

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΤΡΩΤΕΣ ΦΛΟΓΕΣ ΠΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

5.1 Φαινομενολογικά χαρακτηριστικά στρωτών φλογών πρόμιξης.

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στα υποηχητικά κύματα καύσης (deflagrations) δηλαδή στην περιοχή III της καμπύλης Hugoniot. Τα κλασσικά κύματα καύσης (η συνήθης μορφή καύσης) είναι πολλές φορές σημαντικά πιο πολύπλοκα από τα κρουστικά κύματα καύσης, επειδή λόγω των χαμηλών ταχυτήτων διάδοσης που είναι από μερικά cm/s έως μερικές εκατοντάδες cm/s, επηρεάζονται έντονα από εξωτερικές επιδράσεις (Strehlow (1968), Glassman (1977), Lewis and Von Elbe (1961), Jost (1946), Kuo (1986)). Ο Πίνακας 4.1 δίδει μερικά δεδομένα για τις παραμέτρους της υποηχητικής καύσης (εφεξής θα χρησιμοποιείται ο όρος καύση). Η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας, η διάμετρος του σωλήνα, το ιξώδες του μίγματος και η τραχύτητα των τοιχωμάτων συνολικά προσδιορίζουν το αν μια φλόγα μπεκ τύπου σωλήνα θα είναι στρωτή ή τυρβώδης. Εδώ θα μελετηθούν οι στρωτές φλόγες ενώ στο Κεφάλαιο 8 οι τυρβώδεις φλόγες πρόμιξης.

Εν γένει λόγω της μικρής πτώσης πίεσης διαμέσου ενός κύματος καύσης η διεργασία στην φλόγα θεωρείται ισοβαρής. Το πάχος του μετώπου της φλόγας, δ , συνήθως ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς, $(T_2 - T_1)$, προς την μέγιστη βαθμίδα θερμοκρασίας $(dT/dx)_{\max}$. Το πάχος είναι συνήθως της τάξης λίγων mm. Επίσης σε σχέση με το σχήμα 4.1 τα κύματα καύσης μόνο στην ιδανική κατάσταση είναι επίπεδα. Λόγω του ιξώδους, των ροικών διαμορφώσεων και της τριβής στους τοίχους των τοιχωμάτων το σύνθετο προφίλ του μετώπου της φλόγας σε π.χ. σωλήνα είναι παραβολικό με το μέγιστο στον άξονα. Λόγω επίσης ανωστικών δυνάμεων μπορεί να είναι και ασύμμετρο.

Με αναφορά το σχήμα 4.3 έχουμε τις απόλυτες ταχύτητες: V_f με την οποία η φλόγα διασχίζει τον σωλήνα και V_u είναι η ταχύτητα κίνησης του φρέσκου άκαυστου μίγματος (στην γενική περίπτωση μη μηδενική). Η θεμελιώδης ταχύτητα διάδοσης του μετώπου της φλόγας υπό συνθήκες στρωτής ροής, S_L , (fundamental flame speed ή laminar flame speed) ορίζεται σαν την ταχύτητα του μετώπου σε διεύθυνση κάθετη προς αυτό και σε σχέση με το φρέσκο άκαυστο μίγμα των αντιδρώντων. Συνεπώς έχουμε τη σχέση:

$$S_L = V_f \pm V_u \quad (5.1)$$

το S_L είναι χαρακτηριστική θερμοκινητική ιδιότητα του μίγματος. Την εξάρτηση του από τα χαρακτηριστικά του μίγματος θα την εξετάσουμε διεξοδικότερα στο υποκεφάλαιο 5.3. Από

την εξίσωση (5.1) μπορούμε να συνάγουμε τα εξής: Εάν η V_u ρυθμιστεί έτσι ώστε το κύμα να είναι στάσιμο τότε $V_f = 0$ και το $S_L \equiv V_u$. Εάν όμως το $S_L > V_u$ η φλόγα διαδίδεται μέσα από το φρέσκο μίγμα και έχουμε οπισθοδρόμηση ή αναστροφή της φλόγας (flash-back). Εάν $S_L < V_u$ η υπερβολική τροφοδοσία μίγματος σπρώχνει τη φλόγα βαθιά μέσα στα καυσαέρια με αποτέλεσμα να έχουμε το εκφύσημα της φλόγας (blow-off). Τα δύο αυτά θα συζητηθούν εκτενέστερα σε επόμενο υποκεφάλαιο. Εφαρμόζοντας διατήρηση της μάζας δια μέσου του μετώπου της φλόγας, στην γενική περίπτωση, έχουμε μια ταχύτητα του μετώπου φλόγας, V_f , μεγαλύτερη της θεμελειώδους ταχύτητα της φλόγας, S_L , κατά το λόγο των πυκνοτήτων

$$\rho_u \cdot S_L \cdot A = \rho_b \cdot V_f \cdot A \rightarrow V_f = \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \cdot S_L \quad (5.1)'$$

Θα μελετήσουμε τώρα τα χαρακτηριστικά του λύχνου Bunsen μιας βασικής πειραματικής διάταξης καυστήρα φλόγας πρόμιξης (Kanury, 1976). Η βασική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 5.1. Υψηλής ταχύτητας αέριο καύσιμο προσάγεται στο σωλήνα από την βάση του και αναρροφά με την σειρά του αέρα του περιβάλλοντος από τις οπές στην βάση του σωλήνα. Εάν οι οπές αέρα είναι τελειώς κλειστές, μόνο καθαρό καύσιμο εξέρχεται από το άνω χείλος του σωλήνα υπό μορφή jet. Εάν αναφλεγεί καθώς εξέρχεται τότε λαμβάνουμε το σχήμα της φλόγας διάχυσης. Εάν οι οπές στη βάση αρχίζουν να ανοίγουν σταδιακά και το καύσιμο αρχίζει να προαναμιγνύεται με τον αέρα των οπών, ένας μπλε κώνος αρχίζει να εμφανίζεται εντός του περιβλήματος της έντονα φωτεινής φλόγας διάχυσης. Καθώς ο αέρας αυξάνει σιγά-σιγά ο κώνος πρόμιξης μικραίνει και η φλόγα διάχυσης εξαφανίζεται, έτσι ώστε σε κάποιο στοιχειομετρικό λόγο καυσίμου/αέρα ο κώνος πρόμιξης είναι αυτός που παραμένει.

Ο κώνος πρόμιξης είναι λιγότερο φωτεινός και πολύ κοντότερος από τον φάκελο της φλόγας διάχυσης. Το σχήμα 5.2 δείχνει το πραγματικό σχήμα του “κώνου” πρόμιξης. Η κορυφή του είναι στρογγυλεμένη ενώ στη βάση του αιωρείται και δεν ακουμπά τα χείλη του σωλήνα. Το στρογγύλεμα της κορυφής οφείλεται σε αυξημένο τοπικά, S_L , λόγω αύξησης της διάχυσης των συστατικών και της θερμότητας εξαιτίας της “σύμπτωσης” της ακτίνας καμπυλότητας στην κορυφή με το πάχος του μετώπου της φλόγας. Η αιώρηση υπεράνω του χείλους του σωλήνα οφείλεται σε απώλεια θερμότητας προς τα τοιχώματα και την διαφυγή φρέσκου μίγματος προς τα έξω λόγω της μικρής διαφοράς πίεσης που επικρατεί. Επί τη βάσει των ανωτέρω συζητήσεων η μεταβολή της ταχύτητας της φλόγας συναρτήσει της ακτίνας του κώνου Bunsen είναι ποιοτικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Το Σχήμα 5.4 δείχνει την παραμόρφωση του ιδανικού κώνου κατά το Σχήμα 5.3 λόγω των διαφορών

μεταξύ της ακτινικής κατανομής του $S_L(r)$ και της συνιστώσας, της ταχύτητας παροχέτευσης, $V_u = u_{sm}(r)$, κάθετα προς το μέτωπο της φλόγας. Στις θέσεις όπου $S_L < u_s$ η φλόγα ωθείται προς τα έξω, ενώ εκεί που $S_L > u_s$ η φλόγα ωθείται προς τα έσω. Από αυτές τις κατανομές φαίνεται καθαρά ότι εάν $S_L > u_s$ έχουμε αναστροφή της φλόγας, ενώ όταν $S_L < u_s$ έχουμε εκφύσημα ή απόσβεση. Αυτές οι δύο περιπτώσεις θα συζητηθούν εκτενέστερα στο υποκεφάλαιο 5.6.2.

5.2 Θεωρίες διάδοσης της φλόγας.

Εν γένει η θεωρία διάδοσης της φλόγας απαιτεί επίλυση των εξισώσεων διατήρησης του κεφαλαίου 3 για τον λεπτομερή υπολογισμό της δομής της φλόγας, ήτοι τις χωρικές κατανομές της πίεσης, της ταχύτητας, της θερμοκρασίας, των συγκεντρώσεων όλων των συστατικών και της θεμελιώδους ταχύτητας της φλόγας. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες για την επίλυση περιλαμβάνουν τις αρχικές συνθήκες του μίγματος, τους συντελεστές και ιδιότητες μεταφοράς, τις θερμοδυναμικές ιδιότητες όλων των συστατικών και λεπτομερή δεδομένα για τον κινητικό μηχανισμό των αντιδράσεων. Θεωρίες που ακολουθούν μια τέτοια λεπτομερή επίλυση λέγονται συστηματικές. Συχνά όμως ένας μηχανικός που σχεδιάζει π.χ. καυστήρες ή μετακαυστήρες ή επιθυμεί να εκτιμήσει τον κίνδυνο πυρκαγιάς ενός συγκεκριμένου μίγματος σε ορισμένο χώρο, δεν χρειάζεται την λεπτομερή περιγραφή της δομής της φλόγας αλλά μόνο συνολικά (bulk) μεγέθη όπως την ταχύτητα του μετώπου S_L . Οι θεωρίες που παρέχουν τέτοιες συνολικές (bulk ή global) πληροφορίες χωρίζονται στις θερμικές και στις θεωρίες διάχυσης. Οι θεωρίες διάχυσης στηρίζουν την ανάλυσή τους στο ότι η διεργασία της φλόγας μπορεί να ελέγχεται μόνο από την διάχυση αλυσιδωτών φορέων, ριζικών και ατόμων (βλέπε κεφάλαιο 2), από τη ζώνη αντίδρασης προς τον άκαυστο χώρο. Οι θερμικές θεωρίες στηρίζουν την ανάλυσή τους στο ότι η διεργασία μπορεί να ελέγχεται από την αγωγή θερμότητας από τη ζώνη αντίδρασης προς τη ζώνη των άκαυστων αντιδρώντων. Στην πραγματικότητα πολύ λίγες φλόγες ελέγχονται μόνο από τον ένα εκ των δύο μηχανισμών.

Θα παραθέσουμε τώρα ως παράδειγμα, την θερμική θεωρία των Mallard και Le Chatelier. Η ανάλυση αυτή σαν σκοπό έχει τον υπολογισμό του S_L . Η θερμοκρασιακή μεταβολή δια μέσου της φλόγας μπορεί να παρασταθεί όπως στο Σχήμα 5.5. η φλόγα διαιρείται σε τρεις ζώνες. Η ζώνη I είναι η ζώνη προθέρμανσης όπου τα άκαυστα αέρια θερμαίνονται μέσω αγωγής θερμότητας και φθάνουν στην θερμοκρασία έναυσης, T_i . Η ζώνη

II είναι η ζώνη όπου λαμβάνουν χώρα οι χημικές αντιδράσεις και η χημική ενθαλπία μετατρέπεται σε αισθητή ενθαλπία.

Το ενεργειακό ισοζύγιο στην ζώνη I δίδει:

$$\dot{m}C_p(T_i - T_0) = \lambda \frac{(T_f - T_i)}{\delta_r} \quad (5.2)$$

Επίσης:

$$\dot{m} = \rho S_L \quad (5.3)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα των άκαυστων αερίων.

Από τις εξισώσεις (5.2) και (5.3) έχουμε:

$$S_L = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \frac{1}{\delta_r} \quad (5.4)$$

Εάν ορίσουμε, τ_r , σαν τον χρόνο αντίδρασης τότε:

$$\delta_r = S_L \tau_r = S_L \frac{1}{\frac{(v_i'' - v_i')}{\frac{dn_i}{dt}}} \quad (5.5)$$

Ο παρανομαστής είναι ο ρυθμός αντίδρασης, RR , και έτσι:

$$\delta_r = S_L \frac{1}{RR} \quad (5.6)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.6) στην (5.4) έχουμε:

$$S_L = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\rho C_p} \right) \frac{(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \frac{(v_i'' - v_i')}{\frac{dn_i}{dt}}} \sim \sqrt{\alpha \cdot RR} \quad (5.7)$$

όπου α είναι ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας. Εκτιμούμε επίσης ότι το πάχος του μετώπου της φλόγας είναι

$$\delta_L = \frac{2\alpha}{S_L} = \frac{2}{S_L} \left(\frac{k_{cond}}{\rho \cdot c_p} \right) \approx 1 \text{ mm} \quad (5.8)$$

Αυτό το αποτέλεσμα της εξ. (5.7) είναι ένα από τα πλέον σημαντικά για τη θεωρία διάδοσης της στρωτής φλόγας. Φυσικά είναι καθαρά ποιοτική έκφραση η οποία όμως δίδει όλες τις ενδείξεις για την τάση συμπεριφοράς του S_L συναρτήσει των θερμοχημικών παραμέτρων.

5.3 Επίδραση φυσικών και χημικών μεταβολών επί της ταχύτητας της φλόγας.

5.3.1 Επίδραση του λόγου καυσίμου / αέρα (F / A).

Η μεταβολή της ταχύτητας της στρωτής φλόγας, S_L , συναρτήσει του λόγου (F/A) εξαρτάται κυρίως από την μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει του λόγου (F/A). Για καύσιμους υδρογονάνθρακες (HC) η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται σε στοιχειομετρικά ή ελαφρώς πλούσια μίγματα. Μερικά τυπικά αποτελέσματα για την ταχύτητα της φλόγας συναρτήσει του ογκομετρικού ποσοστού του καυσίμου στον αέρα δείχνονται στο Σχήμα 5.6. Είναι γενικά αποδεκτό να υποθέτουμε ότι ένα μίγμα που έχει μέγιστη θερμοκρασία φλόγας θα έχει και μέγιστη ταχύτητα φλόγας. Σε πολύ φτωχά ή πολύ πλούσια μίγματα είναι αδύνατο να διαδοθεί η φλόγα και κατά συνέπεια έχουμε ανώτερα και κατώτερα όρια που λέγονται όρια ευφλεκτότητας και που θα συζητηθούν εκτενέστερα σε άλλο κεφάλαιο.

5.3.2 Επίδραση της μοριακής δομής του καυσίμου.

Το Σχήμα 5.7 δείχνει τη μεταβολή του S_L συναρτήσει του αριθμού των αντικατασταθέντων ομάδων μεθυλίου. Στο δε σχήμα 5.8 δίδεται η μέγιστη ταχύτητα καύσης συναρτήσει του αριθμού ατόμων άνθρακα στον δεσμό για μία σειρά από κοινούς υδρογονάνθρακες. Παρατηρούμε ότι ενώ για τις παραφίνες η επίδραση είναι μικρή, για τους ακόρεστους υδρογονάνθρακες η επίδραση είναι σημαντική.

5.3.3 Επίδραση προσθετικών.

Η επίδραση ανενεργών συστατικών όπως CO_2 , N_2 , He και Ar προκύπτει μέσω της μεταβολής του συντελεστή θερμικής διαχυτότητας $\alpha = \lambda / (\rho C_p)$. Η επίδραση επιπλέον οξειδωτικού ή καυσίμου αναμένεται να είναι παρόμοια με αυτή των ανενεργών συστατικών. Για την ανάμιξη καυσίμων συστατικών μπορούμε να διατυπώσουμε το νόμο Mallard και Le Chatelier: εάν δύο ή τρία καύσιμα μίγματα με ίσες ταχύτητες καύσης αναμιχθούν σε οιαδήποτε αναλογία, η ταχύτητα καύσης του τελικού μίγματος παραμένει αναλλοίωτη. Δηλαδή μίγματα οριακών μιγμάτων είναι οριακά μίγματα. Παρομοίως μίγματα με μέγιστο S_L δίδουν μίγματα με μέγιστο S_L .

5.3.4 Επίδραση της πίεσης.

Από την εξίσωση (5.7) προέκυψε ότι $S_L \sim \sqrt{\alpha \cdot RR}$. Επειδή $RR \sim p^{n-1}$, όπου n η τάξη της αντίδρασης, $S_L \sim \sqrt{\frac{1}{\rho} p^{n-2}} \sim \sqrt{p^{n-2}}$ και συνεπώς προκύπτει η εξάρτηση της ταχύτητας

καύσης από την πίεση. Η κατωτέρω μορφή εξάρτησης υποστηρίζεται και από πειραματικά δεδομένα.

$$S_L \sim p^{\frac{n-2}{2}} \quad (5.9)$$

5.3.5 Επίδραση της θερμοκρασίας φλόγας και μίγματος.

Επί τη βάση της εξίσωσης (5.7) και του νόμου του Arrhenious η θερμοκρασιακή εξάρτηση του S_L προκύπτει ως

$$S_L \sim \sqrt{e^{\frac{E_a}{R_u T}} = e^{-\frac{E_a}{2R_u T}}} \quad (5.10)$$

Το Σχήμα 5.9 δείχνει την εκθετική εξάρτηση του S_L από την αρχική θερμοκρασία του μίγματος. Ο εκθέτης στην υποφαινόμενη σχέση $S_L \sim T_0^m$ είναι από 1.5 έως 2.0. Μία τέτοια πειραματική εξάρτηση όμως δεν εξηγείται απολύτως από το νόμο του Arrhenius και την εξίσωση (5.9).

Η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας για διάφορα μίγματα συναρτήσει της θερμοκρασίας φλόγας, T_f , δείχνεται στο Σχήμα 5.10. Αυτά τα δεδομένα δείχνουν ότι το S_L εξαρτάται και καθορίζεται από την θερμοκρασία φλόγας, T_f , και αυτό οφείλεται στις αντιδράσεις διασπάσεων που ευνοούνται στις υψηλές θερμοκρασίες και παράγουν ριζικά στην φλόγα.

5.3.6 Εμπειρικοί συσχετισμοί για τη S_L

Οι Metghalchi and Keck (Turns, 1986) ανέπτυξαν τον ακόλουθο συσχετισμό:

$$S_L = S_{L,ref} \left(\frac{T_u}{298K} \right)^\gamma \left(\frac{P}{1atm} \right)^\beta (1 - 2.1Y_{dil}) \quad (5.11)$$

Όπου Y_{dil} είναι το κλάσμα μάζας του αραιωτικού και ϕ ο σχετικός λόγος καυσίμου/αέρα.

Επίσης οι εκθέτες είναι

$$\begin{aligned} S_{L,ref} &= B_M + B_2(\phi - \phi_M) \\ \gamma &= 2.18 - 0.8(\phi - 1) \\ \beta &= -0.16 + 0.22(\phi - 1) \end{aligned}$$

Με τις σταθερές για διάφορα καύσιμα να είναι (Turns, 1986):

Fuel	ϕ_M	B_M (cm/s)	B_2 (cm/s)
Methanol	1.11	36.92	-140.51
Propane	1.08	34.22	-138.65
Isooctane	1.13	26.32	-84.72

5.4 Πειραματικός προσδιορισμός της ταχύτητας της φλόγας.

Υπάρχουν έξι βασικοί τύποι πειραμάτων (Kuo, 1986) που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η ταχύτητα της καύσης. Αυτοί είναι: 1) η μέθοδος του καυστήρα Bunsen, 2) η μέθοδος του διαφανούς σωλήνα, 3) η μέθοδος της “βόμβας” σταθερού όγκου, 4) η μέθοδος της φουσαλίδας σαπουνιού, 5) η μέθοδος ανίχνευσης σωματιδίων και 6) η μέθοδος του καυστήρα επίπεδης φλόγας. Αυτές οι μέθοδοι περιγράφονται περιληπτικά κατωτέρω.

Η μέθοδος του καυστήρα Bunsen.

Η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου του καυστήρα προαναμιγμένων αντιδρώντων περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 5.1. Λειτουργώντας τον καυστήρα έξω από τα όρια οπισθοχώρησης και εκφυσίματος της φλόγας δηλαδή επιτυγχάνοντας ένα σχεδόν σταθερό κώνο φλόγας μπορούμε με απλό αλλά προσεγγιστικό τρόπο να υπολογίσουμε την ταχύτητα S_L . Σύμφωνα με το σχήμα 5.2 εάν A_f είναι η επιφάνεια του κώνου της φλόγας, A_t είναι η διατομή του σωλήνα και η μέση ταχύτητα ροής του μίγματος στο σωλήνα είναι V_t τότε η ταχύτητα S_L μπορεί να υπολογιστεί από την διατήρηση της μάζας ως

$$S_L = V_t \frac{A_t}{A_f} \quad (5.12)$$

Η κυριότερη πηγή λάθους εξ αυτής της εξίσωσης είναι η δυσκολία υπολογισμού του A_f . Στην πράξη το A_f υπολογίζεται με οπτικές μεθόδους απεικόνισης της ροής. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι $\pm 20\%$.

Η μέθοδος του διαφανούς σωλήνα.

Εάν γεμίσουμε έναν οριζόντιο διαφανή σωλήνα με ένα ομοιογενές καύσιμο μίγμα και το ενώσουμε στην μία άκρη του το μέτωπο της φλόγας θα κινηθεί διαμέσου του σωλήνα. Φυσικά η διάμετρος του θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της διαμέτρου ψύξης για το δεδομένο μίγμα (τη διάμετρο ψύξης θα τη μελετήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο) για να μπορεί να διαδοθεί η φλόγα. Τοποθετώντας ένα στόμιο εξόδου στο απέναντι άκρο του σωλήνα ελαττώνονται οι πιεστικές ανομοιομορφίες και λαμβάνουμε ομοιόμορφη κίνηση του μετώπου της φλόγας. Αλείφοντας το άκρο του στομίου με σαπούνι, μέσω της αύξησης της φουσαλίδας στο στόμιο μπορεί να ευρεθεί η S_L ως

$$S_L = (V_0 - V_g) \frac{A_{tube}}{A_f} \quad (5.13)$$

όπου V_0 είναι η ταχύτητα της ομοιόμορφης κίνησης του μετώπου της φλόγας και V_g είναι η ταχύτητα του άκαυστου μίγματος εμπρός από την φλόγα. Μέθοδοι οπτικής απεικόνισης χρησιμοποιούνται και εδώ για τον υπολογισμό των ανωτέρω μεγεθών. Η μέθοδος αυτή έχει την ίδια ακρίβεια με τη μέθοδο Bunsen.

Η μέθοδος της “βόμβας” σταθερού όγκου.

Στη μέθοδο της βόμβας σταθερού όγκου το καύσιμο αναφλέγεται στο κέντρο ενός στερεού σφαιρικού δοχείου, συνήθως διαμέτρου 30cm . Καθώς η φλόγα αναπτύσσεται η εκτόνωση των καυσαερίων προκαλεί αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του άκαυστου μίγματος λόγω αδιαβατικής συμπίεσης. Η θερμοκρασιακή αύξηση προκαλεί αύξηση της ταχύτητας του μετώπου της φλόγας από το κέντρο προς τον τοίχο. Εδώ απαιτείται σύγχρονη καταγραφή του μεγέθους της σφαιρικής ζώνης των καυσαερίων και της πίεσης εντός του δοχείου για τον υπολογισμό του S_L . Μπορεί να δειχθεί ότι:

$$S_L = \left(1 - \frac{R^3 - r^3}{3P\gamma_u r^2} \frac{dP}{dr} \right) \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dt} - \frac{R^3 - r^3}{3P\gamma_u r^2} \frac{dP}{dt} \quad (5.14)$$

όπου $\gamma_u = C_p/C_v$ του άκαυστου μίγματος

P = πίεση σε χρόνο t

R = ακτίνα της σφαίρας

r = στιγμιαία ακτίνα της σφαιρικής φλόγας

Η παραπάνω μέθοδος συνήθως υπερεκτιμά την πραγματική ταχύτητα της φλόγας.

Η μέθοδος του καυστήρα επίπεδης φλόγας.

Είναι η πλέον ακριβής μέθοδος λόγω της επίτευξης ενός επιπέδου μετώπου φλόγας υπεράνω του καυστήρα που μπορεί να μετρηθεί εύκολα. Περιλαμβάνει ένα μεταλλικό πορώδη δίσκο ή σειρές μικρής διαμέτρου ($\leq 1\text{mm}$) σωλήνων τοποθετημένων στο στόμιο εξόδου ενός μεγαλύτερης διαμέτρου και ροής εξωτερικού σωλήνα. Το αέριο μίγμα αναφλέγεται σε υψηλή παροχή και ρυθμίζεται έως ότου επιτευχθεί η επίπεδη φλόγα. Τοποθετώντας κατάντη της φλόγας ένα πλέγμα η φλόγα σταθεροποιείται ευκολότερα. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για μίγματα με χαμηλή ταχύτητα φλόγας ($\sim 15\text{cm/s}$) διότι στα μίγματα με υψηλά S_L η φλόγα απομακρύνεται από τον καυστήρα και λαμβάνει κωνικά σχήματα. Επέκταση της μεθόδου σε μίγματα με υψηλά S_L επιτυγχάνεται μέσω ψύξης του πορώδους δίσκου κάτι το οποίο οδηγεί τη φλόγα πίσω στον επίπεδο καυστήρα.

Στην πρώτη διάταξη, χωρίς ψύξη, η ταχύτητα της φλόγας υπολογίζεται από την κυκλική επιφάνεια της φλόγας και την παροχή του φρέσκου μίγματος. Στη διάταξη με ψύξη

δημιουργείται ένα διάγραμμα του S_L συναρτήσει του ρυθμού ψύξης και κατόπιν παρεμβολής σε μηδενική ψύξη λαμβάνεται η αδιαβατική ταχύτητα της στρωτής φλόγας.

5.5 Όρια ευφλεκτότητας και αρχές σταθεροποίησης του μετώπου της φλόγας σε στρωτή ροή.

5.5.1 Όρια ευφλεκτοτητας (flammability limits)

Υπάρχουν δύο τύποι ορίων που συνδέονται με την διάδοση της στρωτής φλόγας. Ο ένας τύπος αναφέρεται στην ικανότητα του (συνήθως στάσιμου) μίγματος να υποστηρίξει την διάδοση φλόγας και έχει σχέση με την σύσταση του μίγματος (Φ). Ο άλλος τύπος μελετά τον συσχετισμό των ορίων ευστάθειας της φλόγας σε σχέση με τις ροϊκές συνθήκες και αναφέρεται σε ρέοντα μίγματα. Τα όρια ευφλεκτότητας και η απόσταση απόσβεσης ανήκουν στην πρώτη κατηγορία και θα μελετηθούν στο παρόν υποκεφάλαιο 5.5.1 ενώ η δεύτερη κατηγορία θα μελετηθεί στο υποκεφάλαιο 5.5.2.

Θεωρητικά ένα μίγμα καυσίμου–οξειδωτή (αέρα) θα αντιδράσει με ρυθμό κατανάλωσης του καυσίμου που προσδιορίζεται από τις αρχές της χημικής κινητικής. Ο ρυθμός όμως της αντίδρασης θα υποστηρίξει την εμφάνιση και διάδοση της φλόγας κάτω από ορισμένες μόνο συνθήκες. Η πιο σημαντική παράμετρος που προσδιορίζει τις συνθήκες αυτές είναι ο λόγος καυσίμου–οξειδωτή (ή αέρα) στο καύσιμο μίγμα. Για κάθε τέτοιο λόγο (K/A) υφίσταται ένα διάγραμμα με παραμέτρους τον σχετικό λόγο καυσίμου–αέρα (Φ), την θερμοκρασία και την πίεση του μίγματος που προσδιορίζει την περιοχή όπου το μίγμα είναι δυνατό να αναφλεγεί με δεδομένο ποσό ενέργειας E (π.χ. μέσω σπινθήρα). Τα όρια ευφλεκτότητας συνήθως δίνονται με τον καθορισμό του εύρους των συνθηκών (π.χ. T , P , Φ) κάτω από τις οποίες η έναυση είναι δυνατή.

Παρενθετικά θα πρέπει να σημειώσουμε τα εξής: Αυτανάφλεξη (spontaneous ignition) ενός καυσίμου μίγματος έχουμε όταν αυξάνουμε τη θερμοκρασία του ή το υποβάλλουμε σε αδιαβατική συμπίεση. Εξαναγκασμένη ανάφλεξη έχουμε όταν προσθέτουμε τοπικά ενέργεια στο μίγμα μέσω μιας εξωτερικής πηγής, όπως ηλεκτρόδιο, ηλεκτρικό σπινθήρα, πυρωμένα σωματίδια, φλόγα πιλότο κλπ. Τα εύρη ανάφλεξης συνήθως παρίστανται σε διαγράμματα $T-\Phi$ ($P = ct$) ή $P-\Phi$ ($T = ct$) όπως δείχνεται στο Σχήμα 5.11. Τα διαγράμματα αυτά έχουν σχήμα U και καθορίζουν τα όρια όπου έχουμε ανάφλεξη (ignition). Οι μορφές τους καθορίζονται μέσω μετρήσεων σε ειδικές συσκευές κάτω από καθορισμένες συνθήκες γι' αυτό και δεν ισχύουν για όλες τις συνθήκες καύσης. Η παραδοσιακή διάταξη μέτρησης (Kuo, 1986) που χρησιμοποιείται αποτελείται από κατακόρυφο γυάλινο σωλήνα, μήκους l (11.25) και διαμέτρου d (50mm), με κλειστό το

άνω άκρο (Kuo, 1986). Η πηγή έναυσης είναι ένας ηλεκτρικός σπινθήρας και τοποθετείται στο κάτω ανοιχτό άκρο του σωλήνα. Το μίγμα θεωρείται αναφλέξιμο μόνο εάν η φλόγα μεταδοθεί μέχρι το άνω άκρο του σωλήνα. Ο Πίνακας 5.1 (Kanury, 1975) δίνει διάφορα τεχνικά δεδομένα για διάφορα καύσιμα μαζί με τα όρια ευφλεκτότητας.

Με αναφορά τα γενικευμένα διαγράμματα του σχήματος 5.11 μπορούμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα:

- 1) Τα όρια ευφλεκτότητας, πλούσια και φτωχά, είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας του μίγματος. Για τους υδρογονάνθρακες ισχύουν οι προσεγγιστικές σχέσεις (L – lean – φτωχό, R – rich – πλούσιο)

$$\begin{aligned}\Phi_L(T_2) &\approx \Phi_L(T_1) - 9.2 \cdot 10^{-4}(T_2 - T_1) \\ \Phi_R(T_2) &\approx \Phi_R(T_1) + 2.5 \cdot 10^{-4}(T_2 - T_1)\end{aligned}\quad (5.15)$$

όπου Φ ο σχετικός λόγος (K/A) και $T_{1,2}$ οι θερμοκρασίες του μίγματος.

- 2) Η επίδραση της πίεσης στο φτωχό όριο είναι σχετικά μικρή για $0.05 \leq P \leq 50$ bar για μίγματα υδρογονανθράκων – αέρα. Το πλούσιο όριο εξαρτάται περισσότερο από την πίεση.
- 3) Το εύρος ανάφλεξης (απόσταση $l-r$) στενεύει καθώς η ενέργεια έναυσης E_i (Σχήμα 5.11α) επιλέγεται χαμηλότερη. Εάν $E < E_{\min}$ η έναυση είναι αδύνατη για οποιοδήποτε Φ .
- 4) Πρόσθεση αδρανών στο καύσιμο μίγμα στενεύει το εύρος ανάφλεξης κυρίως μέσω ελάττωσης του άνω ορίου. Αυτό είναι σημαντικό στην αντιτυρική μεθοδολογία. Τα καλύτερα αντιτυρικά προσθετικά είναι αυτά που έχουν χαμηλή αγωγιμότητα και υψηλή ειδική θερμότητα.

Η ψύξη της φλόγας μέσω εξωτερικών πηγών (quenching) παίζει σημαντικό ρόλο στα όρια ευφλεκτότητας, στο φαινόμενο της έναυσης και στην διάδοση της φλόγας. Η διάμετρος (ή απόσταση) απόσβεσης (quenching diameter ή distance) συνήθως εκφράζει αυτήν την επίδραση. Υπάρχουν δύο τρόποι να μετρηθεί μία τέτοια απόσταση (ή διάμετρος).

- i) Σε ένα καυστήρα Bunsen διακόπτουμε την παροχή μίγματος απότομα και η φλόγα οπισθοχωρεί. Το πείραμα επαναλαμβάνεται μα σταδιακά μικρότερης διαμέτρου σωλήνα Bunsen έως ότου η φλόγα να μη μπορεί να οπισθοχωρήσει, λόγω της ψύξης που υφίσταται στα τοιχώματ σχήμα 5.12α, .Η διάμετρος του σωλήνα Bunsen κάτω από την οποία η φλόγα ψύχεται και σβήνει μη οπισθοχωρώντας λέγεται διάμετρος απόσβεση, d_q . Εάν αντί αγωγού έχουμε δύο παράλληλες πλάκες, σχήμα 5.12β, η απόσταση αυτή καλείται απόσταση απόσβεσης. Γι' αυτή την απόσταση ισχύει ότι:

$$d_q \sim \sqrt{\frac{a}{RR}} \sim \frac{S_L}{a} \sim \frac{1}{P} \quad (5.16)$$

όπου a είναι η θερμική διαχυτότητα. Επίσης έχουμε ότι

$$d_q \propto \delta_L \quad (5.17)$$

- ii) Εξαναγκασμένη ανάφλεξη καυσίμων μιγμάτων επιτυγχάνεται στην πράξη μέσω ηλεκτρικών σπινθήρων από ηλεκτρόδια τοποθετημένα μέσα στο μίγμα όπως π.χ. Σχήμα 5.12β, (Kanury, 1975). Γι' αυτή την διάταξη (d) και για δεδομένο μίγμα (φ) καυσίμου οξειδωτικού τα πειράματα δείχνουν ότι η ανάφλεξη είναι δυνατή μόνο εάν η αποφορτιζόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη κάποιας οριακής τιμής, καλούμενης ενέργειας έναυσης, $E_{ignition}$. Η ενέργεια έναυσης μεταβάλλεται με το d όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12β. Όταν το d είναι μικρότερο μιας ορισμένης τιμής, d_q , η έναυση είναι αδύνατη για οιαδήποτε φυσικώς δυνατή τιμή ενέργειας E . Το d_q αποκαλείται απόσταση απόσβεσης. Το ελάχιστο που συναντάται στην μεταβολή του E , καθώς το d αυξάνει πέραν του d_q , καλείται ελάχιστη ενέργεια έναυσης E_{min} για το δεδομένο μίγμα. Ισχύει δε:

$$E_{min} = C \cdot d_q^2 \quad \text{η μια πρόχειρη εκτίμηση} \quad (5.17)$$

$$E_{ign} = 61.5P \left(\frac{C_p}{R_b} \right) \left(\frac{T_b - T_u}{T_b} \right) \left(\frac{\alpha}{S_L} \right)^3$$

5.5.2 Αργές σταθεροποίησης φλόγας σε στρωτή ροή.

Ο μηχανισμός μέσω του οποίου ένα κύμα καύσης διατηρεί σταθερή θέση σε σχέση με το χείλος του καυστήρα θα μελετηθεί με την βοήθεια του καυστήρα Bunsen, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.1 και 5.2. Το Σχήμα 5.4 επίσης δείχνει την κατανομή της ταχύτητας της παροχέτευσης μίγματος u_s και το σχήμα 5.3 την κατανομή της ταχύτητας του μετώπου της φλόγας S_L . Κοντά στο τοίχωμα η κατανομή του u_s μπορεί να θεωρηθεί γραμμική.

Τα σχήματα 5.4 και 5.13 δείχνουν το μηχανισμό που καθορίζει το σχήμα της φλόγας Bunsen. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Η σύγκριση των κατανομών των u_{sn} και S_L κοντά στο χείλος (rim) δείχνει πως η φλόγα αγκιστρώνεται στο άκρο του σωλήνα. Όταν η ροή του προαναμιγμένου καυσίμου είναι χαμηλή, $S_L > u_{sn}$, σε όλη την διαδρομή (σχήμα 5.4), η φλόγα διαδίδεται μέσα στον αγωγό δημιουργώντας οπισθοχώρηση (flashback). Όταν $u_{sn} > S_L$ σε όλη την διατομή, (σχήμα 5.4), έχουμε εκφύσημα ή απόσβεση

(blow-off). Η οριακή συνθήκη για απόσβεση προκύπτει όταν οι S_L και u_{sn} κατανομές είναι οριακά κοντά σε κάποια ακτινική θέση. Η ευσταθής καύση εξαρτάται από τις βαθμίδες των δύο αυτών ταχυτήτων κοντά στο τοίχο. Λόγω της γραμμικότητας των προφίλ κοντά στον τοίχο οι κατανομές, σχήμα 5.4, παριστάνουν απευθείας βαθμίδες ταχύτητας. Η κρίσιμη τιμή της οριακής βαθμίδας ταχύτητας συμβολίζεται με g_F και είναι, (Kuo, 1986):

$$g_F = \frac{2S_L}{d_q} \quad (5.21)$$

όπου d_q είναι η απόσταση απόσβεσης. Η οριακή τιμή του g που αντιστοιχεί σε απόσβεση (blow-off) συμβολίζεται με g_B και είναι:

$$g_B = \lim_{r \rightarrow R} \left(-\frac{du}{dr} \right)_u^- \quad (5.22)$$

Για στρωτή ροή σε κυκλικό αγωγό προκύπτει ότι

$$g_{F,B} = 8 \frac{\bar{u}_{μέση}}{d_{σωλήνα}} \quad (5.23)$$

Μία εμπειρική σχέση, που επιτυχώς συσχετίζει διάφορα μίγματα (K/A), για οπισθοχώρηση της φλόγας είναι η ακόλουθη, (Kuo, 1986):

$$g_F = 14.125 \left(\frac{S_L}{d} \right)^{1.168} \quad (5.24)$$

Τα δεδομένα για τις βαθμίδες g_F και g_B συνήθως παρίστανται σε διαγράμματα του τύπου $g = f(\Phi)$, όπως δείχνεται στο σχήμα 5.14, από τα οποία μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα, χρήσιμα για τον σχεδιασμό φλογοσωληνών χαμηλής ταχύτητας (Glassman, 1977). Ας δούμε λοιπόν την πρακτικότητα των ανωτέρω περιγραφών θεωρώντας τον σχεδιασμό φλογοσωληνών τύπου Bunsen και παραδοσιακών εστιών γκαζιού. Στον σχεδιασμό ενός φλογοσωλήνα Bunsen είναι επιθυμητό μεγάλο εύρος παροχών μίγματος χωρίς προβλήματα αστάθειας. Το ερώτημα είναι ποιά είναι η μέγιστη διάμετρος για βέλτιστη ευελιξία. Πρώτον η διάμετρος του σωλήνα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της απόστασης διείσδυσης (d_q). Δεύτερον η μέση ταχύτητα παροχέτευσης πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της S_L για να επιτύχουμε τον κώνο Bunsen. Πειραματικά δεδομένα επίσης μας δείχνουν ότι όταν $\bar{u}_s > 5S_L$ το καύσιμο διεισδύει στον κώνο. Επίσης η φλόγα θα θεωρηθεί τυρβώδης για αριθμούς Re στον σωλήνα μεγαλύτερους του 2000. Τέλος υπάρχουν και οι περιορισμοί που τίθενται από τα g_F και g_B . Κάνοντας το διάγραμμα \bar{u} συναρτήσεως του d για τους διάφορους περιορισμούς λαμβάνουμε το διάγραμμα του

σχήματος 5.15. Η εστιγμένη περιοχή είναι και η περιοχή λειτουργίας και η ευελιξία προκύπτει ότι είναι μέγιστη για π.χ. $d = 1\text{cm}$ όπως και συνήθως λαμβάνεται στην πράξη για φλογοσωλήνες τύπου Bunsen.

Από την άλλη μεριά οι εστίες γκαζιού μοιάζουν με καυστήρες Bunsen. Η ροή του καυσίμου αναρροφά αέρα και το προαναμιγμένο καύσιμο φτάνει στις οπές του δακτυλιοειδούς καυστήρα όπως δείχνεται σχηματικά στο Σχήμα 5.16. Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} m_m u_m &= m_f u_f \\ u_m (\rho_m A_m u_m) &= u_f (\rho_f A_f u_f) \end{aligned} \quad (5.25)$$

όπου m = μίγμα και f = καύσιμο

Μπορεί να γραφεί επίσης:

$$\rho_m u_m^2 = a \rho_f u_f^2 \quad (5.26)$$

όπου $a = A_f / A_m$

Εάν οι κατανομές των g_F και g_B τοποθετηθούν στο ίδιο διάγραμμα (σχήμα 5.17), όπως συνήθως γίνεται στην πράξη, παρατηρούμε τα ακόλουθα. Με δεδομένο ότι, η διάμετρος του αγωγού του καυσίμου καθορίζεται έτσι ώστε να έχουμε πλούσιο μίγμα με ϕ που να παριστάνεται στο διάγραμμα του σχήματος από την δεξιά διακεκομμένη γραμμή, η φλόγα δεν θα οπισθοχωρήσει για οιαδήποτε ροή μίγματος. Εάν όμως αλλάξουμε καύσιμο θα παρουσιαστούν δυσκολίες εάν θέλουμε να διατηρήσουμε τον ίδιο καυστήρα. Ο ογκομετρικός λόγος (K/A) είναι:

$$\left(\frac{F}{A} \right) = \frac{u_f A_f}{u_m A_m} = \left(\frac{\rho_m}{\rho_f} \right)^{1/2} a^{1/2} \quad (5.27)$$

Επειδή $\left(\frac{F}{A} \right)_{\text{stoich}} \sim \frac{1}{MW_f} \sim \frac{1}{\rho_f}$ όπου MW = μοριακό βάρος

Και συνεπώς:

$$\phi = \frac{\left(\frac{F}{A} \right)}{\left(\frac{F}{A} \right)_{\text{stoich}}} \sim \frac{a^{1/2} \left(\frac{\rho_m}{\rho_f} \right)^{1/2}}{\left(\frac{1}{\rho_f} \right)} \sim a^{1/2} \rho^{1/2}$$

Έτσι αν χρησιμοποιηθεί ένα ελαφρύτερο καύσιμο το νέο ϕ θα δώσει την εστιγμένη – διακεκομμένη προς τα αριστερά στο διάγραμμα ευστάθειας του καυστήρα στο Σχήμα 5.17. Είναι εμφανές ότι σ' αυτή την θέση λειτουργίας θα έχουμε πρόβλημα απόσβεσης και οπισθοχώρησης. Αυτό που θα μπορούσε π.χ. να γίνει είναι να μεγαλώσει η διατομή του καυστήρα έτσι ώστε η αύξηση στο a να αντισταθμίσει την μείωση του ρ_f .

Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα γενικοποιημένο διάγραμμα ευστάθειας ενός καυστήρα για ένα αριθμό καυσίμων υδρογονανθράκων, H_2 και CO . Ένα τέτοιο διάγραμμα δίδεται στο Σχήμα 5.18, (Glassman (1977), Jost (1947)). Οι παράμετροι που εμφανίζονται είναι:

$$g_R = \frac{g}{g_M} \quad (5.30)$$

$$F_R = 1 + \zeta(F - F_M)$$

Όπου g_M είναι η βαθμίδα στην κορυφή της καμπύλης οπισθοχώρησης και F_M η συγκέντρωση του καυσίμου εκφρασμένη σαν κλάσμα της στοιχειομετρικής αναλογίας στο ίδιο σημείο. Το ζ είναι σταθερά που δίνεται μαζί με τις άλλες παραμέτρους στον πίνακα 5.3. Για μίγματα αερίων καυσίμων οι ανωτέρω παράμετροι υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$\phi = \sum x_i \phi_i$$

$$g_M = \psi \sum g_{M_i}$$

$$F_M = \psi' \sum x_i F_{M_i}$$

και τα ψ και ψ' δίδονται στο σχήμα 5.19.

Διάφορα δεδομένα καύσης όπως, g , S_L , E_{\min} , στοιχειομετρικά κλπ. παρατίθενται στο παράρτημα 8(από Kanury, 1975).

Πίνακας 5.1 Φυσικές ιδιοότητες και δεδομένα καύσης για διάφορα καύσιμα σε αέρα

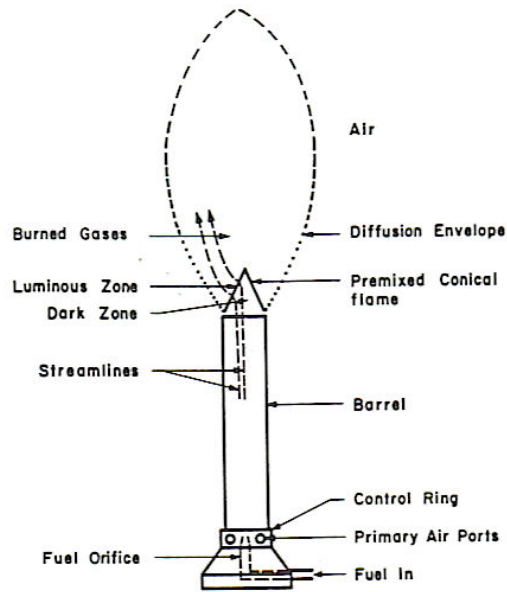
Fuel	Mol. wt.	Spec. grav.	T_{flg} (°C)	Heat of vap. (cal/gm)	Heat of comb. (kcal/gm)	Stoichiometry % Vol.	Flammability limits (% stoichio.)	Spont. ign. temp. (°C)	Fuel for max. flame speed (% stoichio.)	Max. flame speed (cm/sec)	Flame temp. at max. fl. speed (°K)	Ign. energy (10 ⁻³ cal.)	Quenching dist. (Stoich. Min. mm)
Acetaldehyde	44.1	0.783	-56.7	136.1	—	0.0772	59-233	561.1	131	50.18	2,121	8.99	2.29
Acetone	58.1	0.792	56.7	125.0	7.36	0.0497	31	27.48	133	155.25	—	27.48	3.81
Acetylene	26.0	0.621	-83.9	—	11.52	0.0772	48	0.72	100	61.75	2,461	0.72	0.76
Acrolein	56.1	0.841	52.8	—	—	0.0564	87	277.8	105	46.75	2,600	4.18	1.52
Acrylonitrile	53.1	0.797	78.3	—	—	0.0528	—	—	—	—	—	8.60	3.82
Ammonia	17.0	0.817	-33.3	328.3	—	0.2181	—	—	—	—	—	—	—
Aniline	93.1	1.022	184.4	103.4	—	0.0263	43	593.3	108	44.60	2,365	—	—
Benzene	78.1	0.885	80.0	103.2	9.56	0.0277	—	—	—	—	—	—	—
Benzyl alcohol	108.1	1.050	205.0	—	—	0.0240	—	—	—	—	—	—	—
1,2-Butadiene	54.1	0.658	111.1	—	10.87	0.0366	—	—	—	—	—	—	—
n-Butane	58.1	0.584	-0.5	92.2	10.92	0.0312	54	430.6	113	63.90	2,419	5.60	1.30
Butanone	72.1	0.805	79.4	106.1	—	0.0366	—	—	—	—	—	—	—
(methyl ethyl ketone)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-Butene	56.1	0.601	-6.1	93.3	10.82	0.0377	53	443.3	116	47.60	2,319	—	—
d-Camphor	152.2	0.990	203.4	—	—	0.0153	18	466.1	—	—	—	—	—
Carbon disulfide	76.1	1.263	46.1	83.9	—	0.0652	34	1,200.0	102	54.46	—	0.36	0.51
Carbon monoxide	28.0	—	-190.0	50.6	—	0.2950	—	—	—	—	—	—	—
Cyclobutane	56.1	0.703	12.8	—	—	0.0377	48	608.9	115	62.18	2,308	—	—
Cyclohexane	84.2	0.783	80.6	85.6	10.47	0.0227	—	—	—	—	—	—	—
Cyclohexene	82.1	0.810	82.8	—	—	0.0271	—	—	—	—	—	—	—
Cyclopentane	70.1	0.751	49.4	92.8	10.56	0.0448	—	—	—	—	—	—	—
Cyclopropane	42.1	0.720	-34.4	—	—	0.0666	—	—	—	—	—	—	—
n-Decalin	142.3	0.734	174.0	—	—	0.0337	—	—	—	—	—	—	—
n-Decane	74.1	0.714	34.4	83.9	11.34	0.0564	—	—	—	—	—	—	—
Diethyl ether	74.1	0.714	34.4	116.7	—	0.0402	—	—	—	—	—	—	—
Ethane	30.1	0.801	-88.9	—	—	0.0896	—	—	—	—	—	—	—
Ethyl acetate	88.1	0.789	77.2	200.0	6.40	0.0652	—	—	—	—	—	—	—
Ethanol	46.1	0.789	78.5	146.1	—	0.0528	—	—	—	—	—	—	—
Ethylamine	45.1	0.706	16.7	138.9	—	0.0772	—	—	—	—	—	—	—
Ethylene oxide	44.1	1.965	10.6	93.6	—	0.0444	—	—	—	—	—	—	—
Furan	68.1	0.936	32.2	87.1	—	0.0187	—	—	—	—	—	—	—
n-Heptane	100.2	0.688	98.5	87.1	10.62	0.0216	53	247.2	122	42.46	2,214	27.49	3.81
n-Hexane	86.2	0.664	68.0	87.1	10.69	0.0216	51	400	117	42.46	2,239	22.71	5.50
Hydrogen	2.0	0.069	252.7	107.8	28.65	0.2950	—	—	—	—	—	—	—
iso-Propanol	60.1	0.785	82.2	158.9	—	0.0444	—	—	—	—	—	—	—
Kerosene	154.0	0.825	250.0	69.5	10.30	0.0947	—	—	—	—	—	—	—
Methane	16.0	—	-161.7	121.7	11.95	0.0581	—	—	—	—	—	—	—
Methanol	32.0	0.793	64.5	263.0	4.74	0.1224	46	632.2	106	37.31	2,236	7.89	2.54
Methyl formate	60.1	0.975	31.7	112.8	—	0.0947	—	—	—	—	—	—	—
n-Nonane	128.3	0.772	150.6	68.9	10.67	0.0147	—	—	—	—	—	—	—
n-Octane	114.2	0.707	125.6	71.7	10.70	0.0165	—	—	—	—	—	—	—
n-Pentane	72.1	0.631	36.0	87.1	10.82	0.0255	—	—	—	—	—	—	—
n-Pentene	70.1	0.646	30.0	—	—	0.0271	—	—	—	—	—	—	—
Propane	44.1	0.508	-42.2	101.7	11.07	0.0402	—	—	—	—	—	—	—
Propene	42.1	0.522	-47.7	104.5	10.94	0.0444	—	—	—	—	—	—	—
n-Propanol	60.1	0.804	97.2	163.9	—	0.0444	—	—	—	—	—	—	—
Toluene	92.1	0.872	110.6	86.7	9.78	0.0227	—	—	—	—	—	—	—
Triethylamine	101.2	0.723	89.4	—	—	0.0210	—	—	—	—	—	—	—
Turpentine	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Xylene	106.0	0.870	130.0	80.0	10.30	—	—	—	—	—	—	—	—
Gasoline 73 octane	120.0	0.720	155.0	81.0	10.54	—	—	—	—	—	—	—	—
Gasoline 100 octane	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Jet fuel JP1	150.0	0.810	—	—	10.28	0.0130	—	—	—	—	—	—	—
JP3	112.0	0.760	—	—	10.39	0.0170	—	—	—	—	—	—	—
JP4	126.0	0.780	—	—	10.39	0.0150	—	—	—	—	—	—	—
JP5	170.0	0.830	—	—	10.28	0.0110	—	—	—	—	—	—	—

Compiled from data presented in NACA 1100 and estimated from various miscellaneous sources

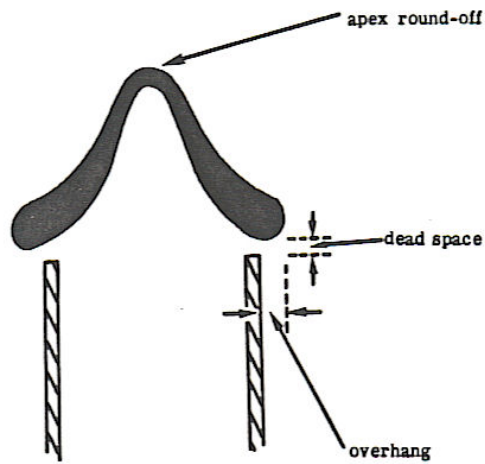
Πίνακας 5.2 Τιμές των g_M , F_M και Φ για διαφορά καυσίμα

Fuel gas	g_M (sec. ⁻¹)	F_M	ϕ
CH ₄	400	1.00	1.00
C ₂ H ₆	650	1.13	0.80
C ₂ H ₄	580	1.12	0.60
C ₂ H ₂	1,400	1.10	0.63
C ₃ H ₈	800	1.14	0.68
C ₃ H ₆	720	1.09	0.63
H ₂	10,500	1.20	0.46
CO (pure gas)	(100)	(1.39)	

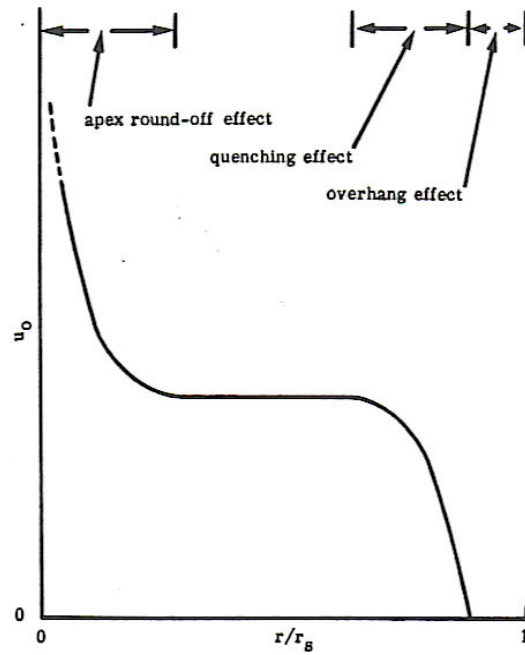
(Glassman, 1977)



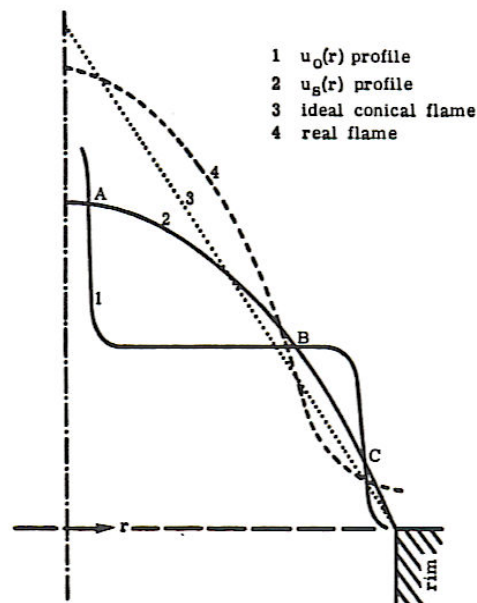
Σχημα 5.1 Σχηματικό διαγραμμα στρωτης φλογας προμιξης , Κιο (1986), υπερων καυστηρα Bunsen



Σχημα 5.2 Ο κωνος της φλογας Bunsen , Kanury (1975).

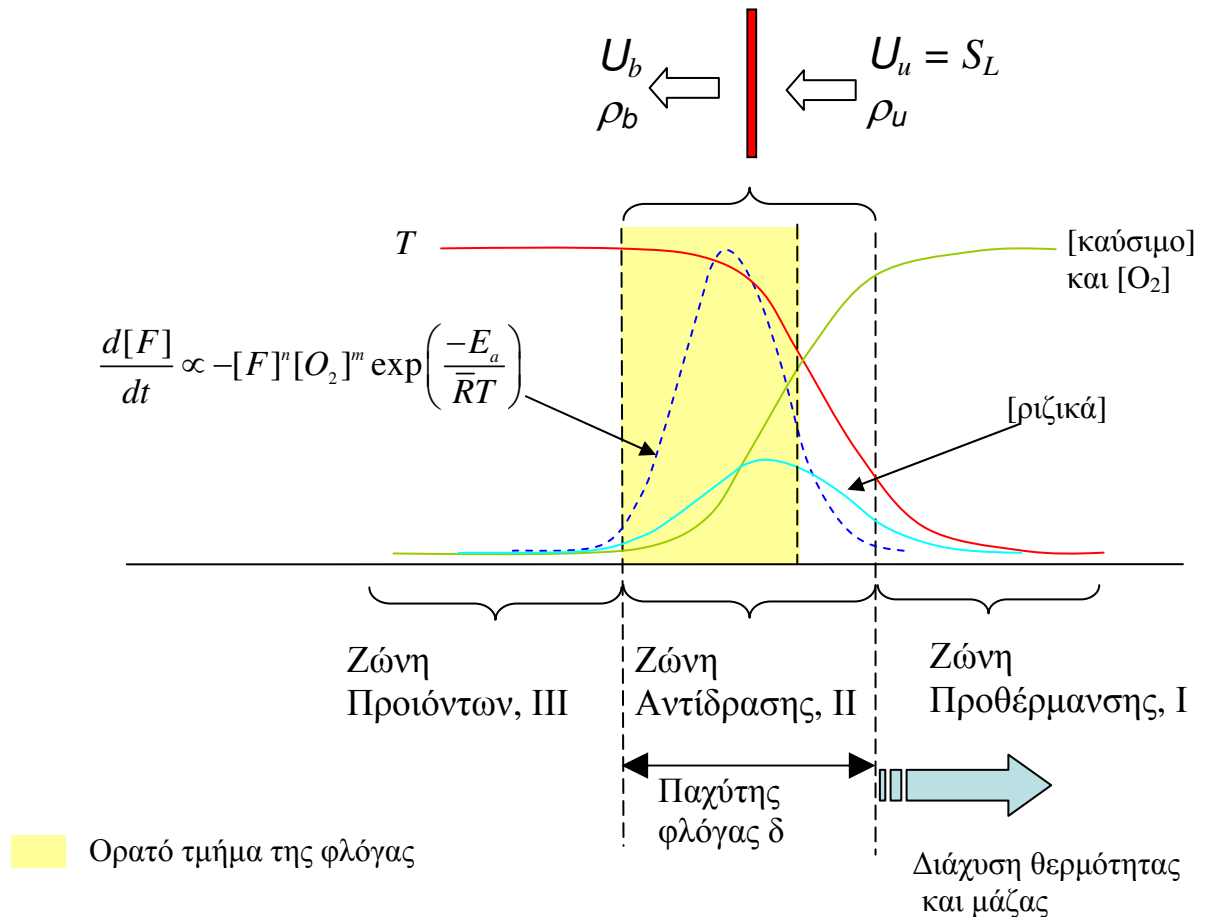


Σχημα 5.3 Η κατανομή της ταχύτητας της στρωτής φλόγας στον κώνο Bunsen , Kanury (1975).

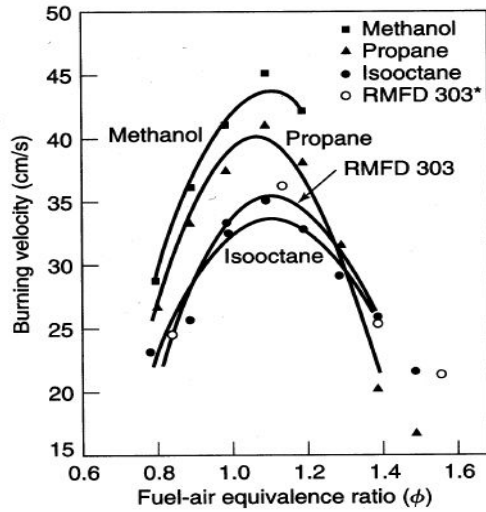


Σχημα 5.4 Παραμόρφωση του κώνου της φλόγας λόγω ανισοτητας μεταξύ των ταχυτητων της φλόγας και του μιγματος Kanury (1975).

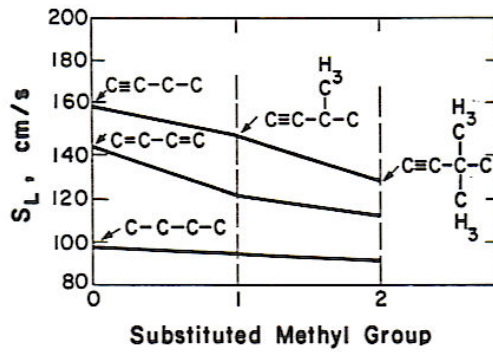
Δομή Φλόγας Πρόμιξης



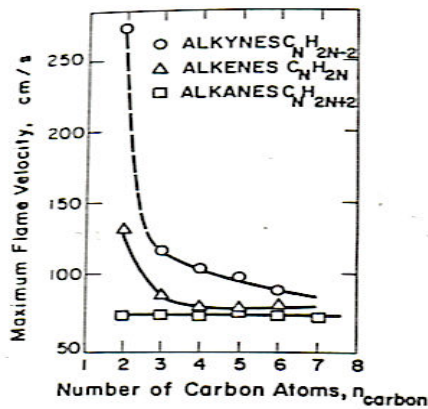
Σχήμα 5.5 Σχηματικό διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας και των συστατικών κατά μήκος ενός στρωτού μετώπου φλόγας



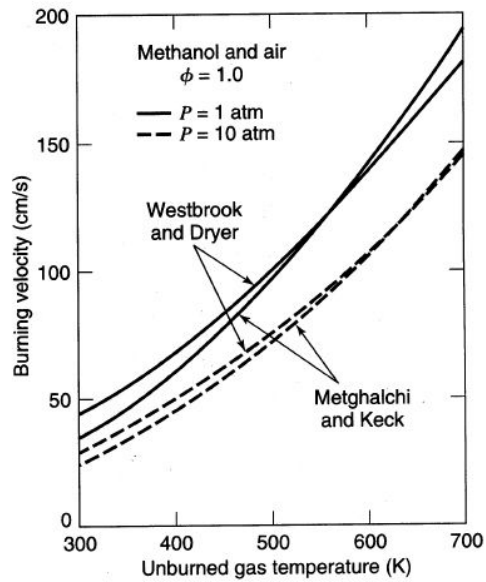
Σχήμα 5.6 Η εξάρτηση της ταχύτητας στρωτής φλόγας από το λόγο καυσίμου-αέρα (Κυο, 1986)



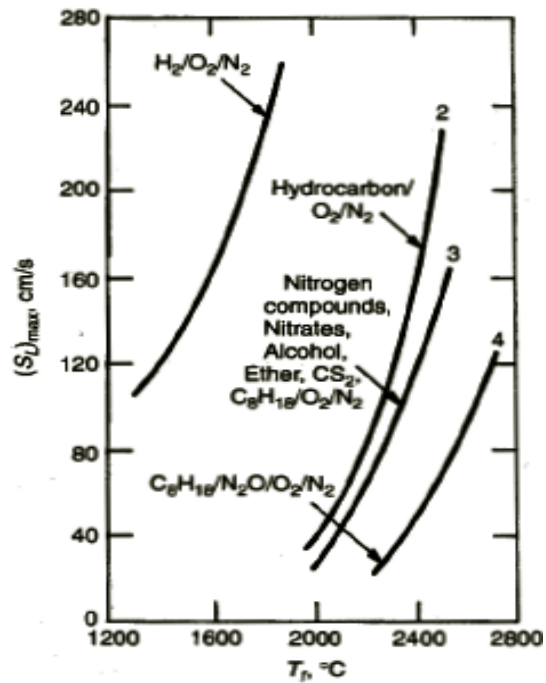
Σχήμα 5.7 Η εξάρτηση της ταχύτητας της στρωτής φλόγας από τη δομή του καυσίμου (Κυο, 1986)



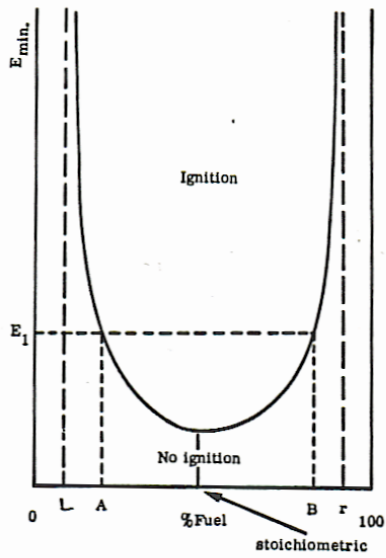
Σχήμα 5.8 Η εξάρτηση της ταχύτητας της στρωτής φλόγας από το αριθμό ατόμων άνθρακα (Κυο, 1986)



Σχήμα 5.9 Η εξάρτηση της ταχύτητας της στρωτής φλόγας από την θερμοκρασία του μίγματος

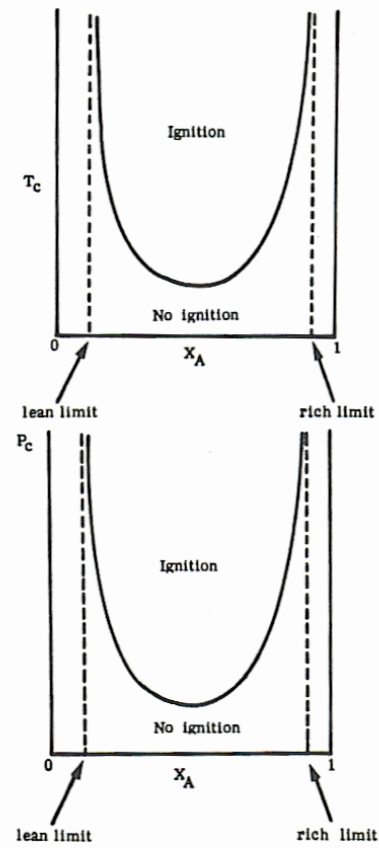


Σχήμα 5.10 Η εξάρτηση της ταχύτητας της στρωτής φλόγας από το αριθμό ατόμων άνθρακα (Kuo, 1986)

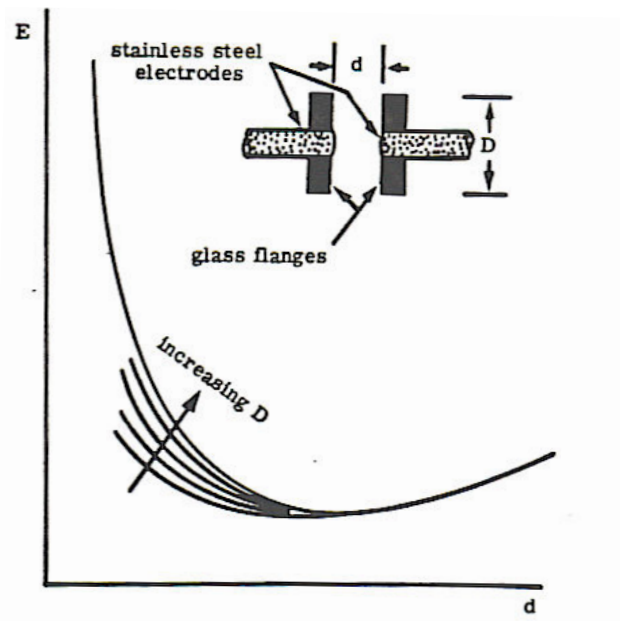
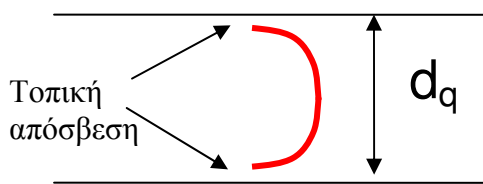


Σχῆμα 5.14

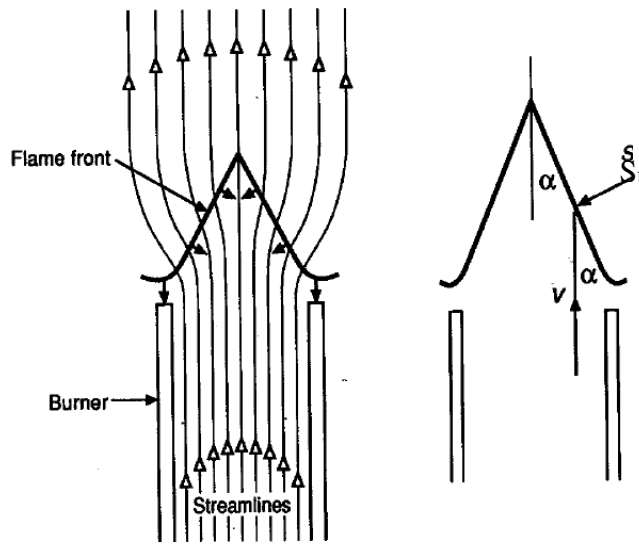
Όρια ευφλεκτότητας και ελαχίστη ενεργεια αναφλεξης



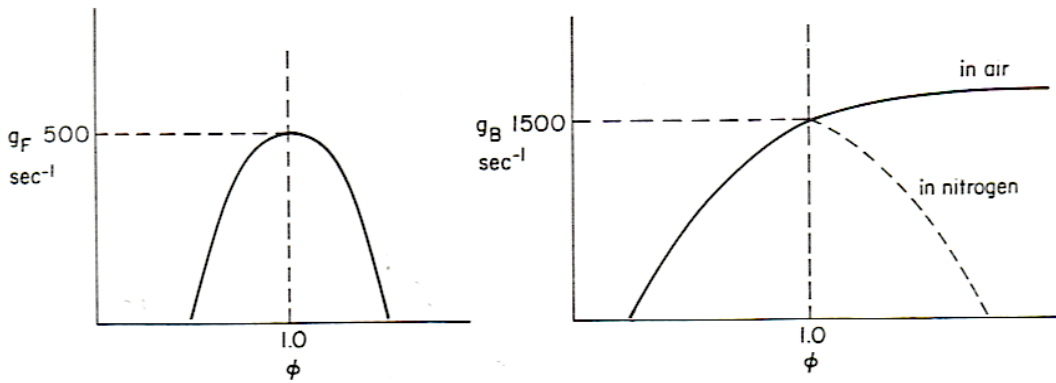
Σχῆμα 5.11 Όρια ευφλεκτότητας και ενεργεια ανάφλεξης



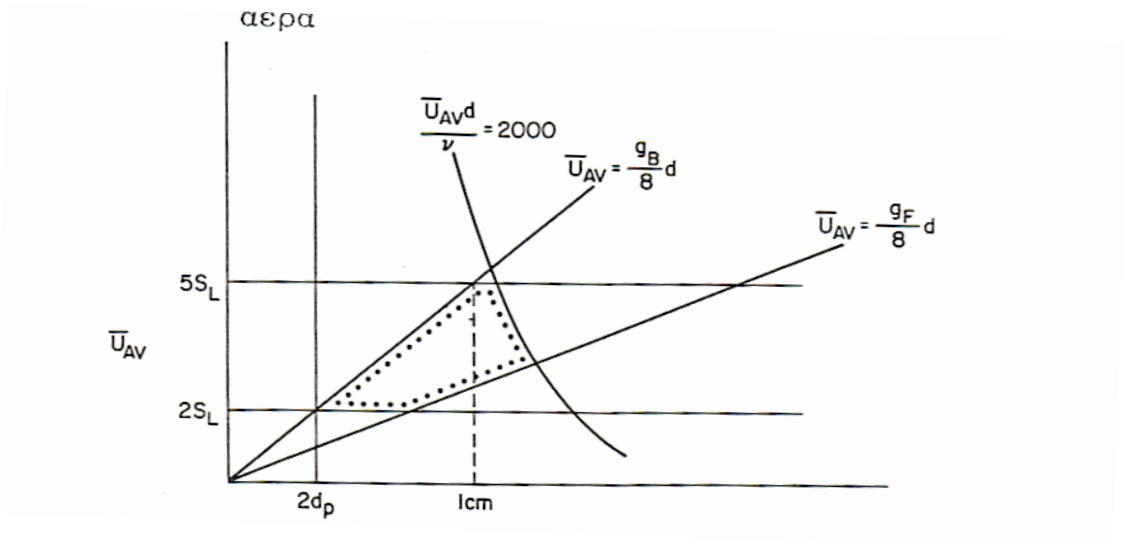
Σχῆμα 5.12 Απόσταση απόσβεσης και ελαχίστη ενεργεια ανάφλεξης



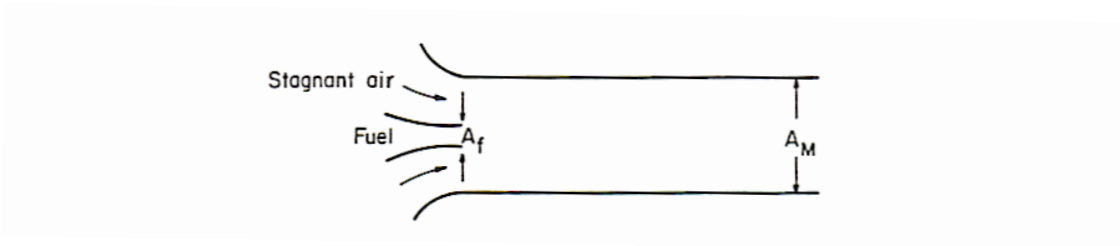
Σχήμα 5.13 Ο κώνος Bunsen και η ισορροπία ταχυτήτων u_s και S_L στον κώνο



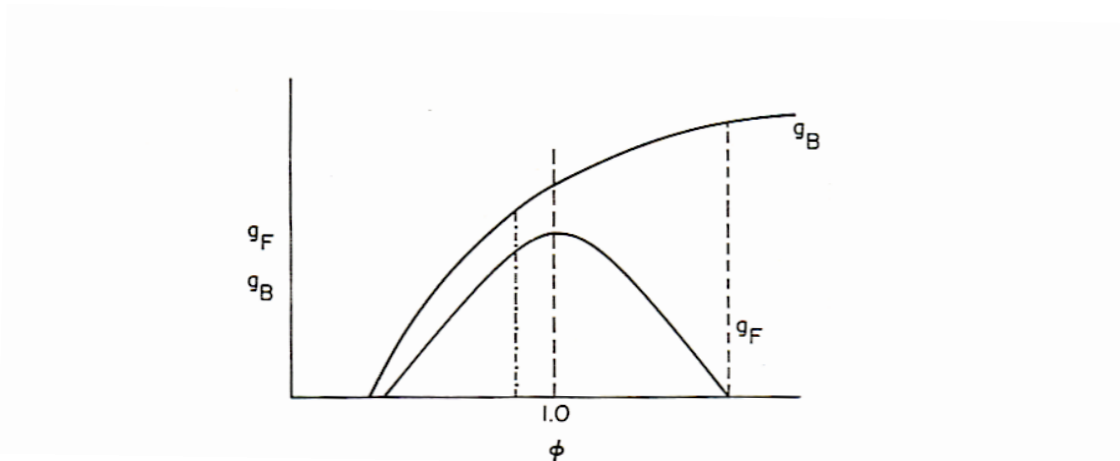
Σχήμα 5.14 Τυπικές καμπύλες της βαθμίδας οπισθοχώρησης και απόσβεσης συναρτήσει του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα, Glassman (1977), Strehlow, (1968).



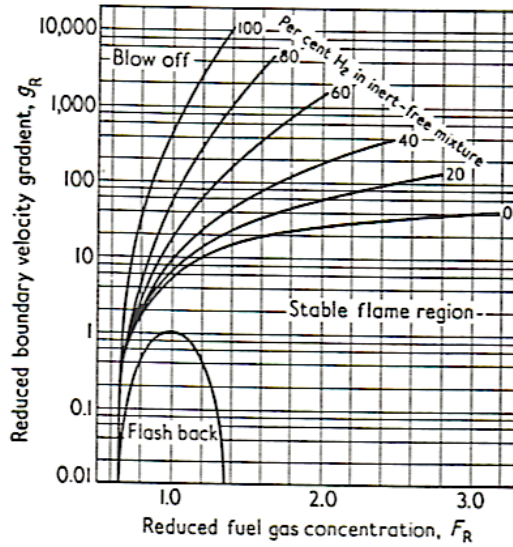
Σχήμα 5.15 Τυπικές καμπύλες της βαθμίδας οπισθοχώρησης και απόσβεσης συναρτήσει του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα Glassman (1977), Strehlow, (1968).



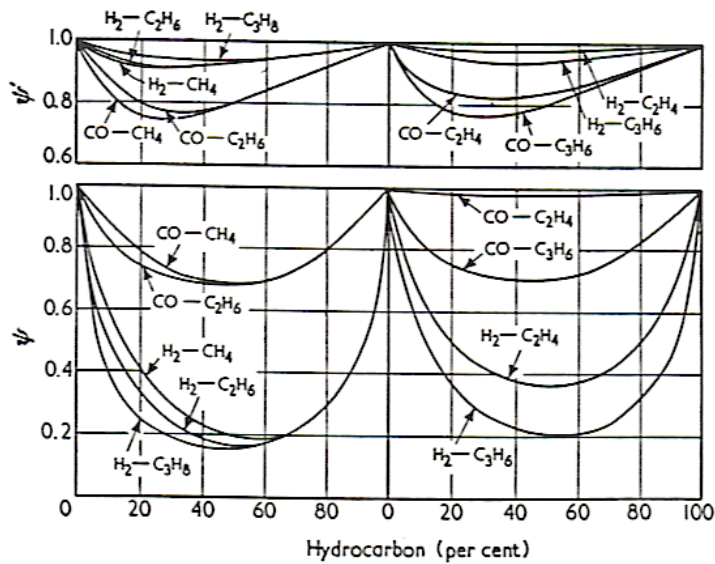
Σχήμα 5.16 Διαμόρφωση καυστήρα με αναρρόφηση πρωτεύοντος αέρα



Σχήμα 5.17 Διάγραμμα ευστάθειας της φλόγας για μίγματα καυσίμου-αέρα, Glassman (1977).



Σχήμα 5.18 Γενικευμένο διάγραμμα ευστάθειας της φλόγας για μίγματα καυσίμου-αέρα, Glassman (1977).



Σχήμα 5.19 Παράγοντες υπολογισμού του g_M και ψ' για μίγματα H_2 και CO_2 για διάφορους υδρογονάνθρακες, Glassman (1977).