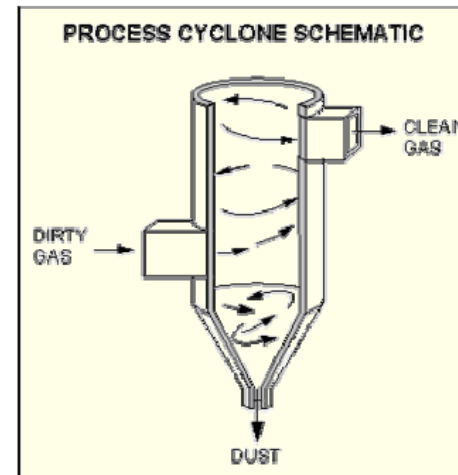




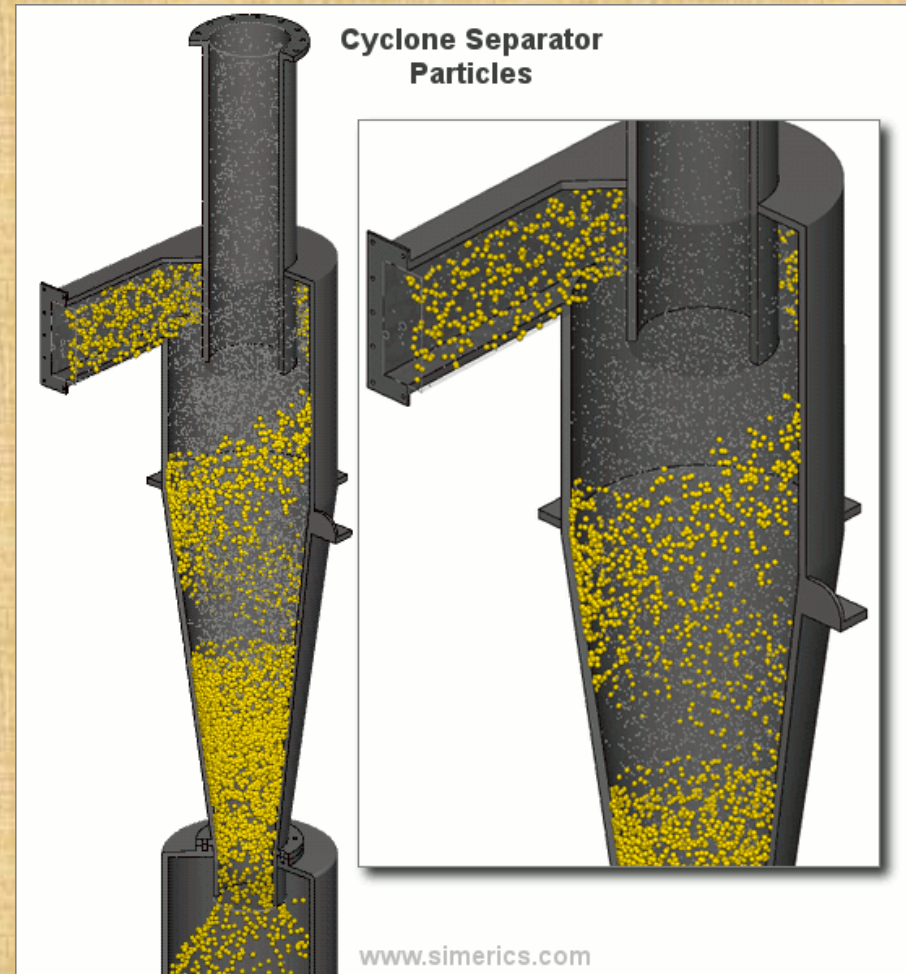
## Φυγοκεντρικοί διαχωριστές Κυκλώνες



# Κυκλώνες

Ο κυκλωνικός διαχωρισμός είναι μια μέθοδος για την απομάκρυνση σωματιδίων από ένα ρεύμα αέρα, ή ένα ρεύμα αερίου ή υγρού, χωρίς τη χρήση φίλτρων, μέσω της δημιουργίας μιας δύνης διαχωρισμού.

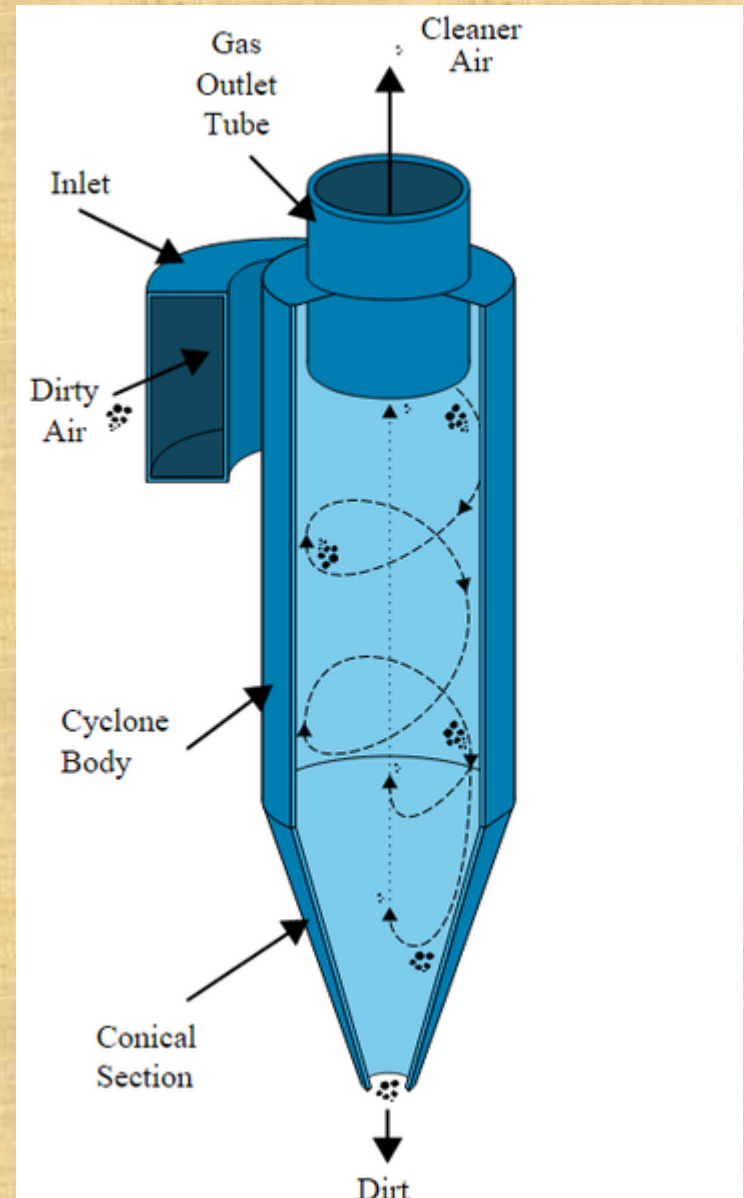
Ο κυκλωνικός διαχωρισμός σε συνδυασμό με την βαρύτητα χρησιμοποιούνται για να διαχωρίζουν μίγματα στερεών και υγρών. Η μέθοδος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό λεπτών σταγονιδίων υγρού από ένα αέριο ρεύμα.



# Κυκλώνες

Οι διαχωριστές-φίλτρα τύπου κυκλώνα ή απλά κυκλώνες είναι συσκευές διαχωρισμού που χρησιμοποιούν την αρχή της αδράνειας για την απομάκρυνση σωματιδίων από τα καυσαέρια. Οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα είναι μέρος μιας ομάδας των διατάξεων ελέγχου και αντιρρύπανσης του αέρα γνωστή ως pre-cleaners.

Επίσης, οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα μπορούν να λειτουργούν παράλληλα δημιουργώντας ένα πολλαπλό σύστημα καθαρισμού.



# Κυκλώνες

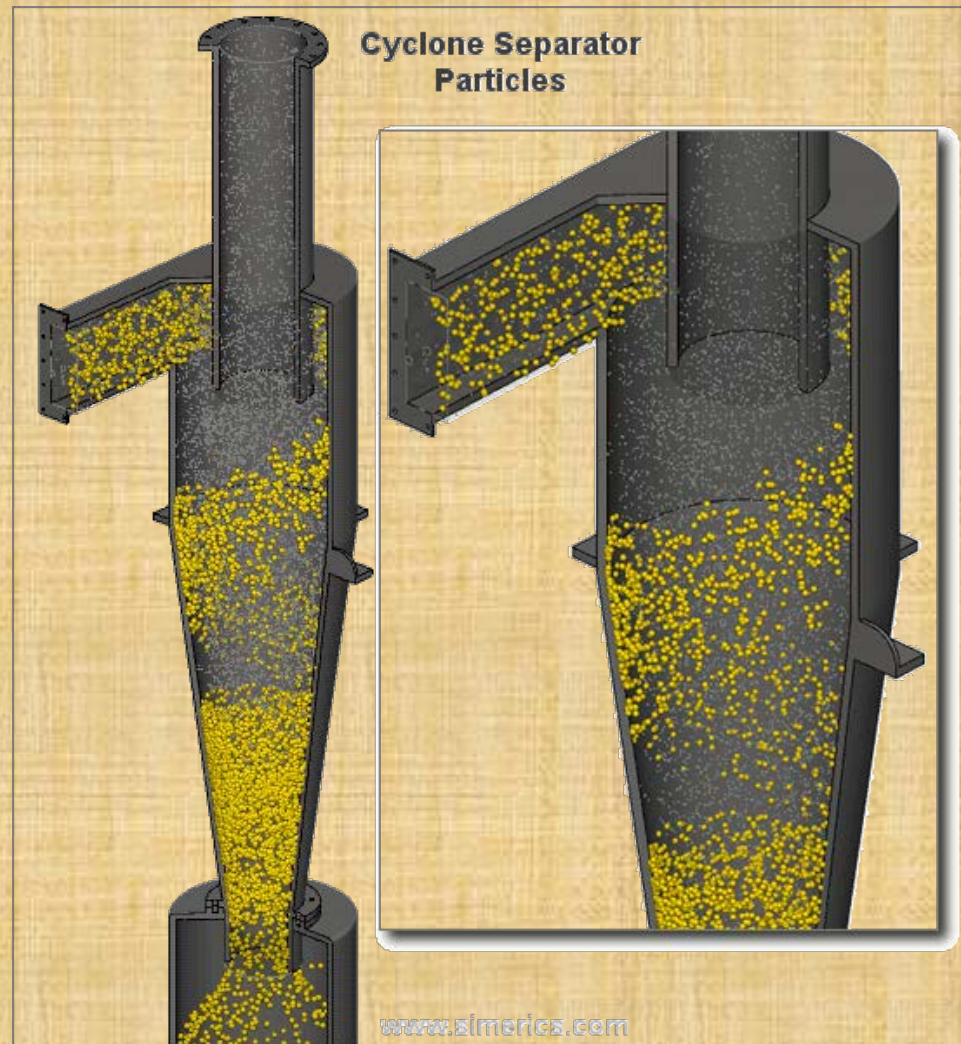
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κυκλώνες μπορεί να διαφέρουν δραστικά σε μέγεθος. Το μέγεθος του κυκλώνα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το την παροχή του προς καθαρισμού αερίου. Έτσι, μεγαλύτερες παροχές τείνουν να χρειάζονται μεγαλύτερες κατασκευές κυκλώνων. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρξουν αρκετά διαφορετικά μοντέλα ενός τύπου κυκλώνα, και τα μεγέθη μπορεί να κυμαίνονται από ένα σχετικά μικρό ύψος 1.2m-1.5m (περίπου 4-5ft) σε περίπου 9m ή περίπου 30ft (που είναι περίπου το ύψος ενός τριώροφου κτιρίου).



# Κυκλώνες

Σε ένα διαχωριστή κυκλώνα, το καυσαέριο διοχετεύεται σε ένα θάλαμο. Μέσα σε αυτή την «αίθουσα» υπάρχει μια δίνη σε μορφή σπείρας, παρόμοια με έναν ανεμοστρόβιλο. Αυτός ο σχηματισμός σπείρας και ο διαχωρισμός φαίνεται στο Σχήμα.

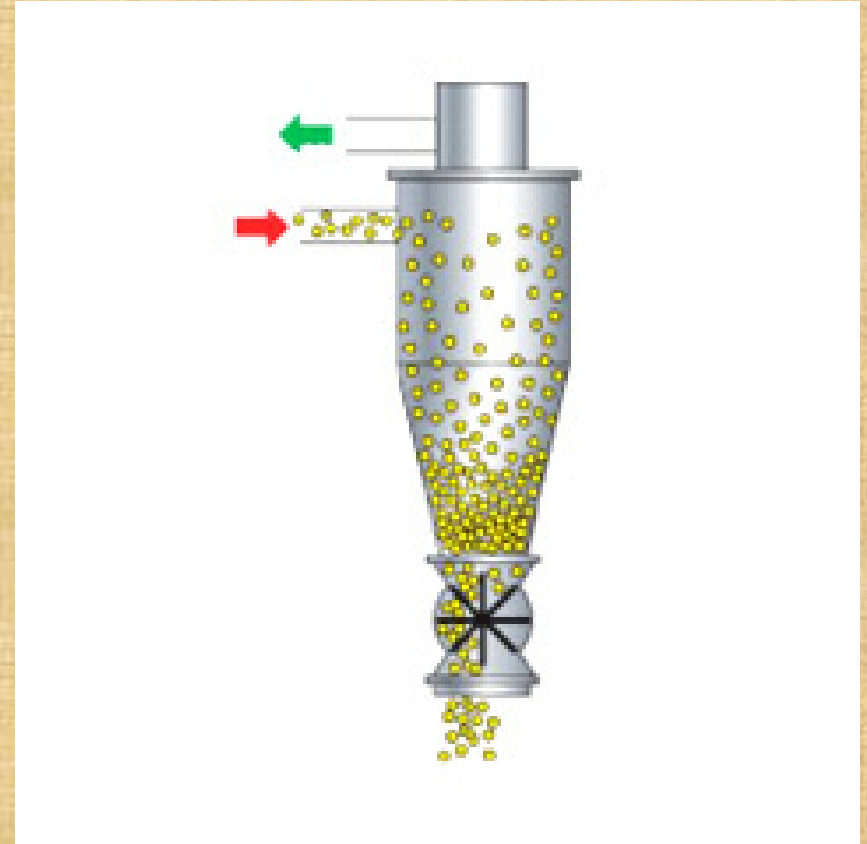
Τα ελαφρύτερα συστατικά του αερίου έχουν μικρότερη αδράνεια, έτσι ώστε να είναι ευκολότερο για αυτά να επηρεάζονται από το στρόβιλο. Έτσι, ταξιδεύουν μαζί με το στρόβιλο. Σε αντίθεση με αυτά τα σωματίδια, τα μεγαλύτερα συστατικά της σωματιδιακής ύλης έχουν περισσότερη αδράνεια και δεν επηρεάζονται τόσο πολύ από τη δίνη.



# Κυκλώνες

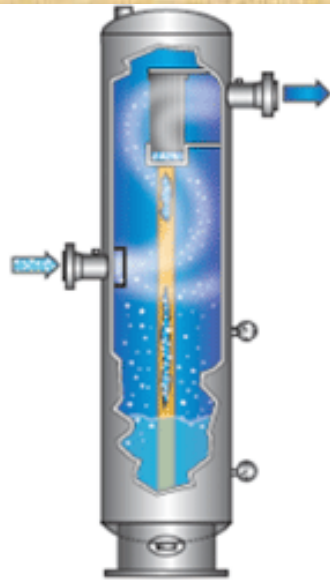
Τα μεγαλύτερα σωματίδια, ακολουθώντας την υψηλής ταχύτητας σπειροειδή κίνηση του αερίου και του στροβίλου, χτυπούν στα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου και στη συνέχεια και λόγω της βαρύτητας πέφτουν προς τα κάτω σε μια χοάνη συλλογής.

Αυτοί οι θάλαμοι διαμορφώνονται σαν ανάποδος κώνος και συντελούν στην προώθηση της συλλογής αυτών των σωματιδίων στον πυθμένα του δοχείου. Το καθαρισμένο καυσαέριο διαφεύγει από την κορυφή του θαλάμου.



# Κυκλώνες

Οι περισσότεροι κυκλώνες έχουν κατασκευαστεί για τον έλεγχο και την απομάκρυνση σωματιδιακής ύλης με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή και μεγαλύτερη των 10 $\mu\text{m}$ . Ωστόσο, υπάρχουν υψηλής απόδοσης κυκλώνες που έχουν σχεδιαστεί για να είναι αποτελεσματικοί και για μικρότερα σωματίδια της τάξης των 2.5 $\mu\text{m}$ . Επίσης, δεν είναι αποτελεσματικοί σε πολύ μεγάλη σωματιδιακή ύλη. Για τα σωματίδια της τάξης περίπου των 200 $\mu\text{m}$  σε μέγεθος, οι θάλαμοι βαρύτητας-καθίζησης ή οι διαχωριστές ορμής είναι μια καλύτερη επιλογή.



Vertical Separator

For slug removal applications and small footprint installations.

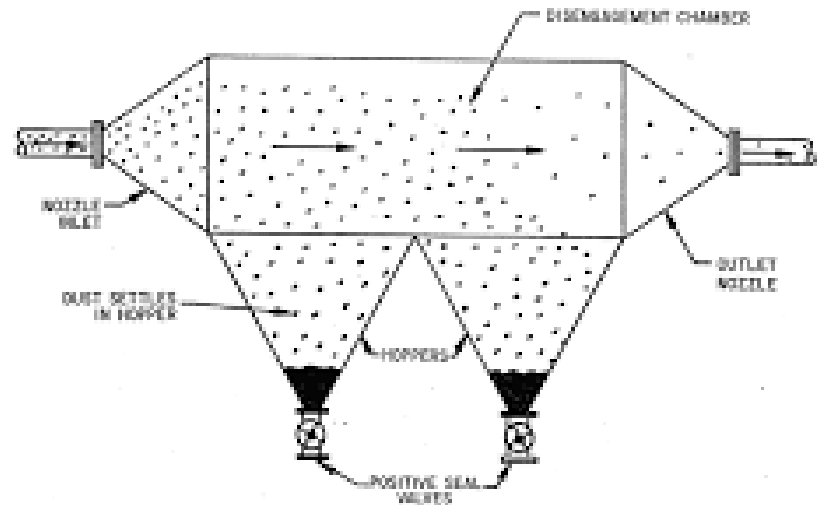
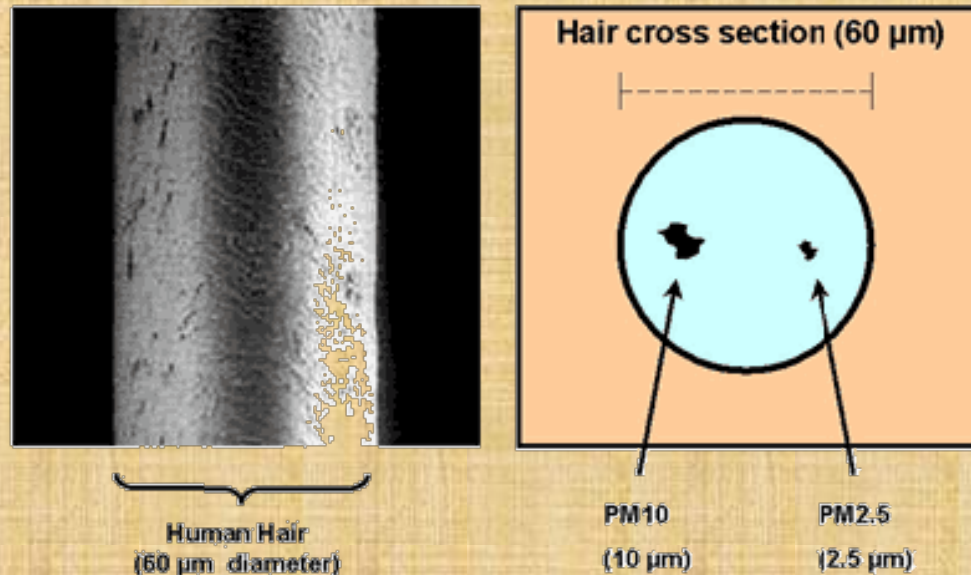


Fig. 6.1. Simple gravity settling chamber.

# Κυκλώνες

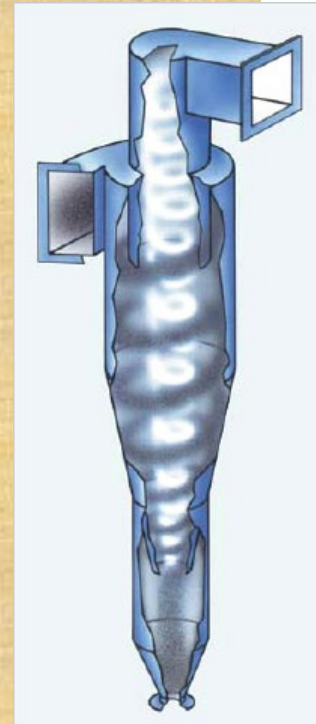
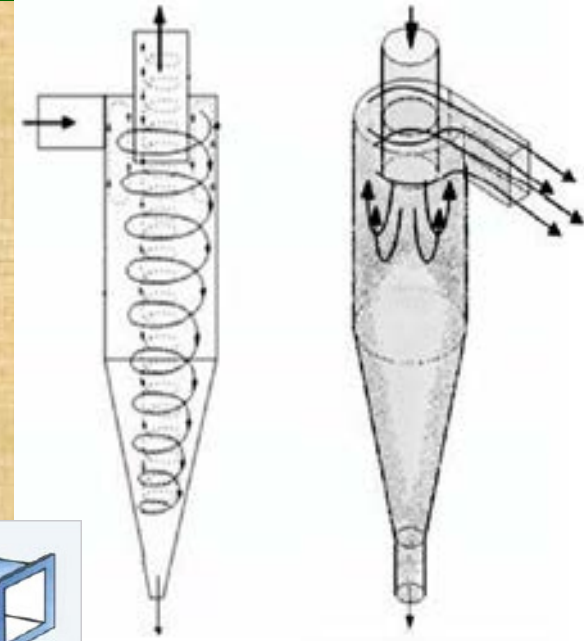
Η γεωμετρία του κυκλώνα μαζί με την παροχή του προς καθαρισμό αερίου, ορίζει το σημείο αποκοπής του κυκλώνα. Ως σημείο αποκοπής του κυκλώνα ορίζεται το μέγεθος των σωματιδίων (αεροδυναμική διάμετρος) που θα αφαιρεθεί από το ρεύμα με μια απόδοση της τάξης του 50%. Σωματίδια μεγαλύτερα από το σημείο αποκοπής θα αφαιρεθούν με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, και μικρότερα σωματίδια με μικρότερη απόδοση.

## HOW SMALL IS PM?



# Κυκλώνες

Ένα εναλλακτικό σχέδιο κυκλώνα χρησιμοποιεί μια δευτερεύουσα ροή αέρα μέσα στον κυκλώνα για να κρατήσει τα σωματίδια που έχουν συλλεγεί από το χτύπημα στους τοίχους, για να τους προστατεύσει από την τριβή. Η κύρια ροή του αέρα που περιέχει τα σωματίδια, εισέρχεται από τον πυθμένα του κυκλώνα και αναγκάζεται σε περιστροφή λόγω των στατικών σπειροειδών πτερυγίων του στροφείου. Η ροή του δευτερεύοντος ρεύματος αέρα, εισέρχεται από την κορυφή του κυκλώνα και κινείται προς τα κάτω προς τον πυθμένα. Η ροή του δευτερεύοντος αέρα επιτρέπει επίσης ο συλλέκτης να μπορεί προαιρετικά να τοποθετηθεί οριζόντια, γιατί ωθεί τα σωματίδια προς την περιοχή συλλογής, ώστε ο καθαρισμός να μην βασίζεται αποκλειστικά σε βαρύτητα.



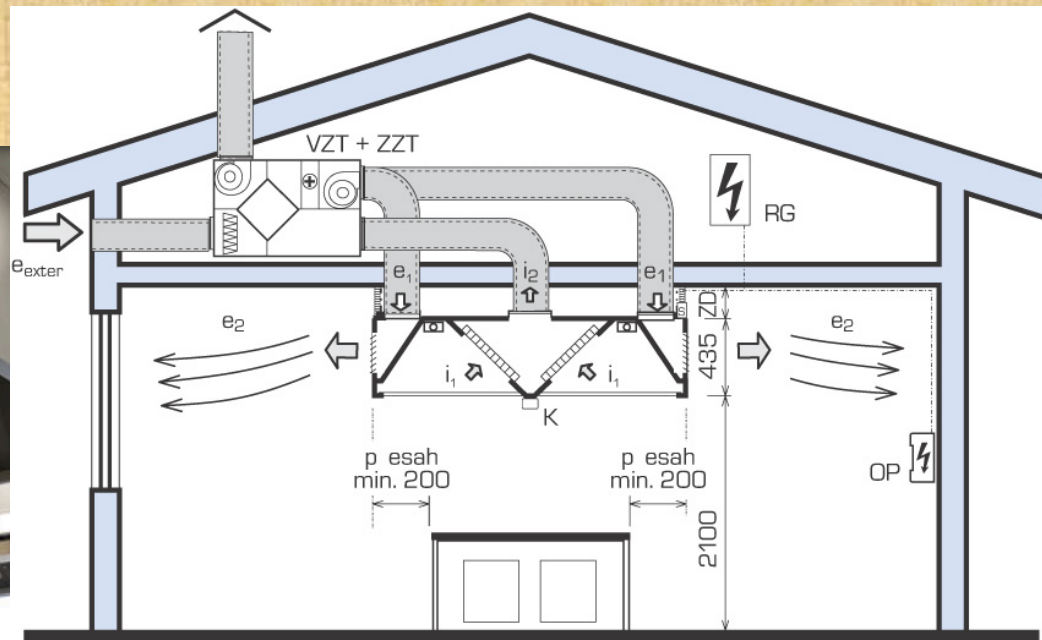
# Κυκλώνες

Μεγάλης κλίμακας κυκλώνες χρησιμοποιούνται σε πριονιστήρια για να αφαιρεθεί το πριονίδι από τον παραγόμενο αέρα. Κυκλώνες χρησιμοποιούνται επίσης σε διυλιστήρια πετρελαίου για το διαχωρισμό ελαίων και αερίων, καθώς επίσης και στην βιομηχανία τσιμέντου. Τα τελευταία χρόνια οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στα νοικοκυριά, στις χωρίς σάκο (bagless) τύπου φορητές ηλεκτρικές σκούπες και κεντρικές ηλεκτρικές σκούπες.



# Κυκλώνες

Κυκλώνες χρησιμοποιούνται επίσης σε βιομηχανικούς και επαγγελματικούς εξαερισμούς κουζίνας, για το διαχωρισμό του λίπους από τον αέρα εξάτμισης στους απορροφητήρες. Μικρότεροι κυκλώνες χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό αιωρούμενων σωματιδίων για την χημική τους ανάλυση.



# Κυκλώνες

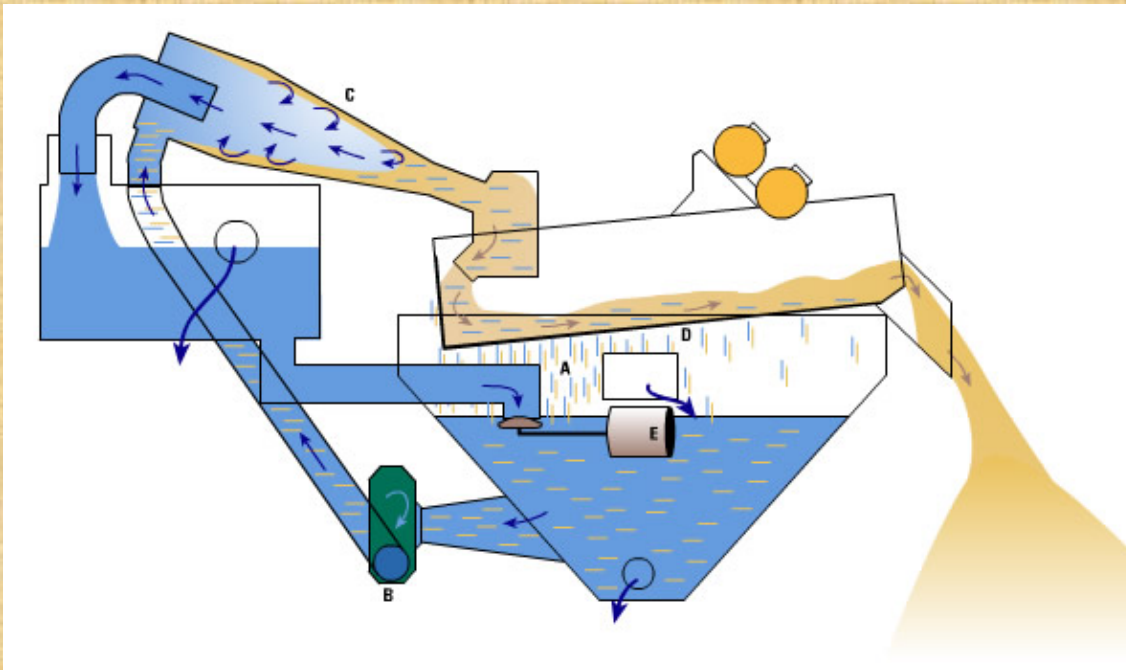
Από όλες τις συσκευές σωματιδιακής ελέγχου, οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα είναι μεταξύ των λιγότερο ακριβών σε κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται συχνά ως μια προ-αγωγή πριν το καυσαέριο εισέλθει σε πιο αποτελεσματικές διατάξεις ελέγχου της ρύπανσης και αντιρρύπανσης. Εξαιτίας αυτού, οι διαχωριστές κυκλώνα μπορεί να θεωρηθούν ως «ακατέργαστοι διαχωριστές» πριν φτάσουν τα καυσαέρια σε πιο αποτελεσματικά στάδια φιλτραρίσματος.



# Κυκλώνες

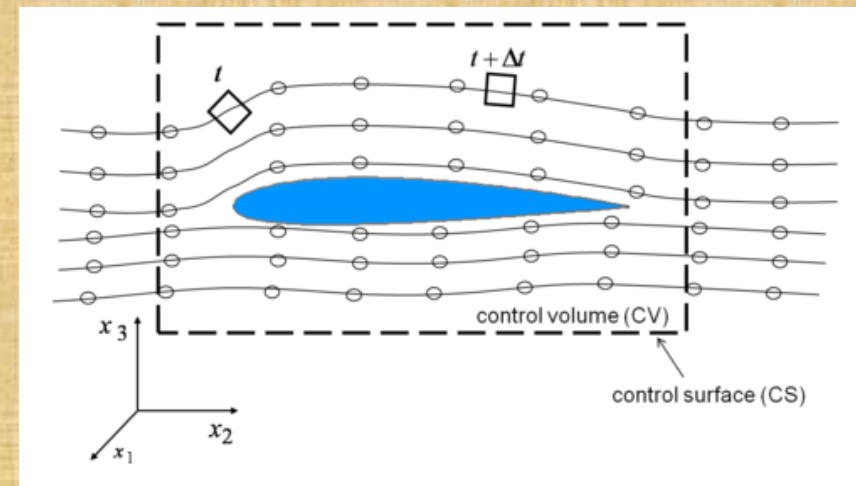
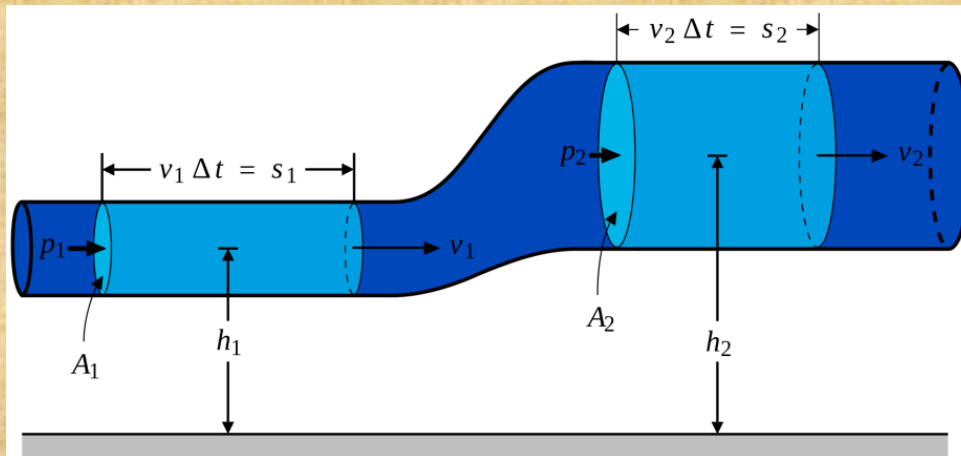
Παρόμοιοι διαχωριστές - κυκλώνες χρησιμοποιούνται και στη βιομηχανία διύλισης πετρελαίου (π.χ. για υγρή καταλυτική πυρόλυση) για να επιτευχθεί γρήγορα ο διαχωρισμός των σωματιδίων του καταλύτη από τα αντιδρώντα αέρια και τους ατμούς.

Υπάρχουν επίσης ανάλογες διατάξεις για το διαχωρισμό σωματιδίων ή στερεών από υγρά, που ονομάζεται διαχωριστήρες φυγοκεντρισμού ή υδροκλώνες. Αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό των στερεών αποβλήτων από το νερό στα λύματα και γενικότερα στην επεξεργασία λυμάτων.



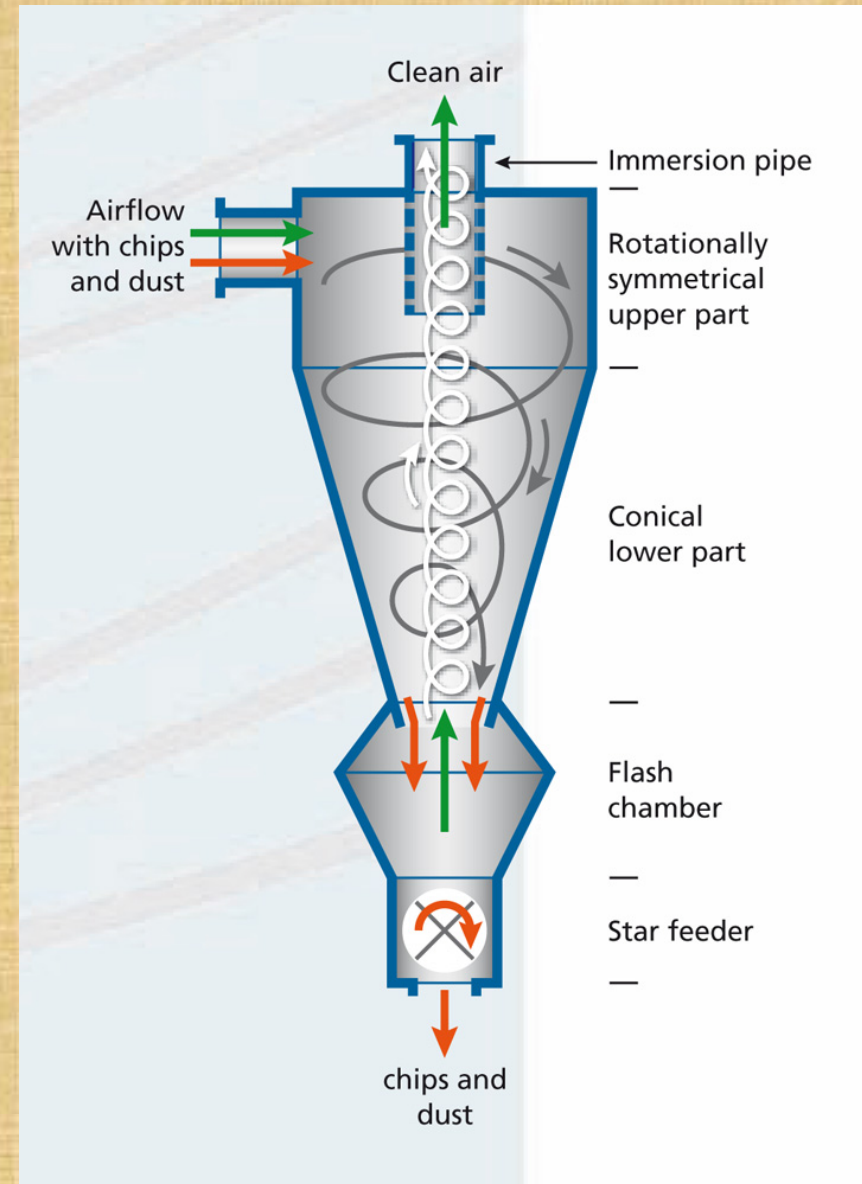
# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Καθώς ο κυκλώνας είναι ουσιαστικά ένα σύστημα δύο φάσεων (σωματιδίων - ρευστού), η ρευστομηχανική και οι εξισώσεις μεταφοράς σωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να περιγραφεί η συμπεριφορά και η λειτουργία ενός κυκλώνα.



# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

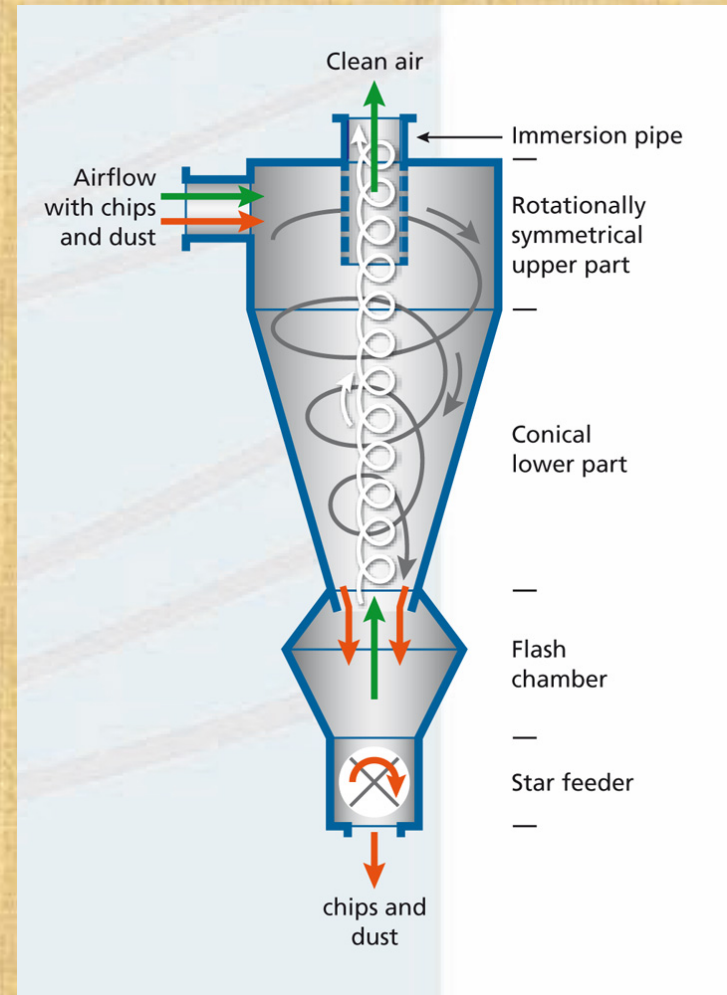
Ο αέρας αρχικά εισάγεται εφαπτομενικά μέσα στον κυκλώνα με μια ταχύτητα εισόδου ( $V_{in}$ ). Υποθέτοντας ότι το σωματίδιο είναι σφαιρικό, μια απλή ανάλυση μπορεί να αποδειχθεί κρίσιμη για τον υπολογισμό των κρίσιμων μεγεθών των σωματιδίων διαχωρισμού, δηλαδή σε ποιες περιοχές αεροδυναμικής διαμέτρου μπορεί να αποδώσει καλύτερα ο συγκεκριμένος κυκλώνας.



# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Ας θεωρήσουμε ότι παρακολουθούμε ένα απομονωμένο σωματίδιο που βρίσκεται στο ανώτερο κυλινδρικό μέρος του κυκλώνα, με μια περιστροφική ακτίνα ( $r$ ) από τον κεντρικό άξονα του κυκλώνα. Το σωματίδιο ως εκ τούτου υπόκειται σε έλξη φυγοκεντρική. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ρευστού βρίσκεται πάνω σε μία σπείρα η ταχύτητα του αερίου μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους ταχύτητες: Μια εφαπτομενική συνιστώσα ( $V_t$ ) και μια προς τα έξω συνιστώσα ακτινικής ταχύτητας ( $V_r$ ). Λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο του Stokes για τη δύναμη αντίστασης που ασκείται πάνω σε σφαιρικό σωματίδιο που κινείται εντός ρευστού, η δύναμη αντίστασης (οπισθέλκουσα) στην εξωτερική ακτινική κατεύθυνση είναι:

$$F_d = -6\pi r_p \mu V_r.$$



# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

$$F_d = -6\pi r_p \mu V_r.$$

όπου:

$F_d$  : η δύναμη αντίστασης

$r_p$  : η αεροδυναμική ακτίνα του σωματιδίου

$\mu$ : το μοριακό ιξώδες του ρευστού μέσα στο οποίο κινείται το σωματίδιο και

$V_r$ : η ακτινική συνιστώσα της σχετικής ταχύτητας του σωματιδίου ως προς το ρευστό.

# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Χρησιμοποιώντας ως ( $\rho_p$ ) την πυκνότητα των σφαιρικών σωματιδίων, η συνιστώσα της φυγοκεντρικής δύναμης στην προς τα έξω ακτινική διεύθυνση είναι:

$$F_c = m \frac{V_t^2}{r} = \frac{4}{3} \pi \rho_p r_p^3 \frac{V_t^2}{r}.$$

Η συνιστώσα δύναμη της άντωσης-άνωσης βρίσκεται στην προς τα μέσα ακτινική διεύθυνση. Είναι στην αντίθετη κατεύθυνση με την φυγόκεντρο δύναμη του σωματιδίου.

Χρησιμοποιώντας ως ( $\rho_f$ ) για την πυκνότητα του ρευστού, η άνωση είναι:

$$F_b = -V_p \rho_f \frac{V_t^2}{r} = -\frac{4\pi r_p^3}{3} \frac{V_t^2}{r} \rho_f.$$

# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Αν θεωρήσουμε στη συνέχεια ως ( $V_p$ ) τον όγκο του σωματιδίου, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο της κίνησης του Newton, το αποτέλεσμα της κίνησης που θα εκτελέσει το σωματίδιο είναι αντίστοιχο με το άθροισμα των δυνάμεων αυτών:

$$m \frac{dV_r}{dt} = F_d + F_c + F_b$$

Για να απλοποιηθεί αυτό, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το υπό εξέταση σωματίδιο έχει φτάσει σε μια «οριακή ταχύτητα» δηλαδή μια σταθερή κατά μέτρο ταχύτητα. Έτσι, η επιτάχυνση είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει όταν λόγω της ακτινικής ταχύτητας έχει αναπτυχθεί μια αρκετά μεγάλη-σημαντική δύναμη αντίστασης σε αντίθεση με τις φυγόκεντρες δυνάμεις και την άνωση. Συνεπώς και με βάση την πιο πάνω εξίσωση, καταλήγουμε ότι:

$$F_d + F_c + F_b = 0$$

# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

$$F_d + F_c + F_b = 0$$

Με αντικατάσταση των αντίστοιχων δυνάμεων στην παραπάνω σχέση, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$-6\pi r_p \mu V_r + \frac{4}{3}\pi r_p^3 \frac{V_t^2}{r} \rho_p - \frac{4}{3}\pi r_p^3 \frac{V_t^2}{r} \rho_f = 0$$

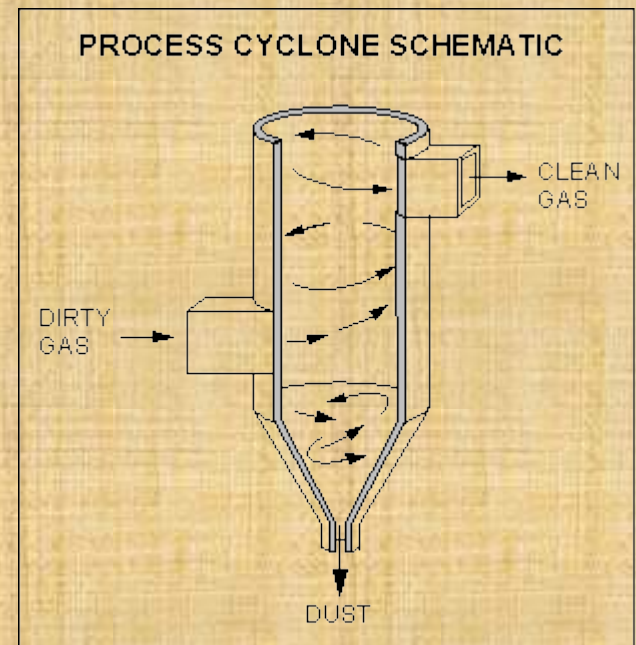
από όπου, λύνοντας ως προς  $V_r$  έχουμε ότι:

$$V_r = \frac{2 r_p^2}{9 \mu} \frac{V_t^2}{r} (\rho_p - \rho_f)$$

# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Παρατηρούμε ότι αν η πυκνότητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του σωματιδίου, η κίνηση είναι αρνητική (-), προς το κέντρο περιστροφής. Αντίθετα, εάν το σωματίδιο είναι πυκνότερο από το ρευστό, η κίνηση είναι θετική (+), μακριά από το κέντρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η λύση προτείνεται και χρησιμοποιείται ως καθοδηγητής στο σχεδιασμό ενός διαχωριστή τύπου κυκλώνα, ενώ η πραγματική απόδοση αξιολογείται και τροποποιείται εμπειρικά.

$$V_r = \frac{2r_p^2 V_t^2}{9\mu r} (\rho_p - \rho_f)$$



# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Σε συνθήκες μη ισορροπίας και όταν η ακτινική επιτάχυνση δεν είναι μηδέν, η παραπάνω γενική εξίσωση της κίνησης του Newton πρέπει να επιλυθεί εκ νέου και με αναδιάταξη των όρων της προκύπτει ότι :

$$\frac{dV_r}{dt} + \frac{9}{2} \frac{\mu}{\rho_p r_p^2} V_r - \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \frac{V_t^2}{r} = 0$$

Δεδομένου ότι οι μονάδες της ταχύτητας  $V_r$  είναι μήκος ανά μονάδα χρόνου, η παραπάνω σχέση είναι διαφορική εξίσωση 2<sup>ης</sup> τάξης, της μορφής:

$$x'' + c_1 x' + c_2 = 0$$

# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η συνιστώσα της ταχύτητας της περιστροφικής ροής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ακτίνας της τροχιάς ( $r$ ) και ως εκ τούτου:

$$V_t \propto r^2.$$

Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα εισόδου του ρευστού στον κυκλώνα, ελέγχει την ταχύτητα στροβιλισμού στο εσωτερικό του κυκλώνα. Έτσι, για μια τυχαία ακτίνα ( $r$ ) η ταχύτητα είναι:

$$U_r = U_{in} \frac{r}{R_{in}}.$$

όπου:

$R_{in}$  : είναι η ακτίνα του στομίου εισόδου στον κυκλώνα

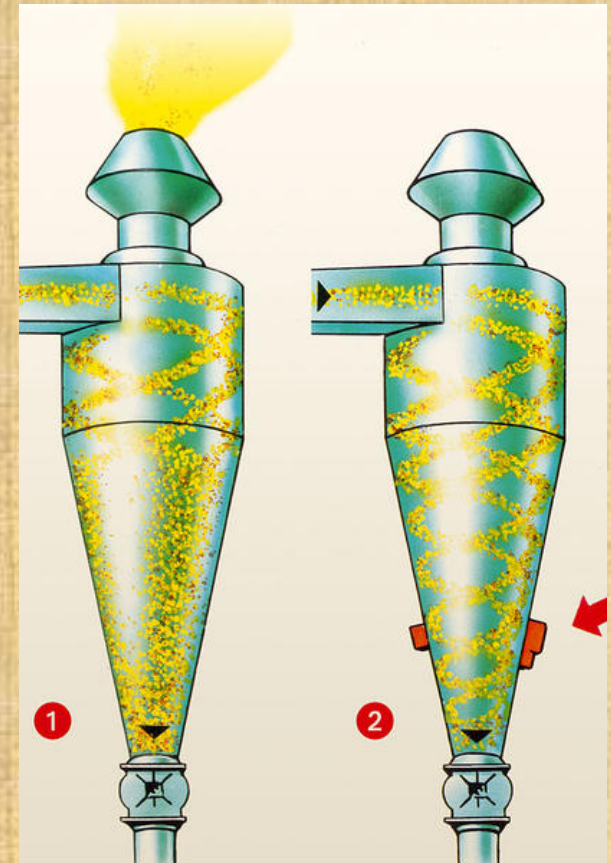
# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

$$U_r = U_{in} \frac{r}{R_{in}}$$

Έτσι, αν γνωρίζουμε την ταχύτητα πιθανώς και σε σχέση με τη γωνία έγχυσης και μία ακτίνα αποκοπής, θα μπορούσαμε να εκτιμήσουμε μια τιμή χαρακτηριστικής ακτίνας φιλτραρίσματος σωματιδίων, πάνω από την οποία τα σωματίδια θα μπορέσουν να αφαιρεθούν από το ρεύμα του αερίου.

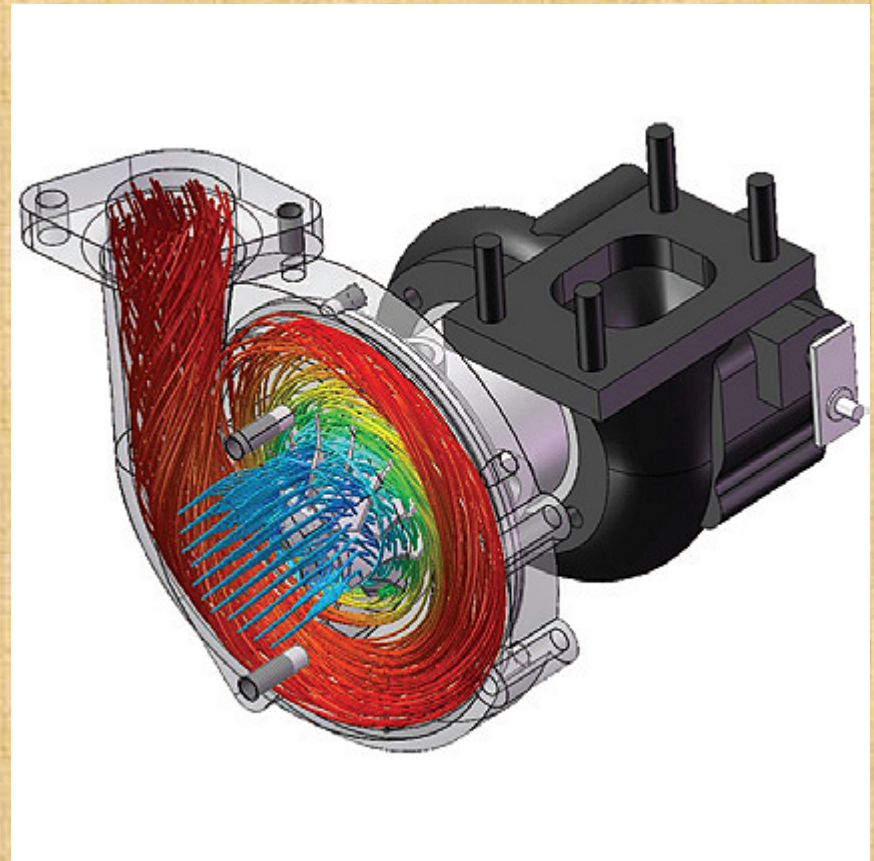
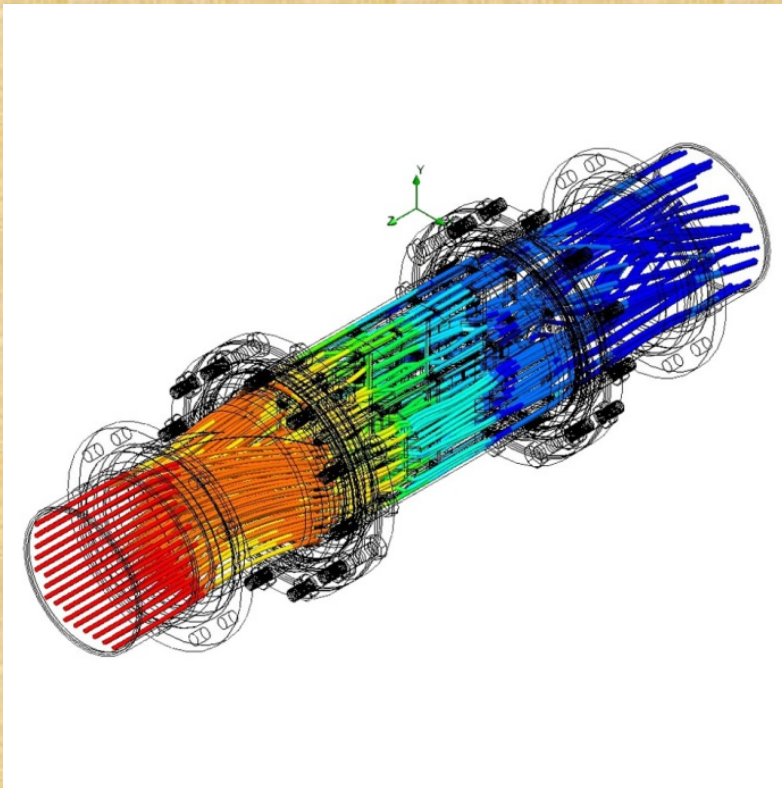
# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνα

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζουν πολλούς περιορισμούς και από πολλές απόψεις. Για παράδειγμα, η γεωμετρία του διαχωριστή δεν λαμβάνεται υπόψη. Τα σωματίδια θεωρούνται ως τελείως σφαιρικά σωματίδια που καταλήγουν σε μια οριακή-σταθερή ταχύτητα, για να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση. Επίσης, αγνοείται και η επίδραση της αντιστροφής δίνης στη βάση του κυκλώνα. Όλα όμως αυτά μπορεί πιθανά να συνυπάρχουν σε έναν κυκλώνα και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



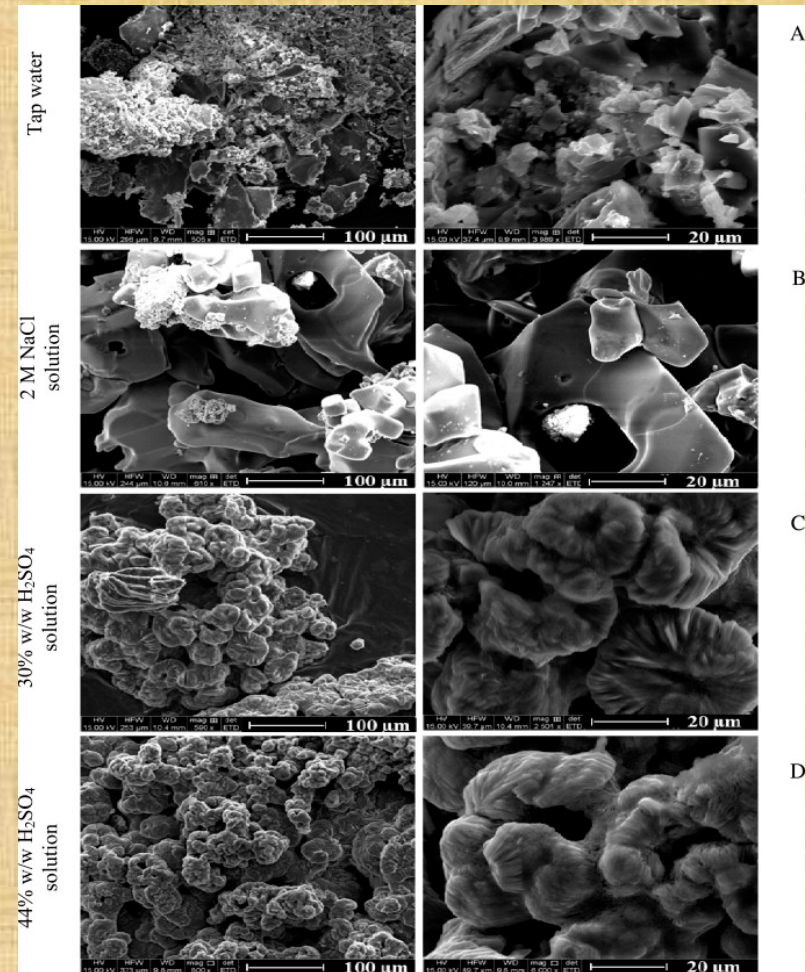
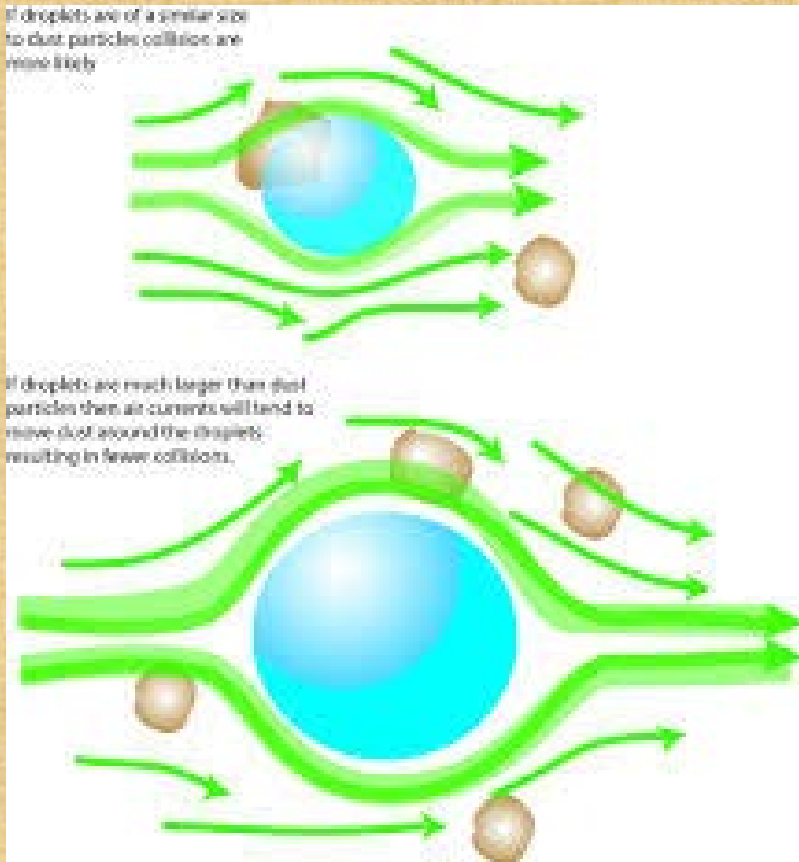
# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλών

Υπάρχουν πληρέστερα μοντέλα, που έχουν προκύψει από μελέτες για τη συμπεριφορά των διαχωριστών τύπου κυκλώνα. Για παράδειγμα, η αριθμητική μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD) έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στη μελέτη της κυκλωνικής συμπεριφορά.



# Θεωρητική προσέγγιση λειτουργίας κυκλώνων

Ένας σημαντικός περιορισμός του οποιοδήποτε μοντέλου ρευστομηχανικής σε διαχωριστές κυκλώνα είναι η αδυναμία να προβλέψει την συσσωμάτωση των λεπτόκοκκων σωματιδίων με μεγαλύτερα σωματίδια, η οποία έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση συλλογής του κυκλώνα.



# ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ



- Δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του στροβιλισμού του αερίου στην ελεύθερη πτώση των κόκκων
- Θεωρείται ότι οι κόκκοι είναι σφαιρικοί
- Δεν αλλάζουν σχήμα ούτε συσσωματώνονται μεταξύ τους
- Όταν φθάσουν στην περιφέρεια του κυκλώνα δεν παρασύρονται από το ρεύμα του αερίου
- Δεν λαμβάνεται υπόψη το κωνικό τμήμα του κυκλώνα

• Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αεροδυναμική αντίσταση  $\Delta p$  (σε mm H<sub>2</sub>O) του κυκλώνα στη διέλευση των αερίων:

$$\Delta p = \zeta' \frac{v_g \rho_g}{2g} \quad \text{mm H}_2\text{O}$$

όπου  $v_g$  = η ταχύτητα του αερίου στην είσοδο του κυκλώνα (m/sec)

$\rho_g$  = η πυκνότητα του αερίου στις επικρατούσες συνθήκες (kg/m<sup>3</sup>)

$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$

$\zeta'$  = ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης του κυκλώνα

# ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ

- Η σκόνη είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη (σε συγκέντρωση και κοκκομετρία) στην εγκάρσια διατομή εισόδου του κυκλώνα

Κατά τον υπολογισμό του κυκλώνα πρέπει να προηγούνται δοκιμές με τα συγκεκριμένα απαέρια. Δηλαδή, να είναι γνωστά τα εξής:

- Κοκκομετρία
- Όγκος των απαερίων υπό τις συνθήκες λειτουργίας και τυχόν διακυμάνσεις
- Πυκνότητα  $\rho_g$  του αερίου υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (0 °C) και πίεσης (1atm)
- Πυκνότητα  $\rho_s$  της σκόνης
- Φαινόμενη πυκνότητα της σκόνης
- Θερμοκρασία απαερίων και Υγρασία απαερίων
- Επιτρεπόμενη αεροδυναμική αντίσταση  $\Delta p$  του κυκλώνα
- Επιθυμητή απόδοση του κυκλώνα
- Συγκέντρωση σκόνης στα απαέρια
- Πίεση των αερίων στην είσοδο του κυκλώνα
- Περιεκτικότητα των αερίων σε  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $HF$  κλπ
- Η τάση της σκόνης να προκαλεί μηχανική φθορά από τριβή



# ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΟΝ ΚΥΚΛΩΝΑ

Η μεγαλύτερη ακτινική διαδρομή που μπορεί να διανύσει ένα σωματίδιο σκόνης είναι:  $R_2 - R_1$  (Σχήμα 1)

Ο χρόνος  $t_s$  που χρειάζεται το σωματίδιο να διανύσει αυτή τη διαδρομή είναι:

$$t_s = \frac{(R_2 - R_1)}{d^2 \rho_s v_g^2} 18 R \mu$$

όπου  $R$  είναι ίσο με:

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

και το  $t_s$  γίνεται:

$$t_s = \frac{(R_2^2 - R_1^2) 9\mu}{d^2 \rho_s v_g^2} \leq t_g$$

όπου:  $t_g$  ο χρόνος παραμονής του αερίου μέσα στον κυκλώνα.  
Για συγκράτηση του κόκκου μέσα στον κυκλώνα πρέπει  $t_s < t_g$

ή

$$d \geq \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{v_g^2 \rho_s t_g}}$$

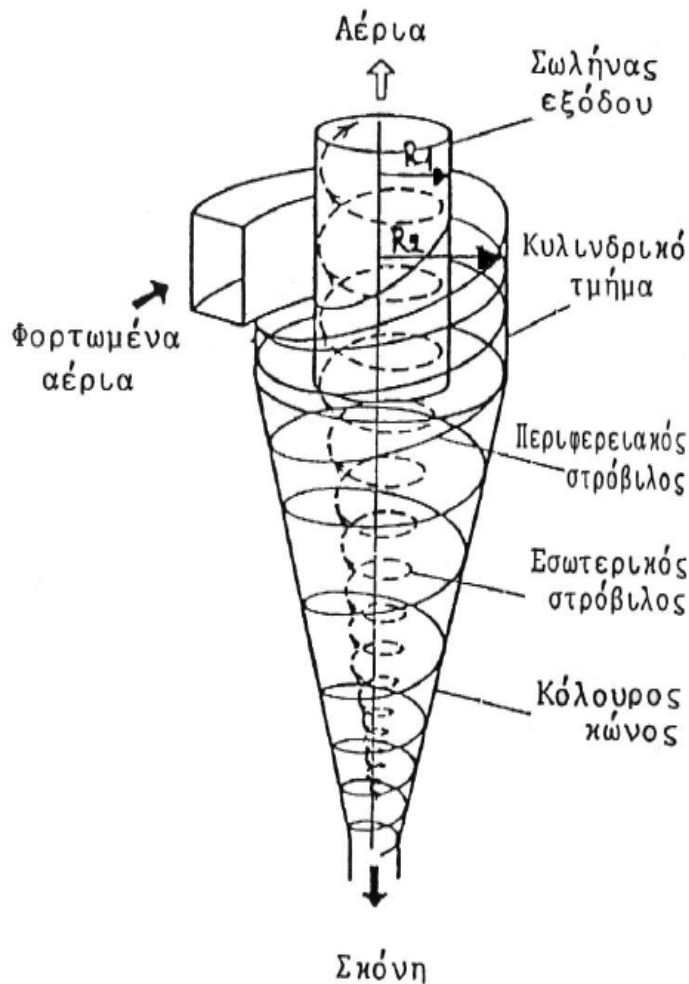
από όπου προκύπτει ότι:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{v_g^2 \rho_s t_g}} \quad (1)$$

ή

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{(2\pi Rn)^2 \rho_s 2}} \quad (2)$$

όπου  $n$  ο αριθμός στροφών ανά sec του αερίου μέσα στον κυκλώνα



Σχήμα 1. Σχηματική Παράσταση Κυκλώνα

# ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΣΤΟΝ ΚΥΚΛΩΝΑ

Η σχέση της ελάχιστης διαμέτρου των σωματιδίων, δίνει τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η αποκονίωση-απόδοση στον κυκλώνα:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{v_g^2 \rho_s t_g}}$$

1. Όταν  $v_g$  αυξάνει, η απόδοση (κονιοσυλλογή) αυξάνει
2. Όταν  $\rho_s$  αυξάνει, η απόδοση (κονιοσυλλογή) αυξάνει
3. Όταν  $(R_2 - R_1)$  μειώνεται, τότε η απόδοση (κονιοσυλλογή) αυξάνει
4. Όταν  $R_2 - R_1 =$  σταθερό αλλά αυξάνουν οι απόλυτες τιμές των  $R_1$  και  $R_2$ , η απόδοση (κονιοσυλλογή) μειώνεται
5. Όταν το ιξώδες  $\mu$  αυξάνει, η απόδοση (κονιοσυλλογή) μειώνεται. Όμως το  $\mu$  αυξάνει όταν και η θερμοκρασία ( $T$ ) αυξάνει. Αλλά, όταν το  $T$  αυξάνει τότε η παροχή ( $Q_g$ ) αυξάνει και το  $v_g$  αυξάνει. Όταν φυσικά το  $v_g$  αυξάνει, το  $d_{\min}$  μειώνεται και άρα η απόδοση (κονιοσυλλογή) αυξάνεται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι όταν αυξάνει η θερμοκρασία, το  $d_{\min}$  αυξάνει και γίνεται ανάλογο του  $T^{0.15}$ .

Συνεπώς:

6. Όταν το  $T$  αυξάνει, η απόδοση (κονιοσυλλογή) μειώνεται
7. Τέλος, όταν η διάμετρος  $D$  του κυκλώνα ( $D_{\text{κυκλώνα}} = 2R_2$ ) αυξάνει, η απόδοση (κονιοσυλλογή) μειώνεται

# ΠΟΛΥΚΥΚΛΩΝΑΣ (Polycyclon, Multiclone)

- Πρόκειται για πολλούς κυκλώνες με μικρή διάμετρο
- Λειτουργούν παράλληλα στην ίδια μονάδα
- Γίνεται εκμετάλλευση της μικρής διαμέτρου
- Η απόδοση είναι μεγαλύτερη από εκείνη του κυκλώνα
- Η περιστροφή του αερίου επιτυγχάνεται με ακίνητη πτερωτή ή οδηγό
- Ο υπολογισμός του πολυκυκλώνα είναι ανάλογος του κυκλώνα
- Απαιτείται ομοιόμορφη κατανομή των αερίων
- $\Delta p \sim 25 \text{ cm H}_2\text{O}$
- Θερμοκρασία αερίων έως 400-450 °C



- Χρησιμοποιείται όταν η ποσότητα του αερίου είναι μεγάλη για ένα κυκλώνα

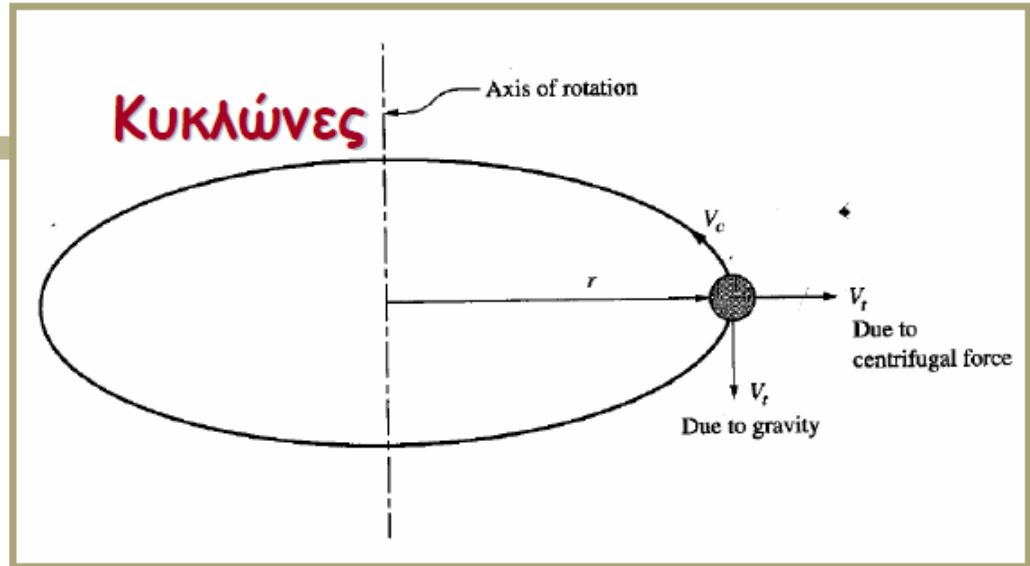
Σύμφωνα με τον τύπο:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{v_g^2 \rho_s t_g}}$$

η μείωση της διαμέτρου του κυκλώνα  $D=2R_2$ , αυξάνει την απόδοση. Όταν αυξάνεται η παροχή  $Q_g$  [ $Q_g = \pi (D^2/4) v_g$ ] (π.χ., 400.000 ή 500.000 m<sup>3</sup>/h) και παραμένει σταθερή η ταχύτητα  $v_g$ , αυξάνει η διάμετρος του κυκλώνα  $D$ . Αλλά όταν η διάμετρος  $D$  φθάσει μία τιμή (συνήθως  $D > 800-1000 \text{ mm}$ ), τότε πέφτει πολύ η απόδοση του κυκλώνα.

Αυτά οδήγησαν στην καθιέρωση του πολυκυκλώνα.

Εάν ένα σώμα κινείται σε μία κυκλική τροχιά ακτίνας  $r$  με ταχύτητα  $V_c$ , έχει γωνιακή ταχύτητα  $\omega = V_c/r$  και φυγόκεντρο δύναμη



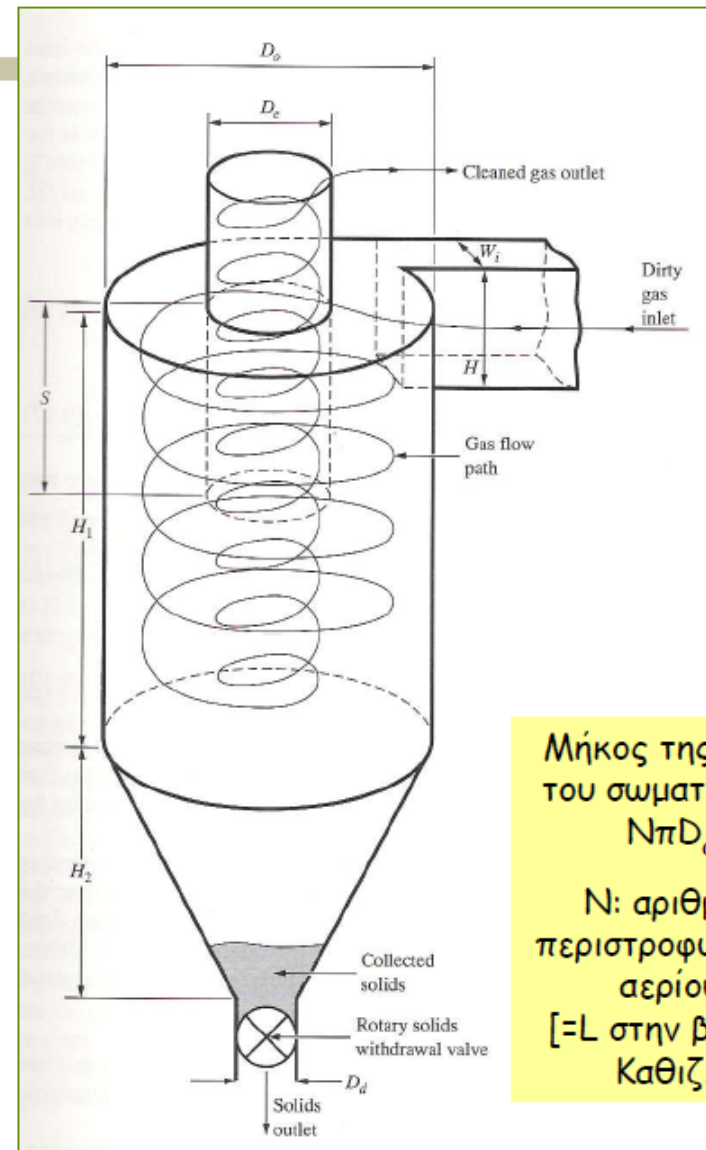
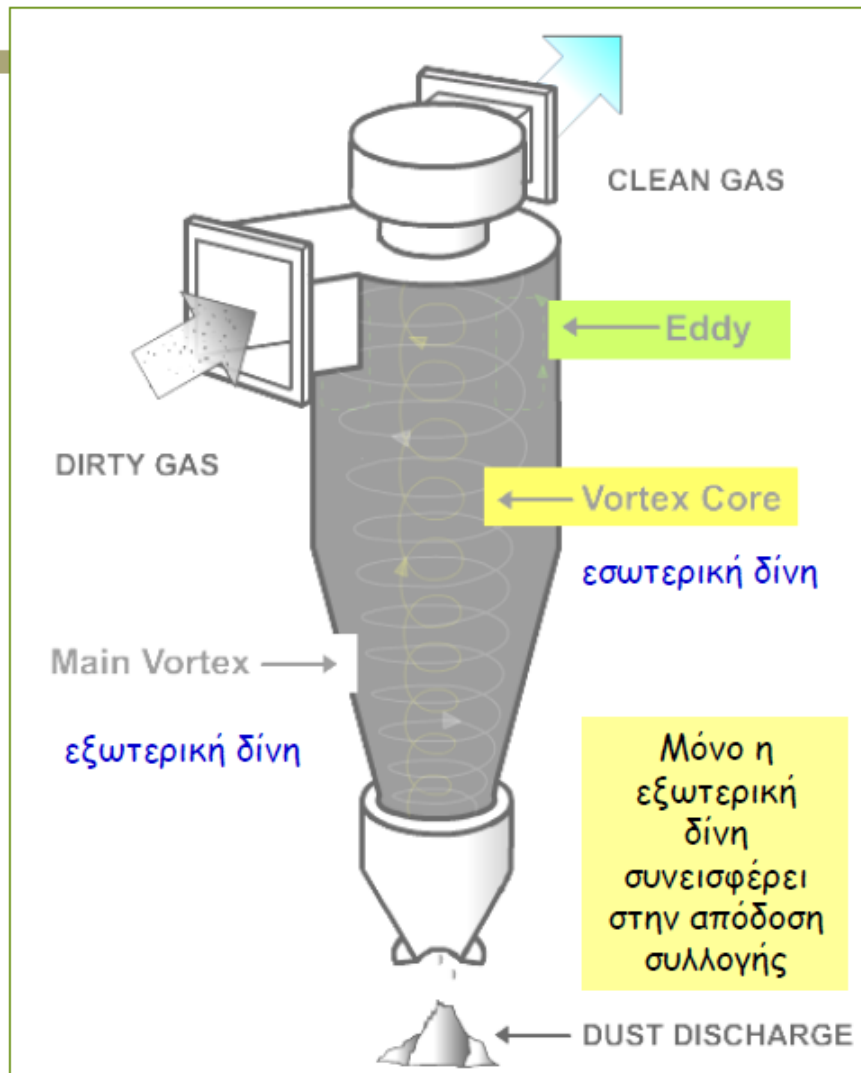
$$\text{Φυγόκεντρος δύναμη} = \frac{mV_c^2}{r} = m\omega^2 r$$

$$\text{Δύναμη βαρύτητας} = mg$$

Για σωματίδιο με  $V_c = 20 \text{ m/s}$  και  $r = 0,30 \text{ m}$   $\Rightarrow$

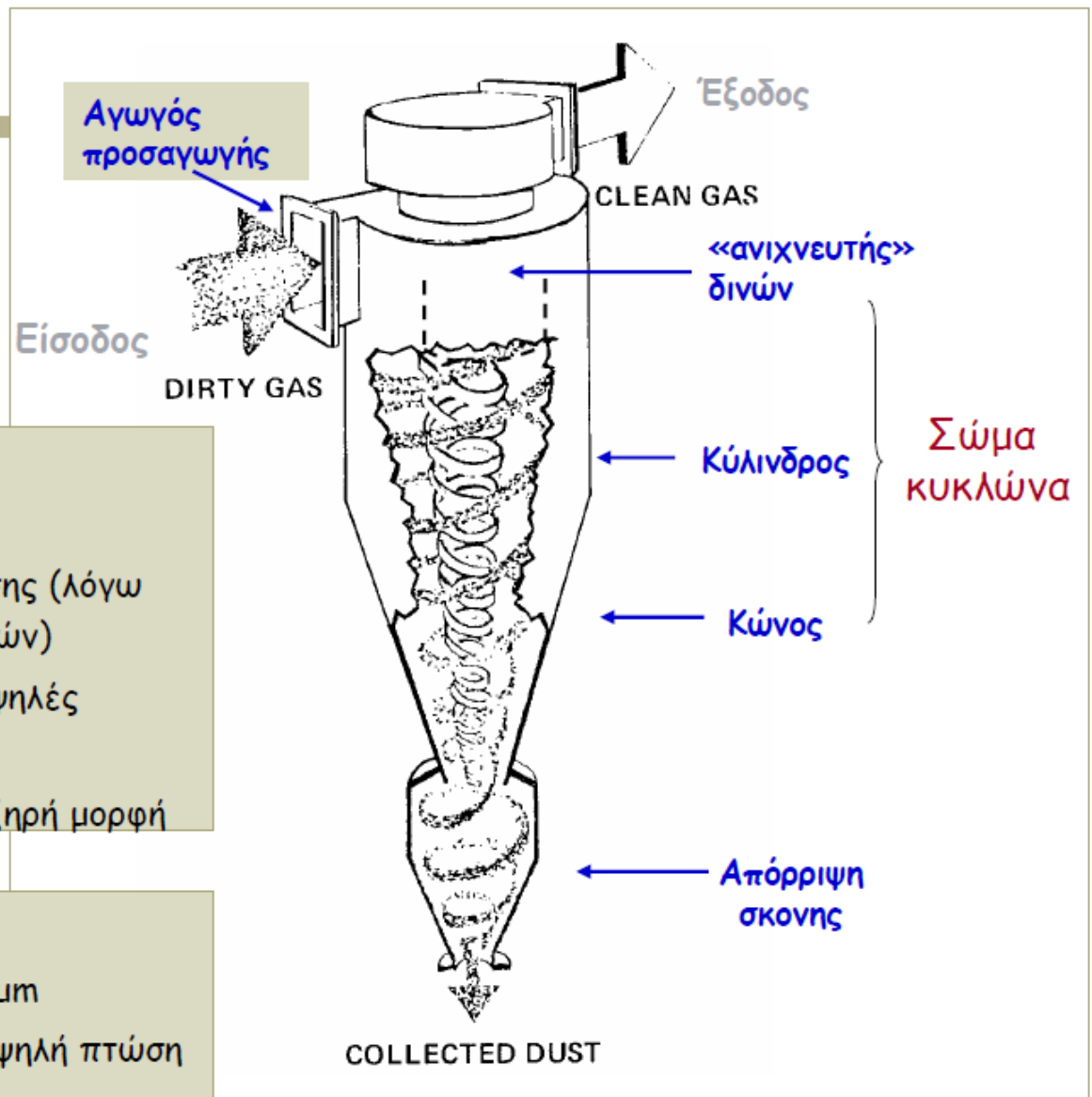
$$\text{Φυγόκεντρος επιτάχυνση} = \frac{V_c^2}{r}$$

$$\frac{\text{Φυγόκεντρος δύναμη}}{\text{Δύναμη βαρύτητας}} = 133 !!!$$



Μήκος της ροής του σωματιδίου =  $N\pi D_o$

$N$ : αριθμός περιστροφών του αερίου  
 [=L στην βαρυτ. Καθιζ.]

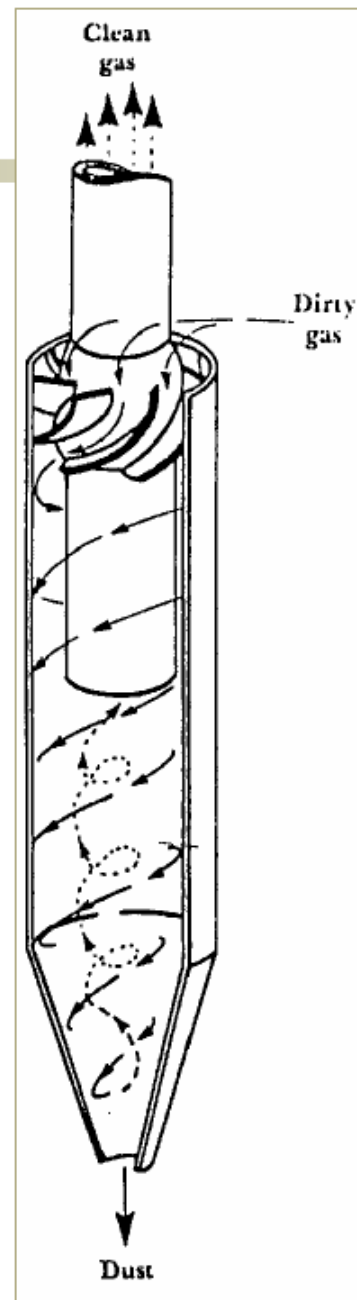
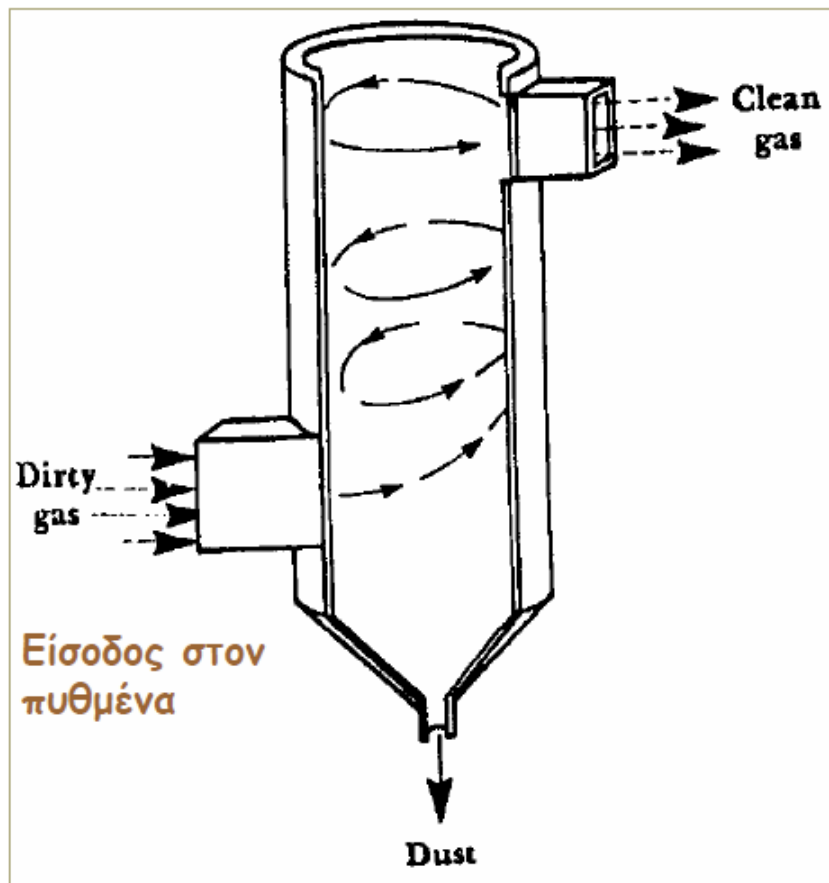


### Πλεονεκτήματα

- Μικρό κόστος κατασκευής
- Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης (λόγω της απουσίας κινούμενων μερών)
- Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες
- Διάθεση των σωματιδίων σε ξηρή μορφή

### Μειονεκτήματα

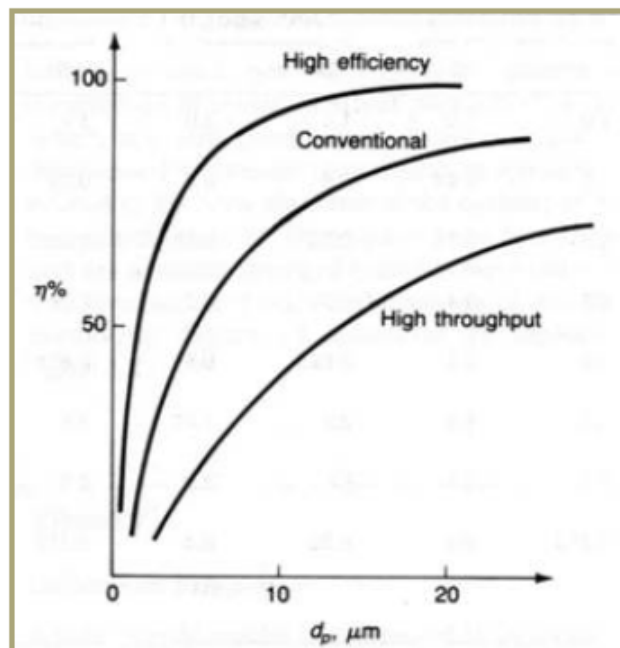
- Χαμηλές αποδόσεις για  $d < 10 \mu\text{m}$
- Υψηλό κόστος λειτουργίας (Υψηλή πτώση πίεσης)



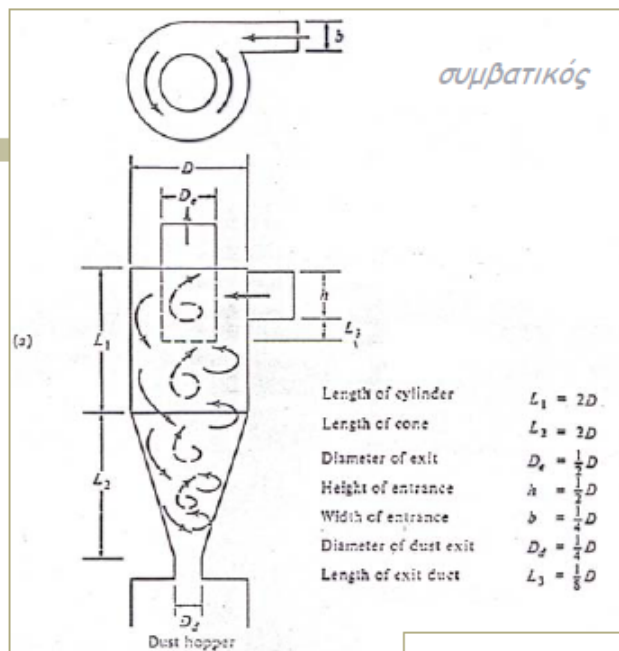
Αξονική είσοδος

## Τύποι κυκλώνων

- Συμβατικός κυκλώνας
- Κυκλώνας υψηλής απόδοσης
- Κυκλώνας υψηλής δυναμικότητας (μεγάλης ογκομετρικής παροχής)

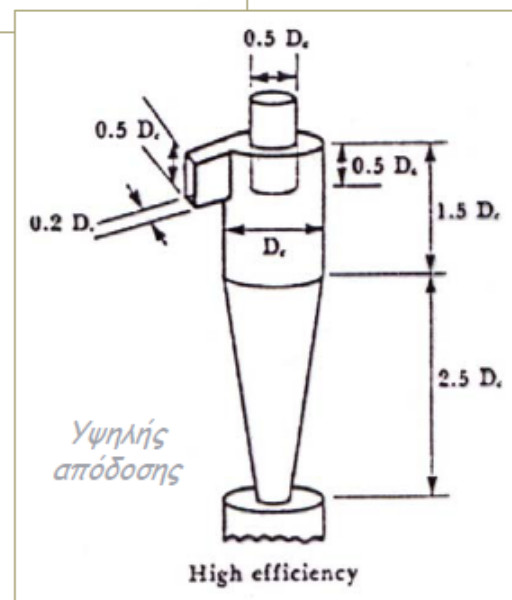


Γενική σχέση της απόδοσης συλλογής σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων.



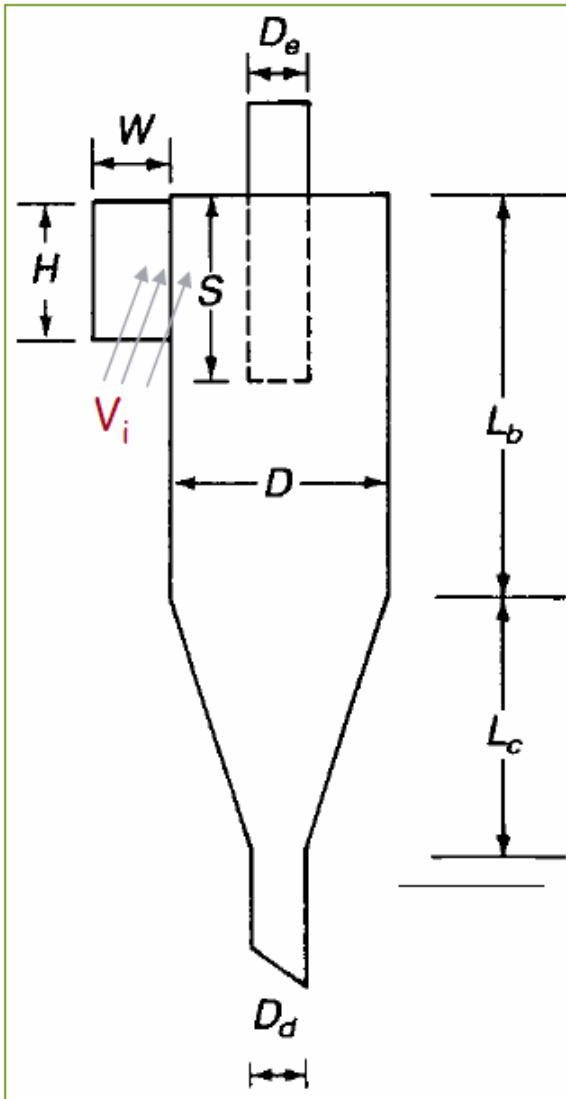
## Ο σχεδιασμός ενός κυκλώνα θεωρεί:

- Απόδοση συλλογής
- Πτώση πίεσης
- Μέγεθος συσκευής



# Τυπικές διαστάσεις κυκλώνα

Βασική παράμετρος η διάμετρος του σώματος



	Τύπος Κυκλώνα				Υψηλής Δυναμικότητας	
	Υψηλής Απόδοσης		Συμβατικός		(5)	(6)
	(1)	(2)	(3)	(4)		
Διάμετρος Σώματος $D/D$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ύψος Στομίου Εισόδου $H/D$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Πλάτος Στομίου Εισόδου $W/D$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Διάμετρος Εξόδου Αερίου $D_e/D$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Μήκος Ανιχνευτή Δίνης $S/D$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Μήκος Σώματος $L_b/D$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Μήκος Κώνου $L_c/D$	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Διάμ. Εξόδου Σωματιδίων $D_d/D$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

(1) (5) Stairmand (1951)

(2), (4), (6): Swift (1969)

(3) Lapple (1951)

## Απόδοση συλλογής: Θεωρία του Lapple (plug flow)

Ο αριθμός των (ενεργών) περιστροφών είναι περίπου

$$N_e = \frac{1}{H} \left[ L_b + \frac{L_c}{2} \right]$$

Χρόνος παραμονής αερίων (στην εξωτερική δίνη)

$$\Delta t = \frac{\pi D N_e}{V_i} \quad (1) \quad V_i = \text{ταχύτητα εισαγωγής αερίου (10-25 m/s)}$$

Για να συλληθούν τα σωματίδια πρέπει να κτυπήσουν στο τοίχωμα  
Οριακή ταχύτητα καθίζησης (λόγω της φυγόκεντρης)  
στην ακτινική διεύθυνση

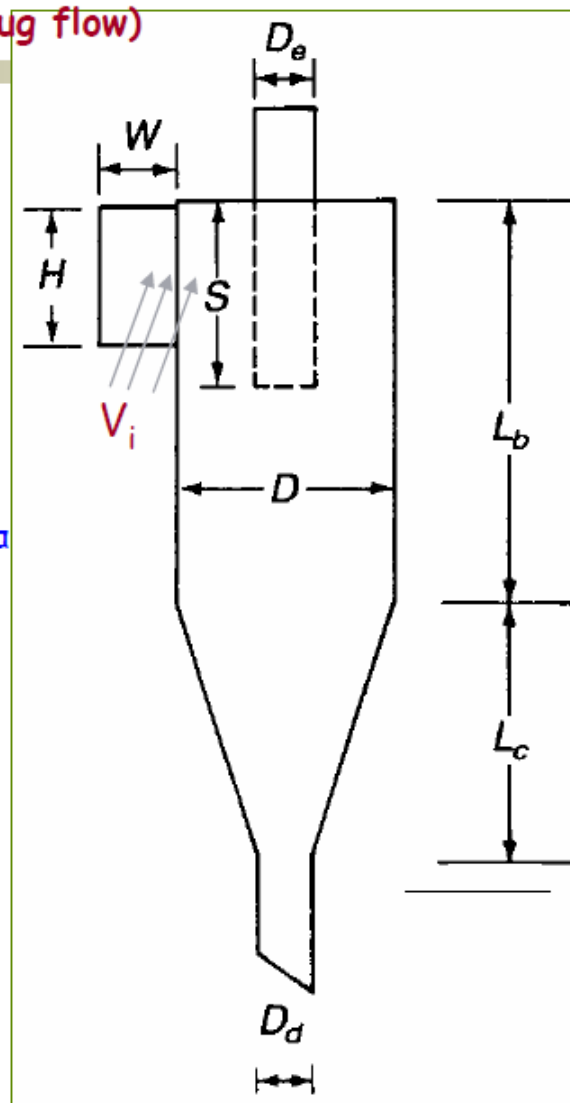
[η μέγιστη ακτινική απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα σωματ. είναι  $W$ ]

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{18\mu} \left( \frac{V_i^2}{R} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) V_i^2}{9\mu D} \quad (2) \quad \text{Υπόθεση: ροή Stokes}$$

Μικρότερη συλλεγόμενη διάμετρος [από (1) και (2)], εάν  
το σωματ. ξεκινήσει από απόσταση  $W$ .

$$d_p = \sqrt{\frac{9\mu W}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}} \quad \text{Εξίσωση Rosin-Rammler}$$

Πως μπορούμε να μειώσουμε τη μικρότερη διάμετρο συλλογής:



# Απόδοση συλλογής

Η εξίσωση Rosin-Rammler δε μπορεί να δώσει την απόδοση συλλογής.

Ο Larple (1951) πρότεινε τη διάμετρο «αποκοπής» 50% (50% cut size) [ημιεμπειρική μέθοδος]

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i \rho_p}}$$

$d_{pc}$  = διάμετρος σωματιδίων που συλλέχθηκαν με 50% απόδοση

Η (εμπειρική) απόδοση συλλογής για το μέγεθος (εύρος)  $d_{pj}$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc} / d_{pj})^2}$$

προσαρμογή

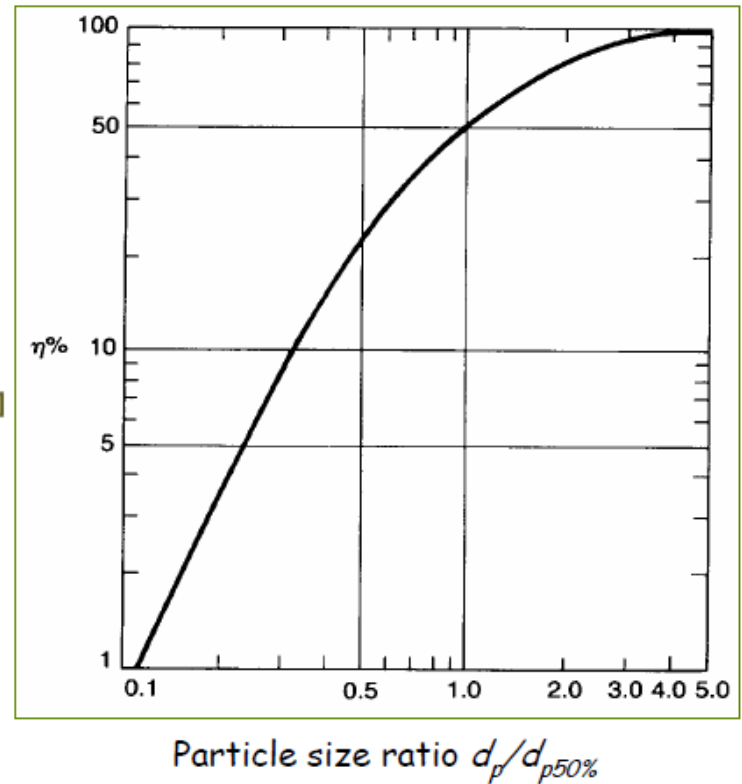
Συνολική απόδοση

$$\eta = \sum \eta_j m_j$$

$m_j$  = κλάσμα μάζας των σωματιδίων στο εύρος μεγέθους  $j$

Διείσδυση

$$p = 1 - \eta$$



Έχουν αναπτυχθεί και περισσότερα πολύπλοκα μοντέλα.

## Απόδοση κυκλώνα για διάφορες διεργασίες\*

Μεγαλύτερη θερμοκρασία εισόδου οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα εισόδου (καλύτερη απόδοση), αλλά και αύξηση του ιξώδους του αέρα (χειρότερη απόδοση), και σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης !

\* *Air Pollution Control Equipment*, Theodore & Buonicore, CRC Press, 1988.

Efficiency vs. particle size	% Of particles below 10 μm in size	Efficiency range
Fly ash (power)		
Spreader stoker-fired boilers	20	90—95
PC-fired boilers	42	75—90
Cyclone-fired boilers	65	55—65
Nonmetallic minerals (when collector is part of process and collector catch is reusable)		
Cement (kilns and process)	40	70—85
Asphalt plant	10	80—95
Lightweight aggregate (kiln)	30—40	80—90
Refractory clays (kiln)	40—50	70—80
Lime (kiln)	40—50	75—80
Fertilizer plant (process equipment)	40	80—85
Steel (ore beneficiation)		
Pelletizing (vertical shaft and rotary kiln)	10—40	80—95
Foundry (general)	10—40	80—95
Chemical process (drying, calcining)	10—40	80—95
Incinerators (municipal)	20—40	65—75
Coal processing (thermal drying)	10	90—97
Petroleum (catalytic cracking process)	0.6	99+
General industrial application (in plant)	10—60	65—95

# Πτώση πίεσης

Σχετικά υψηλή πτώση πίεσης. Γιατί;

Γενικά από 2-10 in νερού.

Αρκετές προσεγγίσεις.

Ικανοποιητικό το (εμπειρικό) μοντέλο των Shepherd & Lapple (1940)

Πτώση πίεσης (σε σχέση με την πτώση πίεση της εισερχόμενης ταχύτητας)

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_g V_i^2} = H_u = K_c \frac{HW}{D_e^2}$$

$\Delta P$  = πτώση πίεσης, Pa  
 $\rho_g$  = πυκνότητα αερίου, kg/m<sup>3</sup>  
 $V_i$  = ταχύτητα εισόδου αερίου, m/s  
 $K_c$  = σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του κυκλώνα, τυπική τιμή για άερια ρύπανση 16 (περιοχή 7,5-18,5)

Μοντέλο των Casal & Martinez (1983)

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_g V_i^2} = 3,33 + 11,8 \frac{HW}{D_e^2}$$

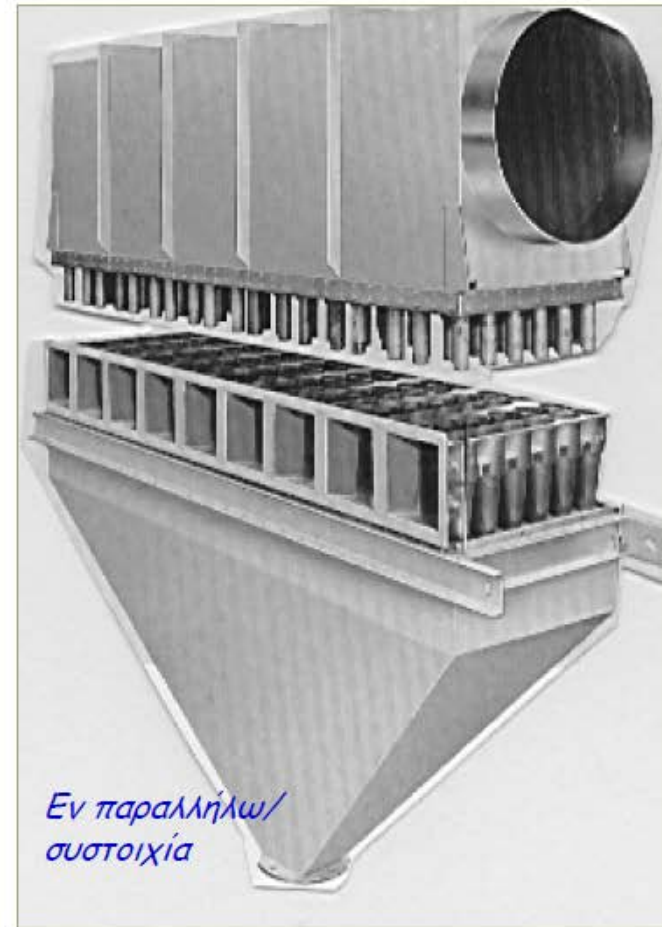
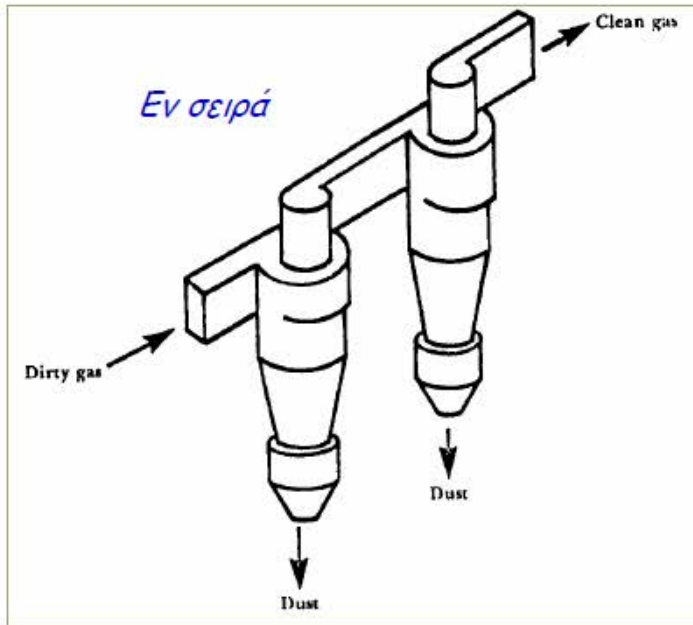
Απαίτηση σε ενέργεια, W

$$\dot{W}_f = Q \Delta P$$

Common ranges for pressure drops are:

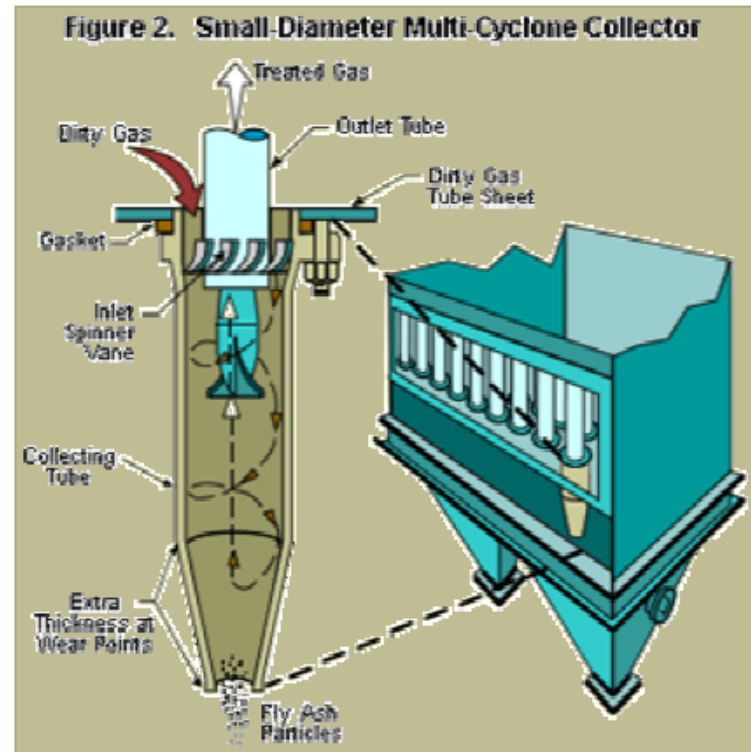
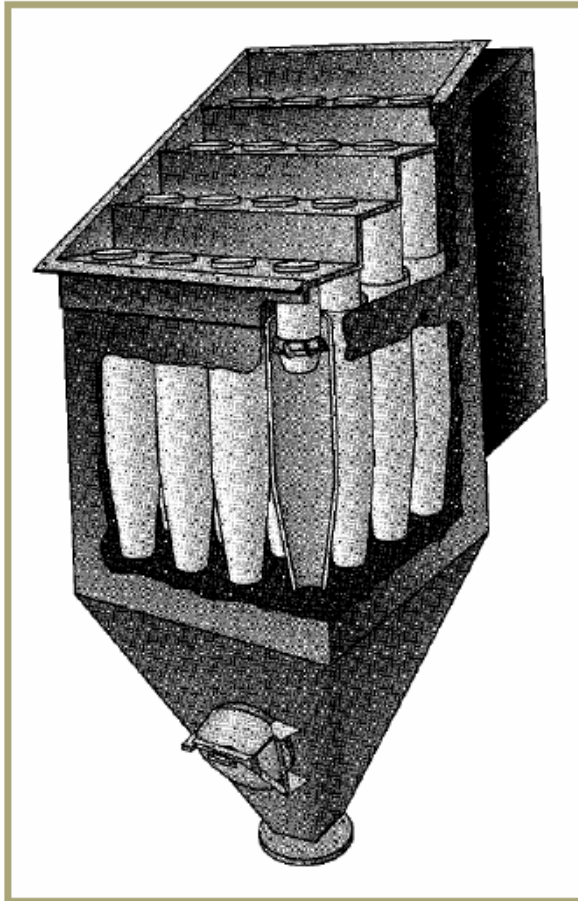
low efficiency cyclone	2 to 4 in. of water.
medium efficiency cyclone	4 to 8 in. of water.
high efficiency cyclone	8 to 10 in. of water.

## Τοποθέτηση κυκλώνων



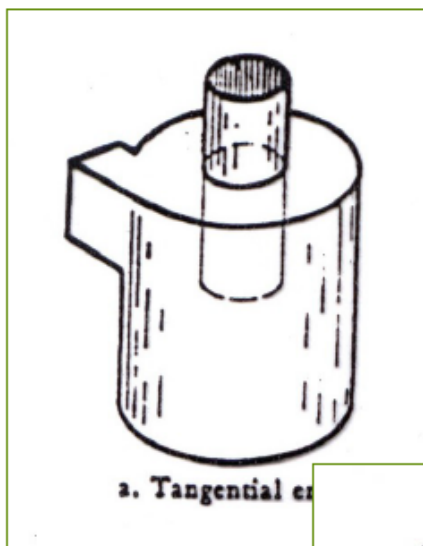
Air Pollution Control Equipment, Theodore & Buonicore, CRC Press, 1988

Ν. Ανδρίτσος Εισαγωγή στον έλεγχο της σωματιδιακής ρύπανσης - Κυκλώνες



*Πολυκωνικό σύστημα: μεγάλος αριθμός μικρών κυκλώνων εν παραλλήλω.*

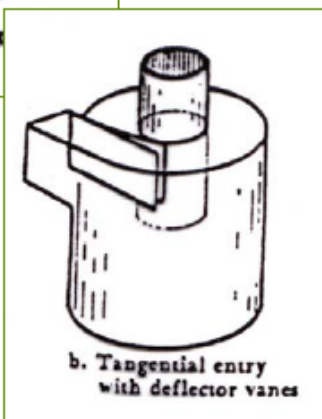
## Είσοδος της σκόνης



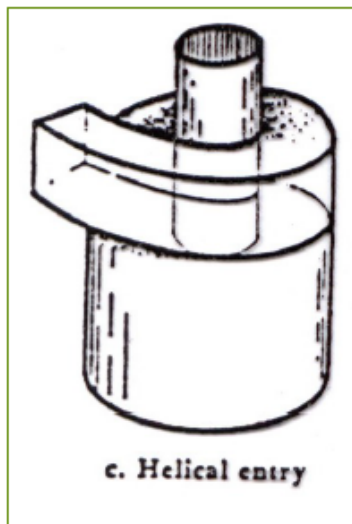
a. Tangential entry

### Εφαπτομενική

- Απλός σχεδιασμός και κατασκευή
- Χαμηλό κόστος
- Χαμηλή απόδοση
- Σχετικά υψηλή πτώση πίεσης



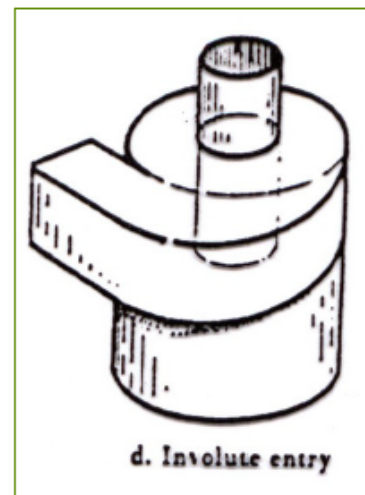
b. Tangential entry with deflector vanes



c. Helical entry

### Ελικοειδής

- Δίνει εφαπτομενική ταχύτητα στο αέριο
- Σχετικά περίπλοκος σχεδιασμός
- Υψηλότερο κόστος



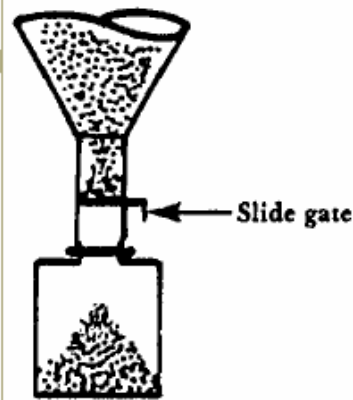
d. Involute entry

### Ενεστραμμένη

- Επιτρέπει να εισέλθει το αέριο με την ελάχιστη τύρβη και χαμηλή πτώση πίεσης
- Υψηλότερη απόδοση από την εφαπτομενική είσοδο
- Μεγαλύτερες συσκευές - κόστος

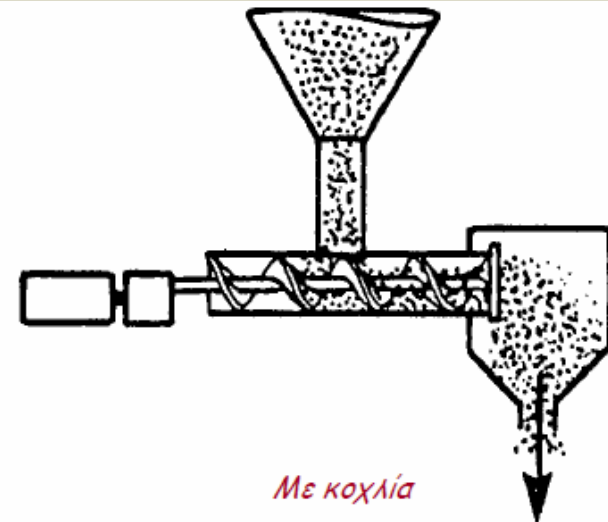
*Handbook of Air Pollution Control Engineering & Technology, Mycock, McKenna and Theodore, Lewis Publishers, 1995.*

## Απόρριψη σκόνης

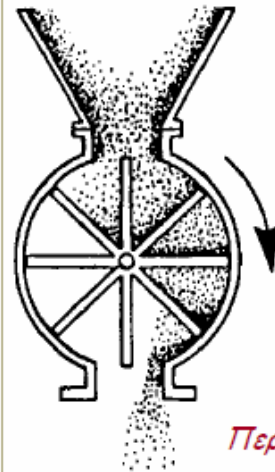


a. Simple manual slide gate

*Χειρονακτικά*

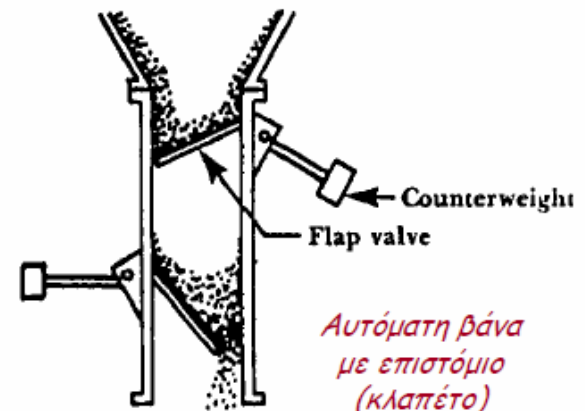


c. Discharge screw feeder



b. Rotary valve

*Περιστροφική βάνα*



d. Automatic flap valve

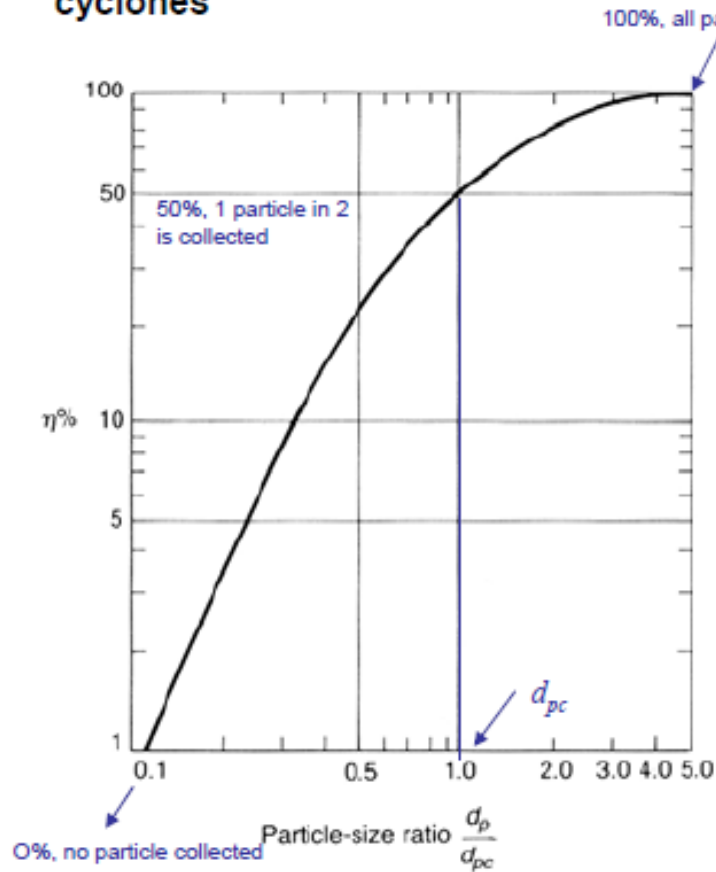
Handbook of Air Pollution Control  
Engineering & Technology,  
Mycock, McKenna and Theodore,  
Lewis Publishers, 1995.



*Κυκλώνες για απομάκρυνση της σκόνης*



## Particle collection efficiency versus particle size ratio for standard conventional cyclones



Lapple then developed a general curve for standard conventional cyclones to predict the collection efficiency for any particle size (see side figure).

If the size distribution of particles is known, the overall collection efficiency of a cyclone can be predicted by using the figure.

Theodore and DePaola (1980) then fitted an algebraic equation to the curve, which makes Lapple's approach more precise and more convenient for application to computers. The efficiency of collection of any size of particle is given by

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc} / d_{pj})^2}$$

where

$\eta_j$  = collection efficiency of particles in the  $j$ th size range ( $0 < \eta_j < 1$ )

$d_{pj}$  = characteristic diameter of the  $j$ th particle size range (in  $\mu\text{m}$ ).

The overall efficiency, called performance, of the cyclone is a weighted average of the collection efficiencies for the various size ranges, namely

$$\eta = \frac{\sum \eta_j m_j}{M}$$

where

$\eta$  = overall collection efficiency ( $0 < \eta < 1$ )

$m_j$  = mass of particles in the  $j$ th size range

$M$  = total mass of particles.

## Example of Cyclone Analysis

Given:

Conventional type (standard proportions)

$D = 1.0$  m

Flow rate =  $Q = 150$  m<sup>3</sup>/min

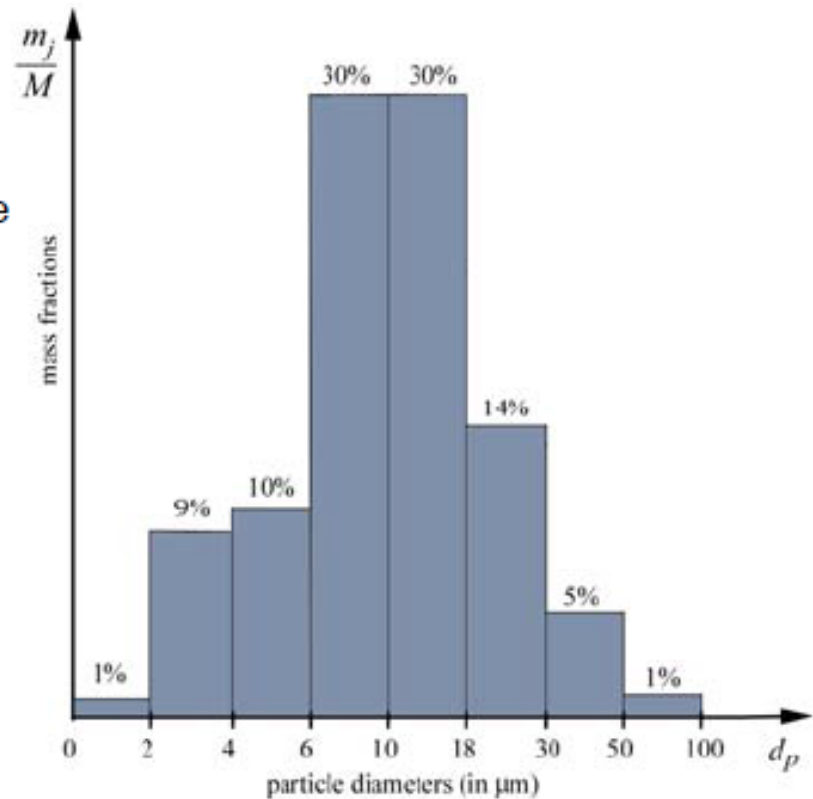
Particle density =  $\rho_p = 1600$  kg/m<sup>3</sup>

Particle size distribution as follows:

Particle size ( $d_p$ )	% mass in that size ( $m/M$ )
0-2 $\mu\text{m}$	1.0%
2-4 $\mu\text{m}$	9.0%
4-6 $\mu\text{m}$	10.0%
6-10 $\mu\text{m}$	30.0%
10-18 $\mu\text{m}$	30.0%
18-30 $\mu\text{m}$	14.0%
30-50 $\mu\text{m}$	5.0%
50-100 $\mu\text{m}$	1.0%
	100%

Question:

What is the collection efficiency?



Solution

$$N = \frac{1}{H} \left( L_b + \frac{L_c}{2} \right) = 6$$

$$V_i = \frac{Q}{WH} = \frac{Q}{0.125 D^2} = 1200 \text{ m/min} = 20 \text{ m/s}$$

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9}{2\pi} \frac{\mu W}{N V_i (\rho_p - \rho_a)}} = \sqrt{\frac{9}{2\pi} \frac{0.25 \mu D}{6 V_i (\rho_p - \rho_a)}} = 5.79 \times 10^{-6} \text{ m} = 5.79 \text{ } \mu\text{m}$$

Size range (in $\mu\text{m}$ )	Average size $d_p$ (in $\mu\text{m}$ )	Collection efficiency $\eta$	Mass fraction $m/M$	Contribution to performance $\eta \times m / M$
0 - 2	1	2.9%	0.01	0.029%
2 - 4	3	21.1%	0.09	1.903%
4 - 6	5	42.7%	0.10	4.268%
6 - 10	8	65.6%	0.30	19.678%
10 - 18	14	85.4%	0.30	25.613%
18 - 30	24	94.5%	0.14	11.953%
30 - 50	40	97.9%	0.05	4.897%
50 - 100	75	99.4%	0.01	0.994%
			1.00	70.6%

## Two distinct approaches in cyclone analysis

### 1. *Performance analysis*

The cyclone exists – All dimensions and characteristics are known.  
The engineer calculates its collection efficiency ( $\eta$ ).

### 2. *Design analysis*

The cyclone needs to be chosen for a given task.

A target performance ( $\eta$ ) is imposed.

Typically, the engineer knows the amount of air flow ( $Q$ ),

& characteristics of particles (range of  $d_p$ 's, mass fractions  $m_j/M$ ).

The engineer needs to determine

the type of cyclone needed (conventional, high-throughput, ...)

the required size of the device (diameter  $D$ ).

*Note:* Design analysis usually necessitates an iterative approach.

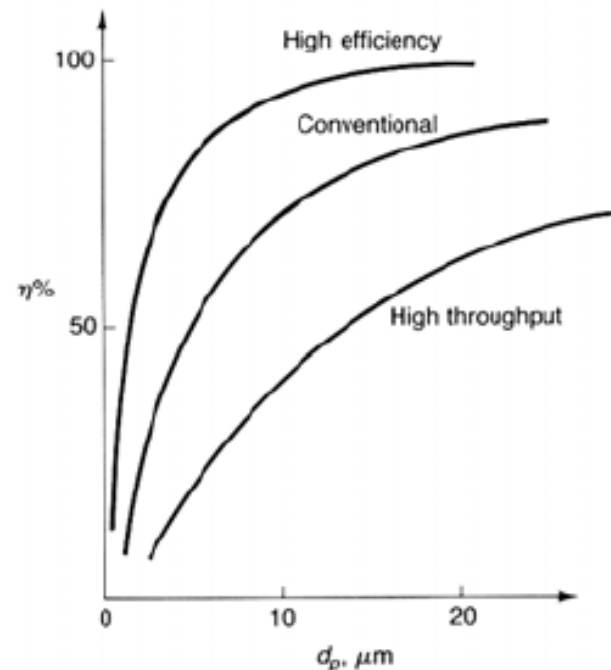
(Successive guesses until the required performance is achieved.)

Cyclones by themselves are generally not adequate to meet stringent air pollution regulations, but they serve an important purpose. Their low capital cost and their maintenance-free operation make them ideal for use as pre-cleaners for more expensive final control devices such as baghouses or electrostatic precipitators. In addition to use for pollution control, cyclones are used extensively in process industries. For example, they are used for recovering and recycling certain catalysts in petroleum refineries, for recovering freeze-dried coffee in food processing plants, and for capturing saw dust in a lumber shop.

Cyclones have often been regarded as low-efficiency collectors. However, efficiency varies greatly with particle size and cyclone design. Advanced design work has greatly improved cyclone performance. Some cyclone manufacturers advertise cyclones that have efficiencies greater than 98% for particles larger than 5 microns, and others that routinely achieve efficiencies of 90% for particles larger than 15 – 20 microns.

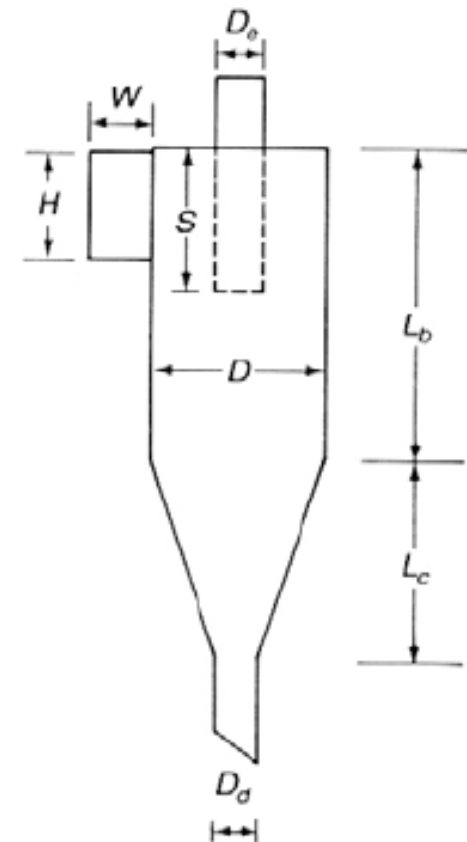
In general, operating costs increase with efficiency (higher efficiency requires higher inflow pressure), and three categories of cyclones are available: high efficiency, conventional, and high throughput.

Typical efficiency curves for these three types of cyclones are presented in the figure.



## Standard cyclone dimensions

	Cyclone Type					
	High Efficiency		Conventional	High Throughput		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Body Diameter, $D/D$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Height of Inlet, $H/D$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Width of Inlet, $W/D$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Diameter of Gas Exit, $D_e/D$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Length of Vortex Finder, $S/D$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Length of Body, $L_b/D$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Length of Cone, $L_c/D$	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Diameter of Dust Outlet, $D_d/D$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4



### SOURCES:

Columns (1) and (5) = Stairmand, 1951; columns (2), (4) and (6) = Swift, 1969; column (3) and sketch = Lapple, 1951.

## Cyclone Separators and their Design

(Nazaroff & Alvarez-Cohen, pages 445-447 augmented)

(Mihelcic & Zimmerman, Section 12.8.1)

Low-pressure drop cyclone  
at Rochester Asphalt Plant  
(Victor, NY)



A cyclone used in a woodshop  
(Lebanon, NH)



<http://www.jtsystemsinc.com/>

Cyclone separators have been used in the United States for about 100 years, and are still one of the most widely used of all industrial gas-cleaning devices. The main reasons for the wide-spread use of cyclones are that they are inexpensive to purchase, they have no moving parts, and they can be constructed to withstand harsh operating conditions.

## Cost Information:

The following are cost ranges (expressed in 2002 dollars) for a single conventional cyclone under typical operating conditions, developed using an EPA cost-estimating spreadsheet (EPA, 1996), and referenced to the volumetric flow rate of the waste stream treated. Flow rates higher than approximately  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$  (21,200 scfm) usually employ multiple cyclones operating in parallel. For purposes of calculating the example cost effectiveness, flow rates are assumed to be between  $0.5$  and  $50 \text{ m}^3/\text{sec}$  (1,060 and 106,000 scfm), the PM inlet loading is assumed to be approximately  $2.3$  and  $230 \text{ g}/\text{m}^3$  (1.0 to 100 gr/scf) and the control efficiency is assumed to be 90 percent. The costs do not include costs for disposal or transport of collected material. Capital costs can be higher than in the ranges shown for applications which require expensive materials. As a rule, smaller units controlling a waste stream with a low PM concentration will be more expensive (per unit volumetric flow rate and per quantity of pollutant controlled) than a large unit controlling a waste stream with a high PM concentration.

- a. **Capital Cost:** \$4,600 to \$7,400 per  $\text{m}^3/\text{sec}$  (\$2.20 to \$3.50 per scfm)
- b. **O & M Cost:** \$1,500 to \$18,000 per  $\text{m}^3/\text{sec}$  (\$0.70 to \$8.50 per scfm), annually
- c. **Annualized Cost:** \$2,800 to \$29,000 per  $\text{m}^3/\text{sec}$  (\$1.30 to \$13.50 per scfm), annually
- d. **Cost Effectiveness:** \$0.47 to \$440 per metric ton (\$0.43 to \$400 per short ton), annualized cost per ton per year of pollutant controlled

- Wikimedia Commons. (July 16, 2015). *Cyclone Separator* [Online].

Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Cyclone\\_separator.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Cyclone_separator.svg)

- R. Wolfson. *Energy, Environment and Climate*, 2nd ed. New York, U.S.A.: Norton, 2012

- US EPA. (July 16, 2015). *Air Pollution Control Technology Fact Sheet* [Online].

Available: <http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir1/fcyclon.pdf>

- Kice. (July 22, 2015). *CK Cyclone Collectors* [Online]. Available: [http://www.kice.com/pdfs/CK\\_Cyclones.pdf](http://www.kice.com/pdfs/CK_Cyclones.pdf)

- Simerics. (July 21, 2015). *Cyclonic Separator* [Online].

Available: [http://www.simerics.com/animation/cyclone\\_ani.gif](http://www.simerics.com/animation/cyclone_ani.gif)

- Ανδρίτσος Ν. Εισαγωγή στον έλεγχο της σωματιδιακής ρύπανσης-Κυκλώνες

Available: [http://blogs.sch.gr/sachinidi/files/2012/05/4-Particulatecontrol\\_2\\_1.pdf](http://blogs.sch.gr/sachinidi/files/2012/05/4-Particulatecontrol_2_1.pdf)

- Nazaroff & Alvarez-Cohen and Mihelcic & Zimmerman. *Gaseous Emission-Control Technologies (Air-Quality Technology)*. Available: <https://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/courses/engs37/Cyclones.pdf>

- Ξενίδης Α. Τεχνολογία επεξεργασίας αέριων αποβλήτων. Υπολογισμός κυκλώνων.

Available: [http://www.metal.ntua.gr/index.pl/notes7d2d20d8\\_gr](http://www.metal.ntua.gr/index.pl/notes7d2d20d8_gr)