, που έχει ληφθεί με αναλογία ροής νερού σε ομοίωμα κυλίνδρου, με ίδιους αριθμούς Reynolds και Strouhal).



Large-scale rotating flow pattern set up within the cylinder by the intake jet. Photograph of streak lines in water flow into model engine with axisymmetric valve.

Σχήμα 6.3

Βέβαια, όταν ληφθεί υπόψη η πραγματική (έκκεντρη) θέση των βαλβίδων εισαγωγής, το προκύπτον ροϊκό πεδίο είναι πιο πολύπλοκο (Σχ.6.4).



Sketches from: (a) streak photographs of in-cylinder intake generated flow in water analog of intake process in model engine with offset inlet valve, at 90° ATC;³ (b) streak photographs of flow in diametral plane; 30 mm below cylinder head, with intake port and valve geometry shown, with steady water flow into cylinder. Valve lift = 4 mm.

Σχήμα 6.4

6.2 Μέση ταχύτητα και χαρακτηριστικά της τύρβης

Οι διεργασίες ροής μέσα στους κυλίνδρους των ΜΕΚ είναι τυρβώδεις. Στις τυρβώδεις ροές, οι ρυθμοί μετάδοσης θερμότητας και ανάμιξης είναι μιά τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από τους ρυθμούς μοριακής διάχυσης και αγωγής.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό μέγεθος μιάς τυρβώδους ροής είναι η τυχαιότητα ή ανωμαλία της. Εδώ χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι για τον ορισμό της τύρβης. Τα σχετικά μεγέθη είναι η μέση ταχύτητα, η τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση τιμή, και ένας αριθμός από κλίμακες μήκους και χρόνου.

Σε μιά κατάσταση μόνιμης τυρβώδους ροής, η στιγμιαία τοπική ταχύτητα σε μιά συγκεκριμένη διεύθυνση γράφεται:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (6.1)$$

Για μόνιμη ροή, η μέση ταχύτητα ορίζεται ως η χρονικά μέση τιμή

$$\bar{U} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} U(t) dt \quad (6.2)$$

Η διακύμανση της ταχύτητας ορίζεται με βάση την ένταση τύρβης

$$u' = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u^2 dt \right)^{1/2} \quad (6.3a)$$

ή

$$u' = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (U^2 - \bar{U}^2) dt \right]^{1/2} \quad (6.3b)$$

αφού η μέση τιμή του (uU) είναι μηδέν.

Στις εμβολοφόρες μηχανές, η εφαρμογή των παραπάνω μεταβλητών δυσχεραίνεται από το γεγονός ότι η ροή αλλάζει σημαντικά στη διάρκεια ενός και μόνο κύκλου. Επίσης, ενώ τα ολοκληρωτικά χαρακτηριστικά κάθε κύκλου επαναλαμβάνονται, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τις λεπτομέρειες, αφού παρατηρείται σημαντική μεταβολή συμπεριφοράς από κύκλο σε κύκλο.

Μιά προσέγγιση για την παράκαμψη της παραπάνω δυσκολίας είναι το ensemble-averaging ή phase-averaging. Συνήθως οι μετρήσεις ταχύτητας γίνονται στη διάρκεια μεγάλου αριθμού κύκλων, και σε μιά περιοχή γωνίας στροφάλου.

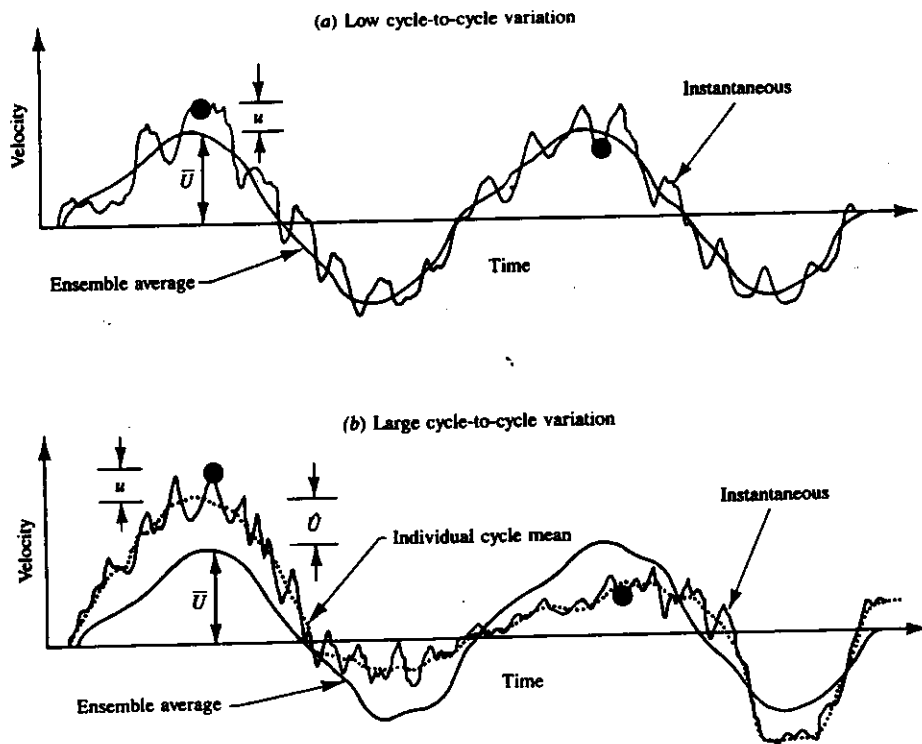
Η στιγμιαία ταχύτητα στη συγκεκριμένη ΓΣ θ , σε ένα συγκεκριμένο κύκλο i , μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$U(\theta, i) = \bar{U}(\theta, i) + u(\theta, i) \quad (6.4)$$

Οπότε μπορούμε να ορίσουμε μιά μέση ταχύτητα από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων στη συγκεκριμένη ΓΣ (ensemble or phase-averaged velocity):

$$\bar{U}_{EA}(\theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U(\theta, i) \quad (6.5)$$

όπου N_c είναι ο αριθμός των κύκλων στους οποίους λαμβάνονται μετρήσεις της ταχύτητας (Σχ.6.5).



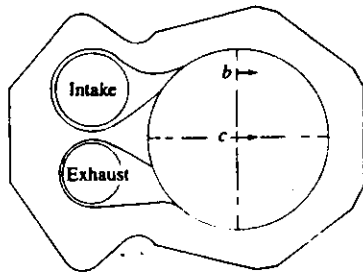
Schematic of velocity variation with crank angle at a fixed location in the cylinder during two consecutive cycles of an engine. Dots indicate measurements of instantaneous velocity at the same crank angle. Ensemble- or phase-averaged velocity obtained by averaging over a large number of such measurements shown as solid smooth line. Top graph: low cycle-to-cycle flow variations. Here the individual-cycle mean velocity and ensemble-averaged velocity are closely comparable. Bottom graph: large cycle-to-cycle variations. Here the individual-cycle mean velocity (dotted line) is different from the ensemble-averaged mean by \bar{U} . The turbulent fluctuation u is then defined in relation to the individual-cycle mean.

Σχήμα 6.5

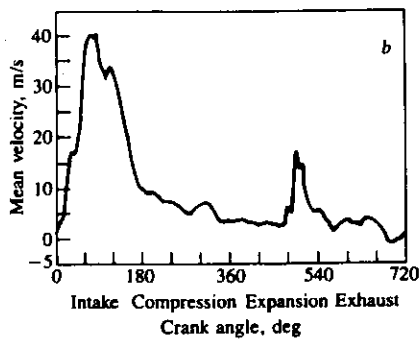
Ετσι, η μέση ταχύτητα που υπολογίζεται μ' αυτό τον τρόπο είναι ανεξάρτητη του συγκεκριμένου κύκλου, και συνάρτηση μόνο της γωνίας στροφάλου (εννοείται ότι αυτή η διαδικασία είναι εφαρμόσιμη μόνο σε μόνιμα σημεία λειτουργίας).

6.2 Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα κινητήρων

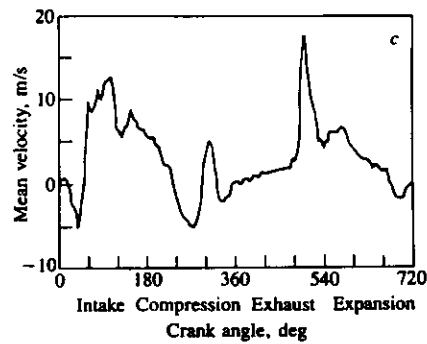
Στα Σχήματα 6.6-6.7 παρουσιάζονται παραδείγματα διακύμανσης της στατιστικά μέσης ταχύτητας σε πραγματικούς κινητήρες.



(a)



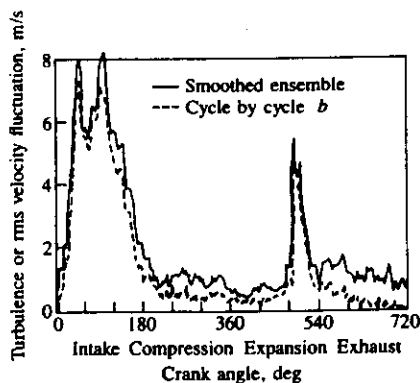
(b)



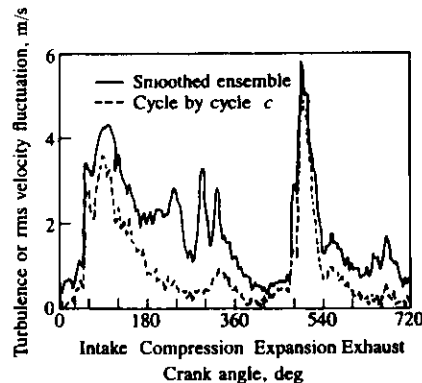
(c)

Ensemble-averaged velocities throughout the engine cycle in motored four-stroke L-head engine: 300 rev/min, mean piston speed 0.76 m/s. (a) Engine schematic showing measurement locations and velocity directions; (b) velocity at *b* in intake flow path; (c) velocity at *c* on cylinder axis.

Σχήμα 6.6



(a)



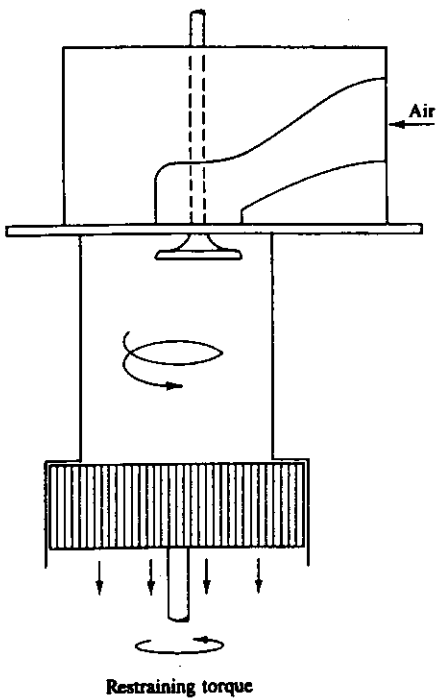
(b)

Ensemble-averaged rms velocity fluctuation and ensemble-averaged individual-cycle turbulence intensity as a function of crank angle: (a) at location *b* in Fig. 8-8a; (b) at location *c* in Fig. 8-8a.

Σχήμα 6.7

6.3 Μέτρηση του στροβιλισμού σε κινητήρες

Η φύση της ροής με στροβιλισμό σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας σε ένα κινητήρα είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιοριστεί. Έτσι, συχνά γίνονται πειράματα μόνιμης ροής για το χαρακτηρισμό του στροβιλισμού σ'ένα κινητήρα. Δημιουργείται μόνιμη ροή αέρα με φυσητήρα μέσα από το κανάλι και τη βαλβίδα εισαγωγής (πραγματική κυλινδροκεφαλή του συγκεκριμένου κινητήρα), προς ένα ομοίωμα κυλίνδρου (Σχ.6.8).

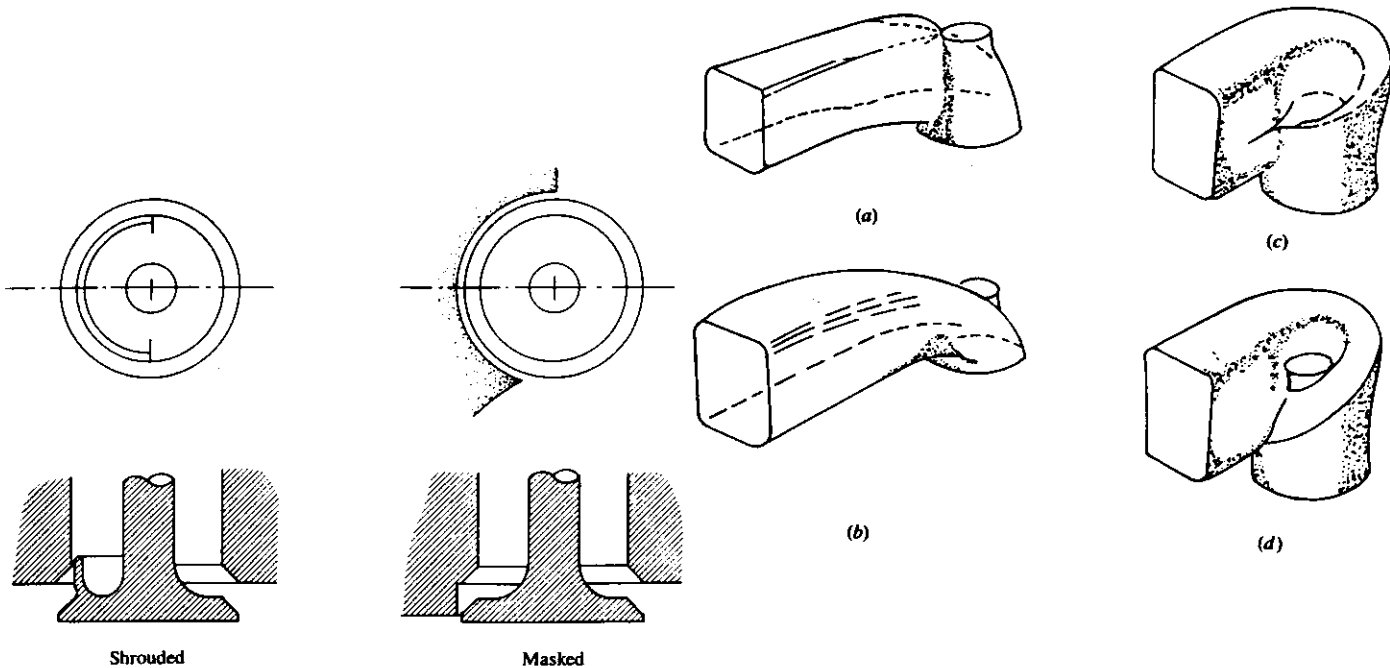


Schematic of steady-flow impulse torque swirl meter.

Σχήμα 6.8

Η πιο απλή τεχνική για τη μέτρηση του στροβιλισμού είναι η τοποθέτηση μίας ελαφριάς φτερωτής με ίσια πτερύγια, που εδράζεται στον άξονα του κυλίνδρου με έδρανα κυλίσεως πολύ χαμηλών τριβών, σε απόσταση 1-1.5 διάμετρο από την κεφαλή. Επειδή η ταχύτητα περιστροφής της φτερωτής μ'αυτή την τεχνική επηρεάζεται από λεπτομέρειες του συγκεκριμένου πειράματος, τελευταία εφαρμόζεται εναλλακτικά η τεχνική του Σχ. 6.8 με χρήση κυψελωτού κεραμικού (όπως τα υποστρώματα των καταλυτικών μετατροπών) για στρώσιμο της ροής, οπότε γίνεται μέτρηση της ροπής που ασκείται στον άξονά του (που είναι μέτρο της στροφορμής της ροής).

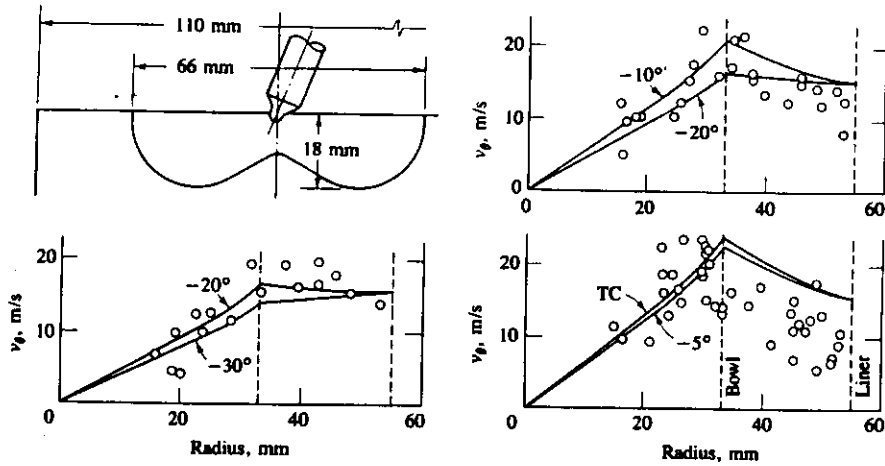
Στο Σχ. 6.9 φαίνονται διάφορες τεχνικές παραγωγής στροβιλισμού με κατάλληλη διαμόρφωση των καναλιών και των βαλβίδων εισαγωγής.



Shrouded inlet valve and masked cylinder head approaches for producing net in-cylinder angular momentum.

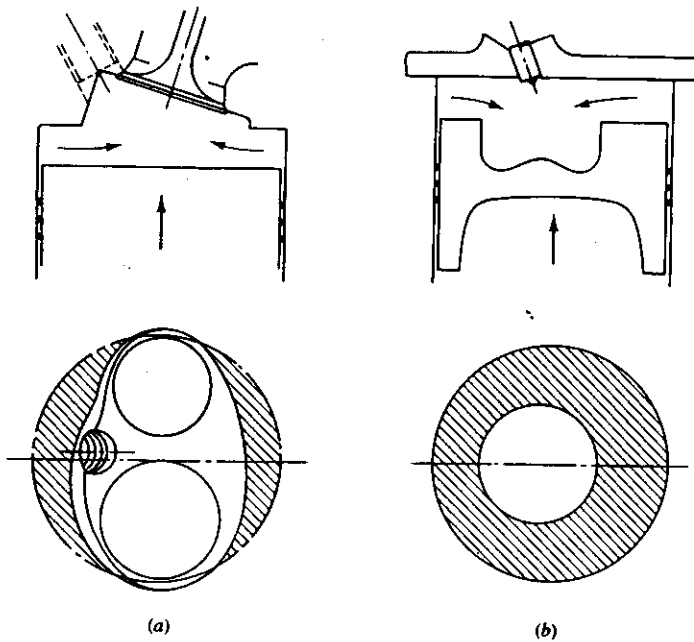
Σχήμα 6.9

Στους κινητήρες diesel με απ'ευθείας έγχυση, ο στροβιλισμός του αέρα ενισχύεται με κατάλληλη διαμόρφωση του εμβόλου (Σχ.6.10)



Velocity measurements as a function of radius across the combustion chamber of a firing, bowl-in-piston, direct-injection diesel engine. Schematic shows the chamber geometry. Solid lines are calculations based on the assumption of constant angular momentum for fluid elements as they move radially inward.

Σχήμα 6.10



Schematics of how piston motion generates squish: (a) wedge-shaped SI engine combustion chamber; (b) bowl-in-piston direct-injection diesel combustion chamber.