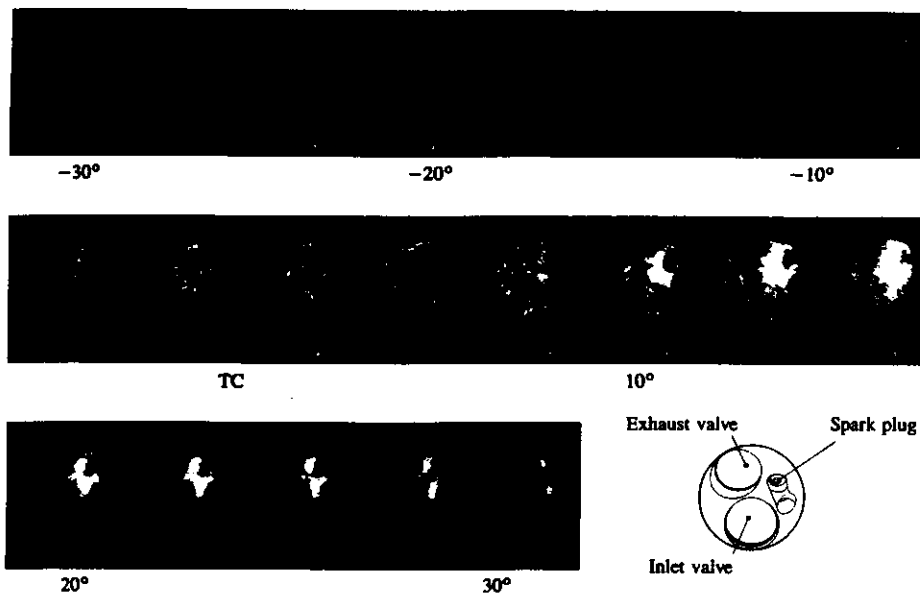


Ενότητα 7

Καύση στον βενζινοκινητήρα

7.1 Κύρια χαρακτηριστικά της καύσης

Στο βενζινοκινητήρα το καύσιμο και ο αέρας αναμιγνύονται στο σύστημα εισαγωγής και αναρροφώνται στον κύλινδρο από τις βαλβίδες εισαγωγής, αναμιγνύονται με το παραμένον καυσαέριο και συμπιέζονται στη συνέχεια. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα η καύση ξεκινάει κοντά στο τέλος του εμβολισμού συμπίεσης με έναν ηλεκτρικό σπινθήρα που προκαλείται μεταξύ των ηλεκτροδίων του σπινθηριστή. Μετά την έναυση αναπτύσσεται μια τυρβώδης φλόγα η οποία προωθείται μέσα στο ομοιογενές μίγμα αέρα βενζίνης και παραμένοντος καυσαερίου μέχρι που φτάνει στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης οπότε και σβήνει. Στο σχήμα 7.1 φαίνονται διαδοχικές φωτογραφίες που δείχνουν την εξέλιξη της διεργασίας καύσης σε μία μονοκύλινδρο μηχανή με γυάλινη κορώνα στο πιστόνι. Προπορεία έναυσης 30° πριν ΑΝ.Σ. 1430 rpm, ελαφρό φορτίο, λόγος αέρα καυσίμου 19.



Σχήμα 7.1

Στις φωτογραφίες η φλόγα γίνεται για πρώτη φορά ορατή περίπου στις 240° πριν το ΑΝ.Σ. Η φλόγα είναι περίπου κυκλικού σχήματος όπως φαίνεται μέσα από το έμβολο και στη συνέχεια προωθείται απομακρυνόμενη από το σημείο έναυσης. Το γαλάζιο φως της φλόγας εκπέμπεται ισχυρότερο από το μέτωπο της φλόγας. Το ανώμαλο σχήμα του μετώπου της τυρβώδους φλόγας είναι φανερό στις φωτογραφίες. Στο ΑΝΣ η διάμετρος της φλόγας είναι ίση με τα $2/3$ της διαμέτρου του κυλίνδρου.

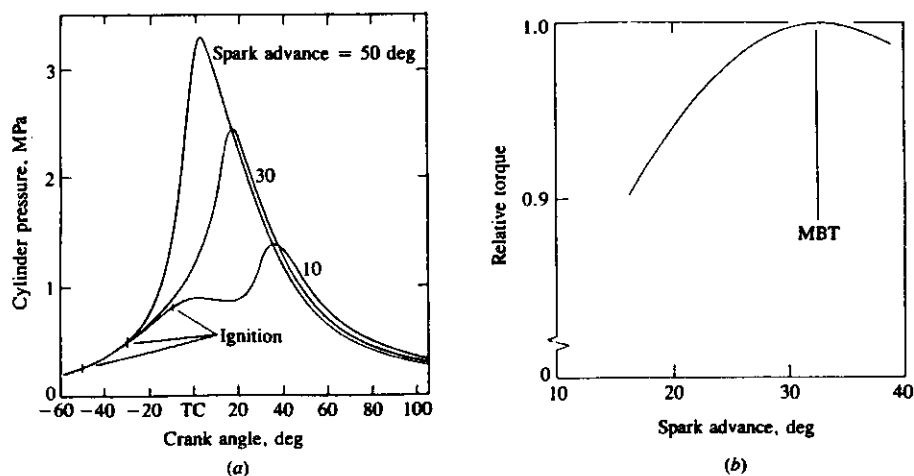
Η φλόγα φτάνει στο πιο απομακρυσμένο από τον σπινθηριστή σημείο του τοιχώματος του κυλίνδρου περί της 150° μετά το ΑΝ.Σ., αλλά η καύση συνεχίζεται σε ορισμένα σημεία στην περιφέρεια του κυλίνδρου για ακόμη 100° .

Περίπου από τις 100° μετά το ΑΝ.Σ. αρχίζει να παρατηρείται εκπομπή ακτινοβολίας λευκού χρώματος που αργότερα ξεθυμαίνει σε ροζ-πορτοκαλί από μία περιοχή με κέντρο τον σπινθηριστή. Πρόκειται για ακτινοβολία των αερίων πίσω από τη φλόγα τα οποία μετά την καύση τους συμπιέζονται και φτάνουν στις μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου (περίπου 150° μετά το ΑΝ.Σ.) ενώ το υπόλοιπο μίγμα συνεχίζει να καίγεται.

Περισσότερες λεπτομέρειες της διεργασίας καύσης φαίνονται στο Σχήμα 7.2, το οποίο βασίζεται σε στοιχεία από 5 διαδοχικούς κύκλους ενός βενζινοκινητήρα σε λειτουργία. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται η πίεση στον κύλινδρο, το κλάσμα της μάζας της γόμωσης που έχει καεί (υπολογισμένο από το δυναμοδεικτικό διάγραμμα σύμφωνα με τη μεθοδολογία Κεφαλαίου 7.2) καθώς και του κλάσματος του όγκου του κυλίνδρου που έχει διαπέρασει η φλόγα (μετρημένο με βάση φωτογραφίες όπως αυτές του σχήματος 7.1) σαν συνάρτηση της γωνίας στροφάλου.

Μετά την έναρξη του σπινθηρισμού του μπουζί υπάρχει μία περίοδος κατά την οποία η εκλυόμενη ενέργεια από την φλόγα που αναπτύσσεται δεν επαρκεί για να προκαλέσει σημαντική αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο. Καθώς η φλόγα συνεχίζει να αυξάνει σε μέγεθος και να προωθείται μέσα στο θάλαμο καύσης, η πίεση αρχίζει να αυξάνεται σημαντικά, και φτάνει σε ένα μέγιστο, οπωσδήποτε μετά το ΑΝ.Σ. Στη συνέχεια η πίεση πέφτει παρά το γεγονός ότι η καύση συνεχίζεται, αφού πλέον η αύξηση του όγκου του κυλίνδρου είναι πολύ σημαντική.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2 η ανάπτυξη και διάδοση της φλόγας διαφέρει αρκετά μεταξύ διαδοχικών κύκλων. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλες μεταβολής του κλάσματος όγκου που κάηκε είναι πιο απότομες από τις αντίστοιχες καμπύλες για το κλάσμα μάζας που κάηκε. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η πυκνότητα του άκαυστου μίγματος εμπρός από τη φλόγα είναι περίπου τετραπλάσια από αυτήν των καυσαερίων που αφήνει πίσω της η φλόγα. Εκτός από αυτό η φλόγα αφήνει πίσω της σημαντική ποσότητα άκαυστου μίγματος : ακόμη και όταν η φλόγα έχει εξαπλωθεί σε όλον το θάλαμο καύσης, παραμένει άκαυστο το 25% της συνολικής μάζας του καυσίμου.



Σχήμα 7.3 (α) Πίεση κυλίνδρου σαν συνάρτηση της γωνίας στροφάλου για υπερβολική προπορεία έναυσης (50°), βέλτιστη (MBT) προπορεία έναυσης (30°) και αργοπορημένη προπορεία έναυσης (10°)

(β) Επίδραση προπορείας έναυσης στην αναπτυσσόμενη ροπή, σε σταθερές στροφές και λόγο αέρα και όλα τα γκάτζια ανοιχτά.

Από την παραπάνω περιγραφή προκύπτει ότι η διεργασία καύσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από 4 διακεκριμένες φάσεις :

- (i) Σπινθηρισμός - έναυση
- (ii) Αρχικό στάδιο ανάπτυξης της φλόγας
- (iii) Διάδοση τη φλόγας
- (iv) Σβήσιμο της φλόγας

Οι φάσεις αυτές θα αναλυθούν στο υπόλοιπο της ενότητας αυτής.

Στο βενζινοκινητήρα είναι πολύ σημαντικό το να χρονίσουμε την καύση σε σχέση με το ΑΝΣ έτσι ώστε να πετύχουμε τη μέγιστη δυνατή ροπή. Η συνολική διάρκεια της καύσης στο βενζινοκινητήρα κυμαίνεται μεταξύ 30ο και 90ο ΓΣ (Γωνία στροφάλου). Στο σχήμα 7.3 επεξηγείται η επίδραση της προπορείας έναυσης στην αναπτυσσόμενη ροπή. Επομένως, η βέλτιστη προπορεία έναυσης είναι εκείνη που δίνει τη μεγαλύτερη δυνατή ροπή (maximum brake torque).

Υπάρχουν διάφοροι εμπειρικοί κανόνες που συσχετίζουν το προφίλ της καύσης και την μέγιστη αναπτυσσόμενη πίεση στον κύλινδρο με τη γωνία στροφάλου όταν έχουμε τη βέλτιστη γωνία προπορείας. Για παράδειγμα όταν ο χρονισμός έναυσης είναι βέλτιστος :

- (i) Η μέγιστη πίεση παρατηρείται 16° μετά το ΑΝΣ
- (ii) Το μισό δείγμα πρέπει να έχει καεί περίπου 10° μετά το ΑΝΣ

Πέρα από την κανονική εξέλιξη της καύσης που περιγράφηκε στα παραπάνω μπορεί να παρατηρηθούν σε ειδικές περιπτώσεις οι δύο παρακάτω τύποι αντικανονικής καύσης :

- (i) Καύση με χτύπημα (πειράκια)
- (ii) Επιφανειακή αυτανάφλεξη.

Το χτύπημα παρατηρείται όταν το συμπιεσμένο άκαυστο μίγμα εμπρός από τη φλόγα αυτανάφλεγει προτού να φτάσει η φλόγα, με συνέπεια την απότομη έκλυση ενέργειας με πολλαπλάσιο ρυθμό από αυτόν της κανονικής καύσης, και χαρακτηριστικό χτύπημα του κινητήρα εξαιτίας των παρατηρούμενων ταλαντώσεων της πίεσης.

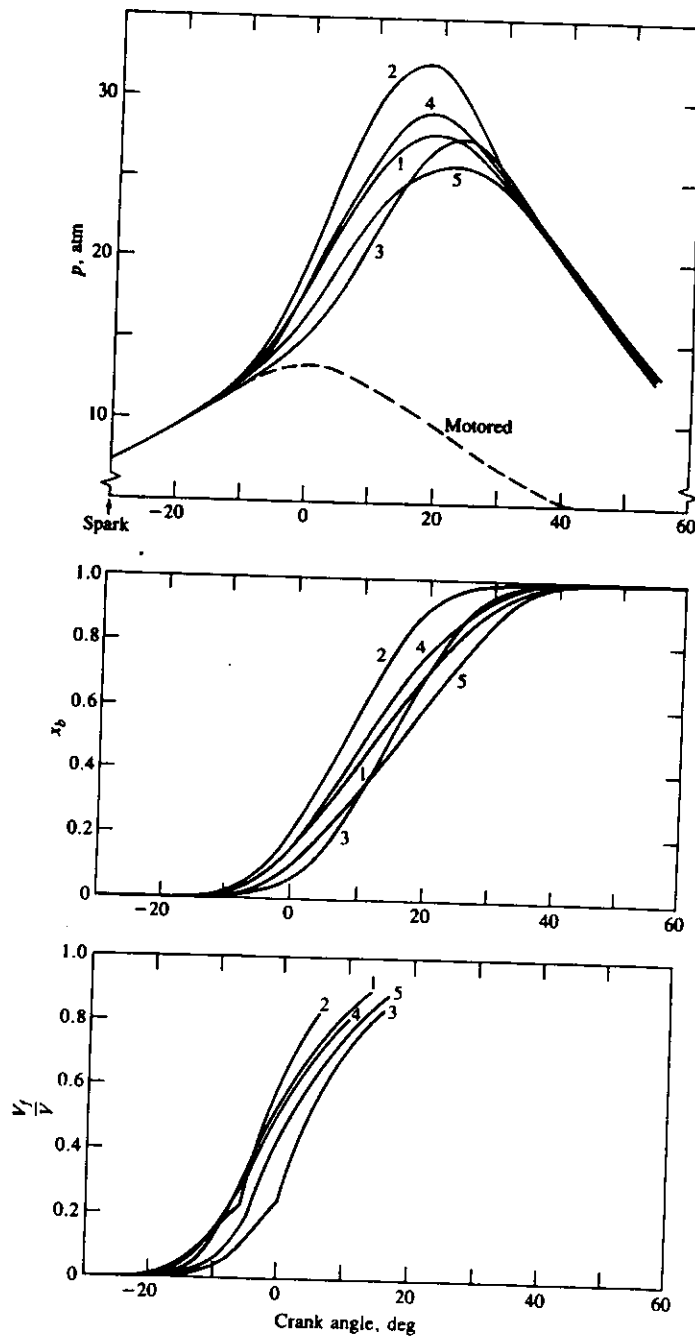
Επιφανειακή αυτανάφλεξη άκαυστου μίγματος μπορεί να παρατηρηθεί στη γειτονιά μίας βαλβίδας σπινθηριστή ή άλλου προεξέχοντος τμήματος του θαλάμου καύσης που έχει υποστεί υπερθέρμανση, και μπορεί να οδηγήσει και αυτή σε χαρακτηριστικό χτύπημα, ακόμη και πριν από τον σπινθηρισμό, ή και με σβηστή μηχανή.

7.2 Θερμοδυναμική της καύσης στον βενζινοκινητήρα

7.2.1 Θερμοδυναμικές καταστάσεις του καμμένου και άκαυστου μίγματος.

Οποσδήποτε οι μεταβολές κατάστασης του καμμένου και άκαυστου μίγματος είναι πολύ πιο πολύπλοκες από αυτές που διδασκόμαστε στη θερμοδυναμική καθαρών ουσιών (ιδανικοί κύκλοι κινητήρων). Η πίεση, η θερμοκρασία και η πυκνότητα του αερίου μεταβάλλονται σαν αποτέλεσμα της μεταβολής του όγκου του θαλάμου καύσης με τη κίνηση του πιστονιού.

Ας θεωρήσουμε τη σχηματική παράσταση της εξέλιξης της καύσης στον κύλινδρο του σχήματος 7.4



Σχήμα 7.2 Πίεση του κυλίνδρου, κλάσμα μάζας που κήκε και κλάσμα όγκου που έχει διαπεράσει η φλόγα για 5 διαδοχικούς κύκλους ενός βενζινοκινητήρα σαν συνάρτηση της γωνίας στροφάλου. Προπορεία έναυσης 30ο πριν ΑΝ.Σ., όλο το γκάζι ανοιχτό, 1044 rpm, $\lambda = 1.02$

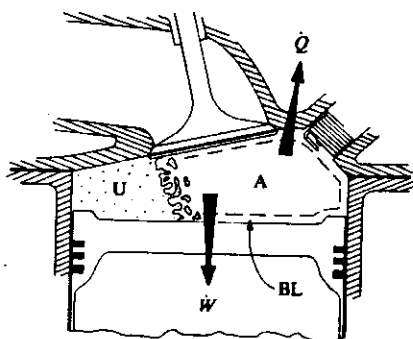
Στις θερμοκρασίες και πιέσεις που συμβαίνει η καύση στους βενζινοκινητήρες, είναι ρεαλιστική η υπόθεση αμελητέου όγκου της ζώνης καύσης σε σχέση με τον όγκο του θαλάμου καύσης, παρά το γεγονός ότι το πάχος της τυρβώδους φλόγας δεν είναι αμελητέο. Οι συνθήκες που επικρατούν στο καμμένο και άκαυστο αέριο, μπορούν τότε να προσδιοριστούν από το ισοζύγιο μάζας :

$$\frac{V}{m} = \int_0^{x_b} v_b dx + \int_{x_b}^1 v_u dx \quad (7.1)$$

και το ισοζύγιο ενέργειας :

$$\frac{U_0 - W - Q}{m} = \int_0^{x_b} u_b dx + \int_{x_b}^1 u_u dx \quad (7.2)$$

Οι δείκτες u και d υποδηλώνουν άκαυστο και καμμένο μίγμα αντίστοιχα.



Schematic of flame in the engine cylinder during combustion: unburned gas (U) to left of flame, burned gas to right. A denotes adiabatic burned-gas core, BL denotes thermal boundary layer in burned gas, W is work-transfer rate to piston, Q is heat-transfer rate to chamber walls.

Σχήμα 7.4 Σχηματική παράσταση της διάδοσης της φλόγας στο θάλαμο καύσης. Άκαυστο μίγμα (U) στα αριστερά της φλόγας, καμμένο μίγμα στα δεξιά. Το A υποδηλώνει τον αδιαβατικό πυρήνα των καυσαερίων, το BL υποδηλώνει το θερμικό οριακό των καυσαερίων. Το W είναι ο ρυθμός παραγωγής έργου πάνω στο πιστόνι, το Q είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στα τοχώματα του θαλάμου καύσης.

Το παραγόμενο έργο και η εκλυόμενη θερμότητα δίνονται από τις σχέσεις :

$$W = \int_{V_0}^V p dV' \quad Q = \int_{\theta_0}^{\theta} \left(\frac{\dot{Q}}{360N} \right) d\theta \quad (7.3)$$

Για να προχωρήσουμε περισσότερο την ανάλυση, απαιτούνται μοντέλα για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των αερίων πριν και μετά την καύση. Τέτοιου είδους μοντέλα συζητήθηκαν στην ενότητα 3. Για έναν ακριβή υπολογισμό της θερμοδυναμικής κατάστασης των αερίων του κυλίνδρου απαιτείται ένα μοντέλο ισορροπίας για τα καυσαέρια και ένα μοντέλο ιδανικού μίγματος αερίου (παγωμένης σύστασης) για τα άκαυστα αέρια. Παρόλα αυτά χρήσιμα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν ακόμη και με την υπόθεση ότι τα άκαυστα και καμμένα αέρια είναι διαφορετικά ιδανικά αέρια που το καθένα έχει σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα :

$$pv_b = R_b T_b \quad u_b = c_{v,b} T_b + h_{f,b} \quad (7.4)$$

$$pv_u = R_u T_u \quad u_u = c_{v,u} T_u + h_{f,u} \quad (7.5)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων 7.1 έως 7.5 δίνει

$$\frac{pV}{m} = x_b R_b \bar{T}_b + (1 - x_b) R_u \bar{T}_u \quad (7.6)$$

$$\frac{U_0 - W - Q}{m} = x_b (c_{v,b} \bar{T}_b + h_{f,b}) + (1 - x_b) (c_{v,u} \bar{T}_u + h_{f,u}) \quad (7.7)$$

όπου

$$\bar{T}_b = \frac{1}{x_b} \int_0^{x_b} T_b dx \quad \bar{T}_u = \frac{1}{1 - x_b} \int_{x_b}^1 T_u dx$$

είναι οι μέσες θερμοκρασίες των άκαυστων και καμμένων αερίων. Οι εξισώσεις 7.6 και 7.7 μπορούν τώρα να λυθούν και να δώσουν

$$x_b = \frac{pV - p_0 V_0 + (\gamma_b - 1)(W + Q) + (\gamma_b - \gamma_u) m c_{v,u} (\bar{T}_u - T_0)}{m[(\gamma_b - 1)(h_{f,u} - h_{f,b}) + (\gamma_b - \gamma_u) c_{p,u} \bar{T}_u]} \quad (7.8)$$

$$\bar{T}_b = \frac{R_u}{R_b} \bar{T}_u + \frac{pV - m R_u \bar{T}_u}{m R_b x_b} \quad (7.9)$$

Εάν τώρα υποθέσουμε ότι τα άκαυστα αέρια υφίστανται ισεντροπική συμπίεση, τότε

$$\frac{\bar{T}_u}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma_u - 1)/\gamma_u} \quad (7.10)$$

Το σύστημα των εξισώσεων 7.8, 7.9 και 7.10 επιτρέπει τον προσδιορισμό του ποσοστού της γόμωσης που καίγεται και της μέσης θερμοκρασίας των καμμένων αερίων με βάση τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των καμμένων αερίων καθώς και δοσμένες τιμές για τα p , V , m , Q . Εναλλακτικά εάν είναι γνωστό το h^b , τότε μπορεί να προσδιοριστεί το p . Το κλάσμα μάζας που κήκε και η πίεση στον κύλινδρο συσχετίζονται αμφιμονοσήμαντα.

Ενώ η εξίσωση 7.9 καθορίζει μία μέση θερμοκρασία για το καμμένο αέριο, είναι γνωστό ότι αυτό δεν είναι ομοιόμορφο. Το μίγμα που καίγεται νωρίτερα στη διάρκεια της καύσης συμπιέζεται παραπέρα καθώς το υπόλοιπο μίγμα καίγεται. Επομένως παρατηρείται μία βαθμίδα θερμοκρασίας μέσα στο καμμένο αέριο, όπου τα τμήματα που κήκαν νωρίτερα βρίσκονται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Εδώ υπάρχουν δύο μοντέλα οριακών περιπτώσεων, που η πραγματικότητα βρίσκεται μεταξύ των τιμών που αυτά προβλέπουν.

(i) Μοντέλο τέλει ανάμιξης

Εδώ γίνεται η υπόθεση ότι κάθε στοιχείο του μίγματος που καίγεται αναμιγνύεται ακαριαία με τα ήδη καμμένα αέρια (τα οποία έχουν ενίαση θερμοκρασία). Εδώ οι παραπάνω εξισώσεις καθορίζουν πλήρως την κατάσταση του περιεχομένου του κυλίνδρου.

(ii) Μοντέλο χωρίς ανάμιξη

Όπου υποτίθεται ότι τα στοιχεία του αερίου που καίγονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές δεν αναμιγνύονται καθόλου μεταξύ τους. Επομένως κάθε τέτοιο στοιχείο καμμένου αερίου συμπιέζεται ισεντροπικά (και τελικά εκτονώνεται μετά την καύση) έτσι έχουμε

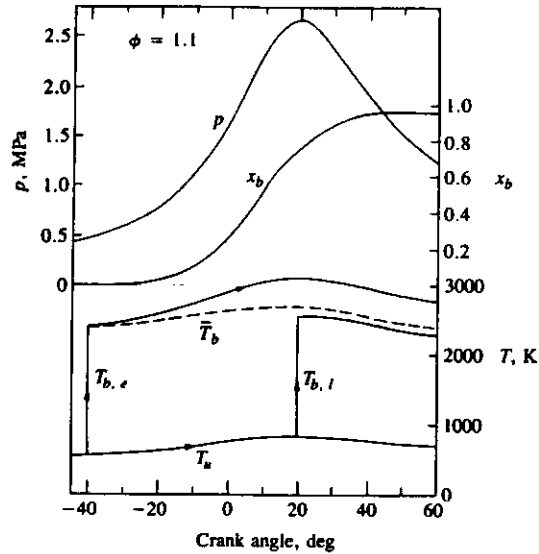
$$\frac{T_b(x'_b, x_b)}{T_b(x'_b)} = \left[\frac{p(x_b)}{p(x'_b)} \right]^{(\gamma_b - 1)/\gamma_b} \quad (7.11)$$

όπου $T_b(x'_b, x_b)$ είναι η θερμοκρασία του στοιχείου που κήκε στην πίεση $p(x'_b)$ όταν η πίεση είναι $p(x_b)$ και

$$T_b(x'_b) = \frac{h_{f,u} - h_{f,b} + c_{p,u} T_u(x'_b)}{c_{p,b}} \quad (7.12)$$

είναι η θερμοκρασία που προκύπτει από την ισενθαλπική καύση του ακαύστου αερίου σε συνθήκες $T_u(x'b)$, $p(x'b)$.

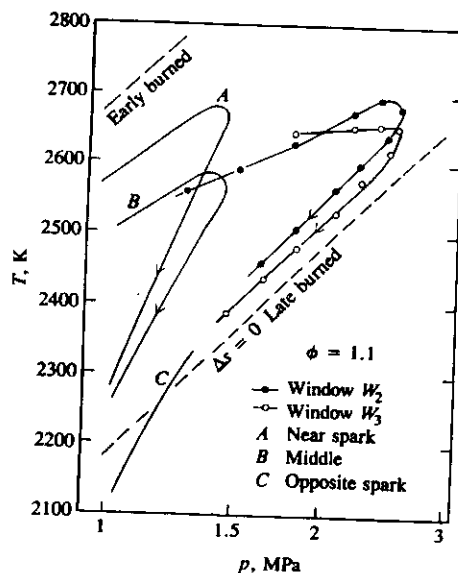
Ένα παράδειγμα της κατανομής θερμοκρασίας που υπολογίζεται με αυτό το μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 7.5



Cylinder pressure, mass fraction burned, and gas temperatures as functions of crank angle during combustion. T_u is unburned gas temperature, T_b is burned gas temperature, the subscripts e and l denote early and late burning gas elements, and \bar{T}_b is the mean burned gas temperature. (Reprinted with permission. Copyright 1973, American Chemical Society.)

Σχήμα 7.5

Ένα στοιχείο του μίγματος που καίγεται αμέσως στην αρχή της διεργασίας καύσης θα έφτανε, με απουσία ανάμιξης κατά 400 K υψηλότερη από ότι ένα στοιχείο που καίγεται περί το τέλος της διεργασίας. Η μέση θερμοκρασία του καμμένου αερίου βρίσκεται πιο κοντά στη χαμηλότερη από αυτές τις θερμοκρασίες.



Burned gas temperatures measured using spectroscopic techniques through windows in the cylinder head, as a function of cylinder pressure. Temperatures measured closer to spark plug have higher values. Dashed lines show isentropic behavior

Σχήμα 7.6

Τα δύο παραπάνω μοντέλα προσεγγίζουν αντίστοιχα καταστάσεις όπου η χρονική κλίμακα που χαρακτηρίζει την τυρβώδη ανάμιξη στο καμμένο αέριο είναι :

- (i) πολύ μικρότερη από τη συνολική διάρκεια καύσης (για το μοντέλο τέλει ανάμιξης)
- (ii) πολύ μεγαλύτερη από τη συνολική διάρκεια καύσης (για το μοντέλο χωρίς ανάμιξη).

Στο σχήμα 7.6 φαίνονται αποτελέσματα μετρήσεων θερμοκρασιών στο καμμένο αέριο που έχουν γίνει σε πειραματικούς κινητήρες με χρήση φασματοσκοπικών τεχνικών μέσα από ειδικό παράθυρο από χαλαζία στην κυλινδροκεφαλή.

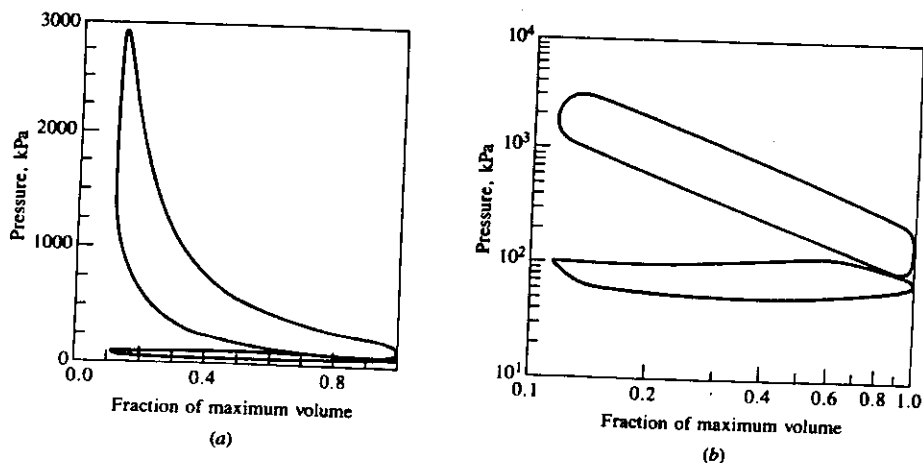
7.2.2 Ανάλυση δυναμοδεικτικού διαγράμματος

Η πίεση στον κύλινδρο μεταβάλλεται με τη γωνία στροφάλου σαν αποτέλεσμα μεταβολών στον όγκο του κυλίνδρου καθώς και της καύσης, της μετάδοσης θερμότητας στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης, της ροής από και προς τις εσοχές του θαλάμου καύσης, καθώς και των διαρροών αερίων. Τα πρώτα δύο φαινόμενα είναι αυτά που έχουν τη μέγιστη επίδραση. Έτσι μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες σχετικά με το ρυθμό καύσης από δυναμοδεικτικά διαγράμματα, εφόσον υπάρχουν μοντέλα για τα παραπάνω φαινόμενα. Τέτοιου είδους μοντέλα όμως έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα.

Η πίεση του κυλίνδρου μπορεί να μετρηθεί με πιεζοηλεκτρικούς αισθητές πίεσης. Αυτού του τύπου οι αισθητές περιέχουν έναν κρύσταλο χαλαζία. Η μία πλευρά του κρυστάλου είναι εκτεθειμένη μέσω ενός διαφράγματος στην πίεση του κυλίνδρου. Καθώς η πίεση αυξάνει ο κρύσταλος συμπιέζεται και παράγει ένα ηλεκτρικό φορτίο το οποίο είναι ανάλογο με την εξασκουμένη πίεση. Ένας ενισχυτής φορτίου χρησιμοποιείται στη συνέχεια για μετατρέψει αυτό το σήμα σε τάση που μπορεί να μετρηθεί με ένα παλμογράφο ή να διοχετευθεί σε έναν υπολογιστή εφοδιασμένο με κάρτα On-line ανάκτησης δεδομένων. Η λήψη δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων ακριβείας απαιτεί την ικανοποίηση των παρακάτω προϋποθέσεων.

- (i) Ακριβή βαθμονόμηση κρυστάλου σε πίεση αναφοράς
- (ii) Ακρίβεια καλύτερη από 0.2% στο χρονισμό ταυτόχρονης λήψης της γωνίας στροφάλου (δηλ. ακρίβεια στον εντοπισμό του AN.Σ)
- (iii) Ακριβής εκτίμηση του νεκρού όγκου
- (iv) Επαρκής ψύξη του κρυστάλου για την ελαχιστοποίηση των θερμοκρασιακών του διακυμάνσεων.

(a) Pressure-volume diagram; (b) $\log p - \log (V/V_{max})$ plot. 1500 rev/min, MBT timing, imep = 513 kPa, $\phi = 0.8$, $r_c = 8.72$, propane fuel.



Σχήμα 7.7 Επεξεργασία δυναμοδεικτικού διαγράμματος

Η ποιότητα των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων μπορεί να ελεγχθεί με την μετατροπή τους σε λογαριθμικά διαγράμματα πίεσης όγκου. (Σχήμα 7.7)

Στο διάγραμμα $\log p - \log V$ η διεργασία συμπίεσης είναι μία ευθεία γραμμή με κλίση 1.3. Η αρχή της καύσης μπορεί να εντοπισθεί στο σημείο που η ευθεία αρχίζει να καμπυλώνει, ενώ μετά το τέλος της καύσης η καμπύλη ξαναγίνεται ευθεία με κλίση 1.33 που παριστάνει την εκτόνωση. Διαγράμματα όπως αυτό του σχήματος 7.7 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της αρχής και του τέλους της καύσης, αλλά ο προσδιορισμός της γραμμής καύσης απαιτεί παραπέρα επεξεργασία.

Εδώ θα δούμε την απλούστερη τεχνική προσδιορισμού της γραμμής καύσης με βάση το δυναμοδεικτικό διάγραμμα. Η μεταβολή πίεσης που μετράμε σε ένα διάστημα γωνίας στροφάλου $\Delta\theta$, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μία μεταβολή εξαιτίας της καύσης και μία μεταβολή εξαιτίας της μεταβολής όγκου του θαλάμου καύσης :

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_v \quad (7.12)$$

Οι πιέσεις και οι όγκοι στην αρχή και το τέλος του διαστήματος $\Delta\theta$ με απουσία καύσης συνδέονται με τη σχέση :

$$p_i V_i^n = p_j V_j^n$$

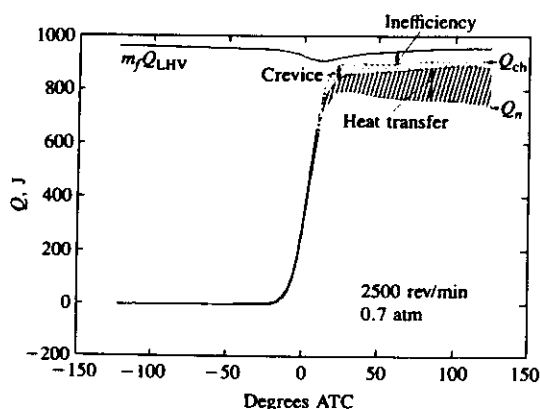
επομένως

$$\Delta p_v = p_j - p_i = p_i \left[\left(\frac{V_i}{V_j} \right)^n - 1 \right] \quad (7.13)$$

Υποθέτοντας ότι η μάζα γόμωσης που καίγεται στο διάστημα $\Delta\theta$ είναι ανάλογη με την αύξηση πίεσης λόγω καύσης (με βάση την καταστατική εξίσωση των αερίων) το κλάσμα μάζας που κήκε στο τέλος του διαστήματος i δίνεται από την σχέση :

$$\frac{m_b(i)}{m_b(\text{total})} = \frac{\sum_0^i \Delta p_c}{\sum_0^N \Delta p_c} \quad (7.14)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός διαστημάτων γωνίας στροφάλου του υπολογισμού.



Results of heat-release analysis showing the effects of heat transfer, crevices, and combustion inefficiency.

Σχήμα 7.8

Ο συνδυασμός των εξισώσεων 7.12, 7.13 και 7.14 επιτρέπει τον υπολογισμό της γραμμής καύσης, με βάση τις παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές :

- (i) Η μετάδοση θερμότητας προς τα τοιχώματα δεν υπολογίζεται ευθέως αλλά συμπεριλαμβάνεται στον πολυτροπικό εκθέτη n .
- (ii) Η αύξηση πίεσης εξαιτίας της καύσης υποτίθεται ανάλογη με τη μάζα γόμωσης που καίγεται ενώ στην πραγματικότητα θα πρέπει να υπολογιστεί με βάση την εκλυόμενη χημική ενέργεια.
- (iii) Ο πολυτροπικός εκθέτης δεν παραμένει σταθερός στην διάρκεια της καύσης. Ανεξάρτητα από αυτό το αποτέλεσμα της παραπάνω μεθοδολογίας ανάλυσης του δυναμοδεικτικού διαγράμματος εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή του n .

Ακριβέστερη ανάλυση δυναμοδεικτικού διαγράμματος μπορεί να γίνει μόνο στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου μοντέλου του κύκλου (Σχήμα 7.8).

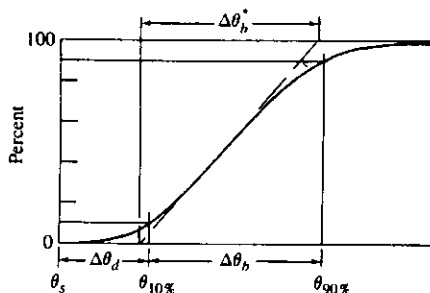
7.2.3 Φαινομενολογικά μοντέλα καύσης

Όπως ήδη θα έχετε παρατηρήσει τα προφίλ της μάζας καυσίμου που κάηκε σαν συνάρτηση της γωνίας στροφάλου σε κάθε κύκλο έχουν μία χαρακτηριστική μορφή S. Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.13 η γραμμή καύσης μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές γωνίας στροφάλου:

- (i) Γωνία ανάπτυξης της φλόγας (0-10% καμμένη μάζα)
- (ii) Γωνία ταχείας καύσης (10-90% καμμένη μάζα)
- (iii) Γωνία μείωσης ταχύτητας και παγώματος της καύσης.

Υπάρχει μία διπλή εκθετική συνάρτηση η οποία παράγει ακριβώς αυτό το σχήμα για τη γραμμή καύσης και μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να προσεγγίζει διάφορους τύπους καύσης με κατάλληλη επιλογή δύο παραμέτρων. Πρόκειται για τη συνάρτηση Wiebe :

$$x_b = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (7.15)$$



Definition of flame-development angle, $\Delta\theta_d$, and rapid-burning angle, $\Delta\theta_b$, on mass fraction burned versus crank angle curve.

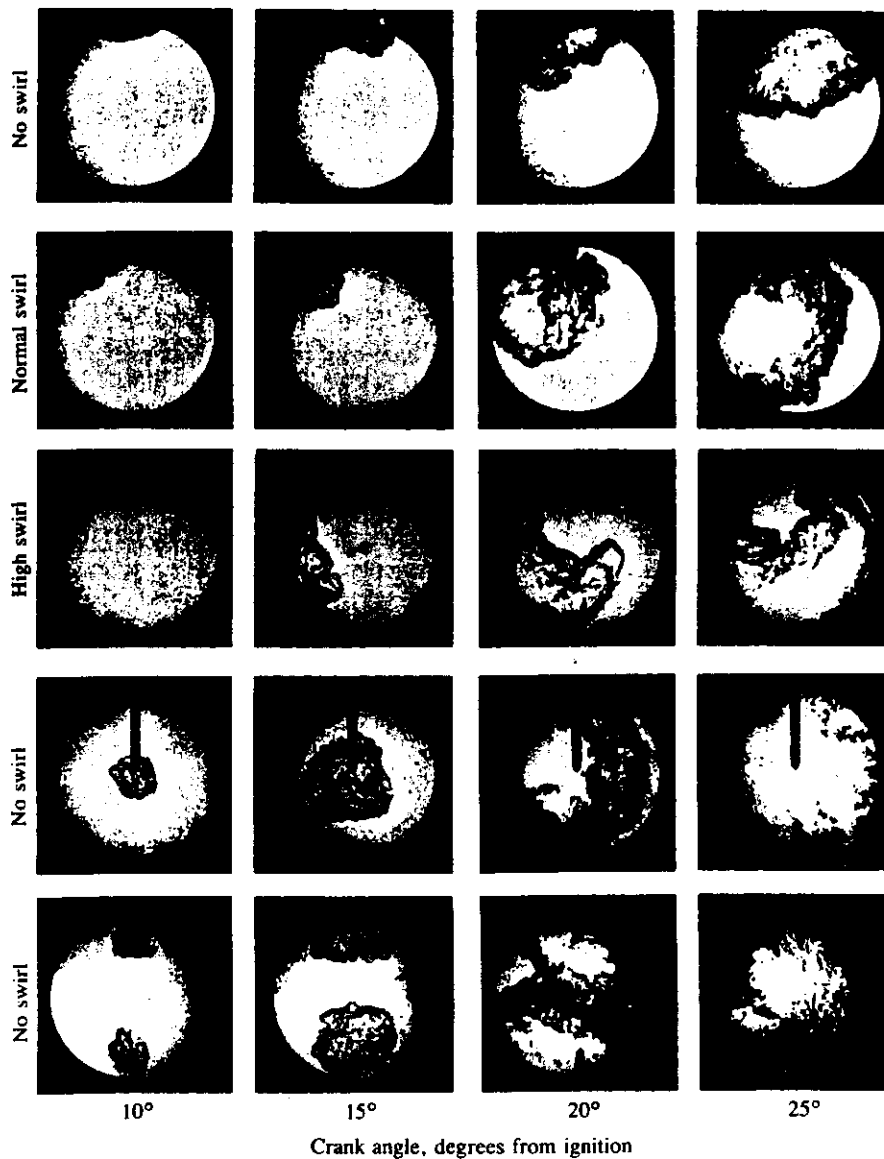
Σχήμα 7.9

Η συνάρτηση Wiebe χρησιμοποιείται ευρέως σε θερμοδυναμικά μοντέλα του κύκλου βενζινοκινητήρων και πετρελαιοκινητήρων.

7.3 Δομή και ταχύτητα της φλόγας

7.3.1 Πειραματικές παρατηρήσεις

Η διεργασία καύσης στο βενζινοκινητήρα λαμβάνει χώρα σε ένα ροικό πεδίο υψηλής τύρβης, που δημιουργείται στη διάρκεια του εμβολισμού εισαγωγής. Η κατανόηση της δομής της φλόγας καθώς αυτή εξελίσσεται ξεκινώντας από τον σπινθήρα του μπουζί, καθώς και η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας στο θάλαμο καύσης και του πως αυτή επηρεάζεται από τη ροή της γόμωσης, τη σύσταση της και τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης, έχουν μεγάλη σημασία για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του θαλάμου καύσης.

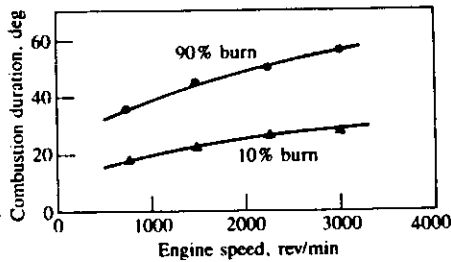


Laser shadowgraph photographs of engine combustion process taken in single-cylinder engine with transparent cylinder head. From top to bottom: side plug without swirl; side plug with normal swirl; side plug with high swirl; central plug without swirl; two plugs without swirl.

Σχήμα 7.10

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10 σχεδόν σε όλες τις γεωμετρίες κινητήρων η φλόγα αναπτύσσεται σφαιρικά ξεκινώντας από το σημείο του σπινθήρα μέχρι που να συναντήσει τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Μόνο σε περιπτώσεις με ασυνήθιστα μεγάλο στροβιλισμό της γόμωσης και αεροδυναμική σταθεροποίηση της φλόγας στη θέση του σπινθηριστή, μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική παραμόρφωση της φλόγας από ροή.

Ο ρυθμός καύσης του μίγματος εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις στροφές του κινητήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.11



Effect of engine speed on flame-development angle (0 to 10 percent burned) and overall burning angle (0 to 90 percent burned). $\phi = 1.0$, intake pressure 0.54 atm, spark 30° BTC.

Σχήμα 7.11

7.3.2 Δομή της φλόγας

Οι στρωτές φλόγες σε προαναμεμειγμένα μίγματα καυσίμου αέρα και παραμένουτος καυσαερίου χαρακτηρίζονται από μία ταχύτητα διάδοσης S_L και ένα πάχος φλόγας δ_L

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για τον ορισμό του πάχους της φλόγας είναι η παρακάτω σχέση:

$$\delta_L = \frac{D_L}{S_L}$$

Οι τυρβώδης φλόγες χαρακτηρίζονται από τη ρίζα της μέσης τιμής της διακύμανσης του τετραγώνου της ταχύτητας, την ένταση της τύρβης και τις διάφορες κλίμακες της τυρβώδους ροής μπροστά από τη φλόγα. Υπάρχει ένα αριθμός από αδιάστατες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό μίας τυρβώδους φλόγας προανάμιξης, όπως είναι ο αριθμός Reynolds της τύρβης.

$$Re_T = \frac{u' l_I}{\nu}$$

Μπορούμε επίσης να ορίσουμε μία χρονική σταθερά για την παραγωγή μίας δίνης :

$$\tau_T = \frac{l_I}{u'}$$

Ενας χαρακτηριστικός χρόνος για την χημική αντίδραση είναι ο χρόνος παραμονής στη στρωτή φλόγα :

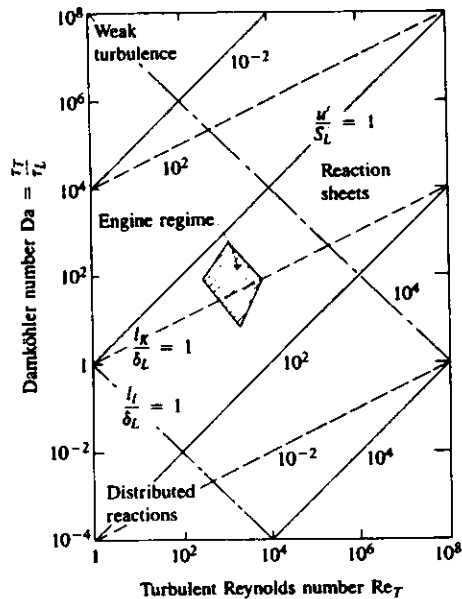
$$\tau_L = \frac{\delta_L}{S_L}$$

Το πηλίκο των δύο προαναφερθέντων χαρακτηριστικών χρόνων δίνει έναν αριθμό Damkoehler

$$Da = \frac{\tau_T}{\tau_L} = \left(\frac{l_I}{\delta_L}\right) \left(\frac{S_L}{u'}\right) \quad (7.16)$$

Ο αριθμός αυτός είναι ένα αντίστροφο μέτρο της επίδρασης της τυρβώδους ροής στις διεργασίες χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν μέσα στη φλόγα.

Οι διάφορες περιπτώσεις τυρβωδών φλογών φαίνονται στη γραφική παράσταση του αριθμού Damköhler συναρτήσει του αριθμού Reynolds της τύρβης στο σχήμα 7.12

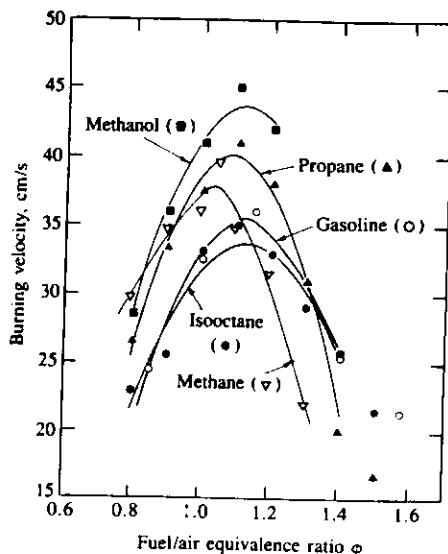


Different turbulent flame regimes on plot of Damköhler number versus turbulence Reynolds number, u' is turbulence intensity; S_L is laminar flame speed; l_I , l_K , and δ_L are integral scale, Kolmogorov scale, and laminar flame thickness.

Σχήμα 7.12

7.3.3 Ταχύτητες διάδοσης στρωτής φλόγας

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζονται ταχύτητες διάδοσης στρωτής φλόγας διαφόρων καυσίμων σαν συνάρτηση του αντίστροφου λόγου αέρα σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.



Laminar burning velocity for several fuels as function of equivalence ratio, at 1 atm and 300 K. Lines are least-squares polynomial fits to data.

Σχήμα 7.13

Η ταχύτητα διάδοσης στρωτής φλόγας είναι πολύ χαρακτηριστική ιδιότητα ενός καυσίμου μίγματος. Πρόκειται για την ταχύτητα κίνησης του ακαύστου μίγματος κάθετα στο μέτωπο της φλόγας, σε συνθήκες στρωτής ροής. Μερικές λεπτομέρειες σχετικά με δομή της φλόγας βοηθούν στην κατανόηση αυτού του μεγέθους. Μία φλόγα είναι το αποτέλεσμα μίας ευσταθούς χημικής αντίδρασης η οποία συμβαίνει μέσα σε μία περιοχή του χώρου που καλείται μέτωπο της φλόγας, και στην οποία το άκαυστο μίγμα θερμαίνεται και μετατρέπεται σε προϊόντα της καύσης. Το μέτωπο της καύσης αποτελείται από δύο περιοχές :

- (i) Μία περιοχή προθέρμανσης και
- (ii) Μία περιοχή αντίδρασης.

Στην περιοχή προθέρμανσης του άκαυστου μίγματος αυξάνει κυρίως με θερμική αγωγή από την ζώνη αντίδρασης. Δεν παρατηρείται σημαντική χημική αντίδραση και η βαθμίδα θερμοκρασίας στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Μόλις φτάσει μία κρίσιμη θερμοκρασία αρχίζει η εξώθερμη χημική αντίδραση. Η έκλυση χημικής ενέργειας με μορφή θερμότητας έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη μίας ζώνης όπου η βαθμίδα θερμοκρασίας στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω.

Το πάχος της ζώνης προθέρμανσης και της ζώνης αντίδρασης μπορούν να υπολογιστούν για μονοδιάστατες φλόγες με βάση ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Το πάχος της ζώνης προθέρμανσης δίνεται από τη σχέση :

$$\delta_{L, \text{ph}} = \frac{4.6\bar{k}}{\bar{c}_p \rho_u S_L} \quad (7.17)$$

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα καύσης μίας στρωτής φλόγας σε ένα συγκεκριμένο άκαυστο μίγμα είναι οι βαθμίδες θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων στη φλόγα και στη γειτονιά της, καθώς και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι συντελεστές διάχυσης του μίγματος.

Οι ταχύτητες καύσης σε στρωτή ροή μετρώνται συνήθως σε σφαιρικές οβίδες, όπου καταγράφεται η διάδοση μίας στρωτής φλόγας ακτινικά από το κέντρο της οβίδας. Η ταχύτητα καύσης δίνεται τότε από τη σχέση :

$$S_L = \frac{dm_b/dt}{A_f \rho_u} \quad (7.18)$$

Όπου ο ρυθμός καύσης προσδιορίζεται από το ρυθμό αύξησης της πίεσης στην οβίδα και A_f είναι η επιφάνεια της φλόγας. Εξαιτίας του μικρού πάχους της φλόγας στις συνθήκες καύσης της μηχανής (0.2 mm περίπου με τη σχέση 7.17) σε σύγκριση με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις της οβίδας, η φλόγα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

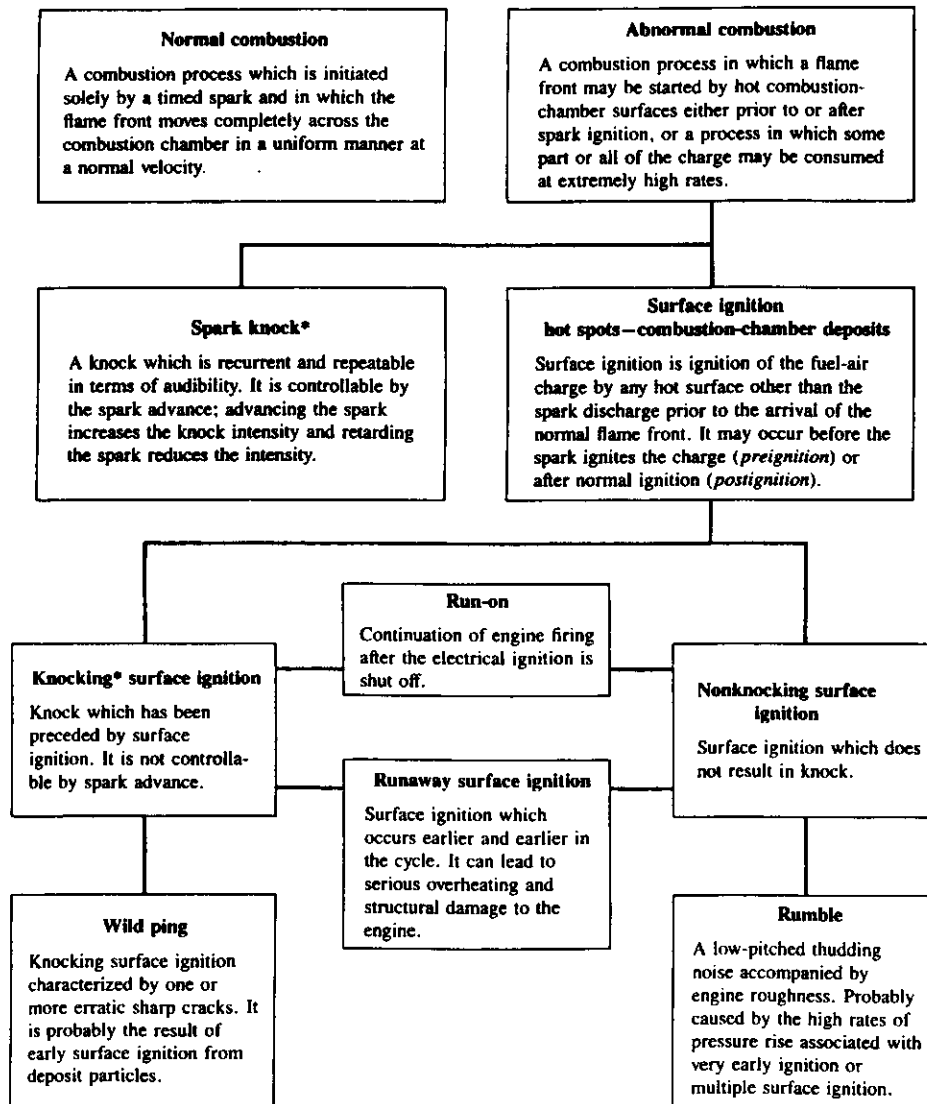
Η επίδραση του λόγου αέρα στην ταχύτητα καύσης με στρωτή ροή που φαίνεται στο σχήμα 7.13 για διάφορες ουσίες μπορεί να υπολογιστεί και για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασιών και πιέσεων με βάση τη σχέση :

$$S_L = S_{L,0} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\alpha \left(\frac{p}{p_0} \right)^\beta \quad (7.19)$$

της οποίας οι σταθερές για προπάνιο, ισοοκτάνιο και μεθανόλη δίνονται από τις σχέσεις :

$$\begin{aligned} \alpha &= 2.18 - 0.8(\phi - 1) \\ \beta &= -0.16 + 0.22(\phi - 1) \\ S_{L,0} &= B_m + B_\phi(\phi - \phi_m)^2 \end{aligned} \quad (7.20)$$

όπου ϕ_m είναι ο αντίστροφος λόγος αέρα στον οποίο το S_{L0} μεγιστοποιείται και παίρνει την τιμή B_m (οι τιμές των σταθερών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα)



*Knock: The noise associated with autoignition of a portion of the fuel-air mixture ahead of the advancing flame front. Autoignition is the spontaneous ignition and the resulting very rapid reaction of a portion or all of the fuel-air mixture.

Definition of combustion phenomena—normal and abnormal (knock and surface ignition)—in a spark-ignition engine. (Courtesy Coordinating Research Council.)

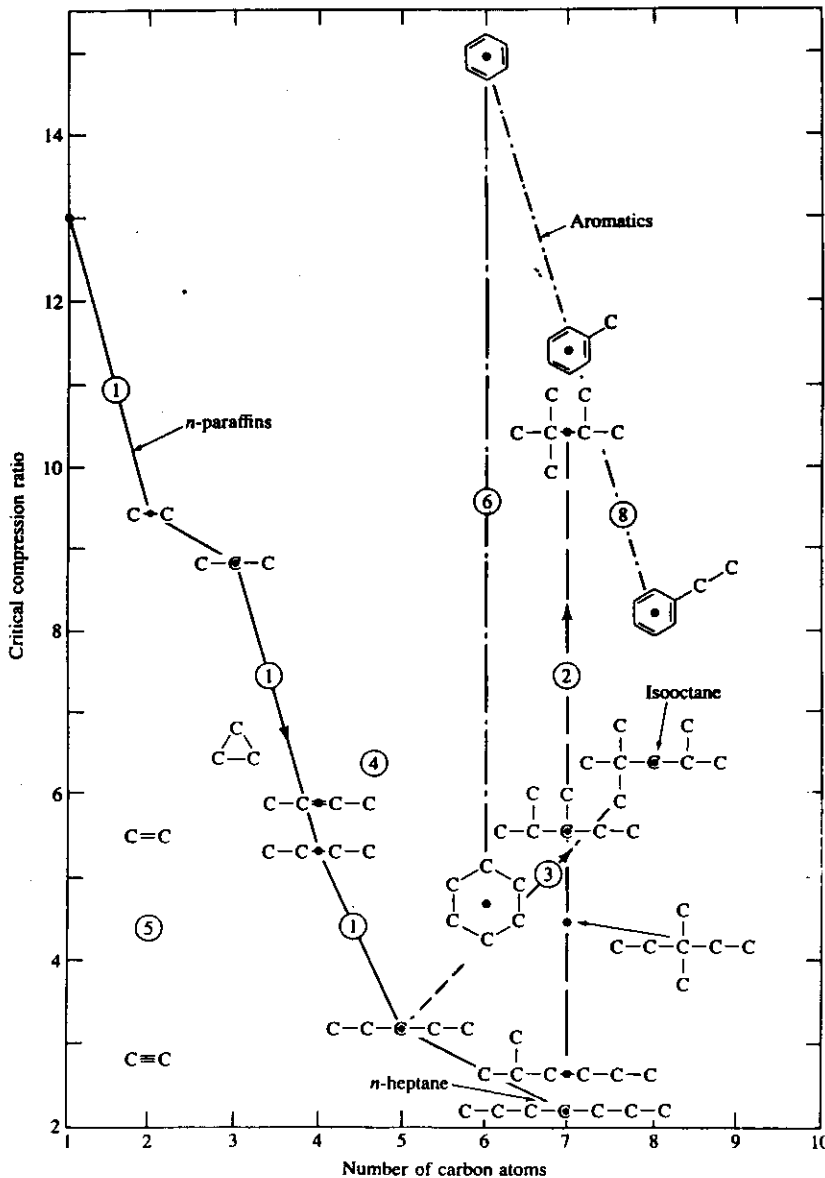
Σχήμα 7.14

7.4 Κτύπημα κατά την καύση

Στο σχήμα 7.14 περιγράφονται συνοπτικά τα διάφορα φαινόμενα κανονικής και μη κανονικής καύσης σε έναν βενζινοκινητήρα.

7.5 Επίδραση του καυσίμου - αριθμός οκτανίου

Η τάση για κτύπημα εξαρτάται από ορισμένα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και λειτουργίας του κινητήρα τα οποία επηρεάζουν τη θερμοκρασία του τμήματος του μίγματος που καίγεται τελευταίο, την πίεση του, καθώς και τον χρόνο που αυτές οι δύο μεταβλητές διατηρούν υψηλές τιμές πριν από την άφιξη της φλόγας. Όμως το κτύπημα είναι ένα φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται και από την σύσταση του καυσίμου και η εμφάνιση ή όχι του κτύπηματος εξαρτάται κυρίως από τις αντικροτικές ιδιότητες του καυσίμου. Η τάση των διαφόρων κατηγοριών υδρογονανθράκων για κτύπημα συσχετίζεται με τη μοριακή δομή τους όπως φαίνεται στο σχήμα 7.15



Σχήμα 7.15 Επίδραση μοριακής δομής στην τάση για κτύπημα

Critical compression ratio (for incipient knock at 600 rev/min and 450 K coolant temperature) as a function of number of carbon atoms in hydrocarbon molecule, illustrating the effects of changes in molecular structure. (Developed from Lovell.)

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην καύση είναι μίγματα μεγάλου αριθμού υδρογονανθράκων όλων των κατηγοριών : αλκάνια (παραφίνες), κεκορεσμένα κυκλικά (ναφθένια), αλκένια (ολεφίνες) και αρωματικά. Προφανώς απαιτείται ένα πρακτικό μέτρο της αντίστασης στο κτύπημα. Αυτή η ιδιότητα προσδιορίζεται από τον αριθμό οκτανίου του καυσίμου. Ο αριθμός αυτός καθορίζει το αν ένα καύσιμο θα κτυπήσει σε μία συγκεκριμένη μηχανή σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Όσο υψηλότερος ο αριθμός οκτανίου τόσο μεγαλύτερη η αντίσταση στο κτύπημα. Ο αριθμός οκτανίου δεν είναι μονοσήμαντη ποσότητα, αλλά μπορεί να ποικίλει σε σημαντικό βαθμό ανάλογα με το σχεδιασμό της μηχανής, τις συνθήκες λειτουργίας στη διάρκεια της δοκιμής, τις καιρικές συνθήκες κατά την δοκιμή, την κατάσταση του κινητήρα από άποψη φθοράς και τον τύπο λαδιού και καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως.

Η κλίμακα αριθμού οκτανίου βασίζεται σε δύο υδρογονάνθρακες που καθορίζουν το 0 και το 100 της : το κανονικό επτάνιο και το ισοοκτάνιο. Ο αριθμός οκτανίου ενός καυσίμου προσδιορίζεται από την περιεκτικότητα σε ισοοκτάνιο ενός μίγματος κανονικού επτανίου και ισοοκτανίου που έχει την ίδια τάση για κτύπημα με το προς δοκιμή καύσιμο σε μία πρότυπη μηχανή.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι μέτρησης αριθμού οκτανίου είναι η RON (ASTM D-2699) και η MON (ASTM D-2700) που γίνονται με έναν πρότυπο μονοκύλινδρο κινητήρα, με τις παρακάτω προδιαγραφές :

Operating conditions for research and motor methods

	Research method	Motor method
Inlet temperature	52°C (125°F)	149°C (300°F)
Inlet pressure	Atmospheric	
Humidity	0.0036-0.0072 kg/kg dry air	
Coolant temperature	100°C (212°F)	
Engine speed	600 rev/min	900 rev/min
Spark advance	13° BTC (constant)	19-26° BTC (varies with compression ratio)
Air/fuel ratio	Adjusted for maximum knock	

Οι συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα είναι πιο σκληρές στη μέθοδο MON.

Η αριθμητική διαφορά μεταξύ των αριθμών οκτανίου RON και MON ονομάζεται ευαισθησία του καυσίμου.

$$\text{Fuel sensitivity} = \text{RON} - \text{MON} \quad (7.21)$$

Η ευαισθησία του καυσίμου εξαρτάται από το αργό πετρέλαιο που προήρθε καθώς και από τις διεργασίες παραγωγής του στο διυλιστήριο. Επειδή οι τιμές RON και MON που μετρώνται στην πρότυπη μηχανή δεν προβλέπουν πάντα καλά το πως θα συμπεριφερθεί το καύσιμο σε ένα αυτοκίνητο στο δρόμο, πολλές φορές υπολογίζεται ένας αριθμός οκτανίου δρόμου

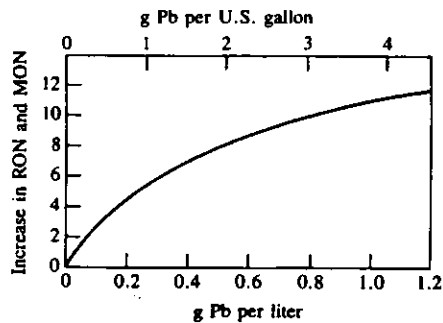
$$\text{Road ON} = a (\text{RON}) + b (\text{MON}) + c$$

όπου τα a,b,c είναι σταθερές που προσδιορίζονται πειραματικά ($a \approx b \approx 0.5$, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες).

Στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται συνήθως η μέση τιμή των δύο αριθμών οκτανίου

$$\text{Antiknock index} = \frac{\text{RON} + \text{MON}}{2} \quad (7.22)$$

Στο σχήμα 7.16 φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας αντικροτικού στον αριθμό οκτανίου της βενζίνης Super με μόλυβδο.



Gasoline octane number increase resulting from use of antiknock additive tetraethyl lead. Varies with fuel composition: average values shown.

Σχήμα 7.16

Οι απαιτήσεις διάρκειας ζωής των τριοδικών καταλυτικών μετατροπών έχουν οδηγήσει στην αντικατάσταση της βενζίνης Super από αμόλυβδη, οπότε η εξασφάλιση του απαιτούμενου αριθμού οκτανίου επιτυγχάνεται με χρήση υψηλότερου ποσοστού αρωματικών υδρογονανθράκων, αλλά και οξυγονούχων ενώσεων όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη, το TBA (C_4H_9OH) και MTBE.

Οι αντικροτικές και άλλες ιδιότητες των οξυγονούχων ενώσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Oxygenate properties

	Methanol	Ethanol	TBA	MTBE	Gasoline
Typical $(R + M)/2$ blending value	112	110	98	105	87-93
Weight percent oxygen	50	35	22	18	0
Stoichiometric (A/F)	6.5	9.0	11.2	11.7	14.5
Specific gravity	0.796	0.794	0.791	0.746	0.74
Lower heating value, MJ/kg	20.0	26.8	32.5	35.2	44.0
Latent heat of vaporization, MJ/kg	1.16	0.84	0.57	0.34	0.35
Boiling temperature, °C	65	78	83	55	27-227

TBA, tertiary butyl alcohol; MTBE, methyl tertiary butyl ether.