
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Η ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Η καύση είναι μία χημική αντίδραση κατά την οποία τα συστατικά του καυσίμου (χημικά στοιχεία) αντιδρούν με οξυγόνο και παράγουν νέες χημικές ενώσεις, ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται και θερμική ενέργεια - είναι δηλαδή εξώθερμη χημική αντίδραση. Για την επιτυχή πραγματοποίησή της επομένως είναι απαραίτητο αφ' ενός να υπάρχει διαθέσιμο το απαιτούμενο οξυγόνο και αφ' ετέρου να απάγονται από την περιοχή της καύσης οι νέες χημικές ενώσεις που παράγονται κατ' αυτήν, ώστε να είναι δυνατή η προσαγωγή του οξυγόνου.

Υπάρχουν παραδείγματα διεργασιών καύσης όπου η παροχή καυσίμου και οξυγόνου και η απαγωγή των προϊόντων που παράγονται γίνονται συνεχώς και ταυτόχρονα, όπως π.χ. σ' ένα λέβητα ή σ' έναν αεριοστρόβιλο. Σε άλλες όμως περιπτώσεις, η προσαγωγή οξυγόνου και καυσίμου στο χώρο της καύσης και η απαγωγή των προϊόντων της από αυτόν είναι διακριτές διεργασίες που συμβαίνουν πλήρως ή τουλάχιστον σε μεγάλο βαθμό ετεροχρονισμένα.

Στον ανθρώπινο οργανισμό, η προσαγωγή οξυγόνου στο σύστημα (δηλαδή στο ανθρώπινο σώμα) γίνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα, με την εισπνοή. Κατ' αυτήν, ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στους πνεύμονες και το οξυγόνο, διαπερνώντας τον ιστό των πνευμονικών κυψελίδων, ενώνεται με την αιμοσφαιρίνη και μεταφέρεται και στους πλέον απομακρυσμένους ιστούς, προκειμένου να συμμετάσχει στην καύση, σε κυτταρικό επίπεδο. Το προϊόν της καύσης (διοξείδιο του άνθρακα) στους απομακρυσμένους ιστούς αντικαθιστά το οξυγόνο στην αιμοσφαιρίνη και μεταφέρεται με αυτή στους πνεύμονες. Από εκεί, ακολουθώντας αντίστροφη πορεία αυτής του οξυγόνου, αναμιγνύεται με το υπόλοιπο του αέρα και τελικά εξέρχεται από τον οργανισμό με την εκπνοή. Το «καύσιμο» στη περίπτωση αυτή είναι ουσίες που βρίσκονται ήδη αποθηκευμένες στο κύτταρο.

Εντελώς ανάλογες διεργασίες συμβαίνουν και στις μηχανές εσωτερικής καύσης: ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στον κύλινδρο (και το οξυγόνο του συμμετέχει στη καύση), τα προϊόντα της καύσης αναμιγνύονται με το υπόλοιπο του ατμοσφαιρικού αέρα (άζωτο ή και οξυγόνο που δεν έλαβε μέρος στη διεργασία) και εξέρχονται από τον κύλινδρο, για να απορριφθούν στην ατμόσφαιρα. Ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, το καύσιμο προσάγεται στο θάλαμο καύσης είτε μαζί με τον αέρα (κινητήρας otto) είτε ξεχωριστά (κινητήρας diesel).

Τόσο δηλαδή στον ανθρώπινο οργανισμό όσο και στις μηχανές εσωτερικής καύσης υφίστανται τρεις διακριτές διεργασίες: είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα στο «σύστημα», πραγματοποίηση της καύσης, έξοδος του υπολοίπου του αέρα και των προϊόντων της καύσης από το «σύστημα».

Με την έννοια αυτή λοιπόν, όσο κι αν ακούγεται ίσως περίεργο, οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι ζωντανοί οργανισμοί μπορούν να θεωρηθούν παρόμοια συστήματα, και οι διεργασίες εισπνοής και εκπνοής των ζωντανών οργανισμών είναι εντελώς ανάλογες με την εισαγωγή και την εξαγωγή αντίστοιχα των μηχανών εσωτερικής καύσης. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος που στο Κεφάλαιο 2 χρησιμοποιήθηκε ο όρος «κινητήρες φυσικής αναπνοής» για τις μηχανές που δεν χρησιμοποιούν κάποια πρόσθετη συσκευή για την εισαγωγή του αέρα στους κυλίνδρους, σε αντιδιαστολή με τις καθ' οιονδήποτε τρόπο υπερπληρούμενες μηχανές.

Οι διεργασίες εισαγωγής και εξαγωγής προϋποθέτουν η πρώτη την ύπαρξη της δεύτερης και αντίστροφα, και για το λόγο αυτό η αλληλουχία τους, η σύνθετη δηλαδή διεργασία που περιλαμβάνει τόσο την εισαγωγή όσο και την εξαγωγή, περιγράφεται με τον όρο «**διεργασία πλήρωσης**» ή αλλιώς και «**διεργασία αλλαγής μίγματος**».

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού είναι ακριβώς η παρουσίαση της διεργασίας πλήρωσης ή αλλαγής μίγματος των μηχανών εσωτερικής καύσης, που είναι προφανές ότι έχει κεφαλαιώδη σημασία για τη λειτουργία τους, καθώς αποτελεί το ανάλογο της αναπνοής των ζωντανών οργανισμών.

5.2 ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Κατά τη θεωρητική περιγραφή της λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα (βλέπε παράγραφο 2.3) αναφέρθηκε ότι όταν το έμβολο φθάσει στο ΚΝΣ μετά την εκτόνωση ανοίγει ακαριαία η βαλβίδα εξαγωγής. Το έμβολο, κινούμενο προς το ΑΝΣ, εξωθεί το περιεχόμενο του κυλίνδρου, δηλαδή το θερμό καυσαέριο, προς το περιβάλλον - αδειάζοντας πλήρως τον κύλινδρο και προετοιμάζοντάς τον έτσι για την εισαγωγή της νέας γόμωσης, που θα ακολουθήσει αμέσως μετά.

Η διεργασία της εξαγωγής, σύμφωνα με την περιγραφή αυτή, διαρκεί 180° γωνίας στροφάλου και ολοκληρώνεται όταν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ, οπότε και κλείνει ακαριαία η βαλβίδα εξαγωγής. Σύμφωνα πάντα με την περιγραφή αυτή, με το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής ο κύλινδρος έχει αδειάσει πλήρως από καυσαέριο.

Στον ίδιο μηδενικό χρόνο που κλείνει η βαλβίδα εξαγωγής, ακριβώς δηλαδή στο ΑΝΣ, ανοίγει ακαριαία και η βαλβίδα εισαγωγής και το έμβολο, κινούμενο προς το ΚΝΣ, επιτρέπει την είσοδο της νέας γόμωσης (αέρας για τον κινητήρα diesel ή μίγμα αέρα και καυσίμου για τον otto), και αυτό συνεχίζεται μέχρι το ΚΝΣ. Μόλις το έμβολο φθάσει στο ΚΝΣ ο κύλινδρος θεωρείται ότι έχει γεμίσει πλήρως με νέα γόμωση (στη συνέχεια του κειμένου θα εξετασθεί τη σημαίνει ο χαρακτηρισμός «πλήρως») και η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει, και πάλι ακαριαία, για να αρχίσει η συμπίεση.

Αντίστοιχα φαινόμενα θεωρήθηκε ότι συμβαίνουν στο δίχρονο κινητήρα, με τη διαφορά ότι αυτά εμφανίζουν χρονική επικάλυψη. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι ο κύλινδρος αδειάζει πλήρως από τα προϊόντα του προηγούμενου κύκλου, ότι γεμίζει πλήρως με νέα γόμωση και ότι το άνοιγμα ή κλείσιμο των θυρίδων εισαγωγής και εξαγωγής συμβαίνει ακαριαία.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινισθεί η έννοια «πλήρης γόμωση του κυλίνδρου», δεδομένου ότι ο όγκος του όταν το έμβολο είναι στο ΚΝΣ είναι βέβαια συγκεκριμένος, η γόμωση όμως είναι είτε σκέτος αέρας (κινητήρας diesel) είτε αέρας και καύσιμο (κινητήρας otto). Η γόμωση επομένως που έχει μπει στο κύλινδρο καταλαμβάνει μεν όλο τον όγκο του, η μάζα της όμως εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Για τις ανάγκες της συζήτησης που προηγήθηκε, πλήρης γόμωση θεωρείται εκείνη που καταλήγει στο να έχει μπει στον κύλινδρο η μέγιστη δυνατή μάζα γόμωσης.

Κατά σύμβαση, ως μέγιστη μάζα νέας γόμωσης ορίζεται αυτή που προκύπτει από τον όγκο του κυλίνδρου όταν το έμβολο είναι στο ΚΝΣ με πυκνότητα αέρα αυτήν που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία και την πίεση πλήρωσης. Τούτο σημαίνει ότι η μέγιστη μάζα γόμωσης στην περίπτωση του ατμοσφαιρικού κινητήρα προκύπτει από τον όγκο του κυλίνδρου στο ΚΝΣ και την πυκνότητα του αέρα που αντιστοιχεί σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην περίπτωση του υπερπληρούμενου κινητήρα, η μέγιστη μάζα γόμωσης προκύπτει και πάλι από τον όγκο του κυλίνδρου στο ΚΝΣ και την πυκνότητα του αέρα, η οποία όμως λαμβάνεται στη πίεση και θερμοκρασία που έχει αυτός όταν περνά από τη βαλβίδα εισαγωγής.

Με τη θεώρηση αυτή, για τον υπερπληρούμενο κινητήρα λαμβάνεται υπ' όψη η αύξηση πίεσης και θερμοκρασίας λόγω του συμπιεστή αλλά και η μείωση

τόσο της θερμοκρασίας όσο και της πίεσης κατά τη διέλευση του αέρα από τον ενδιάμεσο ψύκτη (intercooler), εφ' όσον φυσικά αυτός υπάρχει.

Με βάση τα παραπάνω, η διεργασία πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική περιγραφή της λειτουργίας του 2-χρονου και του 4-χρονου κινητήρα προϋποθέτει ότι:

1. Από τη βαλβίδα εισαγωγής περνά η μέγιστη μάζα γόμωσης που χωρά ο κύλινδρος. Η μέγιστη μάζα γόμωσης προκύπτει από τον όγκο του κυλίνδρου όταν το έμβολο είναι στο ΚΝΣ και από την πυκνότητα του αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος (ατμοσφαιρικός κινητήρας) ή στις συνθήκες μετά τον ενδιάμεσο ψύκτη (συνθήκες πλήρωσης - υπερπληρούμενος κινητήρας).
2. Με βάση το ισοζύγιο μάζας του κυλίνδρου, από τη βαλβίδα εξαγωγής περνά η μέγιστη μάζα αέρα και η αντίστοιχη μάζα καυσίμου που είχε εισαχθεί στον κύλινδρο.

Η διεργασία πλήρωσης που στηρίζεται στις δύο αυτές προϋποθέσεις χαρακτηρίζεται ως «ιδανική διεργασία πλήρωσης». Με άλλα λόγια η ιδανική διεργασία πλήρωσης προϋποθέτει τη διέλευση από τις βαλβίδες (ή θυρίδες) εισαγωγής και εξαγωγής της μέγιστης (όπως αυτή ορίζεται, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα) μάζας νέας γόμωσης (όπως αυτή ορίζεται, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα) και καυσαερίου, αντίστοιχα.

Κατά την πραγματική λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης όμως επιδρούν διάφοροι παράγοντες που δεν επιτρέπουν στη διεργασία πλήρωσης να γίνει κατά τον ιδανικό τρόπο που παρουσιάστηκε.

Στο σύνολό τους οι παράγοντες αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της μάζας νέας γόμωσης που εισέρχεται στον κύλινδρο, και προφανώς αντίστοιχα να μειώνεται και η μάζα καυσαερίου που εξέρχεται από τον κύλινδρο. Τελικά δηλαδή έχουν ως αποτέλεσμα να μην καίγεται η μέγιστη ποσότητα νέας γόμωσης αλλά κάποια μικρότερη αυτής.

Δεδομένου ότι το έργο που αποδίδεται από τον κύκλο εξαρτάται από το έργο που προσδίδεται σ' αυτόν, δηλαδή από την ποσότητα και την ποιότητα της γόμωσης, οι αποκλίσεις από την ιδανική διεργασία πλήρωσης τελικά μειώνουν το μηχανικό έργο που είναι σε θέση να παράγει ο κύλινδρος.

5.3 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Ο αέρας, στην πορεία του από το περιβάλλον μέχρι τον κύλινδρο, περνά κατά σειρά από:

1. Το φίλτρο αέρα, όπου καθαρίζεται από στερεά σωματίδια και σκόνη που μπορεί να μεταφέρει.
2. Στον κινητήρα otto, από τα όργανα ρύθμισης φορτίου (πεταλούδα στραγγαλισμού του συστήματος προετοιμασίας μίγματος - βλέπε σχετικό κεφάλαιο), όπου ρυθμίζεται η παροχή του και από την αντίστοιχη διάταξη μέτρησης.
3. Την πολλαπλή εισαγωγής, όπου διαμοιράζεται προς τους κυλίνδρους του κινητήρα.
4. Τα κανάλια αέρα της κυλινδροκεφαλής.
5. Τις βαλβίδες εισαγωγής.

Αντίστοιχα, το καυσαέριο, στην πορεία του από τον κύλινδρο προς το περιβάλλον περνά κατά σειρά από:

1. Τις βαλβίδες εξαγωγής.
2. Τα κανάλια καυσαερίου της κυλινδροκεφαλής.
3. Την πολλαπλή εξαγωγής, όπου συναντά και αναμιγνύεται με το καυσαέριο των υπολοίπων κυλίνδρων.
4. Τον αγωγό καυσαερίου.
5. Το σύστημα μετεπεξεργασίας καυσαερίου, εφ' όσον υπάρχει (φίλτρο σωματιδίων για τον κινητήρα diesel, καταλυτικός μετατροπέας).
6. Το σύστημα μείωσης θορύβου (πρώτο και συνήθως και δεύτερο σιγαστήρα).

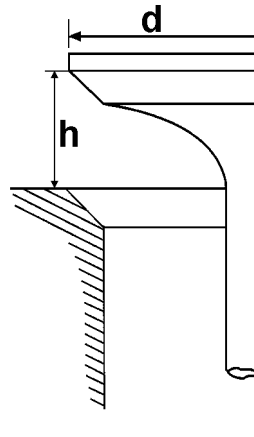
Όλα τα παραπάνω εισάγουν αντιστάσεις στη ροή του αέρα ή του καυσαερίου, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την πλήρωση και να προκαλούν αποκλίσεις από την ιδανική διεργασία που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται αναλυτικότερα ο μηχανισμός επίδρασης στη διεργασία της πλήρωσης των παραπάνω, αλλά και άλλων που δεν αναφέρθηκαν ακόμη.

5.3.1 Βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής

Οι διατομές επικοινωνίας του κυλίνδρου με το περιβάλλον διαμορφώνονται από τη διάμετρο των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής και τη διαδρομή των αντίστοιχων βαλβίδων από την κλειστή στην ανοικτή θέση. Η διατομή ροής δηλαδή είναι στην ουσία η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου που δημιουργείται και που έχει ως διάμετρο τη διάμετρο της βαλβίδας (d) και ως ύψος την απόσταση της κεφαλής της βαλβίδας από την κεφαλή του κυλίνδρου (h), όπως φαίνεται και στην Εικ. 5-1.

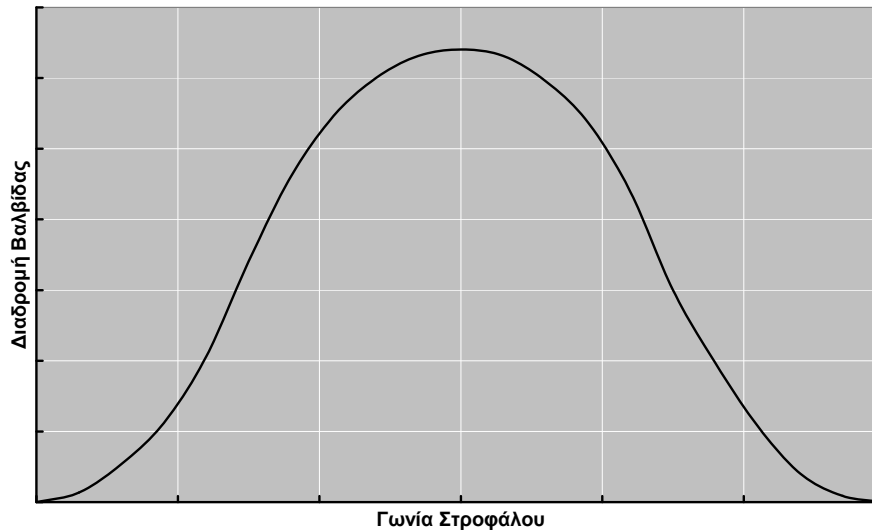
Δεδομένου ότι σε κάθε κύλινδρο πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο βαλβίδες, μία εισαγωγής και μία εξαγωγής (στη συνέχεια του κειμένου θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στους πολυβάλβιδους κινητήρες) είναι προφανές ότι η διάμετρος (d) κάθε βαλβίδας πρέπει να είναι μικρότερη από την ακτίνα του

κυλίνδρου. Η βύθιση της βαλβίδας (h) από την άλλη πλευρά, για λόγους που θα συζητηθούν αργότερα, δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 10 - 20 mm, ανάλογα με το μέγεθος του κυλίνδρου και τον τύπο του κινητήρα (otto ή diesel).



Εικ. 5-1: Διατομή ροής με βαλβίδα ανοικτή.

Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι βαλβίδες δεν ανοίγουν ακαριαία, όπως υποτέθηκε στην ιδανική διεργασία πλήρωσης. Η βύθιση (άνοιγμα) της βαλβίδας γίνεται σταδιακά, και η στιγμιαία θέση της εξαρτάται από τη γεωμετρία του έκκεντρου που την κινεί. Στην Εικ. 5-2 φαίνεται μία τυπική καμπύλη κίνησης βαλβίδας. Πρακτικά δηλαδή το άνοιγμα των βαλβίδων μεγιστοποιείται για ελάχιστο χρόνο, ουσιαστικά στιγμιαία, ενώ τον υπόλοιπο χρόνο η (ανοικτή) βαλβίδα βρίσκεται σε κάποια ενδιάμεση θέση.



Εικ. 5-2: Η διαδρομή της βαλβίδας ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου.

Κατά συνέπεια, η διατομή ροής ξεκινά από μηδενική, αυξάνει μέχρι μία μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στη μέγιστη βύθιση της βαλβίδας, και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά, μέχρι που μηδενίζεται και πάλι. Η αντίσταση στη ροή όμως είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας, δηλαδή αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της διατομής. Με άλλα λόγια, και προκειμένου να επιτευχθεί η εισαγωγή της νέας γόμωσης και η εξαγωγή του καυσαερίου από τον προηγούμενο κύκλο, πρέπει να αντιμετωπισθούν σημαντικές αντιστάσεις

ροής. Οι αντιστάσεις αυτές αντιμετωπίζονται από τον ίδιο τον κινητήρα και, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν μέρος της ισχύος αλλαγής μίγματος, μέρος δηλαδή της ισχύος μηχανικών απωλειών.

Ανεξάρτητα από τη συμμετοχή τους στη διαμόρφωση των μηχανικών απωλειών, η ανάπτυξη αυτών των αντιστάσεων ροής σημαίνει ότι απαιτείται θεωρητικά άπειρος χρόνος προκειμένου η πίεση στο εσωτερικό του κυλίνδρου, τόσο κατά την εισαγωγή όσο και την εξαγωγή, να εξισωθεί με αυτήν πριν από την αντίστοιχη βαλβίδα. Κατά την πραγματική λειτουργία του κινητήρα όμως ο χρόνος που διατίθεται για την αλλαγή του μίγματος είναι της τάξης των μερικών ms, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα (2-χρονος ή 4-χρονος) και τον αριθμό στροφών. Κατά συνέπεια η ύπαρξη και μόνο των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής προφανώς επιβάλλει απόκλιση της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης.

5.3.2 Κανάλια εισαγωγής - εξαγωγής

Μέσα στην κυλινδροκεφαλή διαμορφώνονται τα κανάλια εισαγωγής, τα οποία συνδέουν την πολλαπλή εισαγωγής με τις αντίστοιχες βαλβίδες, και τα κανάλια εξαγωγής, που αντίστοιχα συνδέουν την πολλαπλή εξαγωγής με τις αντίστοιχες βαλβίδες.

Στο εσωτερικό των καναλιών αυτών επομένως ρέει η νέα γόμωση (κανάλια εισαγωγής) και το καυσαέριο (κανάλια εξαγωγής). Προφανώς η ροή γίνεται με κάποια ταχύτητα, η οποία, λόγω των περιορισμένων διατομών και των όγκων που διακινούνται, είναι αρκετά υψηλή. Αυξημένη ταχύτητα ροής όμως συνεπάγεται την ανάπτυξη σημαντικών αντιστάσεων, δηλαδή πτώσης πίεσης, που οφείλονται τόσο στην τραχύτητα της εσωτερικής επιφάνειας των αγωγών όσο και στις, αναπόφευκτες, αλλαγές κατεύθυνσης ή και διατομής της ροής.

Κατά συνέπεια κατά μήκος των καναλιών εισαγωγής και εξαγωγής προκαλείται πτώση πίεσης, η οποία προστίθεται σ' αυτή που προκαλείται στις βαλβίδων και συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η ύπαρξη δηλαδή των καναλιών στην κυλινδροκεφαλή και της επακόλουθης πτώσης πίεσης σ' αυτά αποτελεί μία πρόσθετη αιτία απόκλισης από την ιδανική διεργασία πλήρωσης.

5.3.3 Πολλαπλές και κεντρικοί αγωγοί εισαγωγής και εξαγωγής

Τόσο για λόγους οικονομίας χώρου και υλικών όσο και για λειτουργικούς λόγους (που θα συζητηθούν στη συνέχεια) στις περισσότερες μηχανές οι κύλινδροι ομαδοποιούνται για την παροχή νέας γόμωσης και την απαγωγή καυσαερίου. Το καυσαέριο δηλαδή περισσότερων του ενός κυλίνδρων συγκεντρώνεται σε αγωγό - συλλέκτη (την πολλαπλή εξαγωγής) από όπου και οδηγείται τελικά στην ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα, ο αέρας τροφοδοσίας προετοιμάζεται (φιλτράρεται ή και μετρίεται η παροχή του) κεντρικά και στη συνέχεια μοιράζεται στους κυλίνδρους μέσω αγωγού - συλλέκτη (της πολλαπλής εισαγωγής).

Η ομαδοποίηση μπορεί να περιλαμβάνει όλους τους κυλίνδρους, να υπάρχει δηλαδή μία πολλαπλή εισαγωγής και μία πολλαπλή εξαγωγής, ή να δημιουργούνται περισσότερες της μίας ομάδες, να υπάρχουν δηλαδή δύο ή περισσότερες πολλαπλές εισαγωγής και δύο ή περισσότερες πολλαπλές εξαγωγής.

Επίσης στους κινητήρες τύπου V είναι αρκετά συνηθισμένο να υπάρχει μία πολλαπλή εισαγωγής (στο εσωτερικό του V) και δύο πολλαπλές εξαγωγής, στην εξωτερική πλευρά του V. Σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις δεν διαμορφώνονται πολλαπλές εισαγωγής και εξαγωγής και η επικοινωνία των κυλίνδρων με το περιβάλλον γίνεται ανεξάρτητα.

Προφανώς, η ύπαρξη μίας ή περισσότερων πολλαπλών εισαγωγής ή εξαγωγής έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση πρόσθετης πτώσης πίεσης, αποτελεί επομένως μία πρόσθετη αιτία απόκλισης της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης.

Αντίστοιχα, οι κεντρικοί αγωγοί, που αναχωρούν από την πολλαπλή εξαγωγής ή καταλήγουν στη πολλαπλή εισαγωγής προκαλούν κι αυτοί με τη σειρά τους απώλειες πίεσης, και επομένως περαιτέρω απόκλιση από την ιδανική διεργασία.

5.3.4 Φίλτρο αέρα και σιγαστήρες

Στο φίλτρο, ο αέρας τροφοδοσίας αναγκάζεται να περάσει από πορώδη υλικά, ώστε να διαχωριστεί από στερεές ουσίες που μεταφέρει από το περιβάλλον (σκόνη κλπ.), η είσοδος των οποίων στον κύλινδρο μπορεί να προκαλέσει φθορά και βλάβες, λόγω των πολύ μικρών γεωμετρικών ανοχών. Προφανώς η διέλευση από το πορώδες υλικό συνοδεύεται από απώλεια πίεσης, η οποία βέβαια εξαρτάται από την ταχύτητα ροής (δηλαδή την παροχή και το μέγεθος των πόρων) αλλά και το βαθμό καθαρότητας του φίλτρου.

Αποστολή των σιγαστήρων είναι η καταστροφή των κυμάτων πίεσης που υφίστανται στη ροή του καυσαερίου, και τα οποία προέρχονται από την περιοδικότητα της ροής σε κάθε κύλινδρο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διέλευση του καυσαερίου μέσα από διάτρητους σωλήνες, με απότομη αλλαγή κατεύθυνσης της ροής και άλλες ανάλογες τεχνικές. Ανεξάρτητα από το συνδυασμό τεχνικών που χρησιμοποιούνται, προκαλείται προφανώς απώλεια πίεσης.

Με βάση επομένως τα παραπάνω, το φίλτρο αέρα στην πλευρά της εισαγωγής και οι σιγαστήρες στην πλευρά της εξαγωγής προκαλούν περαιτέρω απόκλιση της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης. Πρέπει βέβαια στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι η τεχνολογία κατασκευής των εξαρτημάτων αυτών (φίλτρα και σιγαστήρες) έχει πλέον φθάσει σε τέτοιο επίπεδο ώστε η επίπτωσή τους στη διεργασία της πλήρωσης είναι πολύ μικρή, με την προϋπόθεση βέβαια ότι συντηρούνται σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές, κυρίως το φίλτρο αέρα.

5.3.5 Σύστημα επεξεργασίας καυσαερίου

Για την ικανοποίηση των προδιαγραφών όσον αφορά στις εκπομπές ρύπων από τους κινητήρες έχει γίνει πλέον απαραίτητη η επεξεργασία του καυσαερίου, πριν αυτό απορριφθεί στην ατμόσφαιρα. Η αναλυτική παρουσίαση των συστημάτων και τεχνικών επεξεργασίας του καυσαερίου τόσο για τους κινητήρες otto όσο και για τους diesel ξεφεύγει από τους σκοπούς του παρόντος βιβλίου, και γι' αυτό απλώς αναφέρεται ότι η επεξεργασία αυτή συνεπάγεται κάποια αντίσταση στη ροή του καυσαερίου, και επομένως αποτελεί και αυτή με τη σειρά της αιτία απόκλισης μεταξύ της πραγματικής και της ιδανικής διεργασίας πλήρωσης. Διευκρινίζεται πάντως ότι η τεχνολογία κατασκευής των συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίου σήμερα πλέον έχει φθάσει σε ε-

πίεδο τέτοιο που η αντίσταση στη ροή που δημιουργείται είναι πολύ περιορισμένη και η επίδρασή τους επομένως στη διεργασία της πλήρωσης είναι πολύ μικρή.

5.3.6 Σύστημα ρύθμισης φορτίου

Όλες οι αιτίες απόκλισης της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης που αναφέρθηκαν μέχρις εδώ έχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά: (α) αναφέρονται τόσο στους κινητήρες otto όσο και στους κινητήρες diesel και, (β) είναι ανεπιθύμητα φαινόμενα που προέρχονται από τη λειτουργία των μηχανών. Αυτό σημαίνει ότι τα φαινόμενα που τις προκαλούν δημιουργούνται αυτόματα κατά τη λειτουργία των μηχανών, και μπορούν να ληφθούν κατασκευαστικά μέτρα για τον σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό περιορισμό των επιπτώσεών τους, και όπως ήδη αναφέρθηκε η αρνητική επίπτωση κάποιων από αυτά τουλάχιστον είναι ιδιαίτερα μικρή.

Στον κινητήρα otto όμως, η ρύθμιση φορτίου γίνεται με περιορισμό της ποσότητας νέας γόμωσης με την οποία τροφοδοτείται ο κύλινδρος. Όπως θα αναλυθεί και στο σχετικό κεφάλαιο, ο χειριστής του κινητήρα, για να αλλάξει το σημείο λειτουργίας του, ρυθμίζει (αυξάνει ή μειώνει) την παροχή αέρα. Το σύστημα προετοιμασίας μίγματος στη συνέχεια μετρά την παροχή αυτή και ρυθμίζει αντίστοιχα την ποσότητα καυσίμου, έτσι ώστε η αναλογία αέρα και καυσίμου να παραμείνει στην επιθυμητή σταθερή τιμή. Με άλλα λόγια ο χειριστής του κινητήρα ουσιαστικά επεμβαίνει δραστικά στη διεργασία εισαγωγής, που όμως αποτελεί μέρος της πλήρωσης, επομένως τελικά επεμβαίνει και ρυθμίζει ο ίδιος την πλήρωση.

Αυτή η επέμβαση γίνεται με τα «όργανα ρύθμισης φορτίου» και συγκεκριμένα με αλλαγή της κλίσης της πεταλούδας στραγγαλισμού, που ελέγχει τη ροή αέρα προς τους κυλίνδρους. Αντιστρέφοντας επομένως τη συζήτηση, η λειτουργία των οργάνων ρύθμισης φορτίου του κινητήρα otto αποτελεί αιτία απόκλισης της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης. Η σημαντική διαφορά βέβαια σε σχέση με τις άλλες αιτίες που αναφέρθηκαν μέχρις και με αυτές που θα αναφερθούν στη συνέχεια είναι ότι η απόκλιση μεταξύ ιδανικής και πραγματικής πλήρωσης που επιβάλλεται από τα όργανα ρύθμισης φορτίου είναι επιθυμητή και ελεγχόμενη.

Από τον τρόπο λειτουργίας του κινητήρα diesel δεν απαιτείται ανάλογο σύστημα για τη ρύθμιση του φορτίου, επομένως τα όργανα ρύθμισης φορτίου προκαλούν απόκλιση από την ιδανική διεργασία πλήρωσης μόνο στον κινητήρα otto.

5.3.7 Θερμά τοιχώματα

Μέχρι του σημείου αυτού, όλοι οι μηχανισμοί που παρουσιάστηκαν σε σχέση με την εισαγωγή επιδρούν κυρίως στην πίεση του κυλίνδρου. Λόγω δηλαδή των αντιστάσεων ροής του αέρα από το περιβάλλον προς τον κύλινδρο, η πίεση στο τέλος της εισαγωγής καταλήγει να είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής (ή της πίεσης στην έξοδο του ενδιάμεσου ψύκτη) και επομένως ανάλογα μικρότερη η πυκνότητα και τελικά η μάζα του αέρα. Αντίστοιχα, η πίεση στον κύλινδρο μετά την ολοκλήρωση της εξαγωγής, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, λόγω των αντιστάσεων στη ροή του καυσαερίου προς το περιβάλλον.

Η πυκνότητα όμως του αέρα δεν εξαρτάται μόνο από την πίεση αλλά και από τη θερμοκρασία. Ο αέρας οδηγείται στον κύλινδρο σε μία περισσότερο ή λιγότερο συγκεκριμένη θερμοκρασία (αυτή του περιβάλλοντος ή αυτήν που του επιβάλλει ο ενδιάμεσος ψύκτης), εκεί όμως συναντά τα τοιχώματα του κυλίνδρου, η θερμοκρασία των οποίων είναι σημαντικά μεγαλύτερη, λόγω της καύσης του προηγούμενου κύκλου. Κατά συνέπεια ο αέρας θερμαίνεται, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της πυκνότητάς του.

Τα θερμά επομένως τοιχώματα του κυλίνδρου αποτελούν μία ακόμα αιτία απόκλισης της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης. Στις σημερινές μηχανές η αύξηση θερμοκρασίας της γόμωσης λόγω των θερμών τοιχωμάτων είναι της τάξης των 15°C, τιμή που δεν είναι βέβαια μεγάλη, αλλά δε μπορεί και να θεωρηθεί αμελητέα.

5.3.8 Υπόλοιπο καυσαερίου

Η αντίσταση στη ροή του καυσαερίου από τον κύλινδρο προς το περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα κάποια ποσότητα καυσαερίου να μην εξέρχεται, αλλά να παραμένει στον κύλινδρο. Ακόμα όμως και με μηδενικές αντιστάσεις ροής, κάποια ποσότητα καυσαερίου μπορεί να παραμείνει στον κύλινδρο, μόνο και μόνο επειδή βρέθηκε σε κάποια απομακρυσμένη από τη βαλβίδα εξαγωγής θέση και η κίνηση του εμβόλου προς το ΑΝΣ απλά την ωθεί προς την κυλινδροκεφαλή, όχι όμως και προς τη βαλβίδα. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται «υπόλοιπο καυσαερίου»

Η παρουσία όμως του υπολοίπου καυσαερίου στον κύλινδρο μετά την ολοκλήρωση της εξαγωγής έχει διπλή αρνητική επίδραση στη διεργασία της πλήρωσης: αφ' ενός η ποσότητα αυτή καταλαμβάνει κάποιο μέρος του όγκου του κυλίνδρου, που προφανώς δε μπορεί να καταληφθεί από νέα γόμωση, και αφ' ετέρου, με την ανάμιξή της με τον αέρα, λόγω της υψηλής αρχικής της θερμοκρασίας, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της γόμωσης, ανεξάρτητη από αυτή λόγω των θερμών τοιχωμάτων που συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

5.3.9 Συμπεράσματα

Τα αίτια απόκλισης της πραγματικής διεργασίας πλήρωσης από την ιδανική μπορούν να συνοψισθούν σε:

- απώλειες πίεσης κατά τη ροή τόσο του αέρα από το περιβάλλον προς τον κύλινδρο όσο και του καυσαερίου από τον κύλινδρο προς το περιβάλλον, όπου κι αν αυτές δημιουργούνται,
- αύξηση θερμοκρασίας της νέας γόμωσης λόγω των θερμών τοιχωμάτων του κυλίνδρου
- αύξηση θερμοκρασίας και μείωση του όγκου νέας γόμωσης λόγω του υπολοίπου καυσαερίου.

Οι απώλειες πίεσης της ροής αέρα από το περιβάλλον προς τον κύλινδρο και η αύξηση θερμοκρασίας της γόμωσης λόγω του υπολοίπου καυσαερίου και των θερμών τοιχωμάτων οδηγούν σε μείωση της πυκνότητας και επομένως και της μάζας της νέας γόμωσης, ενώ οι απώλειες πίεσης της ροής καυσαερίου προς το περιβάλλον συμβάλλουν στην αύξηση του υπολοίπου καυσαερίου.

5.4 Ο ΒΑΘΜΟΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, είναι προφανές ότι η πραγματική διεργασία πλήρωσης είναι αναπόφευκτο να αποκλίνει από την ιδανική. Δεδομένου ότι, όπως πολλές φορές αναφέρθηκε, η καλή και αποδοτική λειτουργία του κινητήρα εξαρτάται έντονα από την πλήρωση, καθίσταται σαφές ότι είναι σκόπιμη η ποσοτικοποίηση της απόκλισης μεταξύ της πραγματικής και της ιδανικής διεργασίας, με στόχο τη δημιουργία ενός μέτρου της δυνατότητας βελτίωσης.

Υπενθυμίζοντας τον ορισμό της ιδανικής πλήρωσης αναφέρεται ότι βασίζεται στη «μέγιστη μάζα γόμωσης», η οποία, για τις ανάγκες της συζήτησης που προηγήθηκε, προκύπτει από τον όγκο του κυλίνδρου όταν το έμβολο είναι στο ΚΝΣ και την πυκνότητα του αέρα που αντιστοιχεί σε συνθήκες εισαγωγής, δηλαδή είτε σε συνθήκες περιβάλλοντος (ατμοσφαιρικός κινητήρας) είτε σε συνθήκες μετά τον ενδιάμεσο ψύκτη (υπερπληρούμενος κινητήρας).

Προφανώς, ο λόγος της μάζας αέρα που πραγματικά μπήκε στον κύλινδρο προς τη μέγιστη μάζα που θα μπορούσε να μπει αποτελεί μία ποσοτική έκφραση της απόκλισης της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης.

Ο λόγος αυτός ορίζεται ως «**βαθμός πλήρωσης**», και συμβολίζεται με το ελληνικό (η) και δείκτη (l), που προέρχεται από τη γερμανική λέξη *luft* (αέρας). Ο βαθμός πλήρωσης δηλαδή ορίζεται με τη σχέση

$$\eta_{l\alpha} = \frac{m_{\text{πραγ}}}{m_{\text{th}}} = \frac{m_{\text{πραγ}}}{V_h \cdot \rho_{\alpha}} \quad (5-1)$$

όπου

$m_{\text{πραγ}}$ η ποσότητα αέρα που μπήκε στον κύλινδρο,

m_{th} η θεωρητικά μέγιστη ποσότητα αέρα που θα μπορούσε να εισέλθει στον κύλινδρο στις συνθήκες εισαγωγής,

V_h ο όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου και

ρ_{α} η πυκνότητα του αέρα, οριζόμενη στις συνθήκες εισαγωγής.

Για τον ορισμό του βαθμού πλήρωσης στην περίπτωση του κινητήρα otto, στον οποίο η νέα γόμωση αποτελείται από αέρα αλλά και καύσιμο, στη σχέση (5-1) χρησιμοποιείται μόνο η μάζα του αέρα. Η παραδοχή αυτή, ότι δηλαδή και στον otto η νέα γόμωση είναι σκέτος αέρας, δικαιολογείται αν ληφθεί υπόψη ότι

(α) το καύσιμο είναι συνήθως υγρό (βενζίνη), σε μορφή λεπτών σταγονιδίων. Ως υγρό έχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από τον αέρα, ο όγκος επομένως που καταλαμβάνει είναι, λόγω της διαφοράς πυκνότητας και μόνο, πρακτικά αμελητέος.

(β) η αναλογία μαζών αέρα / καυσίμου είναι πολύ κοντά στη στοιχειομετρική, που για τη βενζίνη είναι στη περιοχή $14.6 \text{ kg}_{\text{αέρα}}/\text{kg}_{\text{καυσίμου}}$. Πέραν δηλαδή της σημαντικής διαφοράς πυκνότητας των δύο συστατικών της νέας γόμωσης, υπάρχει και πολύ σημαντική διαφορά στην κατά βάρος περιεκτικότητα.

Προκειμένου να αρθεί η ασάφεια που δημιουργείται από τον ορισμό των συνθηκών αναφοράς της πυκνότητας, συνήθως η μέγιστη θεωρητική ποσότητα αέρα ορίζεται σε κανονικές συνθήκες (1013 mbar, 0°C). Δημιουργείται έτσι ο «**βαθμός πλήρωσης υπό κανονικές συνθήκες**», που συμβολίζεται με τον πρόσθετο δείκτη (n), από το λατινικό normal (εννοείται συνθήκες). Ο βαθμός πλήρωσης υπό κανονικές συνθήκες δηλαδή είναι

$$\eta_{ln} = \frac{m_{\text{πραγ}}}{V_h \cdot \rho_n} \quad (5-2)$$

όπου ρ_n η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες.

Με την υπόθεση ότι ο όγκος που καταλαμβάνει το υπόλοιπο καυσαερίου είναι πολύ μικρός, μπορεί να θεωρηθεί ότι η πραγματική μάζα αέρα που μπήκε στον κύλινδρο καταλαμβάνει όλο τον όγκο εμβολισμού. Η υπόθεση αυτή δεν απέχει πολύ από τη πραγματικότητα, δεδομένου ότι στις σημερινές μηχανές το υπόλοιπο καυσαερίου καταλαμβάνει περίπου το 1.5% κατά μέγιστο του όγκου του κυλίνδρου. Με βάση την υπόθεση αυτή, η σχέση (5-2) μπορεί να μετασχηματισθεί στην

$$\eta_{ln} = \frac{V_h \cdot \rho_\alpha}{V_h \cdot \rho_n} = \frac{\rho_\alpha}{\rho_n} \quad (5-3)$$

όπου ο δείκτης (α) αναφέρεται στις συνθήκες που επικρατούν στον κύλινδρο στο τέλος της εισαγωγής και ο δείκτης (n) στις κανονικές συνθήκες.

Οι απώλειες πίεσης κατά τη ροή της γόμωσης προς τον κύλινδρο του ατμοσφαιρικού κινητήρα έχουν ως αποτέλεσμα η πίεση στο τέλος της εισαγωγής να είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής, και επομένως και της κανονικής. Η αύξηση θερμοκρασίας λόγω θερμών τοιχωμάτων και υπολοίπου καυσαερίου προφανώς οδηγούν σε θερμοκρασία γόμωσης μεγαλύτερη της κανονικής, συνολικά επομένως στον ατμοσφαιρικό κινητήρα ο βαθμός πλήρωσης υπό κανονικές συνθήκες είναι πάντοτε μικρότερος της μονάδας, με βάση και τη σχέση (5-3), δεδομένου ότι και οι δύο αυτοί παράγοντες (μειωμένη πίεση και αυξημένη θερμοκρασία) μειώνουν την πυκνότητα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει μεν, είναι όμως σχετικά μικρή και, δεχόμενοι, ότι ο αέρας συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο, είναι προφανές ότι η επίδρασή της στο βαθμό πλήρωσης είναι ακόμα μικρότερη.

Η μείωση της πίεσης όμως, αφ' ενός μπορεί να είναι σημαντική και αφ' ετέρου, με βάση την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, είναι σε γραμμική συσχέτιση με την πυκνότητα. Επιδρά επομένως πολύ έντονα στο βαθμό πλήρωσης! Με άλλα λόγια, ο βαθμός πλήρωσης μίας μηχανής εσωτερικής καύσης εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την αύξηση της θερμοκρασίας της γόμωσης μετά την είσοδό της στον κύλινδρο, και μειώνεται με την αύξησή της, η κύρια εξάρτηση όμως προέρχεται από τις απώλειες πίεσης κατά τη ροή της γόμωσης προς τον κύλινδρο.

Στις υπερπληρούμενες μηχανές η θερμοκρασία του αέρα, λόγω της συμπίεσης αυξάνει και επομένως αντίστοιχα μειώνεται η πυκνότητά του. Αυτή τη δυσμενή για το βαθμό πλήρωσης επίπτωση μετριάζει η τοποθέτηση του ενδιάμεσου ψύκτη. Η αύξηση της πίεσης από την άλλη πλευρά, λόγω και της

γραμμικής συσχέτισής της με την πυκνότητα, και παρά την αρνητική επίπτωση της θερμοκρασίας, μπορεί να οδηγήσει σε πυκνότητα μεγαλύτερη της κανονικής. Στις υπερπληρούμενες μηχανές δηλαδή ο βαθμός πλήρωσης μπορεί να είναι και μεγαλύτερος από τη μονάδα, όχι όμως κατ' ανάγκη. Είναι δυνατό ένας υπερπληρούμενος κινητήρας να εμφανίζει βαθμό πλήρωσης της τάξης του 0.9, ή και μικρότερο. Τούτο οφείλεται ακριβώς στον ορισμό της έννοιας της υπερπλήρωσης, που υπενθυμίζεται ότι σημαίνει «υποβοήθηση της πλήρωσης με τεχνικά μέσα έτσι ώστε να γίνει καλύτερη (εννοείται από τη φυσική - χωρίς δηλαδή υποβοήθηση)». Με άλλα λόγια η αύξηση του βαθμού πλήρωσης ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας από π.χ. 0.85 σε 0.95 αποτελεί υπερπλήρωση, και επιτυγχάνεται με την υποβοήθηση της πλήρωσης με κάποια από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν στο σχετικό κεφάλαιο, παρά το γεγονός ότι ο βαθμός πλήρωσης εξακολουθεί να είναι μικρότερος από τη μονάδα, όπως συμβαίνει και στον κινητήρα φυσικής αναπνοής.

Συμπερασματικά λοιπόν, ο βαθμός πλήρωσης των ατμοσφαιρικών κινητήρων είναι πάντοτε μικρότερος από τη μονάδα, ενώ των υπερπληρούμενων μπορεί να είναι είτε μικρότερος είτε όμως και μεγαλύτερος από τη μονάδα.

5.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφέρθηκαν οι παράγοντες που επιδρούν στη διεργασία πλήρωσης του κινητήρα και που έχουν ως αποτέλεσμα τελικά τη μείωση του βαθμού πλήρωσης, δηλαδή τη μικρότερη ή μεγαλύτερη απόκλιση της πραγματικής από την ιδανική διεργασία πλήρωσης.

Δεδομένης της επίδρασης της πλήρωσης στη λειτουργία του κινητήρα, είναι προφανές ότι οι κατασκευαστές λαμβάνουν μία σειρά μέτρων, με στόχο τη προσέγγιση στο μέγιστο δυνατό βαθμό της ιδανικής διεργασίας. Τα μέτρα αυτά και οι τεχνικές παρουσιάζονται σε συντομία στις παραγράφους που ακολουθούν.

5.5.1 Μείωση απωλειών πίεσης σε αγωγούς και συσκευές

Οι πρώτες προσπάθειες προφανώς στρέφονται στην κατεύθυνση περιορισμού των απωλειών πίεσης στη ροή κυρίως του αέρα από το περιβάλλον προς τον κύλινδρο, αλλά και του καυσαερίου από τον κύλινδρο προς το περιβάλλον. Οι προσπάθειες αυτές είναι προφανώς κοινές για τον ατμοσφαιρικό και τον υπερπληρούμενο κινητήρα.

Όπως αναφέρθηκε, η πρώτη εστία απωλειών πίεσης είναι το φίλτρο αέρα. Αντίστοιχα επομένως, το πρώτο μέτρο στην κατεύθυνση βελτίωσης του βαθμού πλήρωσης είναι η κατασκευή φίλτρων βελτιωμένων προδιαγραφών, ώστε να προβάλλουν τη μικρότερη δυνατή αντίσταση στη ροή. Προφανώς, η προσπάθεια περιορίζεται από τις απαιτήσεις καθαρότητας του αέρα εισαγωγής, που ορίζουν αντίστοιχα ένα μέγιστο πορώδες.

Πέραν του πορώδους, περιορισμός της αντίστασης μπορεί να προκύψει με μείωση της ταχύτητας ροής του αέρα δια του φίλτρου, με άλλα λόγια με αύξηση της επιφάνειας διήθησης, δηλαδή τελικά με διαφοροποίηση της γεωμετρίας και αύξηση του μεγέθους του φίλτρου. Οι προσπάθειες προς την κατεύθυνση αυτή προφανώς και πάλι περιορίζονται, αυτή τη φορά από παράγοντες χώρου και κόστους - δεδομένου ότι το φίλτρο αέρα αποτελεί, για τη συντριπτική πλειοψηφία των μηχανών, ανταλλακτικό, που δεν μπορεί να υποστεί συντήρηση και αντικαθίσταται περιοδικά. Η αύξηση του μεγέθους του επομένως έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του σχετικού κόστους, και επομένως περιορίζεται από οικονομικούς λόγους. Αυτονόητο είναι βέβαια ότι το μέγεθος του φίλτρου, πέραν των οικονομικών λόγων, περιορίζεται και λόγω χωροταξίας, δεδομένου ότι ο χώρος που διατίθεται για τη τοποθέτησή του είναι γενικά περιορισμένος, ιδιαίτερα στα σχετικά μικρά οχήματα.

Αντίστοιχες με το φίλτρο αέρα ως προς τις επιπτώσεις από την πλευρά της εξαγωγής είναι οι διατάξεις μετεπεξεργασίας του καυσαερίου και οι σιγαστήρες. Η παρουσία των διατάξεων αυτών επιβάλλεται από τη σχετική νομοθεσία προστασίας του περιβάλλοντος είτε από την αέρια ρύπανση (διατάξεις μετεπεξεργασίας καυσαερίου) είτε από την ηχητική ρύπανση (σιγαστήρες). Η κατασκευή τους έχει πλέον βελτιωθεί σημαντικά, σε επίπεδο που η περαιτέρω βελτίωση να είναι πολύ δύσκολη. Αντίστοιχα βέβαια, η επίπτωσή τους στο βαθμό πλήρωσης έχει περιορισθεί σε βαθμό που να μπορεί να χαρακτηριστεί μέχρι και αμελητέα.

Η επόμενη εστία απωλειών πίεσης είναι ο κεντρικός αγωγός, η πολλαπλή και οι αυλοί εισαγωγής της κυλινδροκεφαλής από την πλευρά του αέρα και αντί-

στοιχα οι αυλοί της κυλινδροκεφαλής, η πολλαπλή και ο κεντρικός αγωγός από την πλευρά του καυσαερίου.

Εδώ οι απώλειες πίεσης είναι συνάρτηση αφ' ενός της γεωμετρίας (διαστάσεις και πορεία) των αγωγών και αφ' ετέρου της τραχύτητας της επιφάνειάς τους.

Ως προς τη γεωμετρία οι δυνατότητες βελτιστοποίησης είναι μάλλον περιορισμένες, και εξαντλούνται γρήγορα, κυρίως επειδή εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα χώρου, αλλά και περιορισμούς βάρους (βλέπε και συζήτηση περί αυτοϋπερπλήρωσης στο σχετικό κεφάλαιο).

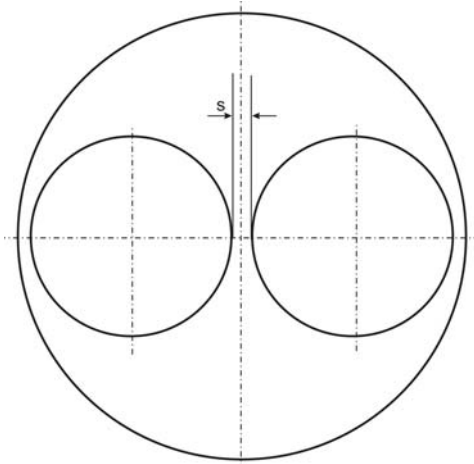
Ως προς την τραχύτητα των επιφανειών και πάλι οι δυνατότητες είναι σχετικά περιορισμένες (στιλβωμένοι αγωγοί, πολλαπλή και αυλοί) κυρίως λόγω της υπέρμετρης αύξησης του κόστους. Η εναλλακτική λύση της χρησιμοποίησης ευγενέστερων υλικών (π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας αντί χυτοσίδηρος για τις πολλαπλές) προσκρούει και πάλι σε οικονομικούς περιορισμούς και υιοθετείται μόνο σε πολύ ειδικές εφαρμογές.

Συμπερασματικά επομένως, οι δυνατότητες μείωσης της αντίστασης ροής στο σύστημα διαχείρισης του αέρα και του καυσαερίου είναι περιορισμένες και δε φαίνεται να μπορούν να οδηγήσουν σε ουσιαστική βελτίωση του βαθμού πλήρωσης με αποδεκτό κόστος.

5.5.2 Πολυβάλβιδες κυλινδροκεφαλές

Η πλησιέστερα στον κύλινδρο, και σημαντικότερη, εστία υδραυλικών απωλειών είναι οι βαλβίδες, τόσο της εισαγωγής όσο και της εξαγωγής και οι αντίστοιχες διατομές που δημιουργούνται με το άνοιγμά τους.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διατομή ροής είναι η παράπλευρη επιφάνεια κυλίνδρου που έχει διάμετρο τη διάμετρο της βαλβίδας και ύψος τη βύθιση αυτής. Με στόχο επομένως τη μείωση των υδραυλικών απωλειών απαιτείται είτε αύξηση της διαμέτρου της αντίστοιχης βαλβίδας είτε αύξηση της βύθισης (ή τουλάχιστον του χρόνου παραμονής της στη μέγιστη βύθιση) ή και τα δύο.



Εικ. 5-3: Άνοψη κυλινδροκεφαλής διβάλβιδου κινητήρα.

Ως προς τη διάμετρο θα πρέπει να ικανοποιείται η προφανής απαίτηση να χωρούν στον κύλινδρο τουλάχιστον δύο βαλβίδες, μία για την εισαγωγή και μία για την εξαγωγή. Το άθροισμα επομένως της διαμέτρου των δύο βαλβίδων δεν μπορεί να υπερβαίνει τη διάμετρο του κυλίνδρου. Θα πρέπει μάλιστα

να είναι αρκετά μικρότερο, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη αντοχή της κυλινδροκεφαλής στην, δυσμενέστερη από πλευράς φόρτισης, περιοχή μεταξύ των δύο βαλβίδων. Δε μπορεί δηλαδή η διάσταση (s) της Εικ. 5-3 να γίνει μικρότερη από κάποια οριακή τιμή, που επιβάλλεται από την αντοχή του υλικού της κυλινδροκεφαλής. Στην περίπτωση επομένως του κινητήρα με δύο βαλβίδες ανά κύλινδρο (μία για την εισαγωγή και μία για την εξαγωγή - διβάλβιδος κινητήρας) η διάμετρος αυτών μπορεί να αυξηθεί μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή, που είναι σε άμεση σχέση με τη διάμετρο του κυλίνδρου.

Το τμήμα της κυλινδροκεφαλής που αντιστοιχεί στη διάσταση (s) της Εικ. 5-3 είναι εκείνο που καταπονείται ιδιαίτερα κατά τη διεργασία αλλαγής μίγματος. Η μία πλευρά του, προς τη βαλβίδα εξαγωγής, εκτίθεται στο ρεύμα καυσαερίου, δηλαδή σε ροή μεγάλης ταχύτητας και πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Ο συντελεστής συναγωγής που δημιουργείται, λόγω της μεγάλης ταχύτητας, είναι μεγάλος και επομένως, λόγω και της μεγάλης θερμοκρασίας της ροής, η μεταφορά θερμότητας ιδιαίτερα έντονη. Η άλλη πλευρά του, προς τη βαλβίδα εισαγωγής, εκτίθεται στο ρεύμα της νέας γόμωσης, δηλαδή και πάλι σε ροή μεγάλης ταχύτητας (που είναι προφανώς μικρότερη από αυτή της εξαγωγής αλλά παραμένει μεγάλη) αλλά χαμηλής θερμοκρασίας (περιβάλλοντος για τον ατμοσφαιρικό κινητήρα, της τάξης των 100 - 120°C για τον υπερπληρούμενο με ενδιάμεσο ψύκτη). Η μεταφορά επομένως θερμότητας από την κυλινδροκεφαλή προς τη νέα γόμωση είναι πολύ έντονη, επομένως το τμήμα αυτό καταπονείται λόγω διαφορικής διαστολής / συστολής, δεδομένου ότι η εισαγωγή ακολουθεί την εξαγωγή με διαφορά χρόνου μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου.

Στην Εικ. 5-3 οι δύο βαλβίδες έχουν σχεδιασθεί ίσης διαμέτρου. Στην πραγματικότητα, στους διβάλβιδους κινητήρες η βαλβίδα εισαγωγής είναι ελαφρά μεγαλύτερη από τη βαλβίδα εξαγωγής. Τούτο είναι μία προσπάθεια μείωσης της ισχύος αλλαγής μίγματος και αιτιολογείται ως εξής:

Προκειμένου να υπάρξει ροή από τον κύλινδρο προς το περιβάλλον για την εξαγωγή θα πρέπει προφανώς ο κύλινδρος να βρίσκεται σε πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, τουλάχιστον κατά τις αντιστάσεις ροής που δημιουργούνται. Αντίστροφα, κατά την εισαγωγή θα πρέπει ο κύλινδρος να βρίσκεται σε πίεση χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική, πάλι τουλάχιστον κατά το μέγεθος των αντιστάσεων ροής. Η ισχύς αλλαγής μίγματος λοιπόν καταναλώνεται για τη δημιουργία της απαιτούμενης υπερπίεσης για την εξαγωγή και υποπίεσης για την εισαγωγή.

Από το ισοζύγιο μάζας του κυλίνδρου προκύπτει ότι η μάζα του καυσαερίου που εξέρχεται από αυτόν είναι ίση με τη μάζα του αέρα που εισήλθε, προσυζητημένη κατά τη μάζα του καυσίμου που καταναλώθηκε. Λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι η στοιχειομετρικά απαιτούμενη ποσότητα αέρα είναι περίπου $14.5 \text{ kg}_{\text{αέρα}}/\text{kg}_{\text{καυσίμου}}$, με πολύ καλή προσέγγιση μπορεί να υποθεθεί ότι η μάζα καυσαερίου είναι ίση με τη μάζα του αέρα, όπως ήδη αναφέρθηκε. Η θερμοκρασία όμως του καυσαερίου είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του αέρα, επομένως η ροή όγκου του καυσαερίου προκύπτει πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Για δεδομένες και ίσες διατομές ροής επομένως, η πτώση πίεσης στη ροή του καυσαερίου αναμενεται σημαντικά μεγαλύτερη αυτής της ροής του αέρα. Το έργο εξώθησης του καυσαερίου επομένως θα έπρεπε να προκύπτει, με βάση τους συλλογισμούς αυτούς, σημαντικά μεγαλύτερο από το έργο αναρρόφησης. Από την άλλη πλευρά, κατά την έναρξη της εξαγωγής ο

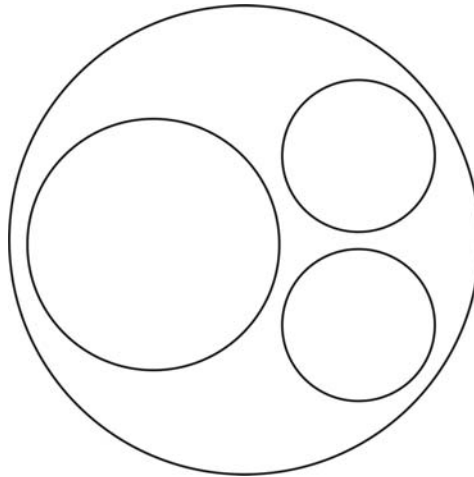
κύλινδρος βρίσκεται σε πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Το καυσαέριο επομένως, τουλάχιστον στην αρχή της εξαγωγής, θα φύγει από το κύλινδρο «αυθόρμητα», λόγω της σχετικά μεγάλης διαφοράς πίεσης. Προς το τέλος της εξαγωγής βέβαια, όταν η πίεση στον κύλινδρο έχει πλησιάσει την ατμοσφαιρική, λόγω της εκτόνωσης προς το σύστημα εξαγωγής, απαιτείται πλέον εξώθηση του καυσαερίου που εξακολουθεί να βρίσκεται στον κύλινδρο, δημιουργείται επομένως κατανάλωση έργου από το έμβολο. Γενικά πάντως, η διαφορά πίεσης μεταξύ κυλίνδρου και ατμόσφαιρας, στο μεγαλύτερο μέρος της εξαγωγής, είναι σημαντική, και επομένως μπορεί να αντισταθμίσει σε σημαντικό βαθμό τις αντιστάσεις ροής που δημιουργούνται από την αυξημένη παροχή όγκου.

Αντίθετα, η εισαγωγή πραγματοποιείται λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ κυλίνδρου και ατμόσφαιρας, που δημιουργείται από την αύξηση όγκου του κυλίνδρου, πρόκειται δηλαδή για αναρρόφηση που κάνει το έμβολο. Όλο επομένως το έργο που απαιτείται για τη διεργασία παρέχεται από το έμβολο, περιλαμβάνεται επομένως στις απώλειες αλλαγής μίγματος.

Δικαιολογείται έτσι η κατασκευαστική επιλογή η βαλβίδα εισαγωγής να είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από τη βαλβίδα εξαγωγής, παρά τη σημαντικά μεγαλύτερη παροχή όγκου από την τελευταία.

Βέβαια η αύξηση διαμέτρου της βαλβίδας εισαγωγής σε βάρος αυτής της εξαγωγής περιορίζεται, γιατί από κάποιο σημείο και μετά μειώνονται μεν οι απώλειες εισαγωγής, αυξάνουν όμως υπέρμετρα και οι απώλειες εξαγωγής, και επομένως συνολικά προκαλείται αύξηση της ισχύος αλλαγής μίγματος.

Στην κατεύθυνση αυτή βοηθά η τεχνολογία των «πολυβάλβιδων» κινητήρων, των κινητήρων δηλαδή που έχουν περισσότερες από μία βαλβίδες εισαγωγής ή και εξαγωγής. Το πρώτο βήμα αποτέλεσαν οι τριβάλβιδοι κινητήρες, οι κινητήρες δηλαδή που έχουν τρεις βαλβίδες ανά κύλινδρο, μία μεγαλύτερης διαμέτρου και δύο μικρότερης, όπως φαίνεται στην Εικ. 5-4. Η διάμετρος κυλίνδρου της εικόνας αυτής είναι ίση με την αντίστοιχη της Εικ. 5-3. Η διάμετρος εκάστης των μικρών βαλβίδων της Εικ. 5-4 είναι μικρότερη κατά 27.5% αυτής των ίσων βαλβίδων της Εικ. 5-3, ενώ αντίστοιχα της μεγάλης είναι μεγαλύτερη κατά 20%, και ταυτόχρονα ικανοποιείται η απαίτηση ελάχιστης απόστασης μεταξύ βαλβίδων. Ως αποτέλεσμα της διαφοροποίησης των διαμέτρων, η διατομή ροής των δύο μικρότερων βαλβίδων, υποθέτοντας φυσικά την ίδια βύθιση, αθροιστικά είναι μεγαλύτερη κατά 45% ενώ ταυτόχρονα είναι μεγαλύτερη και η διατομή ροής της μεγάλης βαλβίδας, κατά 20% σε σχέση με τις αντίστοιχες της διβάλβιδης κατασκευής.



Εικ. 5-4: Άνοψη κυλινδροκεφαλής τριβάλβιδου κινητήρα.

Η επιλογή επομένως τριβάλβιδης κυλινδροκεφαλής επιτρέπει την αύξηση σε σχέση με τη διβάλβιδη ταυτόχρονα των διατομών ροής τόσο της εισαγωγής όσο και της εξαγωγής. Με βάση τη συζήτηση που προηγήθηκε, στην οποία αιτιολογήθηκε η απαίτηση μεγαλύτερης διατομής για την εισαγωγή, οι δύο μικρότερες βαλβίδες είναι βαλβίδες εισαγωγής, ενώ η μεγαλύτερη είναι βαλβίδα εξαγωγής.

Περαιτέρω αύξηση των διατομών μπορεί να επιτευχθεί με τη προσθήκη μία ακόμα βαλβίδας - τετραβάλβιδος κινητήρας. Στη περίπτωση αυτή δύο ίσου μεγέθους βαλβίδες χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή και δύο, επίσης ίσου αλλά ελαφρά μικρότερου μεγέθους, για την εισαγωγή. Αποδεικνύεται ότι οι διατομές που προκύπτουν στην περίπτωση αυτή, τόσο για την εξαγωγή όσο και για την εισαγωγή, είναι ακόμα μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση του τριβάλβιδου κυλίνδρου.

Σε ιδιαίτερες κατασκευές (κινητήρες επιδόσεων για μοτοσικλέτες) συναντώνται και πενταβάλβιδοι κινητήρες (3 ίσες αλλά μικρότερες βαλβίδες εισαγωγής και δύο μεγαλύτερες εξαγωγής).

Η αύξηση του αριθμού των βαλβίδων μειώνει, όπως αναφέρθηκε, τις απώλειες αλλαγής μίγματος και συμβάλλει στη βελτίωση του βαθμού πλήρωσης, ταυτόχρονα όμως συνεπάγεται αύξηση της πολυπλοκότητας του κινητήρα (πολλαπλάσιος αριθμός εκκέντρων στον εκκεντροφόρο, πολλαπλάσια συστήματα κίνησης βαλβίδων κλπ.), τόσο σε επίπεδο κατασκευής όσο και σε επίπεδο ρύθμισης και συντήρησης στη διάρκεια ζωής του κινητήρα, με το επακόλουθο κόστος. Η βελτίωση όμως που επιτυγχάνεται είναι σημαντική, και για το λόγο αυτό η παρουσία των πολυβάλβιδων κινητήρων στην αγορά, κυρίως των επιβατικών οχημάτων και των μοτοσικλετών, έχει γίνει πλέον έντονη.

5.5.3 Εκμετάλλευση αδρανειακών φαινομένων ροής

Στη συζήτηση που προηγήθηκε οι προσπάθειες στρέφονταν προς την κατεύθυνση μείωσης των απωλειών πίεσης κατά τη ροή του αέρα και του καυσαερίου, στην προσπάθεια δηλαδή περιορισμού της σοβαρότητας των αρνητικών επιπτώσεων της ροής στο βαθμό πλήρωσης.

Όμως εκτός των αρνητικών, η ροή, με τη συγκεκριμένη μορφή και τα χαρακτηριστικά που έχει κατά την εισαγωγή και την εξαγωγή στις μηχανές εσω-

τερικής καύσης, μπορεί να έχει και θετικές επιπτώσεις στο βαθμό πλήρωσης του ατμοσφαιρικού κινητήρα.

Συγκεκριμένα, η ροή τόσο στα κανάλια εισαγωγής όσο και στα κανάλια εξαγωγής είναι διακοπτόμενη, και όχι συνεχής. Ας εξετάσουμε καταρχήν την πλευρά της εισαγωγής.

Θεωρητικά τουλάχιστον, εφόσον η βαλβίδα εισαγωγής του κυλίνδρου είναι κλειστή, ο αέρας στην περιοχή της βαλβίδας είναι ακίνητος. Με το άνοιγμα της βαλβίδας δημιουργείται ροή προς τον κύλινδρο, η οποία συνεχίζει για όσο χρόνο παραμένει ανοικτή η βαλβίδα, και διακόπτεται, δηλαδή μηδενίζεται η ταχύτητα, θεωρητικά με το κλείσιμο της βαλβίδας. Η θεωρητική όμως αυτή προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη της φαινόμενα αδράνειας που δημιουργούνται κατά την κίνηση του αέρα. Δε λαμβάνει υπόψη της δηλαδή το γεγονός ότι λόγω της αδράνειας ο αέρας θα συνεχίσει, για λίγο τουλάχιστον, να ρέει προς τον κύλινδρο, ακόμα κι αν το έμβολο έχει περάσει από το ΚΝΣ, ακόμα δηλαδή κι όταν ο όγκος έχει αρχίσει πλέον να μειώνεται. Επιπλέον, το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής, όποτε κι αν γίνει, δε συνεπάγεται και τον ακαριαίο μηδενισμό της ταχύτητας. Αυτό που πραγματικά συμβαίνει είναι ότι ο αέρας, λόγω της αδράνειας που έχει αποκτήσει, συνεχίζει να κινείται προς τον κύλινδρο, στον οποίο όμως δε μπορεί να εισέλθει, αφού η βαλβίδα εισαγωγής είναι κλειστή. Οι επερχόμενες επομένως ποσότητες αέρα «συμπιέζονται» τις πρώτες πάνω στη βαλβίδα εισαγωγής, δημιουργώντας ένα τοπικό κύμα πίεσης. Η αύξηση της πίεσης στην περιοχή της βαλβίδας έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της ταχύτητας ροής προς τον κύλινδρο μέχρι που αυτή μηδενίζεται. Η αυξημένη πίεση όμως πρέπει να εκτονωθεί και έτσι δημιουργείται μία αντίθετη ροή, από τη βαλβίδα προς το περιβάλλον, που έχει τη μορφή κύματος, η πίεση του οποίου σταδιακά μειώνεται. Όταν αυτό το κύμα προσκρούσει στο τοίχωμα του καναλιού εισαγωγής, λόγω αλλαγής κατεύθυνσης του τελευταίου, εν μέρει ακολουθεί τη νέα πορεία και εν μέρει ανακλάται και κατευθύνεται και πάλι προς τον κύλινδρο. Η ταλάντωση αυτή, με συνεχώς μειούμενη πίεση προφανώς, θα μπορούσε να συνεχισθεί μέχρι που να αποκατασταθεί ηρεμία. Στην πραγματικότητα, επειδή η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας είναι πολύ μικρή, η ταλάντωση δεν προλαβαίνει να αποσβεσθεί πλήρως και ανοίγει ξανά η βαλβίδα εισαγωγής. Το κύμα επομένως πίεσης, στην πορεία του προς τον κύλινδρο, βρίσκει ανοικτή τη βαλβίδα και επομένως εισέρχεται σ' αυτόν αέρας με ελαφρά αυξημένη πίεση.

Λόγω της αδράνειας επομένως (α) η φάση της εισαγωγής δεν ξεκινά με μηδενική ταχύτητα αέρα, (β) κάπου στον οχετό εισαγωγής, μέσα στην κυλινδροκεφαλή, υπάρχει μία μάζα αέρα αυξημένης πίεσης, η οποία μπορεί να καταλήξει στον κύλινδρο και (γ) η δυνατότητα εισαγωγής αέρα στον κύλινδρο εξακολουθεί να υπάρχει και μετά το ΚΝΣ.

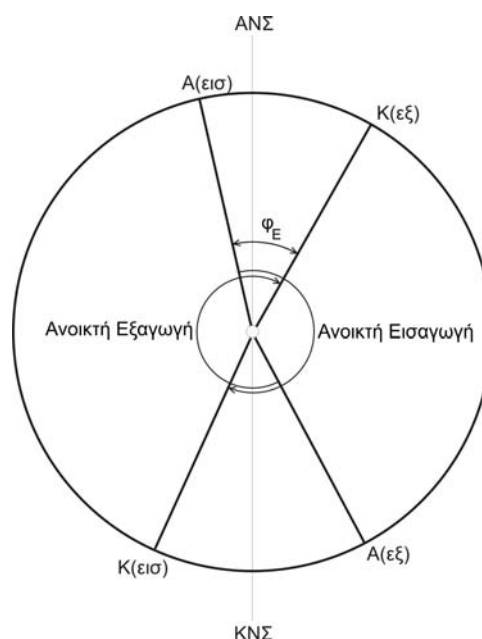
Σε σχέση με την εισαγωγή επομένως, ανακεφαλαιώνοντας, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της διεργασίας σε κάποιο τμήμα του πεδίου στροφών λειτουργίας, με εκμετάλλευση φαινομένων αδράνειας κατά τη ροή του αέρα από το περιβάλλον προς τον κύλινδρο.

Αντίστοιχα, αν και διαφορετικά, φαινόμενα δημιουργούνται και από την πλευρά της εξαγωγής. Συγκεκριμένα:

Αδρανειακά φαινόμενα δημιουργούνται και κατά τη ροή του καυσαερίου από το εσωτερικό του κυλίνδρου προς το περιβάλλον. Η μάζα του καυσαερίου

μέσα στον κύλινδρο αποκτά μία ταχύτητα προς τη βαλβίδα εξαγωγής, και επομένως και την αντίστοιχη αδράνεια. Στα πρώτα επομένως στάδια της κίνησης του εμβόλου προς το κάτω νεκρό σημείο, αμέσως μετά δηλαδή τη θεωρητική ολοκλήρωση της εξαγωγής και έναρξη της εισαγωγής, μέσα στον κύλινδρο εξακολουθεί να υφίσταται ροή προς τη βαλβίδα εξαγωγής, και εφόσον αυτή παραμένει ανοικτή το καυσαέριο προφανώς θα εξέλθει από τον κύλινδρο. Από κάποια στιγμή και μετά βέβαια, λόγω και της αυξανόμενης ταχύτητας κίνησης του εμβόλου προς το ΚΝΣ, η αναρρόφηση που δημιουργείται θα υπερिχύσει και θα αναγκάσει το καυσαέριο να επιστρέψει στον κύλινδρο από τον οχετό εξαγωγής - εκτός κι αν στο μεταξύ η βαλβίδα εξαγωγής έχει κλείσει. Σύμφωνα με αυτά λοιπόν, λόγω της αδράνειας, η εξαγωγή μπορεί να συνεχισθεί και για κάποιο χρόνο μετά το ΑΝΣ, εφόσον η βαλβίδα εξαγωγής παραμένει ανοικτή.

Από όσα αναφέρθηκαν μέχρι του σημείου αυτού έχει γίνει πλέον φανερό ότι με κατάλληλη ρύθμιση της χρονικής στιγμής στη διάρκεια του κύκλου κατά την οποία ανοίγουν ή κλείνουν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής του κυλίνδρου είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί η διεργασία της αλλαγής μίγματος, τόσο σε σχέση με την κατανάλωση έργου που απαιτείται για την υλοποίησή της όσο και σε σχέση με το βαθμό πλήρωσης. Η ρύθμιση αυτή της χρονικής στιγμής ανοίγματος ή κλεισίματος των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής ονομάζεται «χρονισμός των βαλβίδων», και επιτυγχάνεται με την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας στα έγκεντρα του εκκεντροφόρου. Ένα τυπικό διάγραμμα χρονισμού των βαλβίδων ενός τετράχρονου κινητήρα σχηματικά φαίνεται στην Εικ. 5-5.



Εικ. 5-5: Διάγραμμα χρονισμού βαλβίδων τετράχρονου κινητήρα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει πριν από το ΚΝΣ (θέση $A_{(εξ)}$), έτσι ώστε η σχετικά αυξημένη πίεση που επικρατεί στον κύλινδρο να διευκολύνει την εξαγωγή του καυσαερίου. Προφανώς αυτό συνεπάγεται ταυτόχρονα και την απώλεια κάποιου έργου εκτόνωσης, το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί στη στροφαλοφόρο, το μέγεθος του οποίου όμως είναι πολύ μικρό αν συγκριθεί με το όφελος που προκύπτει. Η βαλβίδα παραμένει ανοικτή καθ' όλη τη διαδρομή του εμβόλου προς το ΑΝΣ, αλλά και λίγο μετά από αυ-

τό, για να κλείσει στη θέση $K_{(εξ)}$. Η καθυστέρηση στο κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής επιτρέπει στον κύλινδρο να εκμεταλλευθεί την αδράνεια του καυσαερίου προς τη βαλβίδα, έτσι ώστε να μειωθεί το υπόλοιπο καυσαερίου.

Εν τω μεταξύ η βαλβίδα εισαγωγής έχει ήδη ανοίξει, στη θέση $A_{(εισ)}$, έτσι υπάρχει ένα χρονικό διάστημα (που αντιστοιχεί σε γωνία στροφάλου φ_E) που είναι ταυτόχρονα ανοικτές και η βαλβίδα εισαγωγής και η βαλβίδα εξαγωγής. Το χρονικό αυτό διάστημα, σε μοίρες γωνία στροφάλου, χαρακτηρίζεται ως **«γωνία επικάλυψης των βαλβίδων»**.

Το άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής ενώ το έμβολο εξακολουθεί να κινείται προς το ΑΝΣ, διαδρομή κατά την οποία προφανώς δεν είναι σε θέση να κάνει αναρρόφηση, δικαιολογείται και πάλι από φαινόμενα αδράνειας. Συγκεκριμένα, όπως ήδη αναφέρθηκε, η μάζα του καυσαερίου, στην πορεία της προς τη βαλβίδα εξαγωγής αποκτά αδράνεια, αποτέλεσμα της οποίας είναι πίσω από το καυσαέριο να δημιουργείται ελαφρά υποπίεση. Αυτήν ακριβώς την υποπίεση εκμεταλλεύεται το άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής πριν το ΑΝΣ. Ο εισερχόμενος αέρας, λόγω του προσανατολισμού του οχετού εισαγωγής (από τη κυλινδροκεφαλή προς το έμβολο) αποκτά επίσης αδράνεια, που δεν του επιτρέπει να κινηθεί άμεσα προς τη βαλβίδα εξαγωγής, που βέβαια βρίσκεται δίπλα σ' αυτή της εισαγωγής. Λόγω αδράνειας δηλαδή, η εισερχόμενη ποσότητα αέρα κινείται προς το έμβολο και αφού προσκρούσει σ' αυτό στη συνέχεια ανακλάται και αρχίζει να κινείται προς τις βαλβίδες. Εν τω μεταξύ όμως η βαλβίδα εξαγωγής έχει κλείσει και το έμβολο πλέον κατευθύνεται προς το ΚΝΣ. Έτσι, αυτή η ποσότητα αέρα, που ουσιαστικά αναρροφήθηκε στον κύλινδρο από την υποπίεση που δημιουργεί το καυσαέριο κατά την έξοδό του, παραμένει ως νέα γόμωση για τον επόμενο κύκλο.

Η βαλβίδα εισαγωγής παραμένει ανοικτή και μετά το ΚΝΣ, μέχρι τη θέση $K_{(εισ)}$, προκειμένου, όπως ήδη αναφέρθηκε, να αξιοποιηθεί και η αδράνεια της ροής προς τον κύλινδρο.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι η φαινόμενη στην εικόνα επικάλυψη των βαλβίδων στο κάτω μέρος του σχήματος, γύρω δηλαδή από το ΚΝΣ, στην πραγματικότητα δεν είναι επικάλυψη, καθόσον υπάρχει διαφορά μίας περιστροφής της στροφαλοφόρου, δηλαδή διαφορά 360° γωνίας στροφάλου.

Από όσα αναφέρθηκαν μέχρι το σημείο αυτό προκύπτει ότι η ένταση των αδρανειακών φαινομένων που εκμεταλλεύεται ο χρονισμός των βαλβίδων είναι προφανώς συνάρτηση της ταχύτητας ροής του αέρα και του καυσαερίου στον κύλινδρο και τους οχετούς εισαγωγής. Η δυνατότητα εκμετάλλευσής τους όμως εξαρτάται ταυτόχρονα και από την ταχύτητα κίνησης του εμβόλου, δηλαδή ουσιαστικά από τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Για το λόγο αυτό ο χρονισμός των βαλβίδων στις αργόστροφες μηχανές είναι διαφορετικός από το χρονισμό στις ταχύστροφες, όπως φαίνεται και στον Πιν. 5-1. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται ο χρονισμός βαλβίδων ενός μεσόστροφου υπερπληρούμενου κινητήρα. Παρατηρείται ότι οι διαφορές μεταξύ αργόστροφου και ταχύστροφου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Ο χρονισμός όμως του υπερπληρούμενου είναι εντελώς διαφορετικός γύρω από το ΑΝΣ, με τη γωνία επικάλυψης να εμφανίζεται πολλαπλάσια αυτής των ατμοσφαιρικών κινητήρων.

Πιν. 5-1: Τυπικός χρονισμός βαλβίδων διαφόρων κινητήρων diesel [5].

Τύπος Κινητήρα	Βαλβίδα	Ανοίγει	Κλείνει	Επικάλυψη
Αργόστροφος Ατμοσφαιρικός	Εισαγωγής	7°Π-ΑΝΣ	35°Μ-ΚΝΣ	14°
	Εξαγωγής	40°Π-ΚΝΣ	7°Μ-ΑΝΣ	
Ταχύστροφος Ατμοσφαιρικός	Εισαγωγής	12°Π-ΑΝΣ	45°Μ-ΚΝΣ	24°
	Εξαγωγής	50°Π-ΚΝΣ	12°Μ-ΑΝΣ	
Μεσόστροφος Υπερπληρούμενος	Εισαγωγής	70°Π-ΑΝΣ	40°Μ-ΚΝΣ	150°
	Εξαγωγής	45°Π-ΚΝΣ	80°Μ-ΑΝΣ	

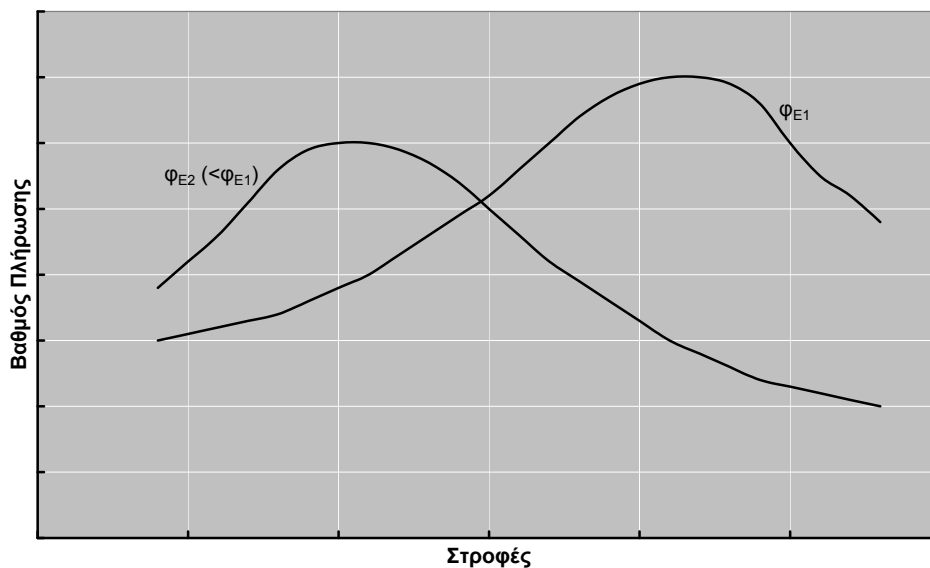
Η έντονη διαφοροποίηση του υπερπληρούμενου κινητήρα δικαιολογείται ως εξής:

- Ο αέρας στον οχετό εισαγωγής προέρχεται από τον υπερπληρωτή, είναι δηλαδή αυξημένης πίεσης. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει στη βαλβίδα εισαγωγής να ανοίξει αρκετά πριν από το ΑΝΣ, δεδομένου ότι η αυξημένη πίεση θα αναγκάσει τον αέρα να εισέλθει στον κύλινδρο, παρά την ανοδική πορεία του εμβόλου και την συνεπαγόμενη μείωση όγκου.
- Η παροχή του αέρα, λόγω του υπερπληρωτή, είναι μεγάλη, και μπορεί να είναι ακόμα και μεγαλύτερη από αυτή που πραγματικά χρειάζεται ο κύλινδρος για τον επόμενο κύκλο. Διατηρώντας τη βαλβίδα εξαγωγής επομένως ανοικτή αρκετά μετά το ΑΝΣ, ένα μέρος αυτής της ποσότητας, αφού εισέλθει στον κύλινδρο, στη συνέχεια εξέρχεται, και δεν συμμετέχει στην καύση. Η ποσότητα αυτή, που απλώς περνά από τον κύλινδρο, επιτελεί διπλό έργο: αφενός θερμαίνεται από τα τοιχώματα του κυλίνδρου και μεταφέρει την ενέργεια που παραλαμβάνει στο περιβάλλον - συμβάλλει επομένως στη ψύξη του κυλίνδρου, και αφετέρου παρασύρει όποιο υπόλοιπο καυσαερίου εξακολουθεί να υπάρχει - ξεπλένει δηλαδή τον κύλινδρο από το καυσαέριο, γι' αυτό και ονομάζεται «**αέρας απόπλυσης**» - συντελώντας έτσι στην καθαρότητα της νέας γόμωσης.
- Ο κινητήρας του Πιν. 5-1 είναι κινητήρας με μηχανική υπερπλήρωση, και γι' αυτό το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής γίνεται περίπου στο σημείο που γίνεται και στους ατμοσφαιρικούς. Στις υπερπληρούμενες μηχανές με στροβιλοσυμπιεστή καυσαερίου, η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει αρκετά νωρίτερα, διακόπτοντας την εκτόνωση. Αυτό βέβαια συνεπάγεται απώλεια έργου εκτόνωσης, δηλαδή κατ' αρχήν ωφέλιμου έργου, το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσαερίου όμως είναι αυξημένο και επομένως η ισχύς του στροβίλου του συστήματος υπερπλήρωσης μεγαλύτερη. Αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι επομένως η ισχύς με την οποία κινείται ο συμπιεστής. Έτσι, η μείωση ισχύος που προκαλείται από την απώλεια έργου εκτόνωσης προκύπτει τελικά σημαντικά μικρότερη από την αύξηση ισχύος που προέρχεται από τη δυνατότητα καύσης μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου - που είναι ο κύριος στόχος της υπερπλήρωσης.

Επισημαίνεται ότι τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τη γωνία επικάλυψης και τον αέρα απόπλυσης ισχύουν μόνο για τον υπερπληρούμενο diesel. Στον υπερπληρούμενο otto υπάρχει και πάλι αύξηση της γωνίας επικάλυψης σε

σχέση με τον αντίστοιχο ατμοσφαιρικό, που όμως είναι σημαντικά μικρότερη από ότι στον diesel. Η διαφορά οφείλεται στο ότι η μεν βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει περίπου στο ίδιο σημείο του κύκλου, η εξαγωγή όμως κλείνει όπως στον ατμοσφαιρικό, και ο αέρας απόπλυσης είναι πρακτικά μηδενικός. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η νέα γόμωση στον otto είναι μίγμα αέρα και καυσίμου, η απόρριψη επομένως τμήματος αυτής με το καυσαέριο του προηγούμενου κύκλου δε μπορεί να γίνει αποδεκτή για οικονομικούς, ενεργειακούς αλλά και περιβαλλοντικούς λόγους. Εκτός αυτού, ο βαθμός υπερπλήρωσης και η σχέση συμπίεσης στον otto περιορίζονται από τις αντικρουστικές ιδιότητες των καυσίμων, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμική φόρτιση του κυλίνδρου να είναι σημαντικά μικρότερη από ότι στον υπερπληρούμενο diesel, όπου αντίστοιχα οι περιορισμοί τίθενται ακριβώς από τη θερμική φόρτιση του κυλίνδρου. Στους υπερπληρούμενους otto επομένως δεν είναι απαραίτητη η ψύξη του κυλίνδρου με τον αέρα απόπλυσης, όπως στους diesel.

Ανακεφαλαιώνοντας, ο βαθμός πλήρωσης του ατμοσφαιρικού κινητήρα εξαρτάται από την παροχή του αέρα προς τους κυλίνδρους, την παροχή καυσαερίου από τους κυλίνδρους προς το περιβάλλον, τις απώλειες πίεσης στις δύο αυτές ροές και την ένταση και το βαθμό εκμετάλλευσης των ενεργειακών φαινομένων των ροών αυτών. Συνολικά δηλαδή είναι συνάρτηση αφενός των στροφών λειτουργίας, για τον κινητήρα diesel τουλάχιστον - όπου δεν υπάρχει στραγγαλισμός της εισαγωγής, και της γωνίας επικάλυψης των βαλβίδων. Από τις στροφές εξαρτώνται κατά κύριο λόγο οι παροχές και επομένως και οι ταχύτητες ροής, ενώ από τη γωνία επικάλυψης ο βαθμός εκμετάλλευσης των αδρανειακών φαινομένων. Από τις ταχύτητες ροής όμως, δηλαδή τελικά από τις στροφές, εξαρτώνται επίσης η ένταση των αδρανειακών φαινομένων αλλά και οι απώλειες πίεσης της ροής. Συνολικά επομένως, ο βαθμός πλήρωσης του κινητήρα diesel εξαρτάται από τις στροφές και τη γωνία επικάλυψης των βαλβίδων. Τυπικές μορφές της εξάρτησης αυτής φαίνονται στην Εικ. 5-6, για τον ίδιο κινητήρα και με διαφορετική γωνία επικάλυψης, δηλαδή για τον ίδιο κινητήρα αλλά με διαφορετικούς εκκεντροφόρους.



Εικ. 5-6: Εξάρτηση του βαθμού πλήρωσης από τις στροφές λειτουργίας και τη γωνία επικάλυψης - κινητήρας diesel.

Όπως φαίνεται από τη μορφή των καμπύλων της Εικ. 5-6, ο βαθμός πλήρωσης εμφανίζει μέγιστο σε μία συγκεκριμένη περιοχή στροφών, η θέση της οποίας εξαρτάται από τη γωνία επικάλυψης των βαλβίδων.

Η αύξηση της γωνίας επικάλυψης έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση του μέγιστου του βαθμού πλήρωσης προς υψηλότερες στροφές, έχει ως αποτέλεσμα δηλαδή τη μείωση της ελαστικότητας του κινητήρα.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, στις πολύ χαμηλές στροφές ο βαθμός πλήρωσης είναι μικρός. Στις χαμηλές αυτές στροφές, η παροχή του αέρα (και αντίστοιχα και του καυσαερίου) είναι μικρή και επομένως και οι αντίστοιχες ταχύτητες ροής. Οι απώλειες πίεσης της ροής, που είναι συνάρτηση της δεύτερης δύναμης της ταχύτητας, είναι πολύ μικρές, όπως μικρής έντασης είναι και τα αδρανειακά φαινόμενα που δημιουργούνται, και που είναι ανάλογα της ταχύτητας.

Με την αύξηση των στροφών αυξάνει η παροχή τόσο του αέρα όσο και του καυσαερίου, και επομένως και οι ταχύτητες ροής στους αντίστοιχους οχετούς. Αντίστοιχα αυξάνεται η ένταση των αδρανειακών φαινομένων αλλά και οι υδραυλικές απώλειες. Αν και η αύξηση των υδραυλικών απωλειών είναι εντονότερη, επειδή με τα κατασκευαστικά μέτρα που προαναφέρθηκαν (μειωμένη τραχύτητα κλπ.) το σημείο εκκίνησης είναι πολύ χαμηλά, αρχικά η αύξηση αυτή επηρεάζει αρνητικά το βαθμό πλήρωσης σε πολύ περιορισμένο βαθμό. Αντίθετα, η αύξηση της έντασης των αδρανειακών φαινομένων, αν και λιγότερο έντονη, επηρεάζει έντονα θετικά το βαθμό πλήρωσης. Συνολικά επομένως εμφανίζεται η θετική επίδραση της Εικ. 5-6, η οποία όμως σταδιακά μειώνεται και ο βαθμός πλήρωσης φθάνει στη μέγιστη τιμή του. Με περαιτέρω αύξηση των στροφών υπερισχύει πλέον η αρνητική επίδραση της αύξησης των υδραυλικών απωλειών, και ο βαθμός πλήρωσης αρχίζει πλέον να μειώνεται.

Επαναλαμβάνεται ότι η μεταβολή του βαθμού πλήρωσης της Εικ. 5-6 είναι τυπική για το κινητήρα diesel ανεξάρτητα από το φορτίο λειτουργίας. Ουσιαστικά δηλαδή, στον κινητήρα diesel η παροχή αέρα είναι ανεξάρτητη του φορτίου, και εξαρτάται μόνο από τις στροφές, σύμφωνα με μία καμπύλη της μορφής της Εικ. 5-6.

Στο κινητήρα otto, στον οποίο, όπως προαναφέρθηκε, ο βαθμός πλήρωσης διαμορφώνεται κατά κύριο λόγο από τα όργανα ρύθμισης φορτίου (δηλαδή από τη κλίση της πεταλούδας στραγγαλισμού), μπορούν να δημιουργηθούν σμήνη καμπυλών της μορφής της Εικ. 5-6, με παράμετρο ακριβώς την κλίση της πεταλούδας στραγγαλισμού. Ο μέγιστος βαθμός πλήρωσης του κινητήρα εμφανίζεται στο πλήρες φορτίο, προφανώς ακολουθεί την ακραία προς τα πάνω καμπύλη από το σμήνος που προαναφέρθηκε και προκύπτει με την πεταλούδα στραγγαλισμού στην τελείως ανοιχτή θέση - στη θέση δηλαδή μηδενικού στραγγαλισμού.

Η μορφή της καμπύλης μέγιστης ροπής ενός κινητήρα ως συνάρτηση του αριθμού στροφών εξαρτάται βέβαια από το συνολικό βαθμό απόδοσης αλλά και από την ενέργεια που παρέχεται στον κύλινδρο. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης προφανώς επηρεάζεται από τις στροφές, αλλά η εξάρτησή του δεν είναι ιδιαίτερα έντονη, όπως συζητείται και σε άλλα σημεία του κειμένου. Η ενέργεια όμως που παρέχεται στον κύλινδρο είναι σε άμεση συνάρτηση με την ποσότητα αέρα που μπορεί να εισαχθεί σ' αυτόν, δεδομένου ότι η ποιό-

τητα του καύσιμου μίγματος, η αναλογία δηλαδή αέρα / καυσίμου, είναι συγκεκριμένη (στον κινητήρα otto ανεξάρτητα από το φορτίο, στον κινητήρα diesel στο πλήρες φορτίο). Η μορφή επομένως της καμπύλης μέγιστης ροπής (περιβάλλουσα του κινητήρα) ουσιαστικά επιβάλλεται από την καμπύλη του βαθμού πλήρωσης.

Ο ίδιος κινητήρας επομένως με διαφορετικό εκκεντροφόρο, με διαφορετικό δηλαδή χρονισμό βαλβίδων, είναι δυνατό να γίνει περισσότερο ελαστικός, με καμπύλη βαθμού πλήρωσης - και επομένως ουσιαστικά και περιβάλλουσα - που προκύπτει με γωνία επικάλυψης φ_{E2} της Εικ. 5-6, ή λιγότερο ελαστικός και με μεγαλύτερη μέγιστη ροπή, εάν ο χρονισμός των βαλβίδων του αντιστοιχεί στη καμπύλη φ_{E1} της ίδιας εικόνας.

Για συγκεκριμένη χρήση επιβατικού οχήματος, η ιδανική καμπύλη μέγιστης ροπής είναι αυτή που σε χαμηλό αριθμό στροφών φθάνει σε μία υψηλή τιμή και διατηρείται πρακτικά σταθερή σ' αυτήν μέχρι περίπου τις μέγιστες στροφές λειτουργίας, όπως η επίπεδη καμπύλη της Εικ. 4-2 ή η καμπύλη του κινητήρα 2200 cm^3 της Εικ. 4-3.

Τέτοιας μορφής καμπύλες μέγιστης ροπής μπορούν επιτευχθούν με ειδικές κατασκευές του εκκεντροφόρου και του συστήματος που τον κινεί. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή ονομάζονται «κινητήρες μεταβλητού χρονισμού βαλβίδων». Η εμπορική ονομασία της τεχνολογίας, όπως και ο τρόπος υλοποίησής της αλλά και τα αποτελέσματα που έχει, διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Τεχνολογία VANOS της BMW: η μεταβολή του χρονισμού επιτυγχάνεται με περιστροφή των έκκεντρων ως προς τον εκκεντροφόρο, με τη βοήθεια φυγοκεντρικού μηχανισμού.
- Τεχνολογία VTEC της HONDA: χρησιμοποιεί εκκεντροφόρο με διπλά έκκεντρα για τις βαλβίδες εισαγωγής. Το ένα από τα έκκεντρα χρησιμοποιείται σε χαμηλές στροφές και το δεύτερο στις υψηλές. Εκτός της χρονικής στιγμής ανοίγματος των βαλβίδων εισαγωγής μεταβάλλεται και η διάρκεια που αυτές παραμένουν ανοικτές όπως επίσης και η βύθιση.
- Τεχνολογία S-VT της MAZDA: ο χρονισμός των βαλβίδων μεταβάλλεται με περιστροφή του εκκεντροφόρου ως προς τη στροφαλοφόρο.
- Τεχνολογία MIVEC της MITSUBISHI, που μεταβάλλει μόνο τη βύθιση (διαδρομή) των βαλβίδων.
- Τεχνολογία VVTL της TOYOTA: μεταβάλλει την προένταση της αλυσίδας κίνησης του εκκεντροφόρου, ουσιαστικά δηλαδή περιστρέφει τον εκκεντροφόρο ως προς την στροφαλοφόρο, χρησιμοποιεί εκκεντροφόρο με διπλά έκκεντρα (τεχνολογία ανάλογη του VTEC) και επιπλέον διαφοροποιεί τη βύθιση των βαλβίδων, με υδραυλική υποβοήθηση.

Όπως προκύπτει από τη σύντομη περιγραφή των παραπάνω τεχνολογιών, που επαναλαμβάνεται ότι δεν εξαντλούν το σχετικό κατάλογο, όλα τα συστήματα είναι καθαρά μηχανικά.

Ως μηχανικά συστήματα, επιτυγχάνουν το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα σε κάποιο βαθμό, μικρότερο ή μεγαλύτερο, ανάλογα με την πολυπλοκότητά τους.

Σε κάθε περίπτωση όμως υπάρχουν ακόμη μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης των χαρακτηριστικών του κινητήρα, τις οποίες όμως οι μηχανικές κατασκευές δε φαίνεται να μπορούν να υλοποιήσουν. Στην κατεύθυνση αυτή η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία είναι αυτή του κινητήρα χωρίς εκκεντροφόρο (camless engine), η κίνηση των βαλβίδων του οποίου θα γίνεται ηλεκτρομαγνητικά ή ηλεκτροϋδραυλικά.

Η ηλεκτρομαγνητική ή ηλεκτροϋδραυλική κίνηση των βαλβίδων μπορεί να επιτρέψει την υλοποίηση με μεγάλη ακρίβεια τόσο του επιθυμητού χρονισμού ως συνάρτηση όχι μόνο των στροφών αλλά και του φορτίου όσο και την κατά περίπτωση βέλτιστη βύθιση των βαλβίδων. Η τεχνολογία αυτή δεν έχει ωριμάσει ακόμη στο βαθμό που απαιτείται προκειμένου να αρχίσει η εμπορική αξιοποίησή της, εκτιμάται όμως ότι βρίσκεται στα τελικά στάδια ανάπτυξης. Λόγω ακριβώς της σημασίας της και του μεγάλου οικονομικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει, δεδομένου ότι η εφαρμογή της δε θα επηρεάσει μόνο τη μορφή της περιβάλλουσας αλλά και συνολικά την οικονομικότητα λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης, οι δημοσιευμένες σχετικές εργασίες είναι συγκριτικά πολύ περιορισμένες.