

Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας
ΣΤΕΦ/Τμήμα Μηχανολογίας

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ

Για το μάθημα Καύση – Καύσιμα – Λιπαντικά

Κωνσταντίνος Κράλλης

Νοέμβριος 2002

ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ

Καύση ονομάζεται κάθε εξώθερμη χημική αντίδραση ενός υλικού με το οξυγόνο ή άλλο οξειδωτικό (π.χ. χλώριο, υπεροξείδιο υδρογόνου) που συντελείται με έντονο ρυθμό ώστε η θερμότητα που απελευθερώνεται να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη. Με βάση τον ορισμό αυτό η καύση δεν περιλαμβάνει τη βραδεία οξείδωση του σιδήρου ή του άνθρακα στο περιβάλλον.

Κατά την καύση η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμική (εσωτερική ενέργεια ή ενθαλπία στα καυσαέρια). Η ενέργεια αυτή αξιοποιείται με τους εξής τρόπους:

- Εκτόνωση των καυσαερίων σε εμβολοφόρους κινητήρες ή αεριοστροβίλους
- Άμεση εκτόνωση (πυραυλοκινητήρες, πυροβόλο όπλα)
- Μεταφορά θερμότητας σε άλλο μέσο για παραγωγή ισχύος (ατμομηχανές – ατμοστροβίλοι) ή χρήση σε διεργασίες
- Άμεση μετάδοση της θερμότητας σε διεργασίες (κλίβανοι, οξυγονοκολλήσεις)

Το οξυγόνο ή άλλο οξειδωτικό που απαιτείται για την καύση προέρχεται από τις εξής πηγές:

- Λαμβάνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα
- Συνυπάρχει στο καύσιμο (στις εκρηκτικές ύλες και τα προωθητικά)
- Χορηγείται σαν καθαρό οξυγόνο (στους πυραυλοκινητήρες και τις οξυγονοκολλήσεις)

Στην ενεργειακή τεχνολογία η καύση γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με το οξυγόνο του αέρα και αυτή η παραδοχή γίνεται στη συνέχεια των σημειώσεων, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

Για την επίτευξη της καύσης είναι αναγκαία η παρουσία ενός καυσίμου, αέρα και μια πηγή εναύσεως. Συνήθως η πηγή εναύσεως είναι ηλεκτρικός σπινθήρας ή φλόγα. Σε ορισμένα συστήματα καυσίμου – αέρα είναι δυνατή και η αυτανάφλεξη με σταδιακή άνοδο της θερμοκρασίας από βραδεία οξείδωση (π.χ. σε σωρούς γαιανθράκων) ή με θέρμανση λόγω συμπίεσης (π.χ. μηχανές diesel).

ΑΝΑΦΛΕΞΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στα αέρια καύσιμα η ανάφλεξη από εξωτερική πηγή είναι πολύ εύκολη και μπορεί να γίνει σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, αρκεί να υπάρχει η απαιτούμενη αναλογία αέρα. Η ανάφλεξη των μειγμάτων αέρα – καυσίμου γενικά απαιτεί πολύ μικρό ποσό ενέργειας (π.χ. σπινθήρας κάτω από 0.5 J).

Στα υγρά καύσιμα οι συνθήκες είναι διαφορετικές. Στην περίπτωση αυτή δεν καίγεται το ίδιο το υγρό καύσιμο αλλά οι ατμοί που εκλύονται από την επιφάνειά του είτε λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του καυσίμου είτε λόγω της θέρμανσής του από τη φλόγα. Η δυνατότητα έκλυσης ατμών εξαρτάται από την πτητικότητα, η οποία εκφράζεται με ακρίβεια από την τάση ατμών.

Επειδή η τάση ατμών εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ένα υγρό καύσιμο χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες θερμοκρασίες:

Σημείο αναφλέξεως: Είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία αν θερμανθεί το καύσιμο και πλησιάσει σε πηγή θερμότητας αρχίζει να καίγεται, αλλά δεν διατηρεί την καύση αν απομακρυνθεί η εξωτερική πηγή.

Σημείο καύσεως: Είναι η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο, αν έλθει σε επαφή με φλόγα, αναφλέγεται και συνεχίζει να καίγεται μετά την απομάκρυνση της φλόγας.

Σημείο αυταναφλέξεως: Είναι η θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο αναφλέγεται στην παρουσία αέρα, χωρίς την ύπαρξη εξωτερικής πηγής εναύσεως (φλόγας, σπινθήρα).

Το σημείο αναφλέξεως (flash point) είναι πολύ σημαντικό για την ασφαλή διακίνηση και αποθήκευση του υγρού καυσίμου.

- Καύσιμα με μεγάλη πτητικότητα παράγουν ατμούς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε περίπτωση διαρροής είναι πολύ εύκολο να προκληθεί πυρκαϊά από σπινθήρα ή φλόγα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα υγραέρια, η βενζίνη και η αιθυλική αλκοόλη, καθώς και πλήθος οργανικών ουσιών που χρησιμοποιούνται από την χημική βιομηχανία (ακετόνη, ισοπροπυλική αλκοόλη, αιθέρας, βενζόλιο κλπ).
- Λιγότερο πτητική και επομένως ασφαλέστερη στο χειρισμό της είναι η κηροζίνη (φωτιστικό πετρέλαιο) και ακόμα ασφαλέστερο είναι το πετρέλαιο diesel.
- Το μαζούτ αναφλέγεται πολύ δύσκολα λόγω της μικρής τάσης ατμών του, σε βαθμό που να προκαλεί δυσκολίες στην εκκίνηση διαφόρων εγκαταστάσεων καύσεως.

Στα στρατιωτικά οχήματα μάχης (άρματα μάχης, ΤΟΜΠ κλπ) για πολλά χρόνια κυριαρχούσαν οι βενζινοκινητήρες με αποτέλεσμα να υπάρχει σχεδόν βέβαιη ανάφλεξη σε κάθε πλήγμα από πυροβόλο όπλο. Ο κίνδυνος αυτός μειώθηκε σημαντικά σε νεώτερες σχεδιάσεις με την υιοθέτηση κινητήρων τεχνολογίας diesel.

ΚΑΥΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Η εστίες στερεών καυσίμων βασίζονται σε μια από τις ακόλουθες τεχνολογίες:

- Καύση τεμαχίων καυσίμου σε εσχάρα. Η μέθοδος έχει εγκαταλειφθεί πλέον στις βιομηχανικές εφαρμογές και χρησιμοποιείται μόνο σε μικρούς λέβητες βιομάζας κλπ.
- Καύση κονιοποιημένου καυσίμου μεταφερόμενου σε ρεύμα αέρα. Αποτελεί την κυριότερη μέθοδο σήμερα σε βιομηχανική χρήση.
- Καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη. Είναι νεώτερη μέθοδος με αρκετά πλεονεκτήματα, και πρόσφατα άρχισε να εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα. Επιτρέπει την καύση προβληματικών καυσίμων (π.χ. απορρίμματα) και έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά τον έλεγχο αερίων εκπομπών.

Τα στερεά καύσιμα καίγονται σε δύο στάδια, τα οποία σε κάποιο βαθμό προχωρούν παράλληλα.

- Πρώτα με την επίδραση της θερμοκρασίας ο κόκκος του καυσίμου θερμαίνεται και αποβάλλονται τα πτητικά συστατικά τα οποία καίγονται με φλόγα. Μετά την έκλυση των πτητικών παραμένει το εξανθράκωμα. Το στάδιο αυτό δεν υπάρχει ή δεν

εμφανίζεται έντονα σε καύσιμα με πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα και μικρή περιεκτικότητα σε πτητικά (κώκ, ανθρακίτης, ξυλάνθρακες κλπ).

- Κατόπιν ολοκληρώνεται η καύση του εξανθρακώματος. Στη φάση αυτή οξυγόνο διαχέεται προς τους κόκκους του καυσίμου και αντιδρά με τον άνθρακα παράγοντας μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Τα αέρια αυτά κατόπιν διαχέονται έξω από τους κόκκους. Το μονοξείδιο του άνθρακα, εφόσον υπάρχει, καίγεται με γαλάζια φλόγα μικρής φωτεινότητας. Ο κόκκος του εξανθρακώματος θερμαίνεται και ακτινοβολεί έντονα. Στο τέλος καταναλώνεται όλος ο άνθρακας και τυχόν υπολείμματα άλλων καυσίμων στοιχείων και παραμένει η τέφρα (άκαυστα υλικά).

Είναι προφανές ότι το δεύτερο στάδιο είναι δύσκολο να ολοκληρωθεί ομαλά σε μικρό χρόνο όταν τα τεμαχίδια του άνθρακα είναι μεγάλα, όπως συμβαίνει σε εστίες τύπου εσχάρας. Στις εστίες αυτές αναγκαστικά τροφοδοτείται μεγάλη περίσσεια αέρα. Εναλλακτικές μέθοδοι, οι οποίες βελτιώνουν την καύση στερεών καυσίμων σε σχέση με τις εστίες τύπου εσχάρας, είναι οι καυστήρες κονιοποιημένου άνθρακα και η τεχνολογία της ρευστοποιημένης κλίνης.

Η ανάφλεξη των στερεών καυσίμων είναι αρκετά δύσκολη σε συνθήκες περιβάλλοντος και δύσκολα επιτυγχάνεται εντελώς αυτοματοποιημένα. Σχεδόν πάντα απαιτείται αρχικά η έναυση της εστίας με υγρό ή αέριο καύσιμο και αφού αυτή αποκτήσει κατάλληλη θερμοκρασία αρχίζει η τροφοδοσία στερεού καυσίμου. Ιδιαίτερα επίπονη είναι η έναυση εστιών τύπου εσχάρας.

ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗ

Το φαινόμενο της αυτανάφλεξης είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε στερεά καύσιμα (λιγνίτες και λιθάνθρακες) και σε μερικές κατηγορίες απορριμμάτων. Κατά την αποθήκευση λεπτόκοκκου άνθρακα σε σωρούς η βραδεία οξείδωση με το οξυγόνο του αέρα (που γίνεται εντονότερη αν υπάρχει υγρασία) παράγει μικρά ποσά θερμότητας. Αν η σωροί είναι μεγάλοι, η απώλεια από την επιφάνειά τους δεν επαρκεί για αποβολή της θερμότητας με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους να φθάσει τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης, η οποία δεν είναι πολύ μεγάλη (135 – 240 °C). Αν επέλθει ανάφλεξη, η κατάσβεση είναι αρκετά δύσκολη και μπορεί να γίνει είτε με διάσπαση του σωρού και χρήση πυροσβεστικών μέσων ή με κάλυψη του σωρού με λεπτόκοκκα αδρανή υλικά.

ΑΝΑΦΛΕΞΕΙΣ – ΕΚΡΗΞΕΙΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ ΚΟΝΕΩΝ

Μια ειδική περίπτωση που έχει ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά την βιομηχανική ασφάλεια είναι η ανάφλεξη αιωρημάτων σκόνης σε αέρα. Αυτό φυσικά προϋποθέτει η σκόνη να αποτελείται από καύσιμο σε λεπτό διαμερισμό, αλλά στην κατηγορία αυτή ανήκουν και υλικά που σε μεγάλα τεμάχια δεν αναφλέγονται (αλουμίνιο, ζάχαρη, άλευρα κλπ). Οι εκρήξεις αυτές συμβαίνουν συχνά σε αγωγούς αερομεταφοράς των ουσιών αυτών και σε χώρους αποθήκευσης. Η συνηθέστερη αιτία ανάφλεξης είναι οι σπινθήρες που προέρχονται από ηλεκτροστατικά φορτία τα οποία παράγονται από την τριβή.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΕΩΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (ΚΑΤΑ W. GUMZ)	
	⁰ C
ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΥΣΙΜΑ	
Μαλακό ξύλο	220
Σκληρό ξύλο	300
Τύρφη (ξηρή)	225 – 280
Φαιάνθρακες (Λιγνίτες)	135 – 240
Λιθάνθρακες πισσούχοι	214 – 230
Ανθρακίτης	485
Ξυλάνθρακες	133 – 208
Κώκ	505 – 560
Γραφίτης	658
Αιθάλη	560 – 600
ΥΓΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ	
Βενζίνη	330 – 520
Βενζένιο (βενζόλιο)	520 – 600
Πετρέλαιο (γκαζόιλ)	230 – 242
ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΙΜΑ	
Μονοξειδίο του άνθρακα	590 – 610
Υδρογόνο	450 - 530
Μεθάνιο	645
Προπάνιο	490 – 510
Βουτάνιο	460 – 490
Ακετυλένιο	335
Φωταέριο	450 – 560

Αέριο	Ελάχιστη Ενέργεια Ανάφλεξης (mJ)
Υδρογόνο H ₂	0.019
Ακετυλένιο C ₂ H ₂	0.019
Μεθάνιο CH ₄	0.28
Προπάνιο C ₃ H ₈	0.26
Βουτάνιο C ₄ H ₁₀	0.25
Εξάνιο C ₆ H ₁₄	0.24

Βενζένιο (βενζόλιο) C_6H_6	0.20
Κυκλοπροπάνιο C_3H_6	0.17
Κυκλοεξάνιο C_6H_{12}	0.17

Υλικό – σκόνη	Ελάχιστη Ενέργεια Ανάφλεξης (mJ)	Ελάχιστη πυκνότητα ανάφλεξης (g/m^3)
Αλουμίνιο	50	25
Ελαστικό (Καουτσούκ)	50	25
Άνθρακας	40	35
Καζείνη	60	45
Μαγνήσιο	80	20
Πολυαιθυλένιο	80	25
Θείο	15	35
Πριονίδι	25	50
Συνθετικό ελαστικό (καουτσούκ)	30	30

ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

Για τον καθορισμό της θερμοκρασίας που αποκτά το καυσαέριο κατά την καύση ενός καυσίμου θεωρούμε ότι η διεργασία γίνεται σε τρία στάδια:

- Πρώτα όλη η θερμότητα εκλύεται από τη φλόγα σε θερμοκρασία 298 K (Θερμογόνος Δύναμη).
- Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε αισθητή θερμότητα στα καυσαέρια, τα οποία αποκτούν την αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας.
- Κατόπιν τα καυσαέρια εκτονώνονται ή ψύχονται.

Αυτή η ανάλυση καταρχήν επιτρέπεται γιατί στη θερμοδυναμική οι ανταλλαγές θερμότητας και έργου εξαρτώνται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση ισορροπίας και είναι ανεξάρτητες του δρόμου.

Αν υποθέσουμε μια αδιαβατική εστία (μια εστία με πυρίμαχη μόνωση στα τοιχώματα χωρίς σωλήνες θέρμανσης ρευστού, χρησιμοποιείται για καύση αερίων μικρής θερμογόνου δύναμης, σαν προεστία) τότε θεωρητικά προσεγγίζουμε στην πράξη τις παραπάνω συνθήκες. Σε ατμοπαραγωγούς, μηχανές diesel κλπ όμως η καύση ολοκληρώνεται σε μεγαλύτερο χρόνο με ταυτόχρονη εκτόνωση (παραγωγή έργου) ή μετάδοση θερμότητας. Η ζώνη της φλόγας γενικά μεταδίδει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας προς τα τοιχώματα με ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι πολύ μικρότερη από την αδιαβατική, παρόλο που η παραγόμενη θερμότητα είναι η ίδια.

Στην περίπτωση της αδιαβατικής καύσης καταρχήν ισχύει το ακόλουθο ενεργειακό ισοζύγιο, ανά μονάδα μάζας καυσίμου:

$$H_u + m_L \cdot (h_{Le} - h_{La}) = m_G \cdot (h_{G,max} - h_{Ga})$$

όπου:

h_{Le} : η ενθαλπία του αέρα καύσεως στη θερμοκρασία εισαγωγή του στο θάλαμο καύσεως

h_{La} : η ενθαλπία του αέρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (αναφοράς)

$h_{G,max}$: η ενθαλπία των καυσαερίων μετά την καύση

h_{Ga} : η ενθαλπία των καυσαερίων στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (αναφοράς)

m_G : η ποσότητα καυσαερίων ανά μονάδα μάζας καυσίμου

m_L : η ποσότητα αέρα καύσης ανά μονάδα μάζας καυσίμου

H_u : η κατώτερη θερμογόνο δύναμη των καυσαερίων

Λύνοντας ως προς $h_{G,max}$ λαμβάνουμε:

$$h_{G,max} = \frac{H_u + m_L (h_{Le} - h_{La}) + m_G \cdot h_{Ga}}{m_G}$$

Για τους υπολογισμούς μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $h_{La} = h_{Ga} = 0$ (διότι μας ενδιαφέρουν μόνο οι διαφορές ενθαλπίας), στους 25 °C, ή ακόμα και σε όποια θερμοκρασία θέλουμε. Με την ρύθμιση αυτή η σχέση γίνεται:

$$h_{G,max} = \frac{H_u + m_L \cdot h_{Le}}{m_G}$$

Οι ενθαλπίες μπορούν να εκφραστούν σαν συναρτήσεις της θερμοκρασίας, σαν ολοκλήρωμα ως προς t της ειδικής θερμότητας από την θερμοκρασία αναφοράς μέχρι την τελική θερμοκρασία. Η απλούστερη έκφραση, που χρησιμοποιεί μια μέση τιμή της ειδικής θερμότητας c_p μεταξύ T_0 και T είναι:

$$h(T) = \int_{T_0}^T c_p(t) \cdot dt = \bar{c}_p \cdot (T - T_0)$$

Αν αντικαταστήσουμε τις συναρτήσεις αυτές στην αρχική εξίσωση, έχουμε μια εξίσωση πρώτου βαθμού με άγνωστο το T , το οποίο και είναι η αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας.

Αν θέλουμε ακριβέστερα αποτελέσματα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολυώνυμα που μας δίνουν την ειδική θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας και να τα ολοκληρώσουμε ως προς t . Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση που μας δίνει το T δεν είναι απλή πρωτοβάθμια αλλά μπορεί να λυθεί εύκολα με αλγεβρικές ή αριθμητικές μεθόδους.

Με τον τρόπο αυτό μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε μια αριθμητική τιμή για τη θερμοκρασία της φλόγας για κάθε καύσιμο και κάθε αναλογία αέρα. Επίσης μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε τη δυνατότητα αύξησης της αδιαβατικής θερμοκρασίας της φλόγας λόγω προθέρμανσης του αέρα, την επίπτωση της αύξησης της αναλογίας αέρα –

καυσίμου, την αύξηση της αδιαβατικής θερμοκρασίας της φλόγας αν χρησιμοποιήσουμε καθαρό οξυγόνο αντί αέρα κλπ.

Ο υπολογισμός όμως αυτός, ενώ είναι ακριβής όσον αφορά την αρχική και τελική κατάσταση, δεν είναι ακριβής όσον αφορά την πραγματικά επιτυγχανόμενη αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας και δίνει μεγαλύτερη τιμή από την πραγματική. Αυτό οφείλεται ότι τα τελικά προϊόντα καύσεως (CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2) σε υψηλές θερμοκρασίες διασπώνται μερικά. Έτσι το μείγμα των καυσαερίων σε υψηλή θερμοκρασία μπορεί να περιέχει πλήθος χημικών ενώσεων που σε συνήθεις συνθήκες είναι ασταθείς, και οι οποίες είναι σε χημική ισορροπία με τα τελικά προϊόντα (dissociation).

Για τον προσδιορισμό της πραγματικής αδιαβατικής θερμοκρασίας της φλόγας γίνεται επαναληπτικός υπολογισμός με την μέθοδο δοκιμής – σφάλματος. Με τη μέθοδο αυτή αρχικά υπολογίζεται η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας χωρίς dissociation. Κατόπιν υπολογίζονται οι σταθερές χημικής ισορροπίας για την διάσπαση των προϊόντων καύσης στη θερμοκρασία αυτή, με βάση τις οποίες υπολογίζεται μια νέα σύσταση καυσαερίων. Η νέα σύσταση καυσαερίων όμως αντιστοιχεί σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών υπολογισμών. Ο αλγόριθμος που επιλύει τα το πρόβλημα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή έχει αναπτυχθεί στις Η.Π.Α. (JANNAF) για στρατιωτικούς σκοπούς (σχεδιασμό πυραυλοκινητήρων) και συνοδεύεται από μεγάλη βάση δεδομένων με θερμοδυναμικές ιδιότητες (ενthalπίες σχηματισμού) των προϊόντων καύσης και των προϊόντων διάστασής τους.

ΟΡΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΕΩΣ - ΚΑΥΣΕΩΣ

Σε κάθε σύστημα καυσίμου – οξειδωτικού η καύση είναι εφικτή σε ορισμένες αναλογίες μόνο. Όταν το μείγμα είναι πολύ πτωχό (έχει μικρή αναλογία καυσίμου) ή πολύ πλούσιο (έχει πολύ μεγάλη αναλογία καυσίμου), τότε η ταχύτητα του μετώπου της φλόγας μηδενίζεται και η καύση σταματά. Με τον τρόπο αυτό ορίζονται τα άνω και κάτω όρια αναφλέξεως και καύσεως. Τα όρια αυτά εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την πίεση και επίσης επηρεάζονται από την παρουσία άλλων ενεργών και αδρανών συστατικών. Ανάμεσα στα δυο αυτά όρια υπάρχει η περιοχή των εύφλεκτων μειγμάτων, σε ένα σημείο της οποίας η ταχύτητα του μετώπου της φλόγας αποκτά την μέγιστη τιμή. Αυτό συμβαίνει πλησίον της στοιχειομετρικής αναλογίας ($\lambda = 1$). Στη στοιχειομετρική αναλογία επιτυγχάνεται επίσης η μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας.

	Όρια αναφλέξεως (% vol)		Θερμοκρασία φλόγας (K)	Μέγιστη ταχύτητα φλόγας (m/s)
	Κάτω	Άνω		
Μείγμα				
$\text{H}_2 + \text{O}_2$	4.0	94	3083	11
$\text{CO} + \text{O}_2$ (+ vapor)	15.5	94	2973	1.08
$\text{CH}_4 + \text{O}_2$	5.1	61	3010	4.5
$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$			3431	11.4
$\text{H}_2 + \text{air}$	4	75	2380	3.1

CO + air	12.5	74	2400	0.45
CH ₄ + air	5.3	15	2222	0.45
C ₂ H ₂ + air	2.5	80	2513	1.58
C ₂ H ₄ + air	3.1	32	2375	0.75
C ₂ H ₆ + air	3.1	15	2244	0.40
C ₃ H ₈ + air	2.2	9.5	2250	0.43
n-C ₄ H ₁₀ + air	1.9	8.5	2256	0.38
C ₆ H ₆ + air	1.5	7.5	2365	0.41
C ₂ H ₄ O + air	3	80	2411	1.05

ΦΛΟΓΕΣ

Οι φλόγες διακρίνονται σε δύο βασικά είδη: Φλόγες διάχυσης και φλόγες σε προαναμειγμένα μείγματα. Στην πρώτη περίπτωση το καύσιμο και το οξυγόνο διαχέονται στο χώρο καύσης από αντίθετες κατευθύνσεις με μηχανισμό μοριακής διάχυσης ή τυρβώδους ανάμειξης και το μέτωπο της φλόγας σταθεροποιείται στο χώρο που εμφανίζεται στοιχειομετρική αναλογία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η φλόγα του κεριού, της λυχνίας θυέλλης (κηροζίνης), του λύχνου ασετυλίνης κλπ.

Στη δεύτερη περίπτωση σχηματίζεται μείγμα αέρα – καυσίμου το οποίο οδεύει με ταχύτητα ίση και αντίθετη με την ταχύτητα με την οποία το μέτωπο της φλόγας επιστρέφει προς το μείγμα. Αυτή η φλόγα υπάρχει στην πιο χαρακτηριστική της μορφή στους πιεστικούς καυστήρες φυσικού αερίου και υγραερίου. Η καύση σε κυλίνδρους Μ.Ε.Κ. γίνεται με ανάλογο τρόπο, μόνο που στην περίπτωση αυτή η φλόγα δεν σταθεροποιείται αλλά διαδίδεται και καταλαμβάνει όλο το θάλαμο καύσεως.

Σε πολλές άλλες ενδιάμεσες περιπτώσεις υπάρχει μια αρχική ανάμειξη καυσίμου – πρωτογενούς αέρα και παραγωγή μιας αρχικής φλόγας, η οποία όμως είναι πολύ πλούσια σε καύσιμο. Η καύση ολοκληρώνεται με μια φλόγα διάχυσης που καταναλώνει το υπόλοιπο καύσιμο με τον δευτερογενή αέρα. Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά διαδεδομένη χρησιμοποιείται σε αεριοστροβίλους, καυστήρες στερεών καυσίμων, ατμολέβητες (staged combustion), και ατμοσφαιρικούς καυστήρες αερίων (γκαζάκια υγραερίου κλπ). Στις περιπτώσεις αυτές ο αέρας που συμμετέχει στην καύση κατατάσσεται σε:

- Πρωτογενής αέρας καύσεως: Ο αέρας που αναμειγνύεται άμεσα με το καύσιμο στον καυστήρα.
- Δευτερογενής αέρας καύσεως: Ο αέρας που διοχετεύεται στο χώρο καύσεως από άλλη διαδρομή και ολοκληρώνει την καύση.
- Τριτογενής αέρας: Ο αέρας που αραιώνει τα καυσαέρια και υποβιβάζει τη θερμοκρασία τους (σε αεριοστροβίλους και άλλες ειδικές διατάξεις).

Οι ορισμοί αυτοί μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε εστίας και θαλάμου καύσεως.

Με την σταδιακή χορήγηση του αέρα μπορούμε να κρατήσουμε την θερμοκρασία στο χώρο καύσεως χαμηλή ώστε να μειωθούν οι καταπονήσεις των υλικών και να μειωθεί η παραγωγή οξειδίων του αζώτου.

Οι υπολογισμοί μετάδοσης θερμότητας από φλόγα είναι εξαιρετικά δύσκολοι, γιατί προϋποθέτουν καλή γνώση των παραγόντων που επηρεάζουν τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία. Συγκεκριμένα απαιτούνται το μέγεθος, το σχήμα και η θερμοκρασία της φλόγας καθώς και το χρώμα και η φωτεινότητά της. Ο προσδιορισμός των μεγεθών αυτών πειραματικά είναι δύσκολος, δαπανηρός και έχει μικρή ακρίβεια.

Ειδικά μικρές αποκλίσεις στην εκτίμηση των θερμοκρασιών προκαλούν μεγάλα υπολογιστικά σφάλματα διότι ο ρυθμός μετάδοσης είναι ανάλογος της τετάρτης δύναμης της θερμοκρασίας. Για τους λόγους αυτούς διεξάγεται εντατική έρευνα στον τομέα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής για συστήματα καύσεως και σύγκριση με αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων ώστε να βρεθούν τουλάχιστον κάποιες ημι-εμπειρικές σχέσεις κατάλληλες για το σχεδιασμό συσκευών. Αυτό έχει γίνει εφικτό σε μερικές κατηγορίες συσκευών και φλογών, σε άλλες όμως οι έρευνες συνεχίζονται.

ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ

Τα περισσότερα φαινόμενα που απαρτίζουν την ατμοσφαιρική ρύπανση σχετίζονται με την καύση γιατί οφείλονται σε ουσίες (species) που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από εγκαταστάσεις καύσης και είναι αυτούσια καύσιμα και προϊόντα καύσης. Αυτές οι ουσίες λέγονται πρωτογενείς ρυπαντές. Από αντιδράσεις των πρωτογενών ρυπαντών στην ατμόσφαιρα παράγονται οι δευτερογενείς ρυπαντές.

Ουσία	Καθαρή ατμόσφαιρα	Αέρας με ρύπανση
SO ₂	1 – 10 ppb	20 – 200 ppb
CO	120 ppb	1000 – 10000 ppb
NO	0.01 – 0.05 ppb	50 – 750 ppb
NO ₂	0.1 – 0.5 ppb	50 – 250 ppb
O ₃	20 – 80 ppb	100 – 500 ppb

Δευτερογενείς ρυπαντές είναι το όζον (O₃), το τριοξείδιο του θείου (SO₃) και μεγάλο μέρος του NO₂ (παράγεται από οξείδωση του NO), καθώς και ορισμένα σταγονίδια.

Μονοξείδιο του άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόν ατελούς καύσεως καυσίμων που περιέχουν άνθρακα. Παράγεται για ένα από τους εξής λόγους:

- Ο αέρας δεν επαρκεί για ολοκλήρωση της καύσης (φραγμένοι εναλλάκτες intercooler κλπ) ή το μείγμα ρυθμίζεται πολύ πλούσιο.
- Ο αέρας δεν αναμειγνύεται ικανοποιητικά με το καύσιμο (π.χ. σε καυστήρες άνθρακα τύπου εσχάρας) με αποτέλεσμα να έχουμε πλούσιο μείγμα τοπικά.
- Η φλόγα έρχεται σε επαφή με ψυχρές επιφάνειες και σβήνει πριν ολοκληρωθεί η καύση (π.χ. σε Μ.Ε.Κ., σε ψυχρές εγκαταστάσεις κατά την έναρξη λειτουργίας).

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι τοξικό (δηλητηριώδες) αλλά είναι ελαφρό και δεν δημιουργεί πρόβλημα εφόσον υπάρχει υψηλή καπνοδόχος. Είναι όμως εξαιρετικά επικίνδυνο εφόσον δημιουργείται μέσα σε χώρους ενδιαίτησης ατόμων από θερμάστρες χωρίς καπνοδόχο (π.χ. θερμάστρες κηροζίνης). Επίσης με τον αέρα σχηματίζει εκρηκτικά μείγματα και μπορούν να προκληθούν εκρήξεις αν προκληθεί σπινθήρας, π.χ. στα ηλεκτρόφιλτρα.

Στις Μ.Ε.Κ. το μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί να μετατραπεί σε διοξείδιο του άνθρακα με καταλυτικό μετατροπέα.

Η μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα γίνεται φωτομετρικά ή με ηλεκτροχημικό αισθητήρα.

Οξείδια του Αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου (NO, NO₂, συνοπτικά “NO_x”) παράγονται από το άζωτο του αέρα (thermal NO_x) και από το άζωτο του καυσίμου (fuel derived NO_x). Οι ενώσεις αυτές είναι σταθερές μόνο σε υψηλή θερμοκρασία και αν τα καυσάερια κρυσώσουν σταδιακά διασπώνται

αργά. Στην ατμόσφαιρα υπάρχει και ποσότητα του οξειδίου N_2O το οποίο όμως προέρχεται από βακτηριακή δράση στο έδαφος.

Τα οξείδια του αζώτου στην ατμόσφαιρα, και ιδίως το NO_2 , αποτελούν σημαντικό παράγοντα της φωτοχημικής ρύπανσης.

Η εμφάνισή NO_x στα καυσαέρια σε σημαντική ποσότητα οφείλεται στην ταχεία ψύξη των καυσαερίων με αποτέλεσμα να μην γίνει δυνατή η διάσπαση των οξειδίων του αζώτου. Σημειώνεται ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία στο θάλαμο καύσεως, τόσο περισσότερα οξείδια αζώτου παράγονται από το άζωτο του αέρα (thermal NO_x) και τόσο περισσότερα εμφανίζονται στα καυσαέρια. Επίσης η παραγωγή NO_x ευνοείται σε μείγματα με περίσσεια αέρα. Για το λόγο αυτό, όταν είναι επιθυμητή η μείωση των NO_x , η καύση γίνεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία (π.χ. καύση σε δυο στάδια, καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη). Η παραγωγή NO_x που οφείλονται στο άζωτο του καυσίμου (fuel NO_x) μπορεί να μειωθεί μόνο με αλλαγή καυσίμου.

Ο περιορισμός των NO_x μπορεί να γίνει με διέλευση των καυσαερίων από ειδικό καταλύτη (π.χ. SINOX) και ταυτόχρονη προσθήκη αμμωνίας ή ουρίας.

Η μέτρηση των οξειδίων του αζώτου γίνεται με ηλεκτροχημικό αισθητήρα ή φωτομετρικά.

Οξείδια του Θείου

Το θείο που περιέχεται σε πολλά ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακες, πετρέλαιο) καίγεται και παράγει διοξείδιο του θείου. Το διοξείδιο του θείου συνδυάζεται με συμπυκνώματα υδρατμών και παράγει θειώδες οξύ το οποίο είναι διαβρωτικό για τις εγκαταστάσεις.

Το SO_2 που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα εν μέρει οξειδώνεται προς SO_3 . Τα προϊόντα αυτά μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις και πέφτουν στο έδαφος με τη βροχή. Αυτό δημιουργεί το φαινόμενο της όξινης βροχής το οποίο καταστρέφει τα φυτά και τη ζωή σε λίμνες, με εξαίρεση τις περιοχές που υπάρχουν ασβεστολιθικά πετρώματα.

Ο μόνος τρόπος να μειωθεί η παραγωγή SO_2 είναι η χρήση καυσίμων μειωμένου θείου. Καύσιμα με αμελητέα περιεκτικότητα θείου είναι το φυσικό αέριο, το υγραέριο και η βενζίνη. Η κηροζίνη έχει μικρή περιεκτικότητα ενώ το πετρέλαιο diesel, το μαζούτ και οι γαιάνθρακες έχουν σημαντική περιεκτικότητα. Σήμερα διακινείται στην ελληνική αγορά πετρέλαιο χαμηλού θείου, το οποίο έχει υποστεί αποθείωση στο δυλιστήριο.

Τα καυσαέρια μπορούν να καθαρισθούν από το SO_2 με δέσμευσή του σε αιώρημα οξειδίου του ασβεστίου με παραγωγή γύψου. Το κόστος (πάγιο και λειτουργικό) τέτοιων εγκαταστάσεων καθαρισμού είναι μεγάλο.

Το διοξείδιο του θείου μπορεί να μετρηθεί φωτομετρικά ή με δέσμευσή του σε διάλυμα και χημική ανάλυση.

Οργανικές ενώσεις

Οι οργανικές ενώσεις στα καυσαέρια είναι προϊόντα της ατελούς καύσεως. Εμφανίζονται μαζί με το μονοξείδιο του άνθρακα κυρίως στα πλούσια μείγματα και σε περιπτώσεις κακής

ανάμιξης καυσίμου – αέρα. Στην ίδια κατηγορία υπάγονται και οι διαφυγές πτητικών συστατικών από τις δεξαμενές αποθήκευσης των εγκαταστάσεων καύσης, αν και η αντιμετώπισή τους γίνεται με διαφορετικό τρόπο.

Ιπτάμενη τέφρα

Τα άκαυστα στερεά που υπάρχουν στα καύσιμα είναι γαιώδεις προσμίξεις και ανόργανα άλατα. Αυτά υπάρχουν σε μικρές ποσότητες στο μαζούτ και τη βιομάζα και σε σχετικά μεγάλες στους γαιάνθρακες. Κατά την καύση τα συστατικά αυτά παράγουν την τέφρα, της οποίας ένα μέρος συλλέγεται στον πυθμένα, ένα μικρό μέρος επικάθεται σε διάφορες επιφάνειες της εγκατάστασης και το υπόλοιπο παρασύρεται από τα καυσαέρια παράγοντας την «ιπτάμενη τέφρα». Αυξημένη ιπτάμενη τέφρα παράγουν και οι λέβητες τύπου ρευστοποιημένης κλίνης, αφού στην παραγωγή της συμμετέχει και το υλικό πλήρωσης.

Η ιπτάμενη τέφρα συλλέγεται με ειδικές εγκαταστάσεις αποκονίωσης. Το μεγαλύτερο μέρος μπορεί να συλλεγεί με κυκλώνες ή πολυκυκλώνες, ενώ μείωση μέσα στα όρια που προβλέπει ο νόμος απαιτεί μεθόδους όπως τα σακκόφιλτρα (bughouse) και τα ηλεκτρόφιλτρα (electrostatic precipitators).

Ο προσδιορισμός της ιπτάμενης τέφρας σε ρεύμα καυσαερίων γίνεται σταθμικά, με διέλευση μεγάλης ποσότητας καυσαερίων μέσα από ελαφρό φίλτρο κυτταρίνης και ζύγιση του φίλτρου πριν και μετά. Συνεχής ένδειξη είναι δυνατή με ειδικά όργανα (οπασίμετρα) που παρακολουθούν την εξασθένιση οπτικής δέσμης που διέρχεται μέσα από τα καυσαέρια.

Αιθάλη - καπνός

Η αιθάλη προέρχεται από τον άνθρακα που υπάρχει στα διάφορα καύσιμα και του οποίου η καύση δεν ολοκληρώνεται για διάφορους λόγους (π.χ. πρόωρη σβέση της φλόγας). Η παρουσία αιθάλης στη ζώνη της φλόγας είναι επιθυμητή γιατί αυξάνει τη φωτεινότητα της φλόγας και την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

Η αιθάλη στα καυσαέρια μετράται με άμεση παρατήρηση με το χάρτη Ringelman ή με απορρόφηση καυσαερίων μέσα από διηθητικό χάρτη (μέθοδος Bacharach). Μεγάλες συγκεντρώσεις αιθάλης μπορούν να μετρηθούν όπως η ιπτάμενη τέφρα.

Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα δεν είναι ρύπος με την έννοια των υπολοίπων αφού δεν προκαλεί ουσιαστικά προβλήματα σε τοπικό επίπεδο, είναι όμως ανεπιθύμητη εκπομπή σε πλανητικό επίπεδο γιατί συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ποσότητα που παράγεται είναι σε άμεση συνάρτηση με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα, με αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερη κατά την καύση γαιανθράκων, σημαντικά μειωμένη κατά την καύση φυσικού αερίου και μηδενική κατά την καύση υδρογόνου.

Η μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται συνήθως για προσδιορισμό του λόγου αέρα με απορρόφηση σε διάλυμα καυστικού καλίου ή με φωτομετρική μέθοδο. Υπάρχουν επίσης μέθοδοι που στηρίζονται στην θερμική αγωγιμότητα ή την πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα.

