

ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ: *“ ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ
ΕΛΕΓΧΟΥ”*

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΛΙΩΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΙΣΤΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2000

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΣΕΛ.
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ	4
1.1 Λίγη από την ιστορία του ελέγχου της ατμοσφαιρικής μόλυνσης	5
1.2 Γιατί το ξαφνικό ενδιαφέρον το 1967-1970;	6
1.3 Απομάκρυνση του μολυσμένου αέρα ή έλεγχος εκπομπών;	9
1.4 Ένα πρόβλημα ή μια οικογένεια προβλημάτων;	10
1.5 Εκπομπές, μεταφορά, παραλήπτες	13
1.6 Μονάδες και πρότυπα	16
2. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ	18
2.1 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην ανθρώπινη υγεία	18
2.1.1 Πειράματα σε ζώα	24
2.1.2 Σύντομη έκθεση εθελοντών	29
2.1.3 Επιδημιολογία	29
2.1.4 Κανονισμοί για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	32
2.2 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην ιδιοκτησία	36
2.3 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην ορατότητα	38
3. ΝΟΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΦΙΛΟΣΟΦΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ	46
3.1 Νόμοι και κανονισμοί για την μόλυνση του αέρα	46
3.2 Φιλοσοφίες σχετικά με τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα	49
3.3 Οι τέσσερις φιλοσοφίες	49
3.3.1 Η φιλοσοφία του προτύπου εκπομπών	50
3.3.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προτύπων εκπομπών	54
3.3.2 Η φιλοσοφία του προτύπου ποιότητας αέρα	59
3.3.2.1 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της φιλοσοφίας του προτύπου ποιότητας αέρα	61
3.3.3 Η φιλοσοφία του φόρου εκπομπών	64
3.3.4 Η φιλοσοφία του κόστους - ωφέλειας	67

3.4	Έλεγχος αγοράς και δικαιώματα εκπομπής	71
3.5	Οι κύριοι αμερικανικοί νόμοι για τη μόλυνση του αέρα	73
4.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	
4.1	Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα	76
4.2	Πηγαίνοντας το αντιπροσωπευτικό δείγμα στον ανιχνευτή	80
4.3	Καθαρισμός συγκέντρωσης	82
4.4	Εύρεση μέσου όρου	83
4.5	Προσδιορισμός ρυθμών ροής ρυπαντή	88
4.6	Ισοκινητική δειγματοληψία	91
4.7	Παράγοντες εκπομπής	92
4.8	Ορατές εκπομπές	97
5.	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΜΙΚΡΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	101
5.1	Συσκευές συγκέντρωσης τοίχου	101
5.1.1	Εγκαταστάσεις βαρύτητας (GRAVITY SETTLERS)	102
5.1.2	Φυγόκεντρος διαχωριστήρας	110
5.1.3	Ηλεκτροστατικοί Μηχανισμοί Καθίζησης (ESP)	125
5.2	Συσκευές Τμηματοποίησης της Συγκέντρωσης	150
5.2.1	Φίλτρα επιφανείας	150
5.2.2	Φίλτρα βάθους	168
5.2.3	Συσκευές συλλογής λεπτών σωματιδίων σε ρευστή μορφή για τον έλεγχο των εν αιωρήσει σωματιδίων	181
5.2.3.1	Συλλογή σωματιδίων σε μια καταιγίδα	183
5.2.3.2	Συλλογή σωματιδίων σε συσκευή συλλογής λεπτών σωματιδίων σε ρευστή μορφή (scrubber) εγκάρσιας ροής, αντιρροής και συρροής.	187
5.2.3.3	Πτωτική πίεση στα (scrubbers)	201
5.3	Επιλογή ενός συλλεκτήρα	206
	REFERENCES	208

1⁰ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Η μόλυνση του αέρα είναι η παρουσία ανεπιθύμητων υλικών στον αέρα, σε ποσότητες αρκετά μεγάλες ώστε να προκαλέσουν βλαβερές συνέπειες. Αυτός ο ορισμός δεν περιορίζει την μόλυνση του αέρα σε ανθρώπινες αιτίες, παρόλο που συνήθως μιλάμε μόνο γι'αυτό. Τα ανεπιθύμητα υλικά μπορούν να καταστρέψουν την υγεία των ανθρώπων, ή τη βλάστηση ή ανθρώπινες κατασκευές ή το παγκόσμιο περιβάλλον, προκαλώντας συγχρόνως αισθητική προσβολή εξαιτίας του καφέ και του γκρι αέρα ή των δυσάρεστων οσμών. Πολλά από τα βλαβερά υλικά εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από πηγές που δεν μπορούν, τουλάχιστον στα χρόνια μας, να ελεγχθούν από τον άνθρωπο. Ωστόσο, στις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές της υδρογείου, ιδιαίτερα στις βιομηχανικές χώρες, οι αρχικές πηγές της μόλυνσης είναι οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Αυτές οι δραστηριότητες σχετίζονται στενά με τον τρόπο ζωής μας. Η ελαχιστοποίηση αυτών των δραστηριοτήτων θα προκαλούσε τέτοια δραματική μείωση στην ποιότητα ζωής μας που κάτι τέτοιο σπάνια λαμβάνεται υπόψη. Αυτό που προτείνεται στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες είναι η συνέχιση των δραστηριοτήτων και ο έλεγχος των βλαβερών εκπομπών από τις ίδιες.

1.1 Λίγη από την ιστορία του ελέγχου της ατμοσφαιρικής μόλυνσης.

Παρ' ότι, ο έλεγχος για την μόλυνση της ατμόσφαιρας ξεκινάει σχεδόν από τον 13^ο αιώνα, η μεγαλύτερη προσπάθεια έχει γίνει από το 1945. Πριν από τότε, άλλα θέματα βρίσκονταν υψηλότερα στη λίστα προτεραιοτήτων της κοινωνίας (και συνεχίζουν να παραμένουν στις αναπτυσσόμενες χώρες). Στις δεκαετίες του 1930 και 1940, ένα εργοστάσιο που έβγαζε από τα φουγάρα του πολύ καπνό θεωρούνταν σημάδι ευημερίας, και μερικά κυβερνητικά πρακτορεία το συμπεριέλαβαν στα επίσημα σύμβολα τους.

Πριν το 1945, ο έλεγχος στη βιομηχανική μόλυνση του αέρα περιοριζόνταν στον έλεγχο των εκπομπών των ρύπων μεγάλων εργοστασίων που είχαν οδηγήσει σε διαμάχες με τους γείτονες των εργοστασίων αυτών.

Μεταξύ του 1945 και του 1969 και ενώ η γνώση σχετικά με τα προβλήματα του περιβάλλοντος αυξάνονταν, μερικές τοπικές προσπάθειες για έλεγχο της μόλυνσης γίνονταν, ιδιαίτερα στο Pittsburgh, Los Angeles και στο St Louis. Μεταξύ του 1963 και του 1967, η κυβέρνηση άρχισε να λαμβάνει υπόψη της και να συντονίζει τοπικές και κρατικές προσπάθειες για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα.

Στο 1969 και το 1970 έγινε στις Ηνωμένες Πολιτείες η αφύπνιση σχετικά με τα προβλήματα του περιβάλλοντος. Οι μαθητές του σήμερα ίσως να μην μπορούν να καταλάβουν πόσο γρήγορη και δραστική η αλλαγή αυτή ήταν. Μπορείτε να συγκρίνετε μερικές «μεγάλες» εφημερίδες από το 1968 με μερικές από το 1970. Περιβαντολογικά θέματα, σπανίως, αναφέρονταν σε εφημερίδες του 1968, αλλά οι ίδιες εφημερίδες είχαν μια ιστορία σχετικά με το περιβάλλον κάθε μέρα από το 1970. Τότε έγινε το πέρασμα δυο πολύ σημαντικών νόμων του National Environmental Policy Act και της Clean Air Act το 1970, οι οποίες είχαν

δραστικά αποτελέσματα και άλλαξαν τον τρόπο αντιμετώπισης της μόλυνσης του αέρα. Παρόμοιες αλλαγές έγιναν σε όλο τον βιομηχανοποιημένο κόσμο, με παρόμοια αποτελέσματα.

Στα τέλη του 1980, ένα νέο θέμα εισήλθε στην αρένα της μόλυνσης του αέρα: Παγκόσμια μόλυνση του αέρα. Μέχρι το 1980, τα περισσότερα προβλήματα θεωρούνταν ως τοπικά. Οι τότε μολυσματικοί ρύποι είχαν σύντομη διάρκεια ζωής και αποβάλλονταν σε τόσο μικρές ποσότητες που δεν θεωρούνταν πρόβλημα παρά μόνο για την περιοχή που γινόταν η εκπομπή τους. Τότε, φαίνονταν λογικό να αφήνουν τις τοπικές αρχές και τις κυβερνήσεις να αντιμετωπίζουν το πρόβλημα. Στη δεκαετία του 1980 τρία προβλήματα προέκυψαν σχετικά με την διάρκεια ζωής των ρύπων και σχετικά με τους ρύπους που μεταφέρονται σε μεγάλη απόσταση μέχρι να κάνουν τη ζημιά τους η όξινη βροχή, η καταστροφή του όζοντος και η συσσώρευση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Οι νόμοι που θεσπίστηκαν στην διάρκεια του 1970 για την αντιμετώπιση των τοπικών προβλημάτων από την μόλυνση του αέρα φαίνονται ανίσχυροι να αντιμετωπίσουν τέτοια διεθνή και παγκόσμια προβλήματα.

1.2 Γιατί το ξαφνικό ενδιαφέρον το 1967 - 1970;

Γιατί η αφύπνιση σχετικά με την μόλυνση του αέρα αυξήθηκε το 1969-1970; Αυτό είναι ένα θέμα για ιστορική διαμάχη αλλά κάποιοι λόγοι είναι προφανείς. Ένα μεγάλο μέρος από τις ενέργειες που γίνονταν εναντίον του πόλεμου του Βιετνάμ, μετατράπηκαν σε ενέργειες υπέρ της προστασίας του περιβάλλοντος και μάλιστα εντελώς ξαφνικά τα M.M.E άρχισαν να ασχολούνται με το θέμα σχεδόν τον ίδιο καιρό που η πετρελαιοκηλίδα της Santa Barbara έδινε ένα ορατό παράδειγμα για το

πρόβλημα της μόλυνσης και τραβούσε το παγκόσμιο ενδιαφέρον και προσοχή. Υπάρχουν βέβαια και άλλες αιτίες.

Η ανησυχία για το περιβάλλον συχνά θεωρείται μια πολυτέλεια που μόνο οι πλούσιες χώρες μπορούν να έχουν και οι Η.Π.Α έχουν. Στους ανθρώπους που ανησυχούν για το επόμενο γεύμα τους ή αν θα έχουν σπίτι ή ιατρική φροντίδα, η μόλυνση του αέρα είναι ασήμαντη. Στους ανθρώπους όμως που οι βασικές ανάγκες έχουν καλυφθεί, η μόλυνση του αέρα μπορεί να είναι μεγάλη αιτία για ανησυχία. Οι άνθρωποι που συμμετείχαν στην περιβαντολογική αφύπνιση ανήκαν στην μεσαία και ανώτερη τάξη περιλαμβάνοντας πολλούς φοιτητές.

Επιπλέον όταν η αρχική αιτία θανάτου ήταν μολυσματική ασθένεια όπως γρίπης χολέρα και τυφοειδής πυρετός, οι επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην υγεία, είναι αργές και αθροιστικές αλλά σπάνια παρατηρούνταν. Καθώς έχουμε μάθει να θεραπεύουμε τέτοιες ασθένειες, έχουμε διπλασιάσει τον μέσο όρο ζωής μας, επιβιώνοντας τόσο ώστε να πεθαίνουμε από μακροχρόνιες ασθένειες όπως αρτηριοσκλήρυνση, καρδιακές δυσλειτουργίες, εμφράγματα, εμφύσημα και καρκίνο, οι οποίες όλες σχετίζονται με περιβαντολογικούς λόγους. Η ίδια παρατήρηση μπορεί να γίνει σχετικά με το κάπνισμα. Προτού μάθουμε να θεραπεύουμε τις μεταδοτικές ασθένειες, το κάπνισμα πιθανώς είχε πολύ μικρή επίδραση στη διάρκεια ζωής. Τώρα που άλλες αιτίες θανάτου έχουν πρακτικά εξαιρεθεί ζούμε τόσο, ώστε το κάπνισμα να έχει πραγματική επίδραση στην διάρκεια ζωής. Έτσι συμβαίνει και με την μόλυνση του αέρα.

Είναι χρήσιμο να αντιπαραθέσουμε την κατάσταση της μόλυνσης του αέρα με την μόλυνση του νερού, για την οποία είχαμε ενεργά προγράμματα για πάνω από έναν αιώνα. Τα χειρότερα προβλήματα με το νερό προκλήθηκαν με την μόλυνση του πόσιμου νερού με ανθρώπινα απόβλητα. Αυτό γρήγορα μετέδωσε χολέρα, τύφο και δυσεντερίες. Αυτές

οι ασθένειες εμφανίζονται δραματικά γρήγορα και συχνά οδηγούν στο θάνατο. Η σχέση τους με το μολυσμένο νερό φαίνεται εύκολα. Γι' αυτό το λόγο ανταποκριθήκαμε στη μόλυνση του νερού πιο εύκολα, πιο γρήγορα και πιο δυναμικά από ότι στην μόλυνση του αέρα.

Οι αποδείξεις για τις επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην υγεία είναι λιγότερο δραματικές από αυτές της μόλυνσης του νερού. Κάποιος μετά από ένα ξέσπασμα χολέρας μπορεί, βλέποντας ένα σορό από πτώματα να πει ότι πέθαναν από μόλυνση του νερού. Αυτό όμως σπάνια μπορεί να το πει κανείς για την μόλυνση του αέρα. Οι επιδράσεις αυτές μοιάζουν πιο πολύ με αυτές του καπνίσματος. Σπάνια λεμε ότι κάποιος πέθανε από το κάπνισμα, αλλά ξέρουμε ότι το κάπνισμα έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την διάρκεια ζωής του καπνιστή και αυξάνει το ποσοστό εμφάνισης ορισμένων ασθενειών τόσο στους ίδιους τους καπνιστές όσο και στους παθητικούς καπνιστές. Το γεγονός ότι τόσο πολλοί άνθρωποι – συμπεριλαμβάνοντας και μορφωμένους ανθρώπους – καπνίζουν δείχνει ότι αυτό το επιχείρημα δεν είναι τόσο πειστικό όσο η θεά των πτωμάτων μετά από μια επιδημία που προκλήθηκε από μόλυνση του νερού. Πολλοί άνθρωποι δεν παίρνουν στα σοβαρά το χάσιμο της ζωής και της υγείας εξαιτίας της μόλυνσης του αέρα, όπως και εξαιτίας του καπνίσματος, γιατί πιστεύουν ότι αυτό είναι « απλώς στατιστικό».

Οι γνώσεις του κοινού για την μόλυνση του αέρα αναπτύχθηκε σε μια περίοδο που το πρόβλημα ήταν λιγότερο σοβαρό από πολλές απόψεις από ότι τα προηγούμενα χρόνια. Πριν την εισαγωγή του φυσικού αερίου σαν πρωταρχικό καύσιμο στις περισσότερες πόλεις των Η.Π.Α, ο αέρας τους χειμώνες ήταν πολύ πιο μολυσμένος από σκόνη κάρβουνου από ότι τώρα. Επίσης στις αρχές του αιώνα οι εκπομπές διοξειδίου του θείου σε πόλεις όπως η Tacoma, Salt Lake City, El Paso και Anaconda ήταν πολύ περισσότερες από ότι τώρα. Εκείνο τον καιρό πρέπει να υπήρχαν

διαμαρτυρίες για αυτές τις πηγές μόλυνσης αλλά όχι στο επίπεδο που υπήρχαν πριν μερικά χρόνια.

Αυτή η αύξηση του ενδιαφέροντος μερικώς εξηγείται από τον αυξημένο πλούτο της χώρας, όπως αναφέρθηκε πιο πριν. Κάποια στιγμή πιστέψαμε ότι οι ρύποι ήταν απαραίτητα συστατικά καλής οικονομίας. Τώρα ξέρουμε ότι τα πράγματα δεν είναι έτσι. Ομοίως, κάποτε νομίζαμε ότι δεν μπορούσαμε να κάνουμε τίποτε. Τώρα που μάθαμε να διαβάζουμε το γενετικό κώδικα, που στείλαμε τους ανθρώπους στο φεγγάρι είναι δύσκολο να πούμε ότι δεν μπορούμε να ελέγξουμε την μόλυνση του αέρα.

1.3 Απομάκρυνση του μολυσμένου αέρα ή έλεγχος εκπομπών;

Θα αναφέρουμε παρακάτω ένα αριθμητικό παράδειγμα το οποίο αναφέρεται στο LOS ANGELES μιας και αυτή η πόλη είναι η πρώτη στην οποία δοκιμάστηκαν όλες οι μέθοδοι ελέγχου της μόλυνσης.

Παράδειγμα

Η περιοχή του Los Angeles είναι 4083 τετραγωνικά μίλια. Το πολύ μολυσμένο στρώμα αέρα θεωρείται να είναι 2000 πόδια πάχος κατά μέσο όρο. Μια λύση στα προβλήματα του Los Angeles θα ήταν να αντληθεί ο μολυσμένος αέρας. Ας υποθέσουμε ότι αντλούμε έξω από την πεδιάδα του Los Angeles κάθε μέρα τον μολυσμένο αέρα και ότι τον στέλνουμε 50 μίλια στην έρημο κοντά στο Palm Springs (υποθέτουμε ότι οι κάτοικοι του Palm Springs δεν θα παραπονεθούν). Ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα σε κάθε σωλήνα είναι 40 ft/s. Υπολογίστε την απαιτούμενη διάμετρο του σωλήνα.

Λύση:

Ο ρυθμός ροής που απαιτείται θα είναι:

$$Q = \frac{AH}{\Delta t} = \frac{4083 \text{ mi}^2 \cdot 2000 \text{ ft} \cdot (5280 \text{ ft} / \text{mi})^2}{24h \cdot 3600s/h} = 2.63 \times 10^9 \frac{\text{ft}^3}{s} = 7.47 \times 10^7 \frac{\text{m}^3}{s}$$

και έτσι, η απαιτούμενη διάμετρος του σωλήνα θα είναι :

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\rho V}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.63 \times 10^9 \text{ ft}^3 / s}{\rho \times 40 \text{ ft} / s}} = 9158 \text{ ft} = 2791 \text{ m}$$

Έτσι, η διάμετρο αυτή (2791m) είναι περίπου έξι φορές το ύψος του υψηλότερου οικοδομήματος που έχει ποτέ φτιαχτεί και κατά πολύ ξεπερνά τις ικανότητες μας στην μηχανική. Παρόμοιοι υπολογισμοί δείχνουν ότι η ενέργεια που απαιτείται για να οδήγησει τον αέρα έξω από το Los Angeles είναι κατά πολλή μεγαλύτερη από την ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί την πεδιάδα του Los Angeles. Είναι απίθανο να λύσουμε το πρόβλημα του μολυσμένου αέρα με αυτό τον τρόπο, παρ'ότι η λύση αυτή ακόμη προτείνεται. Αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα μειώνοντας τις εκπομπές.

1.4 Ένα πρόβλημα ή μια οικογένεια προβλημάτων;

Στον πίνακα 1.1 βλέπουμε τις εκτιμηθείσες εκπομπές για τους περισσότερους ρύπους που οφείλονται στον άνθρωπο το 1991. Από τον πίνακα βλέπουμε τα ακόλουθα:

1. Υπάρχουν έξι ρύποι, που είναι οι πιο κύριοι. Υπάρχουν βέβαια και άλλοι ρύποι, αλλά εκπέμπονται σε μικρότερες ποσότητες.

2. Άλλοι ρύποι προέρχονται από την κυκλοφορία (αυτοκίνητα και εξατμίσεις) και άλλοι προέρχονται κυρίως από την βιομηχανία.

3. Δεν υπάρχει όρος «Γενική μόλυνση του αέρα.» Το κοινό σκέφτεται αυτό τον όρο και αναρωτιέται εάν το πρόβλημα είναι περισσότερο βιομηχανικό (αυτοί) ή εξαιτίας των αυτοκινήτων (εμείς). Οι μηχανικοί αναγνωρίζουν ότι δεν υπάρχει μόνο μία μόλυνση του αέρα αλλά μία ομάδα προβλημάτων και ότι μερικά προβλήματα προκαλούνται κυρίως από τα αυτοκίνητα.

Το κοινό και πολλοί πολιτικοί ελπίζουν να βρουν μια απλή σύντομη, εύκολη και φθηνή λύση στο πρόβλημα. Οι μηχανικοί αναγνωρίζουν ότι είναι απίθανο να βρεθεί τέτοια λύση και οι περισσότεροι συνεχίζουν να εφαρμόζουν λύσεις σε μέρη από την οικογένεια προβλημάτων της μόλυνσης του αέρα.

4. Από το 1982 στο 1991, έχει γίνει πρόοδος στο να μειώσουν την εκπομπή μολύβδου και αξιοσημείωτη πρόοδος στο να μειώσουν τις εκπομπές άλλων σημαντικών ρύπων. Η κατάσταση των εκπομπών ρύπων μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά ως εξής:

$$\begin{pmatrix} \text{EkpompeV} \\ \text{rupwn ston} \\ \text{aera} \end{pmatrix} = pl hqusmóV \cdot \begin{pmatrix} \text{oikonomiké} \\ \text{drasthrióthta} \\ \text{aná átomó} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{ekpompeV rupwn aná} \\ \text{monáda oikonomikéV} \\ \text{drasthrióthtaV} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Πίνακας 1.1: Εκπομπές 1991(τιμές σε εκατ. Μετρικούς τόνους/χρόνο)

Πηγή	PM₁₀	SO_x	CO	NO_x	VOC_s	Pb
Κυκλοφορία Αυτοκινήτων	<i>1,51</i>	<i>0,99</i>	<i>43,99</i>	<i>7,26</i>	<i>5,08</i>	<i>0,00162</i>
Καύση	<i>1,10</i>	<i>16,55</i>	<i>4,67</i>	<i>10,59</i>	<i>0,67</i>	<i>0,00045</i>
Βιομηχανίες	<i>1,84</i>	<i>3,16</i>	<i>4,69</i>	<i>0,60</i>	<i>7,86</i>	<i>0,00221</i>
Στερεά Απορρίμματα	<i>0,26</i>	<i>0,02</i>	<i>2,06</i>	<i>0,10</i>	<i>0,69</i>	<i>0,00069</i>
Διάφορα (φωτιά, δάση)	<i>0,73</i>	<i>0,01</i>	<i>7,18</i>	<i>0,21</i>	<i>2,59</i>	<i>0,00000</i>
Σύνολο	<i>5,44</i>	<i>20,73</i>	<i>62,09</i>	<i>18,76</i>	<i>16,89</i>	<i>0,00497</i>
Ποσοστό του συνολικού 1982	<i>97%</i>	<i>101%</i>	<i>69%</i>	<i>92%</i>	<i>87%</i>	<i>9,5%</i>

Από την περιβαντολλογική αφύπνιση του 1969-1970, η σταθερή αύξηση του πληθυσμού και της οικονομικής δραστηριότητας ανά άτομο έχει συνεχιστεί, αλλά η εκπομπή ρύπων ανά μονάδα οικονομικής δραστηριότητας έχει μειωθεί σταθερά εξαιτίας των αυστηρών προγραμμάτων ελέγχου εκπομπών.

Έτσι στις περισσότερες πόλεις του κόσμου οι εκπομπές και οι μετρήσιμες συγκεντρώσεις των περισσότερων ρύπων στην ατμόσφαιρα έχουν σταθερά μειωθεί από το 1970 έως το 1998.

Η μείωση δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο πολλοί θα επιθυμούσαν ή όσο γρήγορα πολλοί είχαν προβλέψει. Άλλωστε υπάρχουν και εξαιρέσεις (π.χ. αύξηση της όξινης βροχής).

Γενικά η εγκατάσταση εξοπλισμού καλύτερου και αποδοτικότερου σχετικά με τον έλεγχο της μόλυνσης μας έχει επιτρέψει να αυξήσουμε τον πληθυσμό μας και το επίπεδο της οικονομικής δραστηριότητας μας

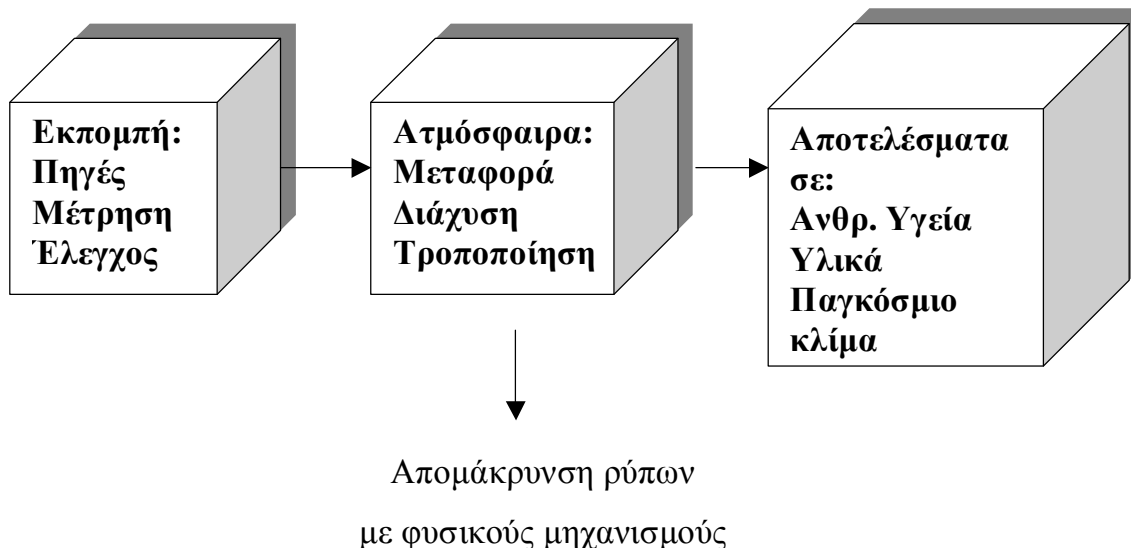
ανά άτομο, καθώς επίσης και να μειώσουμε τις μετρήσιμες συγκεντρώσεις των ρύπων. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα βήματα για τον έλεγχο της μόλυνσης είναι και πιο φθηνά και εύκολα σήμερα από αυτά που θα γίνουν στο μέλλον.

1.5 Εκπομπές, μεταφορά, παραλήπτες.

Η φιγούρα 1.1 είναι μια σχηματική παράσταση της διαδικασίας της μόλυνσης αέρα. Οι ρύποι μεταφέρονται, διαλύονται και αλλάζουν χημικά ή φυσικά στην ατμόσφαιρα και τελικά φτάνουν σε κάποιον παραλήπτη, όπου βλάπτουν την υγεία, την ιδιοκτησία ή κάποιο μέρος του περιβάλλοντος. Μερικοί από τους ρύπους απομακρύνονται με φυσικό τρόπο από την ατμόσφαιρα ώστε να μην βρουν ποτέ κάποιον παραλήπτη.

Ότι γίνεται για κάποια πηγή ή μορφή ρύπου είναι διαφορετικό για κάποια άλλη ή κάποια άλλη μορφή ρύπου. Μερικές από αυτές τις διαφορές βγαίνουν από κάποιο ιστορικό ατύχημα ή από τις διάφορες πηγές και διάφορους τεχνολογικούς ελέγχους των ποικίλων σημαντικών ρύπων. Βλέποντας αυτές τις πολλές λεπτομέρειες θα ήταν πρόπον για κάποιον να επανέρχεται στη φιγούρα 1.1 για να βλέπει πως οι συγκεκριμένες λεπτομέρειες ταιριάζουν στη γενική σχηματική απεικόνιση της μόλυνσης του αέρα που φαίνεται παρακάτω.

Στη φιγούρα 1.1 βλέπουμε επίσης ένα σημαντικό λόγο γιατί η μόλυνση του αέρα είναι διαφορετική από την μόλυνση του νερού ή την βιομηχανική υγιεινή. Εάν η ίδια φιγούρα είχε γίνει για την μόλυνση του νερού το κουτί της μεταφοράς θα είχε αντικατασταθεί από ένα κουτί για μεταφορά υπόγειων νερών ή ρυακιών.



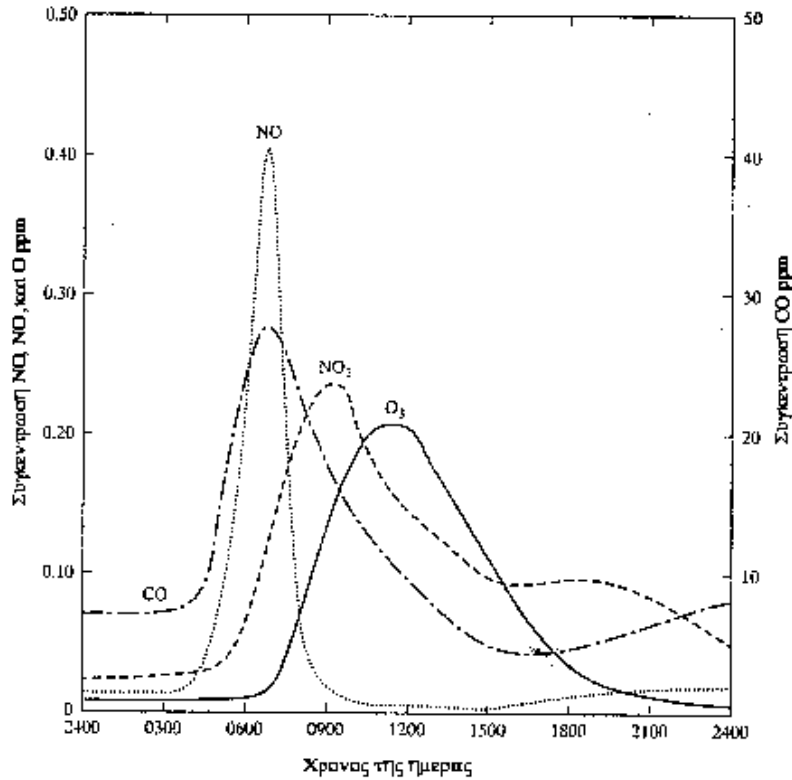
Φιγούρα 1.1:

Σχηματική παράσταση της μόλυνσης του αέρα, που δείχνει τις αλληλοσυσχετίσεις ανάμεσα στις εκπομπές, την μεταφορά, τη διάχυση, την τροποποίηση και τις επιδράσεις.

Αυτοί οι μηχανισμοί είναι πράγματι περίπλοκοι αλλά δεν πλησιάζουν σε περιπλοκότητα τη μεταφορά στην ατμόσφαιρα. Θα δούμε επίσης ότι ο χημικός ή βιολογικός τύπος με τον οποίο εκπέμπονται οι ρύποι του νερού είναι αυτός που προκαλεί τις βλαβερές επιδράσεις. Το ίδιο δεν ισχύει για την μόλυνση του αέρα: πολλοί από τους σημαντικούς ρύπους σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα και ονομάζονται δευτερεύοντες ρύποι για να τους ξεχωρίσουμε από τους αρχικούς ρύπους. Η βιομηχανική υγιεινή είναι υπεύθυνη για την προστασία των εργαζόμενων στα εργοστάσια και στα αλλιά μέρη εργασίας και συχνά ασχολείται με μερικές εκπομπές ρύπων αλλά σπάνια με τους δευτερεύοντες.

Αρκετές από αυτές τις ιδέες απεικονίζονται στην φιγούρα 1.2 όπου βλέπουμε τις συγκεντρώσεις τεσσάρων ρύπων σε μια ημέρα. Το CO και το NO είναι οι πρωταρχικοί ρύποι και εκπέμπονται κυρίως από τα αυτοκίνητα όπως και οι HC που δεν φαίνονται σε αυτή την εικόνα. Οι

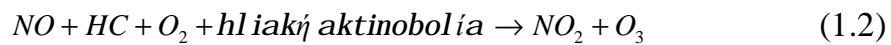
μεγάλες συγκεντρώσεις του CO και του NO σημειώνονται τις πρωινές ώρες όπου έχουμε και την μεγαλύτερη κίνηση των αυτοκινήτων.



Φιγούρα 1.2:

Ομαλές μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των επιλεγμένων ρυπαντών. Παρατηρήστε την πρόοδο $NO \rightarrow NO_2 \rightarrow O_3$ και την διαφορετική συμπεριφορά του CO, το οποίο υφίσταται ραγδαίες χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα.

Το NO_2 και το O_3 είναι δευτερεύοντες ρύποι που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα με σύνθετες αντιδράσεις που συνοψίζονται ως εξής :



Η πιο μεγάλη συγκέντρωση του NO_2 συμβαίνει πριν την μεγαλύτερη συγκέντρωση του O_3 , γιατί η σειρά των αντιδράσεων που είναι πιο περίπλοκη από την (1.2) σχηματίζει πρώτα το NO_2 και έπειτα O_3 . Η μεγαλύτερη συγκέντρωση CO που όπως φαίνεται από το σχήμα είναι περίπου 70 φορές τη μεγαλύτερη συγκέντρωση του NO , δεν μειώνεται τόσο γρήγορα όσο του NO , γιατί η συγκέντρωση του CO μειώνεται μόνο με ατμοσφαιρική ανάμιξη και διάλυση, ενώ η συγκέντρωση του NO μειώνεται από ανάμιξη, διάλυση και χημική αντίδραση (1.2).

Η απογευματινή κίνηση των αυτοκινήτων προκαλεί επίσης αυξήσεις στο NO και στο CO , αλλά οι μετρήσιμες συγκεντρώσεις δεν είναι τόσο μεγάλες όσο οι μετρήσιμες πρωινές, γιατί η μέση ταχύτητα των ανέμων είναι μεγαλύτερη και η ατμοσφαιρική ανάμιξη είναι μεγαλύτερη το απόγευμα από το πρωί, οπότε προκαλείται και γρηγορότερη διάλυση. Έχει επίσης παρατηρηθεί, ότι η υψηλότερη συγκέντρωση O_3 συνήθως συμβαίνει 30 με 60 μιλιά πιο κάτω από το μέρος που το πρωί είχε μεγαλύτερη εκπομπή NO και HC , γιατί η μολυσμένη μάζα του αέρα μπορεί να οδηγήσει τον άνεμο τόσο μακριά μέσα σε μια μέρα. Έτσι, βλέπουμε ότι η χειρότερη έκθεση με ρύπους μπορεί να γίνει σε διαφορετική πόλη ή χώρα από αυτήν που έγινε η εκπομπή ρύπων.

1.6 Μονάδες και πρότυπα.

Ιστορικά οι επιστήμονες χρησιμοποιούσαν το διεθνές σύστημα ενώ οι μηχανικοί το αγγλικό. Οι επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων των αυτοκινήτων δηλώνονται σε gr/mile , ένα μικτό Μετρικό-Αγγλικό σύστημα. Αυτό φαίνεται παράλογο, αλλά δεν είναι. Οι εκπομπές που χρησιμοποιούνται σε μαθηματικά μοντέλα για τον έλεγχο της ρύπανσης δηλώνονται σε gr/s .

Στην ορολογία των αυτοκίνητων έχουμε όμως miles που διανύθηκαν την ώρα και τα πρότυπα σχετικά με τις εκπομπές ρύπων χρησιμοποιούν το miles/gallon. Ο σωστός μηχανικός δέχεται όλες τις Μονάδες, τις ελέγχει και τις δηλώνει.

Στις Η.Π.Α. μια συγκέντρωση εκφρασμένη σε ppm είναι σχεδόν πάντα ανά mol εάν πρόκειται για αέριο και ανά gr εάν πρόκειται για υγρό ή στερεό. Αυτή η σημασία για το ppm συνεχίζει να είναι πηγή σύγχυσης όταν τόσα αέρια όσο και στερεά και υγρά εμφανίζονται στο ίδιο πρόβλημα. Όταν αναφερόμαστε σε αέρια υπάρχει μόνο μια επιλογή για την πίεση η ατμόσφαιρα. Δυστυχώς, δεν υπάρχει συμφωνία ως προς το ποια θερμοκρασία θα χρησιμοποιείται. Έτσι χρησιμοποιούνται οι 0°C , 18°C , 20°C και 25°C . Σε αυτήν την εργασία εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά, η πίεση των αερίων θα θεωρείται ως 1 ατμόσφαιρα και η θερμοκρασία 20°C ($=68^{\circ}\text{F}$). Δυστυχώς πολλοί χρησιμοποιούν τη θερμοκρασία των 25°C ($=77^{\circ}\text{F}$).

2⁰ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Κάθε μηχανικός ξεκινάει κάθε εργασία ρωτώντας μεταξύ των άλλων πραγμάτων «γιατί τα κάνουμε όλα αυτά;». Ελέγχουμε τη μόλυνση του αέρα γιατί προκαλεί βλαβερές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, στην αισθητική και στο παγκόσμιο κλίμα. Αυτό το σύντομο κεφάλαιο ανακεφαλαιώνει ότι ξέρουμε γι' αυτές τις επιδράσεις στην υγεία, την ιδιοκτησία και την ορατότητα.

2.1 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην ανθρώπινη υγεία.

Στο Bhopal της Ινδίας το Δεκέμβριο του 1984, η απελευθέρωση ενός βλαβερού αερίου από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα σκότωσε περίπου 2500 άτομα. Παρόμοιες διαρροές υδρόθειου από αντιδραστήρες γκαζιού έχουν σκοτώσει χιλιάδες ανθρώπων. Αυτά τα τραγικά γεγονότα τραβούν την παγκόσμια προσοχή.

Συνήθως αυτά δεν θεωρούνται σαν γεγονότα μόλυνσης του αέρα, αλλά σαν βιομηχανικά ατυχήματα. Οι βλάβες στην ανθρώπινη υγεία που προκαλούνται από μολύνσεις του αέρα ανήκουν σε πολύ διαφορετικό τύπο. Τα υλικά που σχετίζονται με τη μόλυνση δεν είναι τόσο πολύ τοξικά και συνήθως δεν απελευθερώνονται σε τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις που μπορούν να προκαλέσουν τέτοιες καταστροφές. Οι βλάβες δεν προκαλούνται με μια απλή έκθεση στο αέριο αλλά από την

επαναλαμβανόμενη έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ο πίνακας 2.1 περιέχει τα αέρια που σύμφωνα με την νομοθεσία η έκθεση σ'αυτά είναι βλαβερή για την υγεία. Η πλειοψηφία των προσπαθειών πάνω σ'αυτό το θέμα συγκεντρώνεται στον έλεγχο των ρύπων που βρίσκονται σ'αυτή την λίστα.

Τουλάχιστον από το 1493 – 1541 την εποχή του Paracelsus οι άνθρωποι ξέρουν ότι δεν έχει νόημα να μιλάμε για οποιαδήποτε ουσία όσο βλαβερή και αν είναι εκτός αν την προσδιορίσουμε για πόση ακριβώς ποσότητα ουσίας μιλάμε. Ο Paracelsus είπε ότι: «Υπάρχει δηλητήριο σε όλα, και τίποτα δεν είναι χωρίς δηλητήριο. Είναι η δόση που το κάνει βλαβερό ή όχι». Το ίδιο ισχύει και για την μόλυνση του αέρα. Για να κάνουμε δηλώσεις που να έχουν νόημα σχετικά με την επίδραση της μόλυνσης του αέρα στην ανθρώπινη υγεία, πρέπει να σκεφτούμε την δοσολογία που λαμβάνουν οι άνθρωποι:

$$(\Delta osol ogía) = \int \left(\frac{sugkéntrwshston}{anapneúsimo aéra} \right) \cdot d(crónoV) \quad (2.1)$$

Η πολύχρονη και χαμηλής συγκέντρωσης έκθεση στα βλαβερά αέρια οδηγεί σε χρόνιες επιδράσεις. Οι σύντομες αλλά υψηλής συγκέντρωσης έκθεση οδηγεί σε οξείες επιδράσεις και αυτές συμβαίνουν μόνο στα βιομηχανικά ατυχήματα (όπως η τραγωδία στο Bhopal) ή σε επείγοντα επεισόδια μόλυνσης του αέρα. Το τελευταίο συνέβαινε περιστασιακά στο παρελθόν, αλλά είναι σπάνιο σε χώρες με σύγχρονους κανονισμούς ελέγχου της μόλυνσης.

Πίνακας 2.1: Οι ρυπαντές του αέρα πιστεύεται ότι είναι επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και υπόκεινται συνήθως σε ρυθμίσεις

Οι ρυπαντές ρυθμίζονται από τους Εθνικούς Κανονισμούς για την Ποιότητα του Αέρα του Περιβάλλοντος. Αυτά καλούνται κριτήρια ρυπαντών επειδή πριν την έκδοση των κανονισμών, είχαν εκδοθεί έγγραφα τα οποία ονομάζονταν Κριτήρια Ποιότητας του αέρα.

Οξειδία του θείου

Λεπτή ύλη σωματιδίων

Μονοξείδιο του άνθρακα

Όζον

Διοξείδιο του Αζώτου

Μόλυβδος

Οι ρυπαντές που ρυθμίζονται από τους Εθνικούς Κανονισμούς Εκπομπής Επικίνδυνων Αέριων Ρυπαντών. Αυτοί καλούνται επικίνδυνοι αέριοι ρυπαντές ή τοξικά αέρια.

Αμίαντος

Βενζόλιο

Εκπομπές φούρνου κώκ

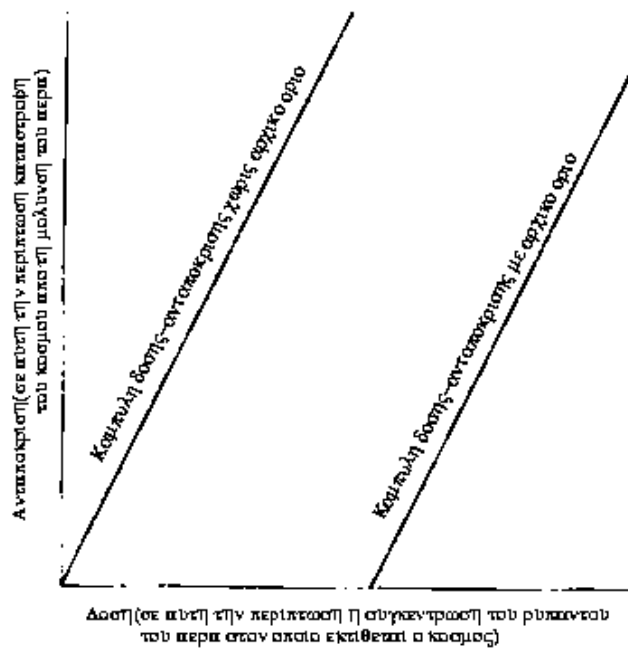
Ανόργανο αρσενικό

Υδράργυρος

Ραδιονουκλίδια (radionuclides)

Χλωριούχο βινύλιο

Για να καθορίσουμε ποια δοσολογία είναι επικίνδυνη, κατασκευάσαμε την καμπύλη ανταπόκρισης της δόσης. Μια τέτοια καμπύλη μπορεί να γίνει για κάθε ρύπο ξεχωριστά και όχι γενικά για τη μόλυνση του αέρα. (Η συνέργεια, δυο ρύποι δηλαδή μαζί που οι επιδράσεις τους είναι μεγαλύτερες απ'ότι το άθροισμα των επιδράσεων των δύο ρύπων ξεχωριστά μπορεί να συμβεί αλλά πολύ σπάνια). Η φιγούρα 2.1 είναι μια καμπύλη ανταπόκρισης της δόσης για ένα υποθετικό ομογενή πληθυσμό που έχει εκτεθεί σε έναν μόνο υποθετικό ρύπο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



Φιγούρα 2.1:

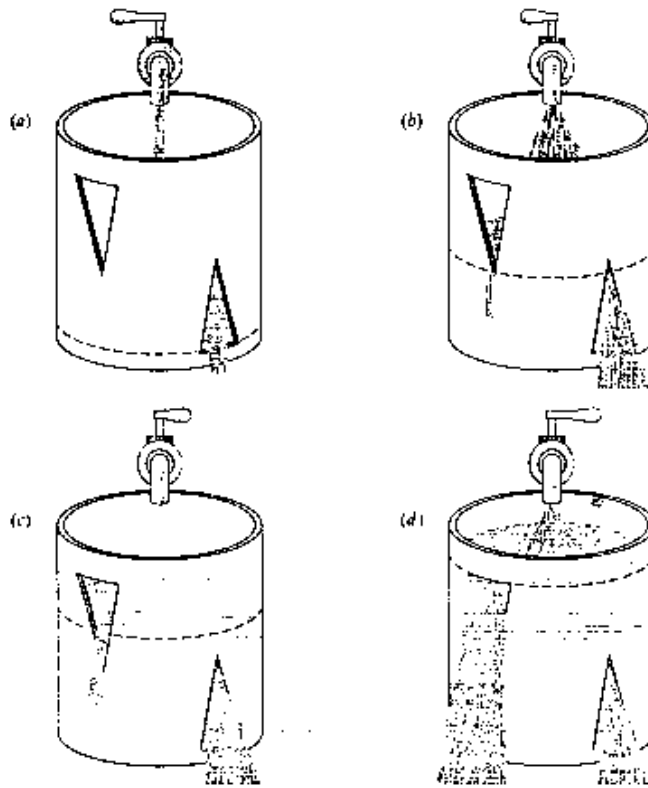
Καμπύλες δόσης-ανταπόκρισης με αρχικό όριο και χωρίς αρχικό όριο. Οι ευθείες γραμμές είναι μια αποδοχή άγνοιας· γενικά δεν γνωρίζουμε τα πραγματικά σχήματα αυτών των καμπύλων.

Τα περισσότερα πράγματα σχετικά μ'αυτή την καμπύλη τα γνωρίζουμε από τη φαρμακολογία, όπου σε πειράματα έχουν δοθεί προσεχτικά μετρημένες δόσεις ρύπων και έχουν μετρηθεί οι αντιδράσεις. Από τη θεωρία και τα πειράματα γνωρίζουμε ότι η κοινή καμπύλη είναι αυτή που δεν έχει αρχή και που περνά από το σημείο (0,0) του σχήματος. Ωστόσο, στη βιομηχανική υγιεινή, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει κάποια συγκέντρωση ρύπων γνωστή ως «αρχική τιμή» που «αντιπροσωπεύει καταστάσεις κάτω από τις οποίες πιστεύεται ότι όλοι οι εργάτες μπορούν να εκτεθούν επανειλημμένα μέρα με τη μέρα, χωρίς κάποιο αντίθετο αποτέλεσμα.» Αυτές οι τιμές γνωστές ως «αρχικές οριακές τιμές» (TLV) καθορίζονται από τη βιομηχανική υγιεινή. Οι βιομηχανικοί αντιδραστήρες δεν επιτρέπεται να εκθέτουν τους εργαζόμενους σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τις TLV_s. Αυτές οι TLV_s δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συγκεντρώσεις. Αντιπροσωπεύουν συγκεντρώσεις στις οποίες οι επιδράσεις στην υγεία (εάν υπάρχουν) είναι λιγότερες από τα συνηθισμένα προβλήματα υγείας της καθημερινότητας. Εάν η ιδέα των αρχικών τιμών ήταν κυριολεκτικά αληθινή, τότε οι αληθινές καμπύλες ανταπόκρισης της δόσης θα ήταν σαν την καμπύλη 2 της φιγούρας 2.1. Οι Ghering et al έχουν παρουσιάσει θεωρητικές βάσεις έτσι ώστε να γίνει πιστευτό ότι υπάρχουν τέτοιες καμπύλες. Η θεωρία τους απεικονίζεται με υδραυλική αναλογία στη φιγούρα 2.2.

Εάν ένας πρώτος μηχανισμός εξουδετέρωσης μπορέσει να αντιμετωπίσει ολόκληρη την συσσώρευση του ρύπου στα σώματά μας, τότε ο δεύτερος μηχανισμός εξουδετέρωσης δε θα λειτουργήσει. Παρά όλα αυτά, εάν ο πρώτος μηχανισμός εξουδετέρωσης σταματήσει, τότε ο δεύτερος θα λειτουργήσει. Εάν ο πρώτος μηχανισμός είναι ακίνδυνος αλλά ο δεύτερος δημιουργήσει επικίνδυνα και βλαβερά προϊόντα μέσα στο σώμα ή βλάψει κάποιο σωματικό όργανο, τότε δε θα υπάρξει ζημία στα σώματα μας εάν φυσικά μπορέσει να αντιμετωπίσει ο πρώτος

μηχανισμός την κατάσταση. Θα υπάρξει όμως πρόβλημα εάν ο πρώτος μηχανισμός δεν αντεπεξέλθει. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία θα πρέπει να αλλάξουμε την εξίσωση 2.1 σε:

$$ΒΙαβερή dosολογία = \int \left[\left(\begin{array}{l} \text{είσερχόμενοι ρυθμοί} \\ \text{εξαιτίας αναρροής} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{μετακινούμενοι} \\ \text{ρυθμοί από τον} \\ \text{1ο μηχανισμό} \end{array} \right) \bullet d(\text{χρονο}) \right] \quad (2.2)$$



Φιγούρα 2.2:

Ένα ρευστό-μηχανικό ανάλογο του βιολογικού μηχανισμού που μπορεί να καταλήγει σε μια πραγματικά αρχική τιμή για μια τοξική ουσία. Για ποσοστά ροής μικρότερα του (b), καμία ροή δεν εξέρχεται από το υψηλότερο άνοιγμα. Εάν τα προϊόντα αποσύνθεσης από την κατώτερη πορεία δεν είναι επιβλαβή, και αυτά από την ανώτερη είναι επιζήμια, τότε το πραγματικό όριο (κατώτερο όριο) αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό εισόδου ίσο μ' αυτό που φαίνεται στο (b).

Υπάρχουν γνωστές αρχικές τιμές για μερικές ουσίες, όπως το σελήνιο. Το σέλινο είναι ένα βασικό θρεπτικό συστατικό: μια δίαιτα με μηδενική ποσότητα σελινιού είναι μοιραία. Μεγάλες ποσότητες γίνονται δηλητηριώδες. Έτσι μια δίαιτα με μεγάλη ποσότητα σελινιού είναι επίσης μοιραία. Οπότε, πρέπει να υπάρχουν δυο αρχικές τιμές μια χαμηλή και μια υψηλή, μέσα στις οποίες η λήψη σελινιού να είναι ακίνδυνη (ή τουλάχιστον όχι μοιραία). Ευτυχώς το πεδίο ανάμεσα στις δυο μοιραίες καταστάσεις είναι ευρύ.

Υπάρχει θεωρητικό (και πειραματικό) επίπεδο για να πιστέψουμε ότι υπάρχουν μερικές ουσίες για τις οποίες δεν υπάρχουν αρχικές τιμές. Για αυτές τις ουσίες, η λήψη θα είναι πολύ βλαβερή (Μια τέτοια λήψη ίσως να μην προκαλέσει βλαβερές επιδράσεις σε κάθε άνθρωπο). Αντιθέτως μπορεί να αυξήσει την στατιστική πιθανότητα της εμφάνισης κάποιας άλλης ασθένειας, π.χ καρκίνου. Με τους όρους της υδραυλικής αναλογίας, δεν υπάρχει ακίνδυνος μηχανισμός εξουδετέρωσης. Οι περισσότερες από τις ουσίες που πιστεύεται ότι δεν έχουν αρχικές τιμές είναι είτε καρκινογόνες, είτε εκπέμπουν ιονίζουσα ακτινοβολία. Το να αποδείξουμε ότι δεν υπάρχουν τέτοιες ουσίες είναι πειραματικά δύσκολο.

Εάν θέλουμε να κάνουμε μια καμπύλη ανταπόκρισης της δόσης για ένα είδος ρύπου έχουμε τρεις πιθανούς τρόπους προσέγγισης. Πειράματα σε ζώα, εργαστηριακά πειράματα με ανθρώπους και επιδημιολογικές μελέτες σε ανθρώπινους πληθυσμούς.

2.1.1 Πειράματα σε ζώα.

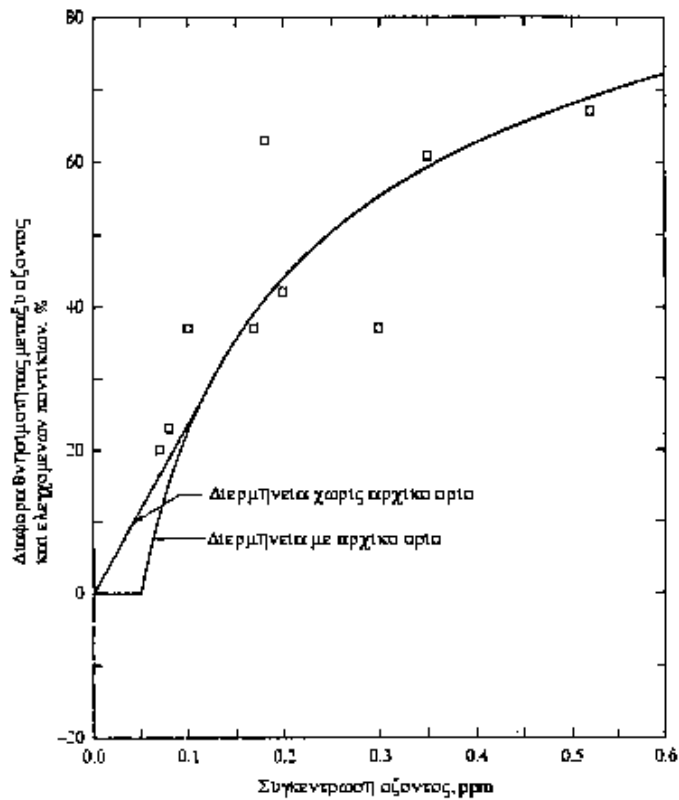
Δυο ομάδες ποντικών (η ομάδα όζοντος και η ομάδα ελέγχου) εκτέθηκαν ταυτοχρόνως σε ένα αέριο που περιείχε στρεπτόκοκκο. Τα βακτήρια σκότωσαν πάνω από το 80 % των ποντικών. Η ομάδα του όζοντος είχε πριν εκτεθεί για τρεις ώρες σε διάφορες συγκεντρώσεις

όζοντος. Η ομάδα έλεγχου δεν είχε εκτεθεί στο όζον. Τα ποσοστά της θνησιμότητας φαίνονται στο πίνακα 2.2 και η διαφορά στην θνησιμότητα σε σχέση με την συγκέντρωση του όζοντος στη φιγούρα 2.3. Από τα πειράματα παρατηρήσαμε τα ακόλουθα:

1. Είναι δύσκολο να κάνουμε το πείραμα με ζωντανούς οργανισμούς και αν είναι τόσο αξιόπιστο όσο με άψυχα αντικείμενα. Η ομάδα έλεγχου και στις δέκα δόκιμες εκτέθηκε σε κάποιο ποσό βακτηρίων που υποτίθεται ότι ήταν το ίδιο κάθε φορά. Η παρατηρούμενη θνησιμότητα ποικίλει από 0 έως 15 %. Οι διαφορές στις πληροφορίες για την θνησιμότητα έχουν σημαντική διασπορά. Η αρνητική διαφορά θνησιμότητας είναι αποτέλεσμα της διασποράς της πνευματικής data. Είναι δύσκολο να φανταστεί κάποιος έναν μηχανισμό με τον οποίο η έκθεση σε 0.07ppm του όζοντος θα προστάτευε τα ποντίκια από την ακόλουθη βακτηριακή μόλυνση.

Πίνακας 2.2: Πειραματικά αποτελέσματα από την έκθεση ποντικών σε όζον και κατόπιν στο βακτηρίδιο C του στρεπτόκοκκου

Συγκέντρωση όζοντος, ppm	Θνησιμότητα επί τοις εκατό		
	Ομάδα ελέγχου	Ομάδα όζοντος	Διαφορά
0.52	13	80	67
0.35	0	60	60
0.30	3	40	37
0.20	8	50	42
0.18	0	63	63
0.17	8	45	37
0.10	8	35	37
0.08	15	38	23
0.07	15	35	20
0.07	8	5	-3



Φιγούρα 2.3:

Πειραματικά δεδομένα από τον Πίνακα 2.2 πάνω στη διαφορά στη θνησιμότητα μεταξύ ποντικών που εκτέθηκαν σε όζον και σε μια μη εκτιθέμενη ομάδα ελέγχου, που και οι δύο κατόπιν εκτέθηκαν σε βακτηρίδια Στρεπτόκοκκου με δύο πιθανές ερμηνείες.

2. Η έκθεση στο όζον έχει σημαντική επίδραση στη θνησιμότητα στις συγκεντρώσεις πάνω από 0,10 ppm, και οι επιδράσεις αυξάνονται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του οζόντος.

3. Εδώ, η μόλυνση του αέρα ήταν έμμεση. Κανένα ποντίκι δεν πέθανε σαν αποτέλεσμα της έκθεσης του στο όζον και μόνο. Αυτό που έγινε

ήταν ότι το όζον (παρενοχλητής του αναπνευστικού) πιθανώς ενόχλησε τους πνεύμονες των εκτεθειμένων ποντικών και έτσι το έκανε ευκολότερο σε φονικούς αριθμούς βακτηριών να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος. Οι συγγραφείς της έρευνας κατέληξαν ότι το όζον κατέστρεψε μερικά από τα λευκά αιμοσφαίρια που υπερασπίζονται το σώμα εναντίων των βακτηριών. Εάν δεν ξέραμε το ιστορικό της έρευνας θα καταλήγαμε ότι η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος οδήγησε σε αυξημένη θνησιμότητα, αλλά δεν θα ξέραμε το μηχανισμό με τον οποίο οδήγησε στην θνησιμότητα. Αυτή η αβεβαιότητα σχετικά με τον μηχανισμό είναι κοινή στις μελέτες για τις διάφορες επιδημίες που οφείλονται στην μόλυνση του αέρα και περιγράφεται στην παράγραφο 2.1. Εάν απλώς είχαμε κοιτάξει τις αναφορές της αυτοψίας, δε θα υπήρχε τρόπος να μάθουμε ποια ποντίκια είχαν εκτεθεί στο όζον και ποια όχι ή εάν η έκθεση στο όζον είχε παίξει κανένα ρόλο στους θανάτους τους. Οι αναφορές της αυτοψίας απλώς θα έλεγαν “θάνατος από μόλυνση βακτηρίων”.

4. Τα ποντίκια σ’ αυτού του τύπου την έρευνα έχουν αναπαραχθεί έτσι ώστε η γενετική παραλλαγή μεταξύ τους να είναι εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές μικρότερη απ’ ότι αυτή στους ανθρώπινους πληθυσμούς. Το περιβάλλον τους από την γέννησή τους ελέγχεται έτσι ώστε να γίνουν όσο πιο όμοια γίνεται το ένα με το άλλο. Αυτό δεν ισχύει με τους ανθρώπους. Παρ’ όλα αυτά η αντίδρασή τους δείχνει μεγάλη παραλλακτικότητα.

5. Από τέτοιου είδους τεστ μπορούμε να εκτιμήσουμε τις επιδράσεις στους ανθρώπους παρόμοιων εκθέσεων. Για τα νέα φάρμακα που δεν χρησιμοποιούνται ακόμα από το κοινό, τα πειράματα σε ζώα είναι ο μόνος τρόπος που έχουμε για να κάνουμε τέτοιες εκτιμήσεις. Ωστόσο, ότι είναι βλαβερό στο ένα ζώο μπορεί να μην είναι βλαβερό στο άλλο. Για παράδειγμα πριν η θαλιδομίδη εγκριθεί για ανθρώπινη χρήση, είχε

ελεγχθεί εκτεταμένα στα ποντίκια (συμπεριλαμβανόμενα και τα ποντίκια σε κατάσταση εγκυμοσύνης) και έδειξε ότι δεν είχε βλαβερές επιδράσεις. Στους ανθρώπους όμως είχε πολλά αρνητικά γενετικά ελαττώματα. Έτσι, τα πειράματα στα ζώα, προτείνουν μόνο ποιες θα είναι οι επιδράσεις στην υγεία των ανθρώπων εξαιτίας τέτοιων εκθέσεων.

6. Αυτά τα πειράματα έλαβαν υπόψη τους μόνο τις άμεσες επιδράσεις, αυτές δηλαδή που φάνηκαν σε λίγες ώρες. Μας δίνουν μια ιδέα σχετικά με σύντομες εκθέσεις ανθρώπων. Επειδή ζούμε πιο πολύ απ'όλα τα θηλαστικά, μας αφορούν οι εκθέσεις που διαρκούν για όλη μας τη ζωή. Τα περισσότερα ζώα που χρησιμοποιούνται για πειράματα δε ζουν πολύ, έτσι είναι δύσκολο να εκθέσεις κάποιο ζώο σε κάποιο ρύπο για πάνω από ένα ή δυο χρόνια. Έτσι, αυτά τα πειράματα μας δίνουν πολύ λίγα δεδομένα.

7. Αυτό το πείραμα ήταν φθηνό, γρήγορα και απλό. Μόνο λίγα ποντίκια χρησιμοποιήθηκαν και το αποτέλεσμα του πειράματος ο θάνατος, είναι εύκολο να ανιχνευθεί. Για να κάνει κάποιος ένα πείραμα για την καρκινογέννηση θα έπρεπε να εκθέσει τα ποντίκια για πολύ περισσότερο χρονικό διάστημα και έπειτα να κάνει αυτοψία για κάθε ένα ξεχωριστά. Και εάν μάλιστα, δεν ήξερε ποιο όργανο θα αποκτούσε καρκίνο θα έπρεπε να εξετάσει ένα-ένα τα όργανα ξεχωριστά.

8. Στη φιγούρα 2.3 και βασιζόμενοι μόνο σ'αυτά που λέει δε θα μπορούσαμε να πούμε εάν και οι δυο ή μόνο μία από τις ερμηνείες είναι σωστή. Αυτό το γράφημα είναι τυπικό για όλα σχεδόν τα πειράματα σε ζώα. Σε υψηλές συγκεντρώσεις τα αποτελέσματα είναι φανερά αλλά σε μικρότερες είναι αδύνατο να καθορίσουμε το είδος της καμπύλης. Είναι υπολογισμένο εάν κάποιος θα ήθελε να κάνει ένα πείραμα εξετάζοντας κάποιες από τις ουσίες που υποπτεύεται ως καρκινογόνες (και χωρίς τα αποτελέσματα να είναι σίγουρο ότι ισχύουν και για τον άνθρωπο)

χρησιμοποιώντας ποντίκια σαν πειραματόζωα θα χρειαζότανε τουλάχιστον 1.000.000 ποντίκια.

9. Η συγκέντρωση στην οποία σημαντικές επιδράσεις αρχίζουν να φαίνονται είναι 0.12ppm στις Η.Π.Α. Ωστόσο, η έκθεση στα βακτήρια που ακολούθησε την έκθεση στο όζον ήταν πολύ πιο σοβαρή στα ποντίκια απ' ότι είναι στους ανθρώπους. Πολύ γρήγορα σκότωσε πάνω από 15% των ποντικιών που ανήκαν στην ομάδα ελέγχου.

2.1.2. Σύντομη έκθεση εθελοντών.

Από μια σύντομη έκθεση εθελοντών (νέων υγιών ενηλίκων) σε συγκεντρώσεις ρύπων πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μετριοούνται στον αέρα είδαμε ότι δεν δημιουργήθηκαν μετρήσιμες επιδράσεις βραχύχρονες ή μακρόχρονες. Ωστόσο επειδή ενδιαφερόμαστε για τις επιδράσεις μακροχρόνιας έκθεσης και γιατί ενδιαφερόμαστε για τις επιδράσεις στην υγεία όχι μόνο νεαρών και υγιών ενηλίκων, αλλά και για τα πιο ευαίσθητα μέλη της κοινωνίας μας (μικρά παιδιά, ασθματικούς, ηλικιωμένους), φαίνεται ότι βραχυχρόνια πειράματα σε εργαστήρια με νέους και υγιείς ενήλικες, δε θα δώσουν τα αποτελέσματα που χρειαζόμαστε. Τέτοια πειράματα είναι χρήσιμα για να βρούμε τους λεπτομερείς φυσιολογικούς μηχανισμούς της μόλυνσης του αέρα, αλλά ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να θέσουμε ερωτήματα σχετικά με τις επιδράσεις στην υγεία μας είναι μεσώ προηγμένης επιδημιολογίας.

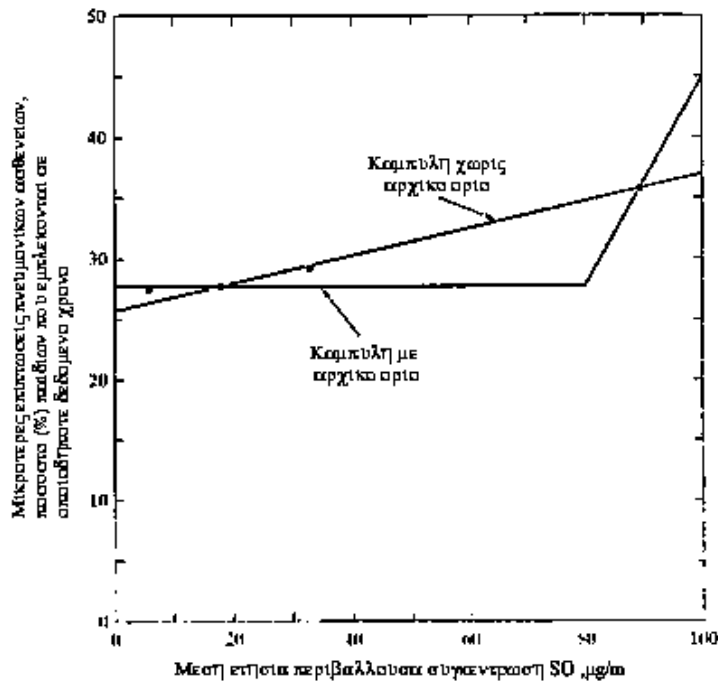
2.1.3 Επιδημιολογία.

Αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει για να γίνουν οι απαιτούμενες επιδημιολογικές μελέτες. Ίσως η πιο ενδιαφέρουσα είναι η CHESS. Έχει

δεχθεί πολλές κριτικές και πολλοί την έχουν υπερασπισθεί με σθένος. Είναι αυτή η μελέτη που θα μας επιτρέψει να κατασκευάσουμε ακριβείς καμπύλες ανταπόκρισης της δόσης για διάφορους ρύπους. Σε ένα μέρος της μελέτης CHESS, τέσσερις πόλεις επιλέχθηκαν σε διάφορες αποστάσεις από το Salt Lake Valley. Οι πόλεις είχαν μεγάλη συγκέντρωση SO₂ εξαιτίας των ανέμων που κυριαρχούσαν σ' αυτές τις περιοχές. Η ομάδα έρευνας προσπάθησε να επιλέξει γειτονίες σε κάθε μια από αυτές τις πόλεις στις οποίες θα μπορούσαν να ταιριάξουν κάποια κοινωνιολογικά χαρακτηριστικά. Σε κάθε γειτονιά η ομάδα προσπάθησε να μετρήσει την υγεία του πληθυσμού, με έμφαση στα προβλήματα υγείας που πιστεύεται ότι έχουν σχέση με το SO₂ (άσμα, χρόνια βρογχίτιδα, ασθένειες του αναπνευστικού στα παιδιά). Έπειτα, αυτοί έψαξαν για μια σχέση μεταξύ της έκθεσης σε SO₂ και τέτοιων ασθενειών. Ισχυρίζονται ότι βρήκαν τέτοια σχέση, ένα συμπέρασμα το οποίο πολλοί κριτικοί το έχουν αρνηθεί.

Εάν εμείς υποθέσουμε, ότι τα στοιχεία τους είναι σωστά, μπορούμε να τα εξετάσουμε για να δούμε εάν οδηγούν σε μια αναμφίβολη ερμηνεία της σχέσης μεταξύ της έκθεσης σε ένα ρύπο και στην ανατροπή της δόσης. Η φιγούρα 2.4 αποδεικνύει ότι οι ασθένειες του αναπνευστικού των παιδιών οφείλονται στη συγκέντρωση SO₂ και στις τέσσερις πόλεις. Αποκαλύπτει τα ακόλουθα:

1. Ακόμα και στο καθαρότερο περιβάλλον ένας σημαντικός αριθμός παιδιών θα έχει προβλήματα με το αναπνευστικό του.
2. Με τα δεδομένα της μελέτης και μόνο θα είναι πολύ δύσκολο για κάποιον να διαλέξει ποια από τις δυο ερμηνείες είναι η σωστή.
3. Τα προβλήματα υγείας δεν οφείλονται μόνο στο SO₂ και στα παράγωγά του. Η μελέτη έχει λάβει υπόψη της και άλλα πολλά στοιχεία αλλά για ευκολία δεν συμπεριλήφθηκαν εδώ.



Φιγούρα 2.4:

Μερικά δεδομένα από την μελέτη CHES. Τα σημεία αναπαριστούν τις περιοχές μελέτης (από αριστερά προς τα δεξιά) στο Ogden, την πόλη του Salt Lake, Kearns και την Magna. Οι συγκεντρώσεις SO₂ επηρεάζονται από τις αποστάσεις και από τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου.

Μια εναλλακτική επιδημιολογική προσέγγιση είναι η μελέτη των ετησίων θανάτων εξαιτίας της μόλυνσης του αέρα. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για να ξεδιαλύνουν τις επιδράσεις. Η πιο γνωστή από αυτές έκανε διάφορες αναλύσεις συσχετίζοντας τον ετήσιο ρυθμό θανάτου με κοινωνιολογικά και οικονομικά δεδομένα συμπεριλαμβανομένων και των εκθέσεων σε μολυσμένο αέρα. Αυτό που έκανε εντύπωση σ' αυτή την έρευνα είναι ότι

αυτό που μετράει δεν είναι η βλαβερή παρουσία υψηλών εκθέσεων αλλά η ωφέλιμη χαμηλών.

Μια πρόσφατη έρευνα έδειξε μία σημαντική αύξηση του ρυθμού θανάτων με αυξημένη την συγκέντρωση ορισμένων ουσιών που μέχρι πρόσφατα δεν θεωρούνταν ότι μπορούσαν να έχουν βλαβερές συνέπειες.

Μια άλλη μέθοδος είναι να συσχετίσουμε τους καθημερινούς θανάτους με τις αλλαγές στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Σε όλες αυτές τις μελέτες, τα συμπεράσματα ήταν ότι η μόλυνση του αέρα είναι ένας σχετικά μικρός παράγοντας στον καθορισμό του ρυθμού των καθημερινών θανάτων. Για παράδειγμα, πέντε παράγοντες είχαν υψηλότερη σχέση με τους καθημερινούς θανάτους, εκτός από αυτόν της μόλυνσης. Τέτοιοι ήταν η εποχή του χρόνου η υπερβολικά μεγάλη θερμοκρασία, οι γιορτές (τα Χριστούγεννα και η Πρωτοχρονιά έχουν υψηλότερους ρυθμούς θανάτων από τις άλλες μέρες) και η μέρα της εβδομάδας (Οι Δευτέρες έχουν υψηλό ποσοστό, οι Τετάρτες και οι Πέμπτες είναι 3% λιγότερο από τις Δευτέρες). Η έρευνα κατέληξε ότι αφού λήφθηκαν υπόψη αυτοί οι παράγοντες υπήρχε ακόμη ένα ποσοστό της τάξης του 3% που μπορεί να συσχετισθεί ότι πέθανε από τη συγκέντρωση του SO₂. Αυτή η έρευνα προκάλεσε αντιπαραθέσεις και κριτική. Ένα πρόσφατο παράδειγμα τέτοιας έρευνας σε μια πολύ μικρότερη περιοχή έδειξε ότι είχαμε σημαντική αύξηση του ημερήσιου ρυθμού θανάτων με την αύξηση των συγκεντρώσεων ορισμένων ρύπων. Αυτές οι έρευνες είναι δύσκολες και τα αποτελέσματά τους υπόκεινται σε σοβαρή κριτική, παρόλα αυτά φαίνεται ότι είναι οι καλύτερες μέτρήσεις που έχουμε.

2.1.4. Κανονισμοί για την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

Δε θα πρέπει να εκπλαγούμε με το γεγονός ότι υπάρχει αντίθεση στο πως θέλουν οι άνθρωποι τον αέρα να είναι (ή πόσα είναι διατεθειμένοι να

ξοδέψουν για καθαρό αέρα). Αντιμετωπίζοντας αυτό το πρόβλημα το αμερικάνικο πρακτορείο προστασίας του περιβάλλοντος (EPA) δρώντας κάτω από το Νόμο Clean Air (δράση για καθαρό αέρα) έχει κάνει έρευνες με εξαίσιους επιστήμονες και κατέληξε ότι έξι πρώτοι ρύποι που βρίσκονται στον πίνακα 2.1 έχουν αρχικές τιμές, ενώ οι τελευταίοι έξι όχι. Η Clean Air ζήτησε από την EPA να καθορίσει πρότυπα για την ποιότητα του καθαρού αέρα (NAAQS). Αυτές οι τιμές έγιναν με σκοπό να προστατεύσουν τη δημόσια υγεία. Για ρύπους που δεν έχουν αρχικές τιμές τέτοια πρότυπα δεν μπορούν να θεσπιστούν. Έτσι, η Clean Air Act θεωρεί τους 8 τελευταίους ρύπους ως επικίνδυνους.

Δύο οργανώσεις η Occupational Safety Health Administration αποφάσισαν να επιτρέψουν την έκθεση σε μικρές συγκεντρώσεις μερικών ρύπων. Από τον πίνακα 2.3 βλέπουμε ότι η επιτρεπόμενη βιομηχανική έκθεση στους ρύπους είναι γενικά πολύ μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη έκθεση του πληθυσμού. Αυτή η διαφορά αντικατοπτρίζει δύο γεγονότα. Εμείς εκτιθόμαστε στον ατμοσφαιρικό αέρα 168 ώρες την εβδομάδα, αλλά είμαστε στη δουλειά μόνο 40 ώρες την εβδομάδα και ο εργαζόμενος πληθυσμός δεν περιέχει αδύναμα μέλη (παιδιά, ασθματικούς, ηλικιωμένους). Επιπλέον οι άνθρωποι που έχουν κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα με κάποιο ρύπο, θα αφήσουν τη δουλειά τους. Αντίθετα, με τα προβλήματα της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, τα βιομηχανικά πρότυπα δεν έχουν σαν σκοπό την προστασία όλου του κοινωνικού συνόλου .

Πίνακας 2.3: Σύγκριση των κανονισμών της αέριας ποιότητας και των κανονισμών βιομηχανικής έκθεσης

Ουσία	Επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις στο περιβάλλον (NAAQS) ^a	Επιτρεπόμενες βιομηχανικές συγκεντρώσεις (TWA & STEL) ^a
Διοξείδιο του θείου	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03 ppm) ^b , ετήσιος μέσος όρος, 365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.14 ppm), 24-h κατά μέσο όρο ^c	2 ppm, 8-h κατά μέσο όρο 5 ppm, 15-min αιχμής
Όζον	0.12 ppm (235 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 1-h κατά μέσο όρο	0.1 ppm, 8-h κατά μέσο όρο 0.3 ppm, 15-min αιχμής
Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂)	0.053ppm (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ετήσιος μέσος όρος	3 ppm, 8-h κατά μέσο όρο 5 ppm, 15-min αιχμής
Μονοξείδιο του άνθρακα	9 ppm (10 mg/m^3), 8-h μέσος όρος. 35ppm(40 mg/m^3), 1-h μέσος όρος	50 ppm, 8-h κατά μέσο όρο 400 ppm, 15-min αιχμής
Σύνολο αιωρούμενων σωματιδίων (TSP) ^d	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ετήσιος μέσος όρος 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24-h μέσος όρος	Υπάρχουν κανονισμοί για συγκεκριμένα είδη σωματιδίων, αλλά όχι για το TSP
Λεπτά σωματίδια (PM ₁₀) ^d	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ετήσιος μέσος όρος 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24-h μέσος όρος	Υπάρχουν κανονισμοί για συγκεκριμένα είδη σωματιδίων, αλλά όχι για το PM ₁₀
Μόλυβδος	1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, τριμηνιαίος μέσος όρος	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 8-h μέσος όρος 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15-min αιχμή
Αμίαντος	Χωρίς NAAQS	Υπάρχει ένας ειδικός κανονισμός, με αριθμό ινών ανά cc.
Βενζόλιο	Χωρίς NAAQS	10 ppm, 8-h μέσος όρος
Βηρύλλιο	Χωρίς NAAQS	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 8-h μέσος όρος
Εκπομπές φούρνου κόκ	Χωρίς NAAQS	Δεν υπάρχει κανένας κανονισμός γι' αυτά σαν ομάδα, κανονισμοί για μεμονωμένα συστατικά μέρη

Ανόργανο αρσενικό	Χωρίς NAAQS	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Υδράργυρος	Χωρίς NAAQS	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 8-h μέσος όρος συν μια κατώτερη βάση για ενώσεις αλκυλίου υδράργυρου
Ραδιονουκλίδια	Χωρίς NAAQS	Κανένας συγκρίσιμος κανονισμός
Χλωριούχο Βινύλιο	Χωρίς NAAQS	5 ppm, 8-h μέσος όρος

- a Οι Εθνικοί Κανονισμοί για την Ποιότητα του Αέρα του Περιβάλλοντος (NAAQS) είναι οι τρέχουσες τιμές EPA. Οι τιμές TWA (μέσος όρος χρόνου-βάρους) και οι τιμές STEL (όριο βραχυχρόνιας έκθεσης) είναι οι τρέχουσες τιμές ACGIH (Αμερικάνικο Συνέδριο των Υγιεινολόγων της Κυβερνητικής Βιομηχανίας).
- b Για τα αέρια, οι κανονισμοί μπορούν να εκφραστούν ως ppm ή $\mu\text{g}/\text{m}^3$, οι περισσότεροι πίνακες τα παρουσιάζουν και με τους δύο τρόπους (για σταθερή θερμοκρασία και πίεση του αερίου). Για στερεά τέτοια όπως το TSP, PM_{10} , ή τον αμίαντο, το μοριακό βάρος δεν είναι εν γένει γνωστό, έτσι η αναπαράσταση σε ppm ανά όγκο ή ανά mol Δεν είναι γενικά δυνατή, οι κανονισμοί εκφράζονται ως $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ή με τα ισοδύναμά τους (υποθέτοντας πάλι ότι το αέριο είναι σταθερής θερμοκρασίας και πίεσης)
- c Η βραχυχρόνια NAAQS (24ώρη) δεν πρέπει να επεκτείνεται παραπάνω από μια φορά το χρόνο. Οι ετήσιοι μέσοι κανονισμοί δεν πρέπει να επεκτείνονται σε οποιοδήποτε χρόνο.
- d Οι κανονισμοί των σωματιδίων που εκδόθηκαν από την EPA το 1971 ήταν για το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων (TSP). Ο πραγματικός ορισμός του TSP είναι το υλικό που συλλέγεται από έναν δειγματολήπτη hi-vol. Η ακόλουθη έρευνα έδειξε ότι οι δειγματολήπτες hi-vol συνέλεξαν πάρα πολλά σωματίδια με μέγεθος που Κυμαίνεται από 10-50 microns. Τέτοιου είδους σωματίδια δεν έχουν καμμία προφανή επίδραση στην υγεία, αλλά στους δειγματολήπτες hi-vol συχνά υπερτερούσαν τα μικρότερα σωματίδια που έχουν επιδράσεις στην υγεία. Την 1 Ιουλίου 1987, το EPA ανακάλεσε τον κανονισμό των σωματιδίων για το TSP και το αντικατέστησε με ένα για λεπτά σωματίδια, τα οποία καλούνται PM_{10} (ύλη σωματιδίου 10 microns ή μικρότερα). Ο πραγματικός ορισμός του PM_{10} είναι ότι το υλικό που συλλέγεται από το δειγματολήπτη PM_{10} που μοιάζει με τον δειγματολήπτη hi-vol, αλλά με μια είσοδο που σχεδιάστηκε για να αποκλείσει τα μεγαλύτερα από 10 microns σωματίδια.

2.2 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην ιδιοκτησία.

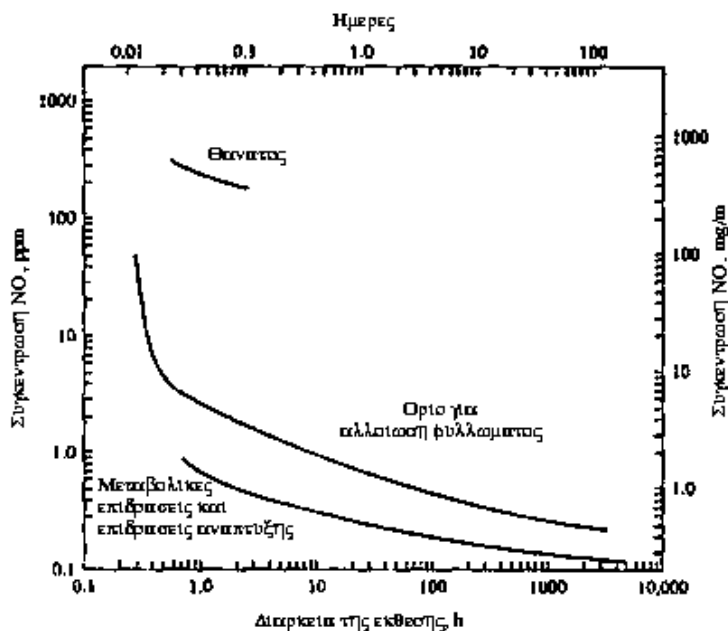
Στα πρώτα βήματα ελέγχου της μόλυνσης του αέρα, πολύ προσοχή δόθηκε στους ρύπους που καταστρέφουν την ιδιοκτησία. Σήμερα, δε δίνουμε τόση προσοχή. Ο λόγος γι' αυτή την αλλαγή είναι ότι 50 χρόνια πριν, υπήρχαν ρύποι που προκαλούσαν ορατές βλάβες σε φυτά και ζώα. Οι ιδιοκτήτες αυτών των φυτών και ζώων μήνυσαν αυτούς που εξέπεμπαν τους ρύπους και έτσι συνέλαβαν στην πρώιμη ανάπτυξη της επιστήμης της μόλυνσης του αέρα και της μηχανικής. Σήμερα, υπάρχουν λίγες τέτοιες πηγές, γιατί έχουμε επιβάλει αυστηρούς ελέγχους για την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

Μερικά παραδείγματα αυτής της βλάβης ακόμα παραμένουν. Τα μέταλλα διαβρώνονται πιο γρήγορα στα μολυσμένα περιβάλλοντα των πόλεών μας απ' ότι σε καθαρότερα περιβάλλοντα. Τα χρώματα δε διαρκούν τόσο πολύ σε μολυσμένα περιβάλλοντα όσο σε καθαρά. Τα λάστιχα και άλλα υλικά διαλύονται λόγω του όζοντος, εάν δεν έχουν φτιαχτεί με αντι-οξειδωτικά προσθετικά (με τα οποία τώρα όλα γίνονται) και μερικά πράσινα φυτά αργοπεθαίνουν απ' τους ρύπους. Η φιγούρα 2.5 δείχνει τις επιδράσεις του NO₂ στα φυτά όπως, άλλωστε, το περιμέναμε η βλάβη εξαρτάται από τη συγκέντρωση και από τη διάρκεια της έκθεσης. Όπως οι άνθρωποι, έτσι και τα φυτά μπορούν να επιβιώσουν με βραχυχρόνιες εκθέσεις σε υψηλές συγκεντρώσεις NO₂. Όσο πιο πολύ διαρκεί η έκθεση τόσο μικρότερη συγκέντρωση NO₂ χρειάζεται για να κάνει τη ζημιά.

Σε περίπτωση καταστροφής σοδειάς από έναν αναγνωρισμένο ρύπο ιστορικά, έχει αποδειχθεί, ότι είναι πιο φθηνό για το εργοστάσιο που εξέπεμψε το ρύπο να αποζημιώνει τον αγρότη παρά να σταματήσει την εκπομπή του ρύπου. Αυτό έχει δημιουργήσει διασκεδαστικές καταστάσεις όπως αυτή του Salt Lake Valley όπου οι αγρότες φύτευαν κοντά στο εργοστάσιο Kennecott Copper φυτά εξαιρετικά ευαίσθητα στο

SO₂, που εκπεμπόταν από το εργοστάσιο και έπειτα επιζητούσαν αποζημιώσεις. Όταν αυτές οι εκπομπές SO₂ σταμάτησαν τη δεκαετία του 1970 για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, οι αγρότες έπαψαν να καλλιεργούν αυτά τα φυτά, γιατί πλέον δεν τους συνέφερε.

Έτσι, οι κάτοικοι των πόλεων βάζουν πιο συχνά τα σπίτια τους απ'ότι οι κάτοικοι των χωριών και πληρώνουν λίγο παραπάνω για λάστιχα που περιέχουν αντί-οξειδωτικά. Περιστασιακές μελέτες έχουν υπολογίσει το κόστος από τέτοιες βλάβες και τα ποσά είναι σημαντικά. Δε μας απασχολούν όμως τόσο, όσο η ανθρώπινη υγεία.



Φιγούρα 2.5:

Καμπύλες ορίου για θάνατο φυτών, αλλοίωση φυλλώματος και μεταβολικές επιδράσεις ή επιδράσεις ανάπτυξης καθώς συσχετίζονται με την συγκέντρωση διοξειδίου του αζώτου και τη διάρκεια της έκθεσης.

Ένα είδος βλαβερής επίδρασης της περιουσίας που πρέπει να μας απασχολεί πολύ είναι αυτή των ιστορικών μνημείων. Εάν η παραγωγή μας μειωθεί, οι πετούνιες στον κήπο μαραθούν ή εάν τα λάστιχά μας διαλυθούν λίγο πιο γρήγορα εξαιτίας του όζοντος μπορούμε να επανορθώσουμε για τη ζημιά με λίγα λεφτά. Δυστυχώς, η μόλυνση του αέρα καταστρέφει τα μαρμάρινα αγάλματα της Ευρώπης και ιδίως της Ελλάδας που κατέχει πρωτεύοντα ρόλο παγκοσμίως. Αυτά δεν αντικαθίστανται εύκολα. Τα πιο διάσημα αγάλματα στον Παρθενώνα –οι καρυάτιδες- έχουν μεταφερθεί σε κλιματιζόμενο μουσείο· ομοιώματα τώρα βρίσκονται έξω στη θέση τους. Η φιγούρα 2.6 δείχνει ένα παράδειγμα καταστροφής ενός Ευρωπαϊκού αγάλματος που προήλθε από εναπόθεση οξειδωτικού.

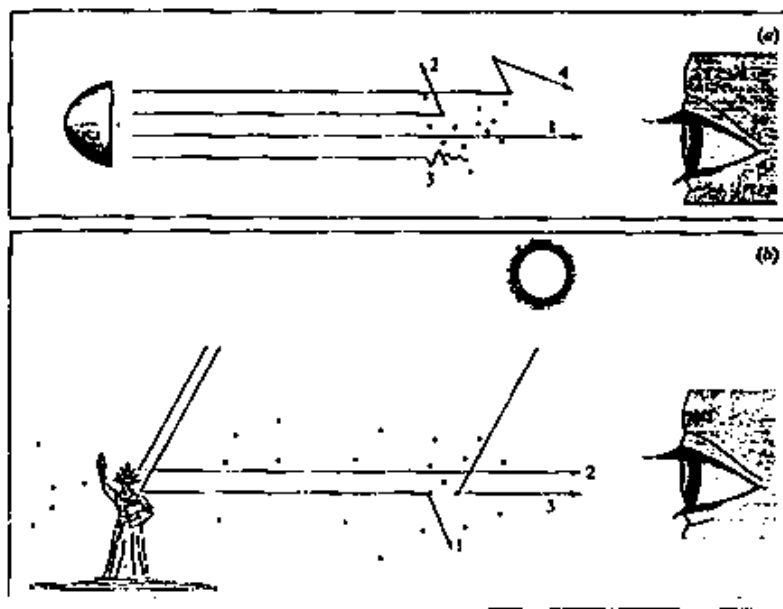
2.3 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στην ορατότητα.

Οι περισσότεροι αέριοι ρύποι είναι απολύτως διάφανοι. Η μόνη κοινή εξαίρεση είναι το NO₂, το οποίο είναι καφέ. (Το φθόριο, χλώριο, βρώμιο, και ιώδιο είναι επίσης έγχρωμα όπως και κάποιοι οργανικοί διαλύτες, αλλά αυτά σπάνια εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα σε σημαντικές ποσότητες). Μερικοί αστικοί καπνοί φαίνονται καφέ εξαιτίας του NO₂ που περιέχουν. Οι περισσότερες ορατές επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα δημιουργούνται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης του φωτός με τα αιωρούμενα σωματίδια. Η φιγούρα 2.7 δείχνει τις πιθανές αλληλεπιδράσεις ενός λαμπερού φωτονίου με ατμοσφαιρικά σωματίδια. Στην φιγούρα 2.7α βλέπουμε το φως από έναν προβολέα αυτοκινήτου να έρχεται σ' ένα μάτι. Μερικά από τα φωτόνια (1) πέφτουν ακριβώς πάνω στο μάτι· το μάτι τα βλέπει αυτά. Μερικά (2) διασκορπίζονται από μόρια του αέρα ανάμεσα στη λάμπα και στο μάτι· το μάτι δεν τα βλέπει αυτά. Μερικά (3) απορροφούνται από τα μόρια· το μάτι δεν τα βλέπει αυτά.



Φιγούρα 2.6:

Ένα παράδειγμα καταστροφής ενός εξωτερικού αγάλματος από κατακάθηση οξέος. Το άγαλμα, φτιαγμένο από πορώδη αμμόλιθο, κατασκευάστηκε το 1702 σαν τμήμα του αετώματος της εισόδου στο κάστρο του Herten κοντά στο Reckliaghhausen στη Γερμανία. Η αριστερή φωτογραφία, που τραβήχτηκε το 1908, δείχνει κάποιες κηλίδες και την απώλεια του αριστερού χεριού, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του προσώπου και του δεξιού χεριού ήταν ανέπαφα μετά από 206 χρόνια έκθεσης. Η δεξιά φωτογραφία, τραβήχτηκε το 1969, δείχνει την απώλεια των περισσότερων λεπτομερειών του αγάλματος μετά από 61 χρόνια.



Φιγούρα 2.7:

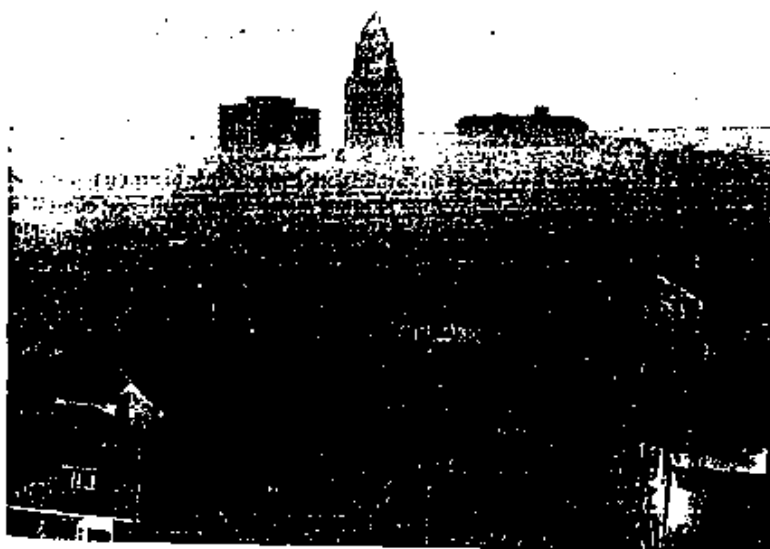
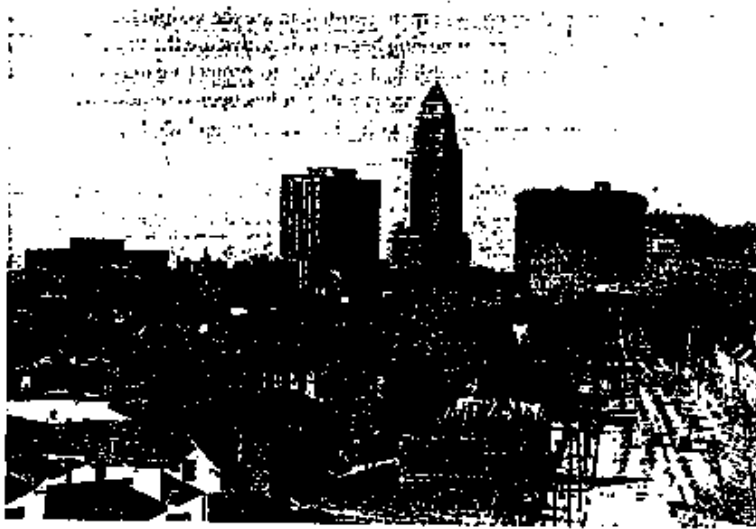
Πιθανές αλληλεπιδράσεις των φωτεινών φωτονίων με τα σωματίδια: (α) φως από ένα αυτόματο κύριο φως που κατευθύνεται προς το μάτι, (β) άποψη του αγάλματος της ελευθερίας που εστιάζεται προς το μάτι.

Μερικά (4) διασκορπίζονται από μόρια περισσότερο από μια φορά και έρχονται στο μάτι από διαφορετική διεύθυνση από αυτή του προβολέα. Πιθανώς να το έχετε παρατηρήσει αυτό κάποια νύχτα με ομίχλη. Πρώτα βλέπετε να έρχεται κάποιο αυτοκίνητο, έπειτα μια θολή λάμψη και τελικά καθώς το αυτοκίνητο πλησιάζει, βλέπετε το σχήμα των προβολέων του αυτοκινήτου. Δεν βλέπετε το αυτοκίνητο στην αρχή, γιατί το φως από τους προβολείς, είτε διασκορπίζεται ή απορροφάται από μόρια της ομίχλης (σταγόνες νερού) προτού φτάσει στα μάτια σας. Όταν βλέπετε τη θολή λάμψη, μερικά από τα φωτόνια των προβολέων έχουν διασκορπιστεί έξω από την άμεση γραμμή ορατότητας και μετά

ξαναδιασκορπίζονται από μια δεύτερη σύγκρουση με μια σταγόνα, έτσι ώστε να φτάνουν στα μάτια μας από μια διεύθυνση διαφορετική από την άμεση γραμμή ορατότητας των προβολέων. Τελικά, καθώς το αυτοκίνητο πλησιάζει, τα περισσότερα από τα φωτόνια έρχονται απ' ευθείας στα μάτια, χωρίς να διασκορπίζονται, έτσι βλέπετε μια καθαρή εικόνα του προβολέα. Το αν ένα φωτόνιο απορροφηθεί ή διασκορπιστεί από ένα μόριο καθορίζεται από την αναλογία της διαμέτρου του μορίου και του μήκους κύματος του φωτός. Εάν η διάμετρος του μορίου είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος, το φωτόνιο θα απορροφηθεί (ή θα αντανακλαστεί εάν το μόριο είναι πολύ αντανακλαστικό). Εάν η διάμετρος του μορίου είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος του φωτός, το φωτόνιο θα το προσπεράσει και ούτε θα διασκορπιστεί, ούτε θα απορροφηθεί. Εάν το μόριο έχει σχεδόν την ίδια διάμετρο όσο το μήκος κύματος του φωτός, θα διασκορπιστεί το φως. Θα έχετε πιθανώς παρατηρήσει ότι τα άσπρα και φωτεινά σύννεφα είναι απίθανο να παράγουν βροχή. Τα μόρια (σταγόνες νερού) μέσα σ' αυτά είναι πολύ μικρά για να διασκορπίσουν το φως και έτσι πολύ μικρά για να περάσουν ως σταγόνες βροχής. Τα μαύρα σύννεφα είναι πιο πιθανό να παράγουν βροχή. Οι σταγόνες νερού μέσα σ' αυτά είναι τόσο μεγάλες που απορροφούν το φως που πέφτει πάνω σ' αυτά, οπότε αρκετά μεγάλα για να πέσουν ως βροχή. Στη φιγούρα 2.7β βλέπουμε το πώς βλέπουμε το Άγαλμα της Ελευθερίας από απόσταση μια ηλιόλουστη ημέρα. Το βλέπουμε με το φως που αντανακλά πάνω του. Αυτά τα αντανακλώμενα φωτόνια μπορούν, είτε να απορροφηθούν, είτε να διασκορπιστούν από μόρια μεταξύ σ' αυτό (το άγαλμα) και εμάς (1) ή μπορούν να φτάσουν μέχρι τα μάτια μας (2). Επιπλέον, μόρια του αέρα μεταξύ σ' εμάς και στο άγαλμα μπορούν να διασκορπίσουν το ηλιακό φως. Όταν μιλάμε για ομιχλώδη αέρα, συνήθως εννοούμε ότι περιέχει μόρια που μπορούν να διασκορπίσουν το ηλιακό φως (ή του φεγγαριού, ή του δρόμου) προς

εμάς, το οποίο μας αποτρέπει απ' το να βλέπουμε σκηνές μακρινές καθαρά. Στη φιγούρα 2.7β, εάν ένα σύννεφο σκίαζε τον αέρα μεταξύ σ' εμάς και στο άγαλμα, ενώ το άγαλμα παρέμεινε κάτω από τον ήλιο, τότε θα βλέπαμε το άγαλμα πιο καθαρά απ' ότι βλέπουμε όταν το ηλιακό φως διασκορπίζεται από τα μόρια του αέρα ανάμεσα σ' εμάς και στο άγαλμα. Το ίδιο αποτέλεσμα δημιουργείται από ένα βρώμικο ρεύμα αέρα. Εάν ένα σύννεφο καλύψει τον ήλιο, η ορατότητα βελτιώνεται δραματικά.

Τα μόρια των αερίων είναι πολύ μικρά (διαμέτρου $0,0005\mu=0,5\text{nm}$). Διασκορπούν το φως (φαινόμενο Rayleigh), αλλά όχι τόσο επαρκώς όσο τα μόρια με διάμετρο κοντά στο μήκος κύματος του ορατού φωτός ($\approx 0,3-0,6\mu$). Ο διασκορπισμός από μόρια ή σωματίδια αλλάζει το χρώμα του φωτός. Επειδή, το μήκος κύματος του χρώματος μπλε είναι μικρότερο από αυτό του κόκκινου, η αναλογία μήκος κύματος-μέγεθος του σωματιδίου είναι μικρότερη για το μπλε απ' ότι για το κόκκινο, κάνοντας το μπλε πιο εύκολο να διασκορπιστεί απ' ότι το κόκκινο. Γι' αυτό, ο ουρανός φαίνεται μπλε: όταν βλέπουμε πέρα από τον ήλιο, βλέπουμε το μπλε μέρος του ηλιακού φωτός να διασκορπίζεται προς το μέρος μας, κυρίως από μόρια οξυγόνου. Γι' αυτό τον λόγο επίσης τα ηλιοβασιλέματα είναι πορτοκαλί ή κόκκινα: Στην ανατολή και στη δύση, βλέπουμε τον ήλιο μέσω μιας μακρύτερης στήλης αέρα απ' ότι το μεσημέρι, έτσι περισσότερο μπλε χρώμα διασκορπίζεται. Συνήθως, τα ηλιοβασιλέματα είναι πιο κόκκινα απ' ότι οι ανατολές. Η ηλιακή θερμότητα που εκπέμπει το έδαφος κατά τη διάρκεια της ημέρας παράγει μια υψηλότερη συγκέντρωση σωματιδίων στον αέρα στη δύση απ' ότι στην ανατολή του ηλίου. Αυτά τα σωματίδια διασκορπίζουν όλο το φως, έτσι ώστε η ηλιακή ένταση είναι μικρότερη στη δύση απ' ότι στην ανατολή και διασκορπίζουν το μπλε φως επαρκέστερα απ' ότι το κόκκινο.



Φιγούρα 2.8:

Δύο απόψεις του κέντρου του Λος Άντζελες (α) μια μέρα με δυνατούς ανέμους από μια μη μολυσμένη περιοχή φέρνει καθαρό αέρα στην περιοχή, (β) κατά τη διάρκεια του πρωινού μιας ημέρας με έντονη αντιστροφή με καθαρό αέρα πάνω από την αντιστροφή και αιθαλώδη αέρα από κάτω. Η ορατότητα σκιάζεται από αναρίθμητα λεπτά σωματίδια (διαμέτρου περίπου από 0.1 έως 1 μ), σχηματιζόμενα κυρίως στον αέρα από υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου.

Η φιγούρα 2.8 δείχνει την ομίχλη που προκλήθηκε από ένα στρώμα αστικού καπνού, παγιδευμένη κοντά στο έδαφος και περιέχοντας πολλά σωματίδια. Η ομίχλη αυτή είναι ορατή, γιατί κρύβει την εικόνα των κτιρίων και των δρόμων και γιατί διασκορπίζει ηλιακό φως στα μάτια μας. Τα σωματίδια στη δεύτερη φωτογραφία είναι κυρίως δευτερεύοντα και παράγονται στην ατμόσφαιρα με χημικές αντιδράσεις μεταξύ κύριων ρύπων που εκπέμπονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Υπάρχουν και αιτίες που εμποδίζουν την ορατότητα που δεν οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα, π.χ. δευτερεύοντα σωματίδια που σχηματίζονται από υδρογονάνθρακες που απελευθερώνονται από τα φυτά, σκόνη που μεταφέρεται με τους ανέμους και αλάτι που διασκορπίζεται από τον ωκεανό. Στις περισσότερες μεγάλες πόλεις, ειδικά κατά τις περιόδους χαμηλών ανέμων, αυτά τα δευτερεύοντα σωματίδια μπορούν να δημιουργήσουν ομίχλη. Η ορατότητα είναι πολύ καλύτερη σε ξηρά κλίματα απ' ό,τι σε υγρά, κυρίως γιατί τα σωματίδια απορροφούν την υγρασία από την ατμόσφαιρα και έτσι μεγαλώνουν σε μέγεθος τόσο ώστε να γίνονται πιο ικανά να διασκορπίζουν το φως. Ο διασκορπισμός του φωτός και η απορρόφηση σωματιδίων χρησιμοποιούνται ως τρόποι εκτίμησης των εκπομπών ρύπων από τα φουγάρα και από τις καμινάδες. Στις πόλεις αυτές οι ομίχλες μπορεί και να είναι ωφέλιμες, γιατί προειδοποιούν το κοινό για το γεγονός ότι αόρατοι ρύποι είναι ίσως παρόντες. Αυτές οι ορατές ομίχλες έχουν ενθαρρύνει τους πολίτες να εκπληρώσουν για το κόστος του ελέγχου της μόλυνσης του αέρα, περιλαμβάνοντας και τον έλεγχο των αόρατων ρύπων που μπορεί να είναι πιο επικίνδυνοι για την υγεία τους απ' ό,τι τα ορατά σωματίδια των ομιχλών. Σε απομονωμένες και αξιοθέατες περιοχές οι ομίχλες είναι πιο ενοχλητικές, γιατί κρύβουν τη θέα. Το 1977 η Clean Air Act θέσπισε κανόνες για την προστασία της ορατότητας σε αξιοθέατες περιοχές και

την επαναφορά της σ' αυτές τις περιοχές που έχουν εξευτελιστεί από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μέχρι τώρα ως τέτοιες περιοχές έχουν χαρακτηριστεί τα μεγάλα εθνικά πάρκα και οι περιοχές άγριας ζωής.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΝΟΜΟΙ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΦΙΛΟΣΟΦΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Οι περισσότερες δραστηριότητες για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα γίνονται στις Η.Π.Α. σε αναμονή των σχετικών νόμων και κανονισμών, οι οποίοι αλλάζουν συνεχώς. Οι λεπτομέρειες σχετικά μ' αυτούς που παρουσιάζονται σ' αυτό το βιβλίο είναι πρόσφατοι αλλά είναι σίγουρο ότι αλλάζουν συνέχεια. Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται κυρίως με τους νόμους οι οποίοι δεν έχουν αλλάξει ουσιαστικά τα τελευταία 20 χρόνια. Αυτό θα βοηθήσει στην κατανόηση των αλλαγών που θα γίνουν στο μέλλον.

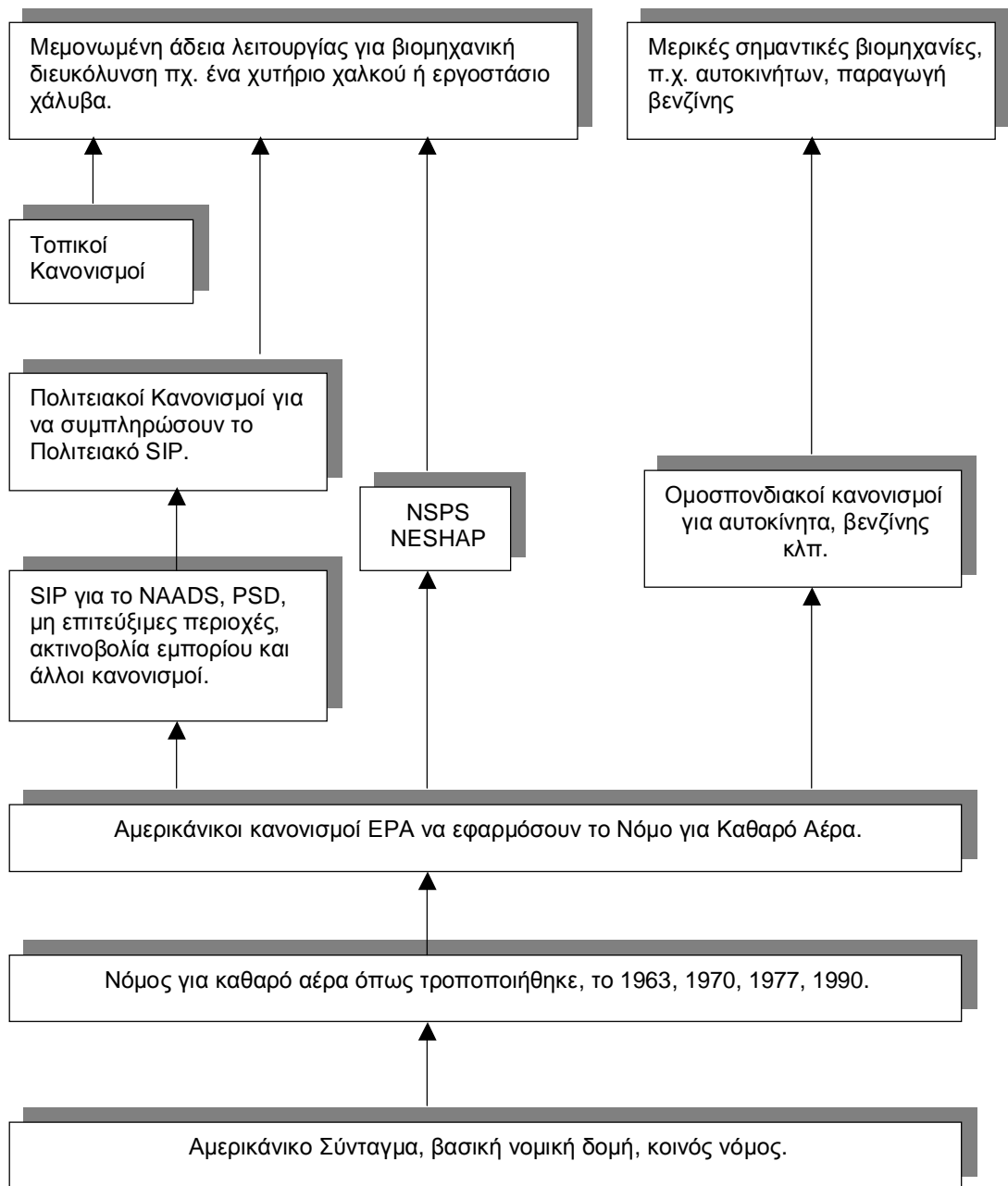
3.1 Νόμοι και κανονισμοί για την μόλυνση του αέρα.

Οι περισσότεροι μηχανικοί για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα δουλεύουν με άδειες. Έτσι και τα περισσότερα εργοστάσια (π.χ. χαλυβουργίες χημικοί αντιδραστήρες). Αυτές οι άδειες είναι εξουσιοδοτήσεις από τοπικές, κρατικές ή ομοσπονδιακές αρχές και συνήθως εκφράζονται ως: "Οι εκπομπές του ρύπου X από το εργοστάσιο

Υ δε θα ξεπεράσουν τη Ζ ποσότητα'' και συμπεριλαμβάνουν πληροφορίες για διάφορες καταγραφές όπως και διάφορα τεστ διαδικασιών. Οι νομικές αρχές αυτών των αρχών φαίνονται στη φιγούρα 3.1.

Η Clean Air Act του 1963 και με τις αλλαγές του 1970, 1977 και 1990, παρέχει τις νομικές βάσεις για τους νόμους σχετικά με τη μόλυνση του αέρα. Το E.P.A. (γραφείο περιβαλλοντολογικής προστασίας) ετοιμάζεται να εκδώσει λεπτομερείς κανονισμούς δείχνοντας πώς αυτοί οι νόμοι πρέπει να εφαρμοστούν. Αυτοί οι κανονισμοί είναι το θέμα ακροαματικών διαδικασιών, εγκρίσεων διαφόρων υπουργείων κλπ. Όταν επιβιώσουν αυτά τα τεστ, έχουν τη δύναμη του νόμου. Μερικοί από αυτούς τους κανονισμούς ισχύουν για όλο το κράτος.

Άλλα μέρη αυτών των κανονισμών είναι λεπτομερείς οδηγίες στις πόλεις στο πώς να ετοιμάσουν (SIP_s) για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα στην περιοχή τους. Αυτά τα σχέδια πρέπει να περάσουν από την έγκριση του κοινού και από το E.P.A. Βασιζόμενες στα (SIP_s) τους οι πόλεις ετοιμάζουν κανονισμούς που περιλαμβάνουν με λεπτομέρειες τον τρόπο λειτουργίας των διαφόρων εργοστασίων της περιοχής τους. Επίσης, περιλαμβάνουν ομοσπονδιακούς κανονισμούς (NSPS, NESHAPS) και ίσως και τοπικούς. Μια κατασκευάστρια εταιρεία αυτοκινήτων πρέπει να έχει άδεια λειτουργίας από το κράτος και πιστοποιητικό από το E.P.A. Τα άτομα μεμονωμένα δεν χρειάζονται γενικά τέτοιες άδειες. Επηρεάζονται άμεσα από τοπικούς κανονισμούς και κρατικούς οδικούς κανονισμούς και επιθεωρήσεις εκπομπών από αυτοκίνητα και έμμεσα από τους κανονισμούς για αυτοκίνητα και καύσιμα.



Φιγούρα 3.1:

Η ροή της νόμιμης αρχής που οδηγεί σε λειτουργικές άδειες μόλυνσης του αέρα στις ΗΠΑ. SIP (Σχέδιο Εφαρμογής της Πολιτείας): NAAQS (Εθνικοί Περιβαλλοντικοί Κανονισμοί Ποιότητας του Αέρα), PSD (Πρόληψη Σημαντικής Επιδείνωσης), NSPS (Κανονισμοί Νέας Πηγής Απόδοσης), NESHAP (Εθνικός Κανονισμός Εκπομπής για Επικίνδυνους Ρυπαντές του αέρα).

3.2 Φιλοσοφίες σχετικά με τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα.

Η επιθυμία όλων μας είναι να έχουμε ένα καθαρό περιβάλλον χωρίς να μας κοστίζει τίποτα. Αυτό φαίνεται αδύνατο, έτσι ο λογικός μας στόχος είναι να έχουμε ένα καθαρό περιβάλλον, με κατάλληλο κόστος διαχωριζόμενο κατάλληλα στις βιομηχανίες, στους ιδιοκτήτες αυτοκινήτων, στους ιδιοκτήτες σπιτιών και στις άλλες πηγές μόλυνσης.

Οι λεπτομερείς κανονισμοί μπορούν να καθοριστούν με αυστηρό ή χαλαρό τρόπο. Ο καθένας είναι ελεύθερος να διαλέξει ποια φιλοσοφία θα εφαρμόσει. Μια τέλεια φιλοσοφία για τους κανονισμούς θα ήταν φθηνή, απλή, εύκαμπτη, εύκολη στην επιβολή της και πρωτοποριακή. Φθηνή για να έχουμε περισσότερα οφέλη. Απλή για να την καταλαβαίνουμε και να μην χρειάζεται νομική μετάφραση για κάθε λέξη. Εύκολη στην επιβολή της για να καθορίζει τις αρμοδιότητες και τις ευθύνες του καθενός και να μην χρειάζεται η δικαστική οδός. Εύκαμπτη για να μπορεί να αντιμετωπίζει τις διάφορες δυσκολίες και πρωτοποριακή για να χρησιμοποιεί νέες πληροφορίες και νέες εξελίξεις.

3.3 Οι τέσσερις φιλοσοφίες.

Οι τέσσερις φιλοσοφίες που αναπτύσσονται εδώ είναι τα πρότυπα εκπομπών, τα πρότυπα της ποιότητας του αέρα, οι φορολογίες για τις εκπομπές και τα πρότυπα ωφέλιμου κόστους. Οι δύο πρώτες χρησιμοποιούνται στις Η.Π.Α. και σε άλλες βιομηχανικές χώρες και είναι πολύ καλά αντιληπτές από όλους. Οι τελευταίες δύο έχουν υπάρξει κυρίως ως θέμα ακαδημαϊκών εκδόσεων και δεν έχουν πρακτική εφαρμογή. Παρ' ότι οι φιλοσοφίες αυτές αναλύονται εδώ ξεχωριστά πολλές φορές εφαρμόζονται μαζί.

3.3.1 Η φιλοσοφία του προτύπου εκπομπών.

Η βασική ιδέα αυτής της φιλοσοφίας είναι ότι υπάρχει ένας μέγιστος πιθανός βαθμός ελέγχου των εκπομπών. Αυτός ο βαθμός ποικίλλει μεταξύ των διαφόρων τύπων ρύπων (π.χ. αυτοκίνητα) αλλά μπορεί να καθοριστεί για κάθε τύπο. Εάν λοιπόν, καθοριστεί αυτός ο βαθμός για κάθε τύπο και κάθε μέλος αυτού του τύπου βρίσκεται στο καθορισμένο όριο εκπομπών τότε η εκπομπή ρύπων θα είναι η ελάχιστη δυνατή. Επειδή ο ρυθμός εκπομπής ρύπων και η καθαρότητα του αέρα είναι ποσά αντιστρόφως ανάλογα, εάν εφαρμοστεί αυτή η φιλοσοφία θα έχουμε τον καθαρότερο δυνατό αέρα.

Προφανώς η πρώτη μεγάλη εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας ήταν η Alkali Acts στην Αγγλία το 1863. Αυτή ακολούθησε την εισαγωγή της διαδικασίας Leblanc κατά την οποία κατασκευαζόταν ανθρακικό νάτριο Na_2CO_3 . Στην αρχική μορφή της διαδικασίας το υδροχλωρικό οξύ (HCl) παραπροϊόν της αντίδρασης εκπεμόταν από το φουγάρο του αντιδραστήρα σαν ατμός ή καπνός. Αυτή η εκπομπή κατέστρεψε τη βλάστηση της περιοχής και οδήγησε σε διαμάχες και τέλος σε επιβολή νομοθεσίας. Η νομοθεσία όριζε ένα σώμα "επιθεωρητών αλκαλίων" των οποίων το καθήκον ήταν να επιθεωρούν ανά τακτά διαστήματα τους αντιδραστήρες αλκαλίων και να βρουν τις καλύτερες τεχνικές για ελαχιστοποίηση της εκπομπής βλαβερών ρύπων. Όταν μια τέτοια τεχνική βρέθηκε, εφαρμόστηκε για όλους τους αντιδραστήρες. Έτσι, τα όρια εκπομπών έγιναν πιο αυστηρά μόλις η τεχνολογία ελέγχου βελτιώθηκε. Τώρα, κάθε εργοστάσιο είναι υποχρεωμένο να ελέγξει τις εκπομπές του και να κρατάει τον εξοπλισμό ελέγχου σε καλή λειτουργική κατάσταση. Σε αυτό το είδος κανονισμού δεν υπάρχει ειδικός ρυθμός εκπομπής ή πειράματα εκπομπών. Αυτός που εγκαθιστά και λειτουργεί αυτό το σύστημα υποτίθεται ότι συμφωνεί με τον κανονισμό.

Αυτή η τεχνολογία εφαρμόζεται ακόμα σε περιπτώσεις που είναι δύσκολο να καθορίσουμε την ποσότητα των ρύπων που εκπέμπονται ανά ώρα. Για παράδειγμα οι κανονισμοί για μεγάλες δεξαμενές πετρελαίου απαιτούν οι δεξαμενές να έχουν οροφές που να επιπλέουν με καλοσχεδιασμένες και καλοδιατηρημένες φραγές. Ομοίως οι περισσότερες πόλεις απαιτούν οι σταθμοί υπογείων δεξαμενών και τα φορτηγά που τα γεμίζουν να συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές εξαιτίας μεταφοράς καυσίμων. Ο κανονισμός περιέχει τεχνική περιγραφή του εξοπλισμού της λειτουργίας και της διατήρησής του. Η απαγόρευση της ανοιχτής καύσης σκουπιδιών και αγροτικών αποβλήτων είναι ένα πρότυπο εκπομπής, γιατί το ανοιχτό καύσιμο προκαλεί παραγωγή περισσότερων ρύπων απ' ό,τι η κλειστή αποτέφρωση, η ταφή στη γη ή η ανακύκλωση. Με το να απαγορεύουμε το ανοιχτό κάψιμο, αναγκάζουμε και επιβάλλουμε τη χρήση καλύτερης τεχνολογίας. Επίσης έχουμε ορατές εκπομπές κάρβουνου από τους φούρνους και τα φουγάρα εργοστασίων. Οι κανονισμοί που περιορίζουν αυτές τις εκπομπές είναι μια μορφή πρότυπου εκπομπών. Το κοινό τεστ για ορατές εκπομπές του Ringleman είναι ένα φθηνό, γρήγορο και ευρέως διαδεδομένο εργαλείο για τους κανονισμούς εκπομπών.

Τα καύσιμα από το θείο, από τις ολεφίνες του πετρελαίου και από το οξυγόνο του πετρελαίου, αποτελούν και αυτά πρότυπα εκπομπών, γιατί τα περισσότερα καύσιμα θείου μπαίνουν στην ατμόσφαιρα με τη μορφή SO₂, οι ολεφίνες προκαλούν φωτοχημικό καπνό πιο πολύ απ' ό,τι άλλοι υδρογονάνθρακες και γιατί τα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν πετρέλαιο που περιέχει οξυγόνο εκπέμπουν λιγότερο CO από αυτά που χρησιμοποιούν άλλα πετρέλαια.

Ένα τελευταίο είδος προτύπου εκπομπών είναι ένα αριθμητικό. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς του E.P.A. ένας αντιδραστήρας παραγωγής ενέργειας με κάρβουνο του οποίου η

κατασκευή άρχισε μετά το Σεπτέμβριο του 1978 μπορεί να μην αποβάλλει στην ατμόσφαιρα πάνω από 0,03 σωματίδια ανά 10^6 Btu καμένου καυσίμου, όπως έχει καθοριστεί από πειράματα ή όχι παραπάνω από 1% στάχτη καυσίμου. Οτιδήποτε είναι λιγότερο. Ομοίως, τα αυτοκίνητα που έχουν φτιαχτεί το 1981 και έπειτα μπορούν να μην εκπέμπουν πάνω από 0,41 gram/mile υδρογονάνθρακες.

Όλα αυτά τα είδη προτύπων εκπομπών έχουν την ίδια γενική ιδέα. Υπάρχει ένας βαθμός ελέγχου εκπομπών που είναι πρακτικό να εφαρμόζεται σε όλα τα μέλη και αυτός ο βαθμός απαιτείται από όλα τα μέλη. Αυτή η φιλοσοφία ήταν η βάση των περισσότερων δραστηριοτήτων για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα του βιομηχανικού κόσμου από το 1863 μέχρι το 1970. Στον ισχύοντα αμερικάνικο νόμο για τη μόλυνση του αέρα, δύο τομείς είναι "καθαρά" πρότυπα εκπομπών. Το NSPS και το NESHAP.

Η NSPS απαγορεύει σε μια εταιρεία που σχεδιάζει να κατασκευάσει εργοστάσιο που εκπέμπει ρύπους εάν πρώτα δεν το συγκρίνει με άλλα και δεν βρει ότι αυτό θα εκπέμπει τους λιγότερους.

Πίνακας 3.1:Κανονισμοί για την Απόδοση των Νέων Μόνιμων

Πηγών (συνήθως καλούνται νέοι κανονισμοί απόδοσης πηγής [NSPS])

Οι κανονισμοί που καταχωρούνται είναι για 68 βιομηχανικές κατηγορίες. Προσθέτονται τακτικά νέες κατηγορίες και οι υπάρχουσες τροποποιούνται. Αυτός δείχνει το είδος των ρυθμίσεων που περιέχονται σε αρκετά μεγαλύτερη συλλογή.

1. Εργοστάσιο ισχύος με καιόμενο άνθρακα των οποίων η κατασκευή έλαβε χώρα μετά τις 18 Σεπτεμβρίου 1978, πρέπει να μην εκπέμπουν τα Παρακάτω στην ατμόσφαιρα
 - α. Σωματιδιακή ύλη πάνω από $0.03 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$, ή 1% τέφρας

στερεών μέσα στο καύσιμο, όπιο είναι λιγότερο.

- β. Διοξείδιο του θείου Περισσότερο από $1.2 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$, ή περισσότερο από 30% του SO_2 που θα μπορούσε να δημιουργηθεί εάν το σύνολο του θείου μέσα στον άνθρακα μετατρέπεται σε SO_2 όπιο είναι λιγότερο.
 - γ. Οξείδια του αζώτου Περισσότερο από $0.6 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$, για τους περισσότερους άνθρακες, ή $0.5 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$, για υπο-ασφαλτούχο άνθρακα.
2. Οι μεγάλοι κλίβανοι αποτέφρωσης δεν θα εκπέμπουν αέριο στην ατμόσφαιρα που περιέχει σωματίδια σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερα από 0.08 του κόκκου / ξηρό σταθερό κυβικό πόδι, διορθωμένο στο 12% του CO_2 .
 3. Τα εργοστάσια τσιμέντου δεν θα εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα τα παρακάτω:
 - α. Αέρια από τον κλίβανο που περιέχουν περισσότερο από 0.30 lb/ton της τροφοδοσίας του κλιβάνου (ξηρά βάση).
 - β. Αέρια από τον ψυχαντήρα του κλίνκερ που περιέχει περισσότερο από 0.10 lb/ton της τροφοδοσίας του κλιβάνου (ξηρή βάση).
 4. Εργοστάσια νιτρικών οξειδίων δεν θα εκπέμπουν αέρια που περιέχουν περισσότερο από 3.0 lb του NO_2 ανά τόνο Παραγόμενου νιτρικού οξέως
 5. Εργοστάσια θειικών οξέων δεν θα εκπέμπουν αέρια που περιέχουν περισσότερο από 4 lb SO_2 και/ή 0.15 lb θειϊκού οξέος mist/ton του παραγόμενου οξέος (100% βάση).

Οι παραπάνω ρυθμίσεις περιορίζουν επίσης την αδιαφάνεια των στηλών καπνού από αυτά τα εργοστάσια, Κυρίως σαν ένα μέτρο ελέγχου, και έχουν πολύ λεπτομερείς περιγραφές δοκιμών και υποχρεώσεις παρακολούθησης.

Πριν την δράση της Clean Air Act του 1970, με την οποία ιδρύθηκε η NSPS, κάποιες πόλεις και κοινότητες στις Η.Π.Α. τακτικά καλούσαν διάφορες βιομηχανίες να εγκατασταθούν εκεί και να απολαμβάνουν τους χαλαρούς κανονισμούς για την μόλυνση και κάποιες βιομηχανίες ενθάρρυναν αυτή την τακτική. Οι κανονισμοί της NESHAP καλύπτουν ρύπους που πιστεύεται ότι δεν έχουν αρχικές τιμές (φινγ. 2.1). Για αυτούς, οποιαδήποτε έκθεση είναι πιθανό να βλάψει. Έτσι, επιθυμούμε να μειώσουμε τις εκπομπές όσο πιο πολύ γίνεται εφαρμόζοντας τα καλύτερα τεχνολογικά πρότυπα για τις εκπομπές όλων των ρύπων όλων των κατηγοριών. Αυτά τα δύο μέρη του ισχύοντα νόμου είναι "καθαρά" πρότυπα εκπομπών με την έννοια ότι οι ρυθμοί εκπομπών που επιτρέπονται καθορίστηκαν αυστηρά με δεδομένα της καλύτερης τεχνολογίας. Από την άλλη μεριά, τα πρότυπα εκπομπών για τα αυτοκίνητα καθορίστηκαν όχι απαιτώντας την καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία αλλά αποφασίζοντας παίρνοντας σα δεδομένο την καλύτερη ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε. Επειδή αυτά τα πρότυπα ήταν πιο αυστηρά από αυτά που ίσχυαν μέχρι τότε (1971) αναφέρονται ως πρότυπα εκπομπών "με την επιβολή της τεχνολογίας". Οι άδειες πολλών κρατικών και τοπικών οργανισμών ελέγχου της μόλυνσης του αέρα για διάφορα εργοστάσια βασίζονται εν μέρει στην άποψή τους για το τι είναι καλύτερη τεχνολογία και εν μέρει στην εφαρμογή της φιλοσοφίας για τα ποιοτικά πρότυπα του αέρα.

3.3.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προτύπων εκπομπών.

Ο πίνακας 3.2 συγκρίνει τα πρότυπα εκπομπών (και τις τρεις άλλες φιλοσοφίες που θα αναλύσουμε παρακάτω) με τη λίστα των ποιοτήτων που δόθηκαν προηγουμένως. Το κόστος της φιλοσοφίας του προτύπου

εκπομπών είναι πολύ άσχημο. Εάν εμείς ανεπίσημα εφαρμόσουμε τα ίδια πρότυπα εκπομπής σε μια ολόκληρη τάξη εκπομπών περιλαμβάνοντας αυτά που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές και αυτά που βρίσκονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, με ένα αυστηρό πρότυπο, τότε οι απομακρυσμένοι αντιδραστήρες θα κάνουν μια μεγάλη διαδικασία για πολύ μικρή μόνο μείωση της ζημιάς που προκαλούν στους δέκτες και οπότε ένα πολύ μικρό όφελος. Εάν το πρότυπο είναι χαλαρό, τότε οι αντιδραστήρες στις βιομηχανικές περιοχές δε θα ελέγχονται στο βαθμό που θα βλάπτουν τον περιβάλλοντα πληθυσμό.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση των φιλοσοφιών ελέγχου της μόλυνσης του αέρα

Επιθυμητή Ποιότητα	Πρότυπο Εκπομπής	Πρότυπο ποιότητας αέρα	Φόροι εκπομπών	Ανάλυση κόστους, όφελους
Κόστος	Πολύ κακό	Καλό	Ικανοποιητικό	Τέλειο
Απλότητα	Τέλειο	Φτωχό	Τέλειο	Άσχημο
Επιβολή	Τέλειο	Ικανοποιητικό	Τέλεια	Άγνωστο
Ευκαμψία	Φτωχό	Ικανοποιητικό	Όχι απαραίτητο	Άγνωστο
Πρωτοπορία	Ικανοποιητικό	Ικανοποιητικό	Καλό	Καλό

Η φιλοσοφία της απλότητας του προτύπου εκπομπών είναι τέλεια. Όλοι οι κανονισμοί αποτελούνται από επιτρεπόμενους ρυθμούς εκπομπών και περιγραφές πραγματικών μεθόδων για καθορισμό των προτύπων εκπομπών και της καλής λειτουργίας τους. Το πρόβλημα μεταξύ του κόστους και της απλότητας φαίνεται από την ιστορία των προτύπων εκπομπών για τα αυτοκίνητα. Το 1967 κατασκευαστές αυτοκινήτων έκαναν αίτηση να γράψουν πρότυπα εκπομπών για τα αυτοκίνητα που θα

ισχύουν σε όλες τις πόλεις και απαγορεύοντας από αυτές να γράφουν η κάθε μια τα δικά της. Και έτσι έγινε, διότι φοβήθηκαν την περιπλοκότητα διαφόρων αυτοκινήτων σε διάφορα πρότυπα. Το 1973 έκαναν αίτηση ζητώντας το αντίθετο και να τους επιτρέψει να χρησιμοποιήσουν τη "στρατηγική των δύο αυτοκινήτων" σύμφωνα με την οποία οχήματα που κάλυπταν τα αυστηρά πρότυπα εκπομπών να πωλούνται σε περιοχές με σοβαρά προβλήματα μόλυνσης του αέρα και αυτοκίνητα που ικανοποιούσαν κάποια πιο χαλαρά πρότυπα εκπομπών να πωλούνται σε περιοχές χωρίς σοβαρά προβλήματα μόλυνσης. Το έκαναν αυτό, γιατί πίστευαν ότι η παραπάνω διαδικασία που γίνονταν για την παραγωγή αυτοκινήτων που θα κάλυπταν τα αυστηρά πρότυπα για να χρησιμοποιηθούν τελικά σε περιοχές χωρίς προβλήματα μόλυνσης δεν ήταν και τόσο οικονομική. Η πρόταση δεν έγινε δεκτή. Η φιλοσοφία της επιβολής είναι τέλεια. Μόλις τα πρότυπα καθοριστούν και οι πραγματικές μέθοδοι οριστούν, ο καθένας ξέρει ποιον θα καταγράψει και γιατί κριτήρια παραβίασης μπορούν πολύ εύκολα να γραφτούν και ποινές να κανονιστούν. Η ευκαμψία όμως αυτής της φιλοσοφίας είναι φτωχή. Εάν μια βιομηχανία παραγγείλει εξοπλισμό για τον έλεγχο της μόλυνσης σε κίνηση καλής πίστης και ο εξοπλισμός δεν πληρεί τα προβλεπόμενα κριτήρια του κατασκευαστή (οπότε και τα πρότυπα εκπομπών) μπορεί να πάρει χρόνια για να τον αντικαταστήσει. Πώς πρέπει λοιπόν οι αρχές ελέγχου της μόλυνσης του αέρα να αντιμετωπίσουν αυτήν την βιομηχανία; Με αυτή τη φιλοσοφία μπορούν να την κλείσουν ή να δώσουν την εναλλακτική λύση να λειτουργήσει μέχρι να διορθωθεί ο εξοπλισμός. Η πείρα δείχνει ότι το κλείσιμο των βιομηχανιών είναι πολιτικά αδύνατον και η λειτουργία θα φέρει πολλές καθυστερήσεις. Δεν υπάρχουν όμως άλλες λύσεις. Η πρωτοποριακή ικανότητα αυτής της φιλοσοφίας είναι ικανοποιητική. Εάν μια καινούργια φιλοσοφία κάνει δυνατό ένα χαμηλότερο πρότυπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο

για όλες τις πηγές που χτίστηκαν μετά από μια ορισμένη ημερομηνία. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται πολύ καλά στα αυτοκίνητα, των οποίων η διάρκεια ζωής είναι περίπου 10 χρόνια, αλλά όχι τόσο καλά στους βιομηχανικούς εξοπλισμούς των οποίων η διάρκεια ζωής είναι 30 με 50 χρόνια. Δίνοντας εντολή για ένα χαμηλότερο πρότυπο εκπομπής για τους αντιδραστήρες που χτίστηκαν μετά από μια συγκεκριμένη ημερομηνία θα βοηθήσει την ποιότητα αέρα στις αναπτυσσόμενες περιοχές μετά από αυτή την ημερομηνία, αλλά όχι αυτές χωρίς εξέλιξη. Το μεγαλύτερο μέρος από την πρόοδο που έγινε στον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα ανάμεσα στο 1863 και στο 1970 έγινε με την εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας. Μεγαλύτερη πρόοδος στον έλεγχο των ρύπων θα γίνει εφαρμόζοντας πιο αυστηρούς ελέγχους από αυτούς που χρησιμοποιούμε τώρα, τόσο στις νέες όσο και στις προϋπάρχουσες πηγές. Η φιλοσοφία του προτύπου εκπομπών είναι άχρηστη σαν οδηγός στο να αποφασίσουμε πόσο αυστηροί οι έλεγχοι αυτοί πρέπει να είναι. Αυτό φαίνεται από το θέμα της επάρκειας σχεδιασμού ηλεκτροστατικών ιζημάτων για μεγάλες εκπομπές σωματιδίων π.χ. αντιδραστήρες ηλεκτρικής ενέργειας με κάψιμο κάρβουνου. Οι τυπικές συλλογές σωματιδίων με νέες εγκαταστάσεις έχουν αυξηθεί σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες από 90 μέχρι 99+ τοις εκατό. Φαίνεται ότι δεν υπάρχει λόγος που να μην φτάσει αυτό το ποσοστό το 99,99%, ή ακόμα καλύτερα. Η πιο γενική και απλή ισότητα που χρησιμοποιείται είναι η εξίσωση Deutsch-Anderson:

$$\epsilon_{\text{legco}} V_{\text{apódosh}} = 1 - \exp\left(-\frac{wA}{Q}\right) \quad (3.1)$$

όπου, W= μέση ταχύτητα ενός σωματιδίου προς τις μονάδες συλλογής,

A= επιφάνεια συλλογής,

Q= λόγος ογκομετρικής ροής του καθαρισμένου αερίου

Το κόστος ενός τέτοιου μηχανήματος είναι σχεδόν αναλογικό με την επιφάνεια συλλογής A, έτσι για μια συγκεκριμένη εγκατάσταση μπορούμε να πούμε:

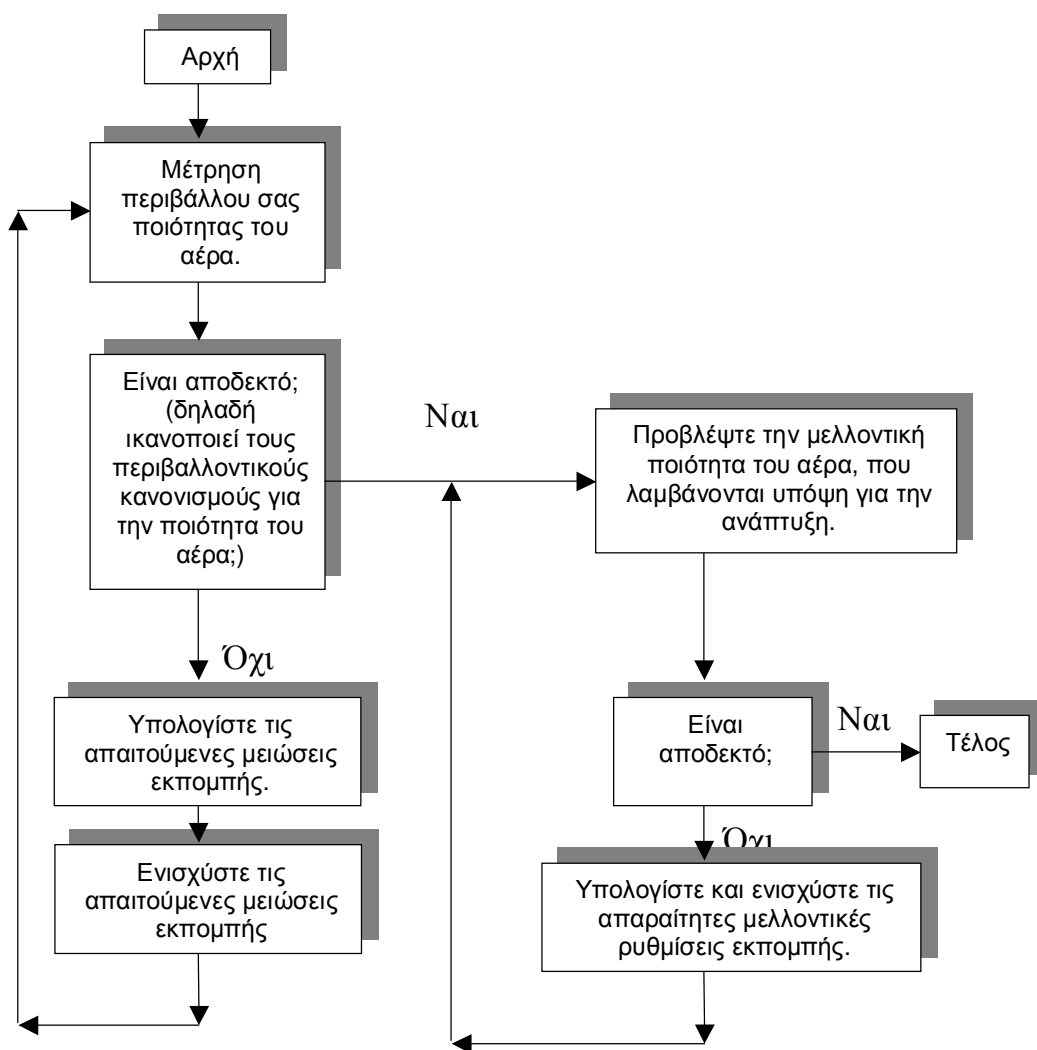
$$\text{έλεγχος απόδοσης } V = 1 - \exp(\text{κάποια σταθερά} \times \text{κόστος}) \quad (3.2)$$

Έτσι, σύμφωνα με την (3.2) εάν κοστίζει N δολάρια η εγκατάσταση ενός μηχανήματος με 90% απόδοση, θα κοστίζει 2N για 99%, 3N για 99,9%, 4N για 99,99% κλπ. (Αυτός ο υπολογισμός είναι σχετικός, γιατί τα μηχανήματα αυτά συγκεντρώνουν τα μεγάλα σωματίδια). Έτσι, καθώς η απόδοση θα αυξάνεται, το w θα μειώνεται. Σύμφωνα με τη σχέση κόστος / απόδοση, ποια θα ήταν η καλύτερη τεχνολογία ή η τιμή για καθαρότερο δυνατό αέρα για μια τέτοια εγκατάσταση; Μπορούμε να πετύχουμε όποιο βαθμό απόδοσης θέλουμε και μπορούμε να φτιάξουμε και τα μηχανήματα που χρειαζόμαστε. Εάν το καλύτερο μηχάνημα είναι στο 99,5% πρέπει να αναλογιστούμε ότι όλοι οι μελλοντικοί αντιδραστήρες θα βρίσκονται σ' αυτό το νούμερο; Φυσικά, θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε ή ακόμα και να φτιάξουμε συσκευές πιο αυστηρές στον έλεγχο, εάν θέλαμε. Εάν η κοινωνία είχε ατελείωτες πηγές και θέλαμε να τις εμπιστευτούμε στον έλεγχο ενός μόνο ρύπου, το ερώτημα δε θα ήταν δύσκολο. Αλλά η κοινωνία έχει περιορισμένες πηγές και πιθανώς θα χρησιμοποιήσει ένα μέρος τους μόνο για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα. Θα ήταν τρελό να τις χρησιμοποιήσει όλες για έναν και μόνο ρύπο. Αλλά η φιλοσοφία του καθαρότερου δυνατού αέρα, θα οδηγούσε αναπόφευκτα σ' αυτό. Εάν ακολουθήσουμε αυτή τη φιλοσοφία, θα οδηγηθούμε σε αδύνατα συμπεράσματα. Παρ' ότι η φιλοσοφία προτύπου εκπομπών ήταν πολύ χρήσιμη στο παρελθόν, μας βοηθάει πολύ λίγο για το μέλλον.

3.3.2 Η φιλοσοφία του προτύπου ποιότητας αέρα.

Εάν η φιλοσοφία του προτύπου εκπομπών είναι λογικά η φιλοσοφία του "καθαρότερου αέρα", η φιλοσοφία του προτύπου αέρα είναι λογικά η φιλοσοφία της "μηδενικής ζημιάς". Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύσαμε την ιδέα των αρχικών τιμών. Η φιλοσοφία του προτύπου ποιότητας αέρα βασίζεται στην υπόθεση ότι η πραγματική κατάσταση για τους περισσότερο σημαντικούς ρύπους είναι αυτή που φαίνεται στη φιγούρα 2.1. Εάν αυτή η υπόθεση είναι αληθινή και εάν μπορούμε να καθορίσουμε τις συγκεντρώσεις του ρύπου (μαζί και την ώρα έκθεσης) που ανταποκρίνονται σ'αυτές τις αρχικές τιμές και κανονίσουμε το χρόνο, το μέρος και το ποσό των εκπομπών του ρύπου και εγγυηθούμε ότι αυτές οι αρχικές τιμές ποτέ δεν υποβληθούν, τότε δε θα υπάρξει πουθενά και ποτέ μόλυνση του αέρα. Η Clean Air Act προσπαθεί να κάνει ακριβώς αυτό. Για να καταλάβει κάποιος καλύτερα αυτή τη φιλοσοφία πρέπει να μελετήσει τα δεδομένα ανταπόκρισης της δόσης και να καθορίσει τις αρχικές τιμές. Στους αμερικάνικους νόμους για την μόλυνση του αέρα όλα αυτά καθορίζονται για την "προστασία της ανθρώπινης υγείας" και ονομάζονται NAAQS. Η E.P.A. έχει θεσπίσει τέτοια πρότυπα για έξι σημαντικούς ρύπους που φαίνονται στον πίνακα 2.3. Οι πόλεις προσπαθούν τώρα να διασφαλίσουν αυτά τα πρότυπα και να μην επιτρέψουν την παραβίασή τους ποτέ και πουθενά. Η διαδικασία φαίνεται στη φιγ. 3.2. Η πορεία για ένα συγκεκριμένο ρύπο σε μία συγκεκριμένη περιοχή ξεκινάει με μέτρηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Εάν η συγκέντρωση του ρύπου είναι αποδεκτή (μικρότερη από τη NAAQS), τότε η ποιότητα του αέρα προβλέπεται για το μέλλον. Εάν και αυτό είναι αποδεκτό, τότε δεν χρειάζεται καμία περαιτέρω ενέργεια. Εάν οι μελλοντικές συγκεντρώσεις (λαμβάνοντας υπόψη τον πληθυσμό και τη βιομηχανική αύξηση) υπερβούν τα πρότυπα,

τότε κανονισμοί εκπομπής πρέπει να θεσπιστούν για να αποτραπεί η προβλεπόμενη παραβίαση. Εάν οι συγκεντρώσεις των ρύπων είναι μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες τιμές, τότε οι εκπομπές πρέπει να μειωθούν για να φέρουν τις τιμές που ισχύουν, σε συμφωνία με τα πρότυπα. Ο καθορισμός ποιών εκπομπών θα μειωθούν και κατά πόσο, απαιτεί υπολογισμό της σχέσης εκπομπών και ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα.



Φιγούρα 3.2:

Αναπαράσταση διαγράμματος ροής των Εθνικών Περιβαλλοντικών Κανονισμών για την ποιότητα του αέρα.

Χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα, κάποιος μπορεί να υπολογίσει τις απαιτούμενες μειώσεις στις εκπομπές και να ενεργοποιήσει τους κανονισμούς προκειμένου να αναγκάσει την μείωση των εκπομπών. Μόλις οι εκπομπές μειωθούν μετριέται πάλι ο ατμοσφαιρικός αέρας. Εάν πάλι δε συμφωνούν τα αποτελέσματα με τα πρότυπα, τότε ολόκληρος ο κύκλος πρέπει να επαναληφθεί μέχρι να συμφωνήσουν. Αυτή η διαδικασία άρχισε στις Η.Π.Α τον Απρίλιο του 1971 και η συμφωνία με όλα τα πρότυπα έγινε το 1975. Στις πόλεις ζητήθηκε να ετοιμάσουν τα SIP, τους και κανονισμούς για να τους εφαρμόσουν σε κάθε έναν από τους σημαντικούς ρύπους. Το να έρθουν σε συμφωνία με τα πρότυπα ήταν πιο δύσκολο απ' ό τι το 1971. Το 1974, 19 χρόνια μετά τις αρχικές προθεσμίες, πολλά πρότυπα δεν έχουν επιτευχθεί σε περιοχές με πολύ σοβαρά προβλήματα. Στο μεγαλύτερο μέρος αποτύχαμε γιατί υποτιμήσαμε τις ολικές εκπομπές, υπερτιμήσαμε τα μέτρα ελέγχου και χρησιμοποιήσαμε αισιόδοξα μοντέλα για να προβλέψουμε την ποιότητα του μελλοντικού αέρα. Η διαδικασία που φαίνεται στη φιγούρα 3.2 έγινε ταυτοχρόνως για κάθε έναν από τους έξι ρύπους. Για τις πόλεις και τους ρύπους τους οποίους τα πρότυπα δεν έχουν επιτευχθεί, η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι ο αέρας να γίνει τόσο καθαρός όσο ορίζουν τα διάφορα πρότυπα.

3.3.2.1 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της φιλοσοφίας του προτύπου ποιότητας αέρα.

Συγκρίνοντας αυτή τη φιλοσοφία με τη λίστα των επιθυμητών ποιοτήτων που περιγράψαμε πριν στον πίνακα 3.2, βλέπουμε ότι το κόστος είναι καλό αλλά όχι τέλειο. Έχει τις αρετές του να συγκεντρώνει τους ελέγχους εκπομπών στις περιοχές με τα προβλήματα μόλυνσης και να επιτρέπει τις υψηλότερες εκπομπές σε περιοχές με λιγότερο σοβαρά προβλήματα.

Ωστόσο, εάν δημιουργηθεί μια ομάδα κανονισμών θα πρέπει να εφαρμοστεί για όλες τις περιοχές ακόμα και γι' αυτές που οι άνθρωποι επισκέπτονται σπάνια ή καθόλου. Έτσι, αυτή η φιλοσοφία απαιτεί διάφορους ελέγχους από τους οποίους η μείωση της ζημιάς είναι πολύ μικρή. Κανένας δεν έχει βρει τρόπο να γράψει απλούς κανονισμούς βασιζόμενους σ' αυτή τη φιλοσοφία. Οι καλύτερες προσπάθειες της E.P.A. να γράψει τέτοιους κανονισμούς για να ενισχύσει την NAAQS, αποτελούν θέμα ατελείωτων νομικών διαμαχών. Ο λόγος για αυτήν την περιπλοκότητα είναι ότι προσπαθούμε να ελέγξουμε τη συγκέντρωση των ρύπων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αυτές οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται από μια ποικιλία εκπομπών. Η σύνδεση μεταξύ εκπομπών και ποιότητας ζωής σε μια δεδομένη περιοχή εξαρτάται από την μετεωρολογική μεταφορά και τον καταμερισμό των ρύπων και από τις αντιδράσεις των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κανένα από αυτά τα θέματα δεν έχει γίνει αρκετά αντιληπτό για να επιτρέψει τους ακριβείς υπολογισμούς συγκεκριμένων ρύπων σε αστικές περιοχές. Με δεδομένη αυτή την αβεβαιότητα, οι κανονισμοί με τους οποίους προσπαθούμε να αντιμετωπίσουμε κοντινούς και μακρινούς ρύπους έχουν οδηγηθεί στα δικαστήρια, καταλήγοντας σε πολλές αλλαγές και περιπλοκότητες.

Η δυσκολία επιβολής αυτής της φιλοσοφίας πηγάζει από την ίδια αιτία που πηγάζει και η περιπλοκότητά της. Όταν δεν επιτυγχάνονται τα πρότυπα, ο ένοχος δεν είναι προφανής. Εάν ο ρύπος έχει μόνο μία σημαντική πηγή στην περιοχή, η ανάθεση ευθυνών είναι εύκολη. Εάν ο ρύπος είναι δευτερεύων όπως το όζον, τότε η ανάθεση ευθυνών είναι πολύ δύσκολη. Η ευκαμψία της φιλοσοφίας αυτής είναι καλή. Εξαιτίας των πολλών τρόπων με τους οποίους επιτυγχάνονται τα πρότυπα αυτοί που έχουν να κάνουν με την ποιότητα του αέρα είναι εύκαμπτοι και κάθε κρατικό ή τοπικό γραφείο μπορεί να γράψει λεπτομερείς κανονισμούς μέσα σε όρια βέβαια. Ειδικές περιπτώσεις και επείγοντα περιστατικά

μπορούν να χειριστούν τυπικά. Επίσης, η πρωτοποριακή ικανότητα του προτύπου είναι καλή. Καθώς καινούργια δεδομένα εμφανίζονται, τα πρότυπα μπορούν να αλλάξουν, αλλά τέτοιες αλλαγές απαιτούν καινούργιους κανονισμούς που είναι και ακριβοί και χρονοβόροι. Όταν η E.P.A. άλλαξε το TSP πρότυπο σε PM10, κάθε μία από τις πόλεις έπρεπε να γράψει ένα καινούργιο SIP και νέους κανονισμούς. Τα SIPs αλλάζουν εξαιτίας των καινούργιων δεδομένων και πληροφοριών. Μια καθαρή δυσκολία με αυτή τη φιλοσοφία που οδήγησε σε δικαστική δράση είναι η "μη-υποβίβαση ή μη-χειροτέρευση". Εάν ήταν απόλυτα αληθινό ότι δεν υπάρχει ζημιά, καθόλου και κανενός είδους σε συγκεντρώσεις κάτω από τις αρχικές αξίες, τότε δε θα ήταν λογικές οι αντιθέσεις στις μολύνσεις μέχρι αυτές τις τιμές. Οι γραμμές -δράσεις της E.P.A. για τις πόλεις έλαβαν υπόψη τους αυτή την άποψη. Διαδηλώνοντας για τους κανονισμούς μια ομάδα από περιβαντολλογικά γκρουπ, απέδειξε ότι αυτή η απόδοση δεν ήταν αυτό που αναμένονταν, ούτε ήταν απόλυτα συμβατό με τα πρότυπα της E.P.A. Παράλληλα μ' αυτά τα νομικά ερωτήματα, οι λογικές βάσεις αυτής της άποψης είναι: (1) ότι ο καθορισμός των αρχικών τιμών έγινε με περιορισμένα δεδομένα και δεν μπορούμε να είμαστε απόλυτα σίγουροι ότι δεν θα βλάψουμε τον αέρα μιας περιοχής μολύνοντας μέχρι τα καθορισμένα όρια και (2) ότι η ορατότητα δεν έχει αρχικές τιμές. Έτσι, εάν ήταν να συμφωνήσουμε με τις αρχικές τιμές της NAAQS, οι περισσότερες από τις πιο όμορφες περιοχές θα ζούσαν μια σημαντική υποβίβαση της παραδοσιακά υψηλής ορατότητας τους και των καθαρών ουρανών τους. Σύμφωνα με αυτούς τους κανονισμούς η συγκέντρωση ενός ρύπου σε περιοχές με καθαρό αέρα, επιτρέπεται να αυξηθεί, αλλά μόνο σε μικρές ποσότητες. Αυτό το πρόβλημα και η νομική του λύση καθαρά φανερώνουν την πιο βασική δυσκολία με αυτή τη φιλοσοφία. Είναι απόλυτα εξαρτώμενη από το συμπέρασμα ότι υπάρχουν αρχικές τιμές κάτω από τις οποίες δεν υπάρχει βλάβη. Όσον

αφορά την ορατότητα αυτή η υπόθεση είναι φανερά λανθασμένη. Ωστόσο, όσο πιο πολλά δεδομένα συναθροίζονται, γίνεται πιο δύσκολο να πιστέψουμε ότι η ιδέα των αρχικών τιμών εφαρμόζεται στους ανθρώπινους πληθυσμούς. Έτσι, βλέπουμε ότι αυτή η φιλοσοφία δεν έχει υπόβαθρο. Εάν τα πράγματα έχουν έτσι, μπορούμε ακόμα να χρησιμοποιούμε τα πρότυπα ποιότητας του αέρα, αλλά θα πρέπει να διαλέξουμε κάποια άλλη φιλοσοφική βάση.

3.3.3 Η φιλοσοφία του φόρου εκπομπών.

Οι περισσότεροι από τους νόμους και κανονισμούς για τη μόλυνση του αέρα βασίζονται στις δύο προηγούμενες φιλοσοφίες. Ξέρουμε πολλά πράγματα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Οι δύο φιλοσοφίες που αναλύονται παρακάτω δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό πουθενά στον κόσμο, αλλά χρησιμοποιούνται περισσότερο σαν θεωρητικές αναλύσεις σε ακαδημαϊκά περιοδικά. Αντιπροσωπεύουν πιθανές μελλοντικές εναλλακτικές λύσεις. Οι νόμοι που βασίζονται σ' αυτή τη φιλοσοφία θα φορολογούν κάθε ρυπογόνο παράγοντα σύμφωνα με το ρυθμό εκπομπής του, π.χ (x) δρχ. για το ρύπο ψ. Αυτή η φορολογία θα εφαρμοστεί έτσι ώστε οι βιομηχανίες να βρουν την εγκατάσταση εξοπλισμού ελέγχου των ρύπων πιο οικονομική, απ' ότι να πληρώνουν φόρους. Από αυτή τη μορφή η φιλοσοφία αυτή είναι καθαρά πιο διαφορετική από τις δύο προηγούμενες. Οι φόροι στις εκπομπές ρύπων έχουν επίσης προταθεί ως συνδυασμός με τη φιλοσοφία του προτύπου της ποιότητας του αέρα. Σ' αυτόν τον συνδυασμό οι φόροι των εκπομπών θα δρούσαν σαν ένα προσθετικό μέσο για μείωση των εκπομπών σε χαμηλότερα επίπεδα απ' ότι αυτά του προτύπου ποιότητας του αέρα. Σ' αυτή τη περίπτωση οι δύο φιλοσοφίες θα δούλευαν παράλληλα. Μια εναλλακτική μορφή, θα είχε το ρυθμό της φορολογίας να αυξάνεται

σταθερά με τον καιρό μέχρι κάποια προκαθορισμένη ποιότητα αέρα να επιτυγχανόταν. Σ' αυτή την εκδοχή η φορολογία των εκπομπών δεν είναι μια ανεξάρτητη φιλοσοφία αλλά μια τακτική που χρησιμοποιείται ως εργαλείο της φιλοσοφίας προτύπου ποιότητας αέρα. Η φορολογία των εκπομπών μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μέλος μιας μεγαλύτερης τάξης φιλοσοφιών, τις ονομαζόμενες "οικονομικά ερεθίσματα". Τα άλλα μέλη αυτής της τάξης είναι μειώσεις φόρων, δάνεια χαμηλότοκα από την κυβέρνηση για εξοπλισμό ελέγχου της μόλυνσης και άμεσες επιχορηγήσεις για το έλεγχο της μόλυνσης. Όλα αυτά δεν έχουν προταθεί ως ξεχωριστές φιλοσοφίες, αλλά έχουν προταθεί και εφαρμοστεί κυρίως σαν τρόποι εφαρμογής των δύο προηγούμενων φιλοσοφιών. Η φιλοσοφία αυτή θεωρεί ότι το περιβάλλον έχει φυσικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης των ρύπων (με τα CFC_s σαν πιθανή εξαίρεση) και ότι σε οποιοδήποτε βαθμό μόλυνσης το περιβάλλον έχει μια ατελείωτη και ανανεώσιμη ικανότητα απορρόφησης και διαχωρισμού. Εάν έτσι, έχουν τα πράγματα και αν αυτή η ικανότητα εφαρμοστεί και στην δημόσια ιδιοκτησία, τότε σίγουρα θα εφαρμοστεί και από ιδιώτες. Εάν εφαρμόσουμε τελικά τη φιλοσοφία αυτή, τότε μπορούμε να πετύχουμε δύο επιθυμητά αποτελέσματα. Πρώτον, ο βαθμός ελέγχου της μόλυνσης από μεμονωμένες εταιρίες γίνεται εσωτερική οικονομική απόφαση. Στις δύο προηγούμενες φιλοσοφίες, εάν οι μεμονωμένες εταιρίες μπορέσουν να πείσουν τις αρχές ελέγχου σε πιο επιεικείς κανονισμούς, οι εταιρίες σώζουν λεφτά και πιθανόν πλεονεκτούν έναντι των ανταγωνιστών τους που δεν είναι ικανοί για κάτι παρόμοιο. Σ' αυτή τη φιλοσοφία κάθε εταιρία διαλέγει το βαθμό της επάρκειας ελέγχου που θα ελαχιστοποιήσει το σύνολο του κόστους και της φορολογίας. Η βιομηχανία είναι καλή σε τέτοιες οικονομικές επιλογές. Δεύτερον, η φιλοσοφία της φορολογίας των εκπομπών θα μειώσει τη λάθος κατανομή των πηγών ελέγχου της μόλυνσης. Εάν τη χρησιμοποιήσουμε, τα μικρά εργοστάσια θα το βρουν

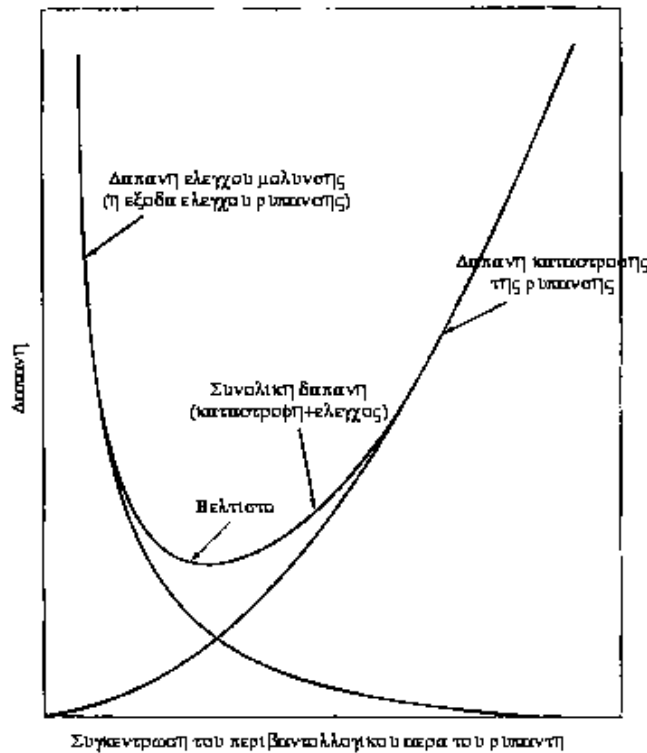
πιθανόν πιο οικονομικό να πληρώνουν φόρους από το να βάλουν συσκευές ελέγχου. Τα μεγάλα εργοστάσια θα βρουν αντιοικονομικές τις φορολογίες, οπότε και θα εγκαταστήσουν τις συσκευές ελέγχου. Πολλές εκδοχές αυτής της φιλοσοφίας έχουν προταθεί και συζητηθεί, αλλά καμία δεν έφτασε ώστε να γίνει νόμος. Πολλές πόλεις βάζουν κάποιο είδος φόρων, ανάλογο των εκπομπών των εργοστασίων, έτσι αυτό είναι ένα είδος φορολογίας. Τα ποσά αυτά είναι γενικά πολύ μικρότερα από το εάν ίσχυε η φιλοσοφία της φορολογίας των εκπομπών ρύπων. Η σύγκριση της φιλοσοφίας με τις επιθυμητές ποιότητες πρέπει να βασιστεί στο πώς θα λειτουργούσε αυτή η νομοθεσία. Το κόστος θα ήταν συγκριτικά καλό, γιατί κάθε εργοστάσιο θα αναγκάζονταν να πληρώνει τους φόρους. Παίρνοντας τις αποφάσεις (εάν θα υπάρχει έλεγχος και σε ποιο βαθμό) – ένα θέμα των οικονομικών των μεγάλων εργοστασίων- θα καταλήγαμε ότι θα συνέφερε πιο πολύ το να πληρώνουμε τους φόρους και να βάζουμε τον απαραίτητο εξοπλισμό σε απομακρυσμένες βιομηχανικές μονάδες, έτσι ώστε να μην έχουμε ζημιές. Εάν γινόταν μια προσπάθεια έτσι ώστε να επεκταθεί η φορολογία σε όλα τα εργοστάσια που εκπέμπουν συγκεκριμένους ρύπους, τότε το πρόβλημα θα γινόταν πιο περίπλοκο. Για τα οξείδια του θείου για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να φορολογήσουμε τα αυτοκίνητα, τα καύσιμα για τα σπίτια που βασίζονται στο θείο σε ένα βαθμό συμβατό με τις εκπομπές θείου από μεγάλες βιομηχανικές πηγές. Αυτό θα ήταν απλό, αλλά δε θα ήταν καθόλου απλό εάν αναφερόμασταν στις εκπομπές του NO_x. Εάν η φορολογία ήταν περιορισμένη στις μεγάλες πηγές, τότε η επιβολή θα ήταν τέλεια, αλλά αν εφαρμόζονταν παντού τότε αυτό θα ήταν πολύ δύσκολο. Η ευλυγισία του να χειρίζεται αυτού του είδους τα προβλήματα δε θα ήταν απαραίτητη. Οι άλλες φιλοσοφίες χρειάζονται την ευλυγισία έτσι ώστε να αντιμετωπίσουν κάποιο εργοστάσιο που λόγω οικονομικών προβλημάτων δεν μπορεί να φτάσει κάποια πρότυπα. Στη φιλοσοφία της φορολογίας το

εργοστάσιο απλώς πληρώνει τους φόρους του. Η ικανότητα για πρωτοπορία είναι καλή, γιατί ο ρυθμός της φορολογίας θα μπορούσε να μεταβληθεί εάν αυτό θα ήταν απαραίτητο. Πρέπει, όμως, να υπάρχει προσοχή, γιατί οι βιομηχανίες έχουν παραπονεθεί για τις δυσκολίες αλλαγής των προτύπων. Αυξάνοντας τη φορολογία για τις υπάρχοντες βιομηχανικές μονάδες προκαλείται μικρότερη οικονομική ζημιά απ' ότι μειώνοντας ένα πρότυπο εκπομπής. Στην περίπτωση της αύξησης του ρυθμού φορολογίας, το εργοστάσιο πιθανόν θα διάλεγε να πληρώσει τη φορολογία, ενώ στη μείωση του προτύπου εκπομπής, θα έπρεπε πιθανόν να αλλάξει τον εξοπλισμό του με άλλον καλύτερο. Παρ' ότι η φιλοσοφία είναι κοινά αποδεκτή από τους οικονομολόγους και είχε προταθεί από πολλούς υψηλά ιστάμενους, γενικά ήταν πάντα ένα ανάθεμα για την βιομηχανία. Μ' αυτή τη φιλοσοφία θα πρέπει να καθορίσουμε τη φορολογία. Γενικά, η πρόταση που ισχύει είναι ότι η φορολογία θα συνεχίζεται μέχρι ο αέρας να καθαριστεί "αρκετά". Το πόσο είναι ακριβώς το "αρκετά" θα καθορίζεται από τη φιλοσοφία του προτύπου ποιότητας αέρα. Θα μπορούσαμε να μη λαβαίνουμε υπόψη μας τη φιλοσοφία του προτύπου ποιότητας αέρα όταν αποφασίζαμε για τη φορολογία εκπομπών και να χρησιμοποιούσαμε κάποια καθαρά οικονομικά κριτήρια. Κάτι τέτοιο όμως δε θα συμπεριλάμβανε τη ζημιά της μόλυνσης του αέρα στο κοινό.

3.3.4 Η φιλοσοφία του κόστους-ωφέλειας.

Η φιλοσοφία αυτή υποθέτει ότι δεν υπάρχουν αρχικές τιμές ή και αν υπάρχουν είναι τόσο χαμηλές που δεν θα μπορούσαμε ποτέ να τις φτάσουμε. Έτσι, πρέπει να δεχτούμε ότι κάποια ποσότητα μολυσμένου αέρα θα βλάψει κάποιον, κάπου. Αυτό δηλαδή που προτείνει αυτή η φιλοσοφία είναι ότι πρέπει να κάνουμε μια απόπειρα να αποφασίσουμε

με λογικό τρόπο πόση ζημιά μπορούμε να δεχτούμε, οπότε αναλογικά, πόσο είμαστε πρόθυμοι να ξοδεύσουμε για να μειώσουμε τις εκπομπές σ' αυτό το επίπεδο.



Φιγούρα 3.3:

Σχηματική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ της καταστροφής, του ελέγχου και των συνολικών δαπανών, για έναν ρυπαντή σε μια θέση.

Η ιδέα αυτή εικονίζεται στη φιγούρα 3.3. Στα δεξιά, μια υψηλή συγκέντρωση ρύπου στον ατμοσφαιρικό αέρα αντιστοιχεί σε μηδενικό κόστος στον έλεγχο της μόλυνσης. Η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού αέρα μπορεί να μειωθεί από τις διαδικασίες ελέγχου της μόλυνσης του αέρα. Το κόστος ελέγχου ανεβαίνει καθώς η συγκέντρωση του αέρα μικραίνει. Στη μηδενική συγκέντρωση έχουμε μηδενικό κόστος ζημιών.

Τα κόστος ζημιών ανεβαίνει αργά στην αρχή και έπειτα πιο γρήγορα σε υψηλές συγκεντρώσεις. Το άθροισμα των δύο κοστών έχει ελάχιστη αξία σε ενδιάμεσες συγκεντρώσεις. Αυτό αντιστοιχεί στον καλύτερο έλεγχο μόλυνσης. Οτιδήποτε πάνω ή κάτω από αυτό είναι οικονομικά ασύμφορο. Η φιγούρα 3.3 είναι ένα παράδειγμα του κλασσικού προβλήματος "ελαχιστοποίηση του αθροίσματος δύο κοστών" που εμφανίζεται σε οικονομικά και μηχανολογικά κείμενα. Το ελάχιστο συμβαίνει όταν οι δύο καμπύλες είναι όμοιες και αντίθετες ή όταν:

$$\frac{d(\text{kόστοV elégcou mól unshV} + \text{kόστοV zhmiáV mól unshV})}{d(\text{sugkéntrwsh rúpou ston atmosfairikóu aéra})} = 0 \quad (3.3)$$

Η φιγούρα 3.3 είναι μια καλή απλούστευση, γιατί υπάρχει μόνο μία καμπύλη ελέγχου, μία καμπύλη κόστους ζημιάς και μία ατμοσφαιρική συγκέντρωση. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια καμπύλη ζημιάς για καθετί που εκτίθεται στη μόλυνση του αέρα, μία καμπύλη ελέγχου για κάθε ρυπογόνο παράγοντα (περιλαμβάνοντας αυτοκίνητα, καύσιμα για το σπίτι κλπ.) και μια διάσταση συγκεντρώσεων για κάθε ένα ρύπο ξεχωριστά σε κάθε περιοχή. Έτσι, η φιγούρα 3.3 δεν είναι στην πραγματικότητα μονοδιάστατη, αλλά πολυδιάστατη, με αριθμό διαστάσεων τόσες όσες είναι όλοι οι άνθρωποι του κόσμου το λιγότερο.

Η απλή εφαρμογή που φαίνεται στη φιγούρα 3.3 και στην εξίσωση (3.3) δε λαβαίνει υπόψη ερωτήσεις του τύπου: "Τίνος το κόστος", "τίνος τα οφέλη"; Εάν ο ρύπος εκπέμπεται από τα αυτοκίνητα μας, τότε το κόστος ελέγχου των εκπομπών του, πιθανόν θα κατανεμηθεί στους πολίτες με τον ίδιο τρόπο που κατανέμονται και οι ζημιές. Αλλά για τον ρύπο που εκπέμπεται από ένα εργοστάσιο και τραυματίζει όλη την κοινότητα, η

κατανομή είναι αρκετά άνιση. Ερωτήματα δικαιοσύνης και ισότητας πρέπει να ληφθούν υπόψη μαζί με τα ερωτήματα για τα οικονομικά.

Αυτός ο τρόπος συχνά κριτικάρεται από αυτούς που λένε ότι "Δεν μπορείτε να υποβιβάσετε το X σε νομισματικούς όρους" όπου X η ανθρώπινη υγεία, η ανθρώπινη ζωή, ή η ποιότητα του καθαρού αέρα ή η ζημιά από τη μόλυνση του αέρα. Αυτές οι αξίες είναι δύσκολο να εκχωρηθούν, αλλά η κοινωνία προφανώς το κάνει. Το πόσο αξίζει η υγεία φαίνεται από τα πόσα ο καθένας μας ξοδεύει για την ασφάλειά του ή για την καλύτερη ζωή του και από τα πόσα ξοδεύει η κοινωνία για τη βελτίωση της δημόσιας υγείας. Το πόσο αξίζει η ανθρώπινη ζωή φαίνεται από τα πόσα θα ξοδέψει η κοινωνία για την αποφυγή κάποιου ατυχήματος. Οι δικαστές μετράνε το χάσιμο της ζωής με οικονομικά μέσα κάθε μέρα. Το πόσο αξίζει ο καθαρός ουρανός φαίνεται από τα πόσα θα εγκαταλείψουν οι άνθρωποι για να μείνουν σε περιοχές με τόσο καθαρό ουρανό. Συχνά, οι άνθρωποι που κάνουν αυτή την κριτική διαφωνούν με τις εκτιμήσεις της κοινωνίας. Συγκρίνοντας αυτή τη φιλοσοφία με τις επιθυμητές ποιότητες βλέπουμε ότι η αποτελεσματικότητα του κόστους είναι τέλεια. Αφού ο στόχος αυτής της φιλοσοφίας είναι να λύσει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του ωφέλιμου κόστους, εάν αυτή η ελαχιστοποίηση γίνει σωστά το αποτέλεσμα θα είναι το καλύτερο δυνατό. Η φιλοσοφία του κόστους-ωφέλειας δεν είναι απλή. Το πρόβλημα της λύσης της ισότητας (3.3) με τόσες πιθανότητες όσοι είναι οι άνθρωποι και ενεργοποίηση των κανονισμών είναι πέρα από τις δυνατότητές μας. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας, είναι πιθανόν ποτέ να μην έχουμε κανονισμούς για τη μόλυνση του αέρα βασισμένους σε αναλύσεις κόστους ή σε άμεση εφαρμογή της ισότητας (3.3). Το πιο πιθανό είναι τρομερά απλοποιημένες μορφές να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα, να καθορίσουμε πρότυπα ποιότητας αέρα. Για πολλά χρόνια, νόμοι βασισμένοι στη φιλοσοφία προτύπου εκπομπών έχουν

συμπεριλάβει λέξεις και φράσεις όπως: “λαβαίνοντας υπόψη το κόστος” ή ανάλογες λέξεις σχετικά με τη λογική και την πρακτική. Αποφασίζοντας, τι είναι λογικό και τι πρακτικό, αυτοί που γράφουν τους κανονισμούς έχουν συνειδητά ή ασυνείδητα προσπαθήσει να αποφασίσουν ποια θα ήταν τα οφέλη ενός δεδομένου μέτρου ελέγχου και να εξισορροπήσουν αυτά τα οφέλη με το κόστος. Επειδή ο πίνακας 3.2 έχει γραφτεί για “καθαρές” φιλοσοφίες, η επιβολή και η ευλυγισία αυτής της φιλοσοφίας έχουν καταγραφεί ως “άγνωστες”. Η πρωτοποριακή ικανότητα πρέπει να είναι καλή, καθώς καινούρια δεδομένα για την μόλυνση και την τεχνολογία θα εμφανίζονται, μπορούμε να τα εισάγουμε στην ισότητα και να αλλάξουμε τους κανονισμούς έτσι ώστε να τα λάβουμε υπόψη. Αφού αυτή η φιλοσοφία, το πιο πιθανό είναι να μην χρησιμοποιηθεί σαν “καθαρή” φιλοσοφία, αλλά σαν οδηγός για καθορισμό διαφόρων προτύπων, γιατί την κατατάσσουμε ως τέτοια; Ο κύριος σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να κάνει σαφείς τις αληθινές φιλοσοφικές βάσεις με τις οποίες ενεργούμε. Εάν εφαρμόζαμε την φιλοσοφία ανεπίσημα, τότε οφείλουμε να το παραδεχτούμε. Εάν τα πρότυπα εκπομπής ή τα πρότυπα ποιότητας αέρα δεν είναι πραγματικά η βασική μας φιλοσοφία, τότε οφείλουμε να αφιερώσουμε τη σκέψη και την απαιτούμενη προσπάθειά μας κάνοντας πραγματικότητα τη φιλοσοφία κόστους-ωφέλειας.

3.4 Έλεγχος αγοράς και δικαιώματα εκπομπής.

Διεξάγοντας τις οδηγίες της Clean Air Act του 1970, οι περισσότερες πόλεις θέσπισαν κανονισμούς που επέβαλαν την τοποθέτηση ορίων εκπομπής σε κάθε εργοστάσιο. Οι βιομηχανίες κατέληξαν ότι μπορούσαν να επιτύχουν το όριο εκπομπής με πιο οικονομικό τρόπο όταν ελέγχαμε μεγάλες ρυπογόνες πηγές αυστηρότερα απ’ ότι τους επέτρεπαν οι

περιορισμοί και όχι όταν ελέγχανε τις μικρότερες σύμφωνα με το όριο. Αυτό οδήγησε σε νομικές αντιδικίες για το πόση άνεση είχαν τα εργοστάσια στο να επιτύχουν τους περιορισμούς. Στις βιομηχανίες δεν άρεσε καθόλου ο κανονισμός που εφαρμόστηκε από τη EPA.

Επίσης, οι βιομηχανίες θεωρούν ότι εάν δύο εργοστάσια εκπέμπουν x ρύπους το χρόνο και το SIP που πρέπει να εφαρμοστεί είναι 20% μείωση στους ρύπους τότε θα ήταν πιο φθηνό για το ένα εργοστάσιο να μειώσει τις εκπομπές κατά 40% απ' ότι και τα δύο να μειώναν 20% το καθένα. Εάν ένα εργοστάσιο μείωνε τις εκπομπές πιο πολύ απ' ότι έλεγαν οι κανονισμοί, τότε οι εργοστασιάρχες ζήτησαν από τους νομοθέτες να τους επιτρέψει να πουλήσουν, να καταθέσουν στην τράπεζα ή να εμπορευθούν την πίστωση αυτής της παραπάνω μείωσης εκπομπής. Αυτό έγινε δεκτό, το 1980 ενδυναμώθηκε και έγινε πλέον κανονισμός της Clean Air Act το 1990. Η παροχή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές που δεν επιτυγχάνουν τα πρότυπα της NAAQS. Από τους κανονισμούς της EPA μια νέα εγκατάσταση πρέπει να προκαλέσει κάπου στην περιοχή μια μείωση στην εκπομπή που είναι μεγαλύτερη από ότι οι επιτρεπόμενες εκπομπές της νέας εγκατάστασης. Αυτό προκαλεί τη φιλοσοφική ερώτηση, εάν κάποιος που έχει εκτεθεί σε X pounds/year του ρύπου Y έχει ένα διαπραγματεύσιμο δικαίωμα να το κάνει αυτό στο μέλλον. Στις Ηνωμένες Πολιτείες στο νόμο που ισχύει σήμερα η απάντηση είναι, ναι. Συνεπώς για κάποιο παλιό εργοστάσιο το πιο πολύτιμο πλεονέκτημα είναι το διαπραγματεύσιμο δικαίωμα να εκπέμπει αέριους ρύπους. Στο Los Angeles τα διυλιστήρια πετρελαίου έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι μπορούν να μειώσουν τις περιφερειακές εκπομπές υδατανθράκων αγοράζοντας και καταστρέφοντας τα παλιά αυτοκίνητα, παρά βελτιώνοντας τους ήδη αποδοτικούς ελέγχους στα διυλιστήρια. Η κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών από το 1980 έως το 1992 ήταν ιδιαίτερα προσανατολισμένη στην αγορά και υποστήριξε πολλές μελέτες

για να φέρει στην αγορά δυνάμεις στον τομέα της ρύθμισης της μόλυνσης του αέρα. Είναι πολύ νωρίς για να πούμε εάν έχει μακροπρόθεσμα ενεργητικά αποτελέσματα.

3.5 Οι κύριοι αμερικάνικοι νόμοι για τη μόλυνση του αέρα.

Οι νόμοι αυτοί περιέχονται κυρίως στους κανονισμούς της Clean Air Act. Ο νόμος διαπραγματεύεται νομικά, οικονομικά και διαδικαστικά θέματα που γενικά δεν ενδιαφέρουν τους μηχανικούς ελέγχου μόλυνσης. Οι νόμοι για τη μόλυνση του αέρα είναι οι ίδιοι με αυτούς για τη μόλυνση του νερού και του εδάφους. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί και οι νόμοι δοκιμάζονται και διατυπώνονται στις Η.Π.Α. και κατόπιν δίνονται για χρήση και σε άλλες ενδιαφερόμενες χώρες.

Πίνακας 3.3: Οι πιο σημαντικοί παράγραφοι του Νόμου Καθαρού Αέρα του 1970 όπως τροποποιήθηκε το 1977 και το 1990.

Παράγρ- αφος	Τίτλος	Κύριες διατάξεις
107	Περιοχές ελέγχου της Ποιότητας του αέρα (AQCR)	Διαιρεί τη χώρα σε περιοχές. Οι περιοχές πρέπει να εφαρμόζουν την ποιότητα του αέρα υπό εποπτεία.
109	NAAQS	Καθιερώνει τους Εθνικούς Κανονισμούς για την Ποιότητας του Αέρα στο περιβάλλον
110	Σχέδια εφαρμογής (SIP)	Απαιτεί από τις πολιτείες να προετοιμάσουν και να ενισχύσουν τα πολιτειακά σχέδια εφαρμογής. Δίνει λεπτομέρειες για το πως αυτό πρέπει να

		γίνει.
111	NSPS	Καθιερώνει τους Κανονισμούς Απόδοσης για νέες μόνιμες πηγές, συνήθως καλούμενες νέοι κανόνες απόδοσης πηγής
112 και 301-306	NESHAP	Καθιερώνει εθνικούς κανόνες εκπομπής για επικίνδυνους αέριους ρυπαντές.
160-169	PSD	Σχεδιάζει κανόνες και ρυθμίσεις για περιοχές με καθαρότερο αέρα από το NAAQS και για την προστασία της ορατότητας.
171-192	Περιοχές όπου δεν έχει επιτευχθεί ο στόχος	Δίνει λεπτομερείς Περιγραφές του πρέπει να γίνει στις Περιοχές όπου δεν αντιμετωπίζεται συνήθως ο NAAQS.
202-235	Κινούμενες πηγές	Θέτει τον έλεγχο των εκπομπών των κινούμενων οχημάτων κυρίως στα χέρια της ομοσπονδιακής κυβέρνησης, ορίζει τους κανόνες κινούμενων οχημάτων και καυσίμου
401-416	Έλεγχος εναπόθεσης οξέος	Καθιερώνει ένα ομοσπονδιακό πρόγραμμα ελέγχου της εναπόθεσης του οξέος.
601-618	Προστασία του όζοντος της στρατόσφαιρας	Καθιερώνει προγράμματα για την προστασία του στρώματος του όζοντος της στρατόσφαιρας.

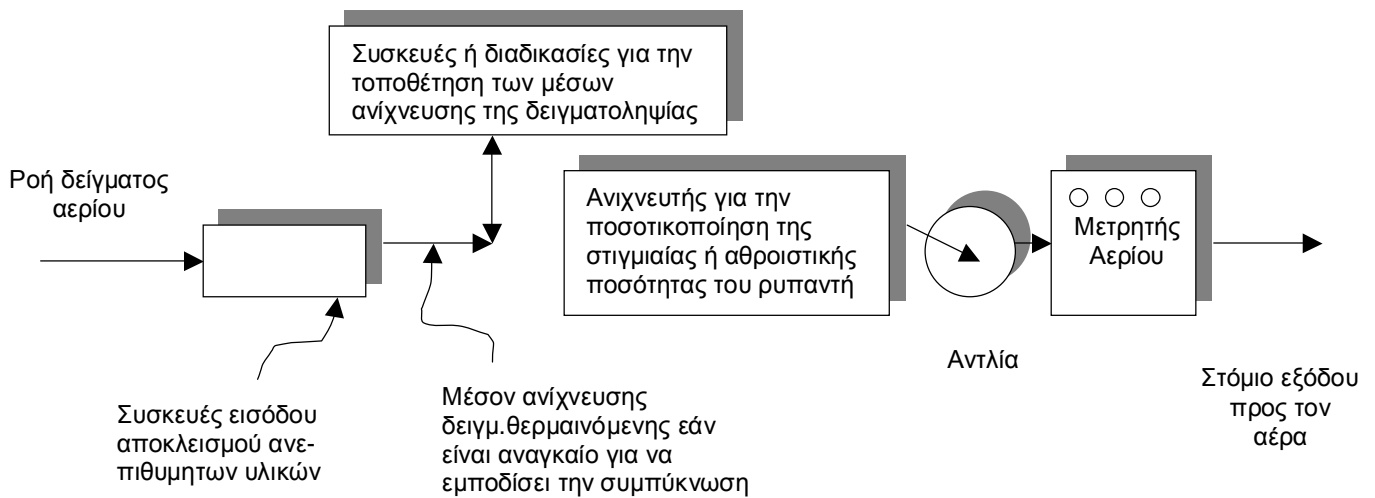
4⁰ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Υπάρχουν δύο ειδών μετρήσεις για την μόλυνση του αέρα: ατμοσφαιρικές μετρήσεις (συγκεντρώσεις ρύπων στον αέρα που αναπνέει ο πληθυσμός) και μετρήσεις στην πηγή (συγκεντρώσεις και / οι ρυθμοί εκπομπής από τις πηγές των ρύπων). Και οι δυο απαιτούνται στην φιλοσοφία του προτύπου ποιότητας αέρα που είναι η κύρια βάση για τους νόμους τους σχετικούς με τη μόλυνση του αέρα. Οι συγκεντρώσεις στον ατμοσφαιρικό αέρα πρέπει να μετρούνται για να καθορίζουν πότε ο αέρας είναι πράγματι ασφαλής για να τον εισπνεύσουμε. Για να ελέγξουμε τις συγκεντρώσεις των ρύπων, πρέπει να κανονίσουμε το χρόνο, τον τόπο και την ποσότητα των εκπομπών. Έτσι, οι ρυθμοί εκπομπής από ποικίλες πηγές ρυπογόνων παραγόντων (π.χ. εργοστάσια, αυτοκίνητα) πρέπει να μετρηθούν.

Ακόμα και αν δεν υπήρχαν νομικές απαιτήσεις γι' αυτά τα τεστ, θα τα χρειαζόμασταν για να εκτιμήσουμε την ποιότητα των συσκευών ελέγχου, μιας και πωλούνται με εγγυήσεις λειτουργίας. Ο αγοραστής δε θα πληρώσει συνήθως για μια συσκευή, μέχρι τα τεστ να δείξουν ότι η συσκευή πληρεί τις εγγυήσεις σε πραγματική λειτουργία.

Περίπου όλες οι συσκευές αποτελούνται από τα διάφορα μέρη που φαίνονται στη φιγούρα 4.1.

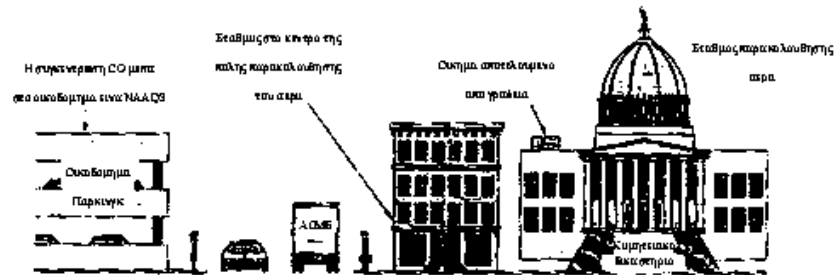


Φιγούρα 4.1:

Τα συστατικά μέρη οποιασδήποτε συσκευής παρακολούθησης του περιβάλλοντος ή συσκευής πηγής δειγματοληψίας. Εάν οι λειτουργίες του ανιχνευτή σε πραγματικό χρόνο (όχι αθροιστική) τότε το μέτρο του αερίου δεν είναι απαραίτητο αλλά είναι απαραίτητο κάποιο είδος οργάνου ολοκληρωτικού λογισμού σήματος ή μηχανήμα καταγραφής.

4.1 Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα.

Κάθε μέτρηση της μόλυνσης του αέρα έχει δύο προβλήματα. Το πρώτο είναι το να πάρεις ένα κατάλληλο αντιπροσωπευτικό δείγμα. Το δεύτερο να καθορίσεις τη συγκέντρωση του ρύπου σωστά. Γενικά, το πρώτο είναι πιο δύσκολο. Το τι ακριβώς είναι το αντιπροσωπευτικό δείγμα και από τι αποτελείται υπήρξε το θέμα νομικών και τεχνικών διαμαχών. Μερικά από τα προβλήματα φαίνονται στη φιγούρα 4.2.



Φιγούρα 4.2:

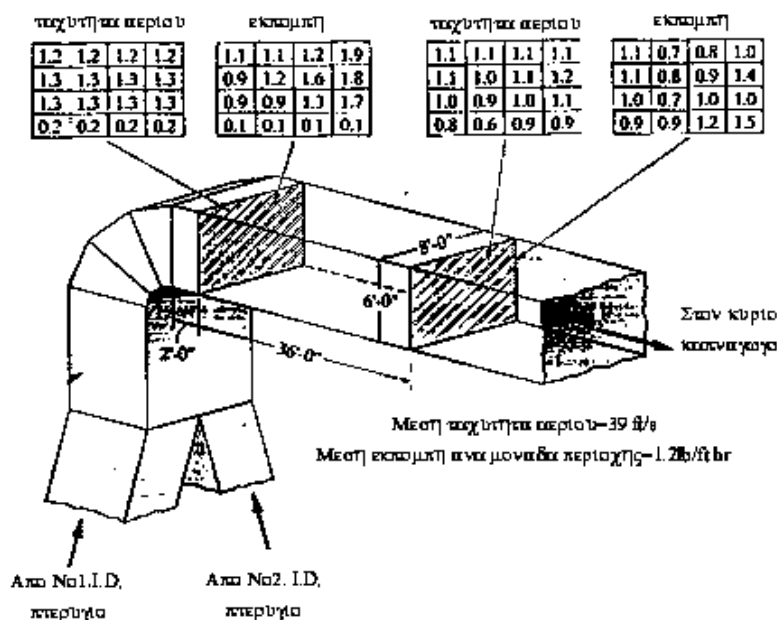
Απεικόνιση κάποιων προβλημάτων επιλογής μιας περιοχής δειγματοληψίας για να μετρηθεί το CO του περιβάλλοντος μέσα σε μια πόλη.

Ο αέρας μέσα στο parking συνήθως περιέχει πολύ περισσότερο CO απ' ό τι επιτρέπει η NAAQS. Εάν κάποιος παρέχει δείγμα ακριβώς απέναντι από μια τέτοια κατασκευή (parking), τις περισσότερες φορές η συγκέντρωση θα είναι μικρότερη απ' ό τι μέσα στη οικοδόμημα ένα τετράγωνο πιο μακριά, η συγκέντρωση θα είναι ακόμα μικρότερη. Στο πεζοδρόμιο του οικοδομήματος, η συγκέντρωση θα είναι ίσως διπλάσια απ' ό τι στο απέναντι πεζοδρόμιο. Ποια, λοιπόν, από αυτές τις περιοχές είναι κατάλληλη για να πάρουμε δείγμα αέρα; Γενικά, αυτό το μέρος θα έπρεπε να βρίσκεται εκεί όπου το κοινό θα έχει ελεύθερη είσοδο και η συγκέντρωση του ρύπου η υψηλότερη. Αυτό εξαιρεί όλα τα κλειστά μέρη και τις περιοχές που το κοινό δεν έχει πρόσβαση. Ένας μετρητής πρέπει να τοποθετείται όπου υπάρχει ενέργεια, προστασία από τη βροχή και το χιόνι, ίσως ένα περιβάλλον με την ίδια συνεχώς θερμοκρασία, εύκολη πρόσβαση για τους επιστήμονες, προστασία από βανδαλισμούς. Ένα

παραδοσιακό μέρος είναι η στέγη του νοσοκομείου ή του δικαστηρίου. Δυστυχώς η συγκέντρωση των ρύπων που σχετίζονται με τα αυτοκίνητα εκεί είναι πολύ μικρότερη απ' ό,τι στους δρόμους με τη μεγάλη κίνηση. Η EPA δίνει σαφείς οδηγίες για το ποιο είναι το κατάλληλο μέρος για μετρήσεις. Συνήθως οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται στο δρόμο, στο κέντρο της πόλης. Στη φιγ. 4.2 το πρακτορείο ελέγχου της μόλυνσης του αέρα θα μπορούσε, για να συμβαδίζει με αυτές τις οδηγίες, να νοικιάσει ένα γραφείο στο δεύτερο όροφο του κτηρίου (office building) και να κρεμάσει τον ανιχνευτή του, έξω από το παράθυρο, σχεδόν 4 μέτρα (10ft) πάνω από το πεζοδρόμιο και άλλες επιλογές μπορεί να είναι καλές αλλά αυτές της EPA είναι οι καλύτερες. Στα πειράματα ελέγχου στην πηγή του ρύπου το πρόβλημα αντιπροσωπευτικού δείγματος είναι εξίσου δύσκολο. Η ροή του αέρα στους αντιδραστήρες μπορεί να είναι σταθερή και ομοιόμορφη, οπότε οποιοδήποτε δείγμα, που παίρνετε οποιαδήποτε ώρα και σε οποιοδήποτε μέρος του εργοστασίου θα είναι αντιπροσωπευτικό. Αλλά για τους περισσότερους βιομηχανικούς χώρους η ταχύτητα και η συγκέντρωση διαφέρει από σημείο σε σημείο, από ώρα σε ώρα έτσι πολλές ξεχωριστές μετρήσεις πρέπει να γίνονται και να βγάζουμε το μέσο όρο. Στη φιγ. 4.3 φαίνονται οι μετρημένες ταχύτητες και συγκεντρώσεις σε έναν αγωγό που φέρει ρεύμα αέρα. Οι διαφορές στην ταχύτητα και στη συγκέντρωση σωματιδίων από μέρος σε μέρος στον αγωγό είναι σημαντικές. Είναι φανερό ότι εάν κάποιος έχει μετρήσει τις ταχύτητες και τις συγκεντρώσεις σε ένα μόνο σημείο, για παράδειγμα, κοντά στην άκρη και από τη μέσα μεριά, θα είχε υπολογίσει πολύ μικρότερη ροή και εκπομπή απ' ό,τι οι πραγματικές. Ακόμα και 12μέτρα (36ft) πιο μακριά τα δεδομένα δείχνουν ότι η ροή δεν έχει ομογενοποιηθεί.

Παράδειγμα 4.1: Σε ένα πείραμα μέτρησης ρύπων από την πηγή, ο αντιδραστήρας χωρίστηκε σε 4 ίσους τομείς ο καθένας έχοντας ίδιο εμβαδό. Στον πίνακα φαίνονται οι ταχύτητες και οι συγκεντρώσεις του ρύπου σε κάθε τομέα. Ποια είναι η μέση συγκέντρωση στον αντιδραστήρα;

Αριθμός τομέα	Ταχύτητα V, m/s	Συγκέντρωση c, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	10	500
2	12	600
3	14	650
4	15	675



Φιγούρα 4.3:

Μετρούμενες ταχύτητες και ποσοστά ροής μάζας σωματιδίων (ταχύτητα x συγκέντρωση) μέσα σε έναν πολύπλοκο αγωγό. Οι τιμές που εμφανίζονται είναι η αναλογία της παρατηρούμενης τιμής προς την μέση τιμή για ολόκληρο τον αγωγό. Για παράδειγμα, κοντά στην καμπή, όπου η ταχύτητα φαίνεται ως 1.2, η μετρούμενη ταχύτητα ήταν $1.2 \times 39 \text{ ft/s} = 47 \text{ ft/s} = 14.3 \text{ m/s}$.

Η μέση συγκέντρωση είναι:

$$C_{avg} = \frac{\text{ολική μάζα}}{\text{ολική ταχύτητα}} = \frac{\sum V_{AC}}{\sum V_A} = \left[\frac{\sum V_C}{\sum V} \right] \text{ για ίσες περιοχές}$$

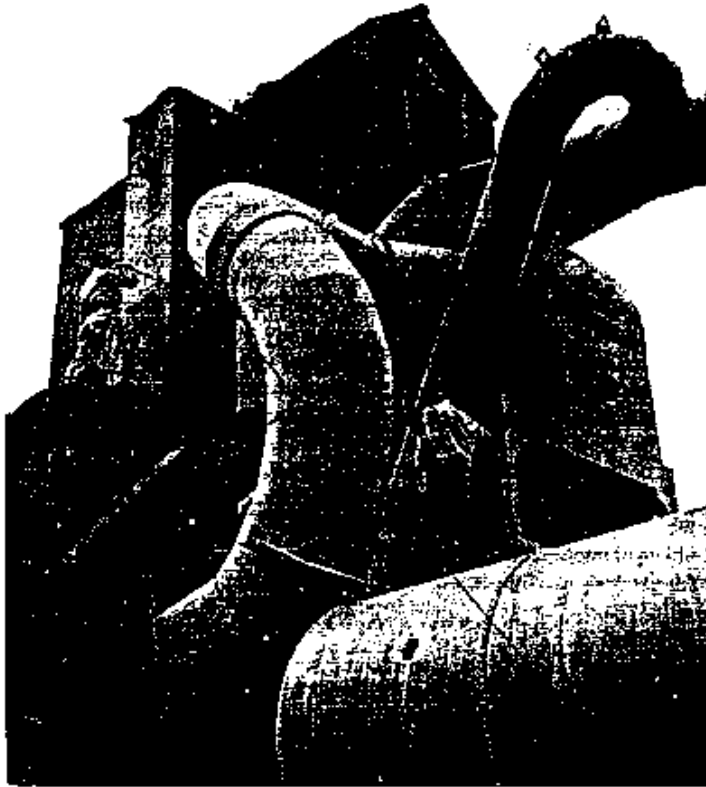
$$= \frac{10 \times 500 + 12 \times 600 + 14 \times 650 + 15 \times 675}{10 + 12 + 14 + 15} = 616 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Εάν οι τομείς δεν ήταν όμοιοι αυτός ο υπολογισμός θα ήταν πιο περίπλοκος. Εάν κάποιος προχωρούσε πιο κάτω στον αντιδραστήρα θα έβρισκε ότι οι ταχύτητες και οι συγκεντρώσεις ομογενοποιούνται. Μια πιο τυπική κατάσταση φαίνεται στη φιγούρα 4.4. Σ' αυτούς τους αγωγούς κάποιος δεν μπορεί να βρει ένα μέρος "ανενόητο από αλλαγή κατεύθυνσης και ροής". Στους πιο καινούργιους αντιδραστήρες, οι σχεδιαστές έχουν ορισμένες φορές σκεφτεί το πρόβλημα αυτό και έχουν προνοήσει έτσι ώστε να υπάρχει πρόσβαση για τον επιστήμονα που θα πάρει το δείγμα έτσι ώστε να τοποθετήσει με ευκολία τα μηχανήματά του. Σε πιο παλιούς αντιδραστήρες αυτό γινόταν σπάνια έως καθόλου.

4.2 Πηγαίνοντας το αντιπροσωπευτικό δείγμα στον ανιχνευτή.

Πολλές συσκευές δειγματοληψίας έχουν κάποιου είδους συσκευή στα εξαρτήματά τους που να αφαιρούν τα ανεπιθύμητα σωματίδια. Για παράδειγμα έντομα ή μεγάλα σωματίδια σκόνης που δεν αφορούν τόσο πολύ την υγεία, αλλά και μολυσμένα σωματίδια που είναι πολύ σοβαρά για την υγεία. Έτσι, σύμφωνα με την Ε.Ρ.Α. θα πρέπει να υπάρχει συσκευή που να απομακρύνει σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης 10μ. Επίσης, υπάρχουν ανιχνευτές που με τη θέρμανση αποτρέπουν τη

συμπύκνωση. Έτσι, αέρια όπως το SO_2 που αντιδρά με αλκάλεια στο φίλτρο, δε θα επικαθίσουν ως στερεά υπολείμματα εφόσον θα έχουν θερμανθεί. Το πρόβλημα αυτό είναι πραγματικό μιας και ακίνδυνα υλικά όπως το γυαλί μπορούν να αντιδράσουν με κάποιο ρύπο και να επικαθίσουν αυξάνοντας το βάρος των στερεών υλικών στο φίλτρο.

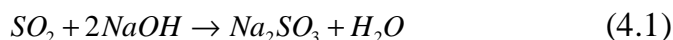


Φιγούρα 4.4:

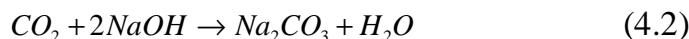
Ο μακρύς ευθύς αγωγός και το άνετο μέρος για να στέκονται και να στηρίζονται κάποιου τα όργανα με κάλυψη από την βροχή και τροφοδοσία ισχύος δεν αποτελούν τον συνηθισμένο για τον έλεγχο της πηγής.

4.3 Καθορισμός συγκέντρωσης.

Μόλις πάρουμε το αντιπροσωπευτικό δείγμα, η συγκέντρωση του ρύπου πρέπει να μετρηθεί. Για τους περισσότερους ρύπους αυτή η μέτρηση μπορεί να γίνει εύκολα με τη χρήση απλών οργάνων. Τα περισσότερα από αυτά λειτουργούν οπτικά. Σε μερικές περιπτώσεις το δείγμα περνά μέσα από ένα κελί μέσα στο οποίο μια φωτεινή δέσμη κατάλληλου μήκους κύματος απορροφάται από τον ρύπο που μας ενδιαφέρει. Σε άλλες περιπτώσεις ο ρύπος επιτρέπεται να λάβει μέρος σε μια γρήγορη χημική αντίδραση που παράγει φως και η εκπεμπόμενη ποσότητα φωτός μετριέται. Εάν ένα μήκος κύματος μπορεί να επιλεγθεί έτσι ώστε να απορροφάται ή να εκπέμπεται από το συγκεκριμένο ρύπο και όχι από άλλον, τότε ο καθορισμός μπορεί να γίνει γρήγορα, απλά με ακρίβεια και φθηνά. Γενικά, όμως υπάρχουν και άλλοι ρύποι οι επονομαζόμενοι "παρεμβολές" που και αυτοί απορροφούν ή εκπέμπουν ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Αυτό το πρόβλημα των παρεμβολών δεν είναι ασήμαντο. Το να μετρήσουμε το SO₂ σε αέριο αζώτου είναι εύκολο. Περνάμε το αέριο από διάλυμα NaOH και έχουμε:



και μετράμε την αλλαγή στη συγκέντρωση του NaOH. Ωστόσο, εάν το πρόβλημα είναι να μετρήσουμε το SO₂ στον αέρα, το CO₂ του αέρα θα παρεμποδίσει την αντίδραση ως εξής:



και η αλλαγή στη συγκέντρωση του NaOH θα οφείλεται μερικώς στο SO₂ και μερικώς στο CO₂. Σ' αυτή την περίπτωση η συγκέντρωση του CO₂ του αέρα είναι γνωστή έτσι η διόρθωση μπορεί να γίνει, αλλά σε άλλες περιπτώσεις η συγκέντρωση του παρεμβολέα μπορεί να μην είναι γνωστή, οπότε και η μέτρηση μπορεί να μην είναι σωστή. Αυτού του είδους το πρόβλημα μπορεί να παγιδεύσει και τους πιο ικανούς ερευνητές. Η E.P.A. είχε υιοθετήσει μια μέθοδο για τη μέτρηση του NO₂ και μετά την απέσυρε λόγω μη επαρκούς προστασίας από τους παρεμβολείς.

4.4 Εύρεση μέσου όρου.

Εάν μετράμε την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος με όργανα πραγματικού χρόνου, εν γένει θέλουμε να γνωρίζουμε την μέση συγκέντρωση για μια κάποια χρονική περίοδο έτσι ώστε να μπορούμε να τη συγκρίνουμε με εφαρμοστέους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, που όλοι έχουν κάποια περίοδο μέτρησης. Αυτό βρίσκεται από:

$$\text{Μέση συγκέντρωση} = c_{\text{avg}} = \frac{1}{\Delta t} \int c dt \quad (4.3)$$

όπου c = η στιγμιαία συγκέντρωση υποδηλώνεται από το όργανο

t = ο χρόνος μέτρησης

Τα πιο πολλά όργανα πραγματικού χρόνου παρουσιάζουν τα αποτελέσματά τους όπως ένα ηλεκτρονικό σήμα που μπορεί εύκολα να δοθεί σαν μέσος όρος των δομηθέντων ηλεκτρονικών για οποιονδήποτε κατάλληλα επιλεγμένο μέσο όρο χρόνου.

Τα παλαιότερα όργανα για τα αέρια, όπως επίσης και τα σύγχρονα όργανα για τα αιωρούμενα σωματίδια δεν είναι όργανα πραγματικού

χρόνου, αλλά μάλλον είναι όργανα μέσου όρου. Για παράδειγμα, η απαιτούμενη μέθοδος EPA για την δειγματοληψία των αιωρούμενων σωματιδίων του περιβάλλοντος είναι ο δειγματολήπτης PM₁₀. Απαρτίζεται από μια ειδική είσοδο που αποκλείει σωματίδια μεγαλύτερα σε διάμετρο από 10μ, ένα φίλτρο, έναν ανεμιστήρα, μια συσκευή μέτρησης ροής και μια κατάλληλη υποδοχή. Ένα προζυγισμένο φίλτρο τοποθετείται στην υποδοχή του φίλτρου, και ο αέρας αναρροφάται μέσα από αυτό για 23.5 ώρες κατά μετρούμενο ρυθμό. Η συγκέντρωση των σωματιδίων υπολογίζεται από:

$$\text{Μέση συγκέντρωση} = C_{avg} = \frac{\text{Άυξηση σε βάρος του φίλτρου}}{\text{Ρυθμός ροής αέρα} \times \Delta_{\text{χρονου}}} \quad (4.4)$$

Παράδειγμα 4.2

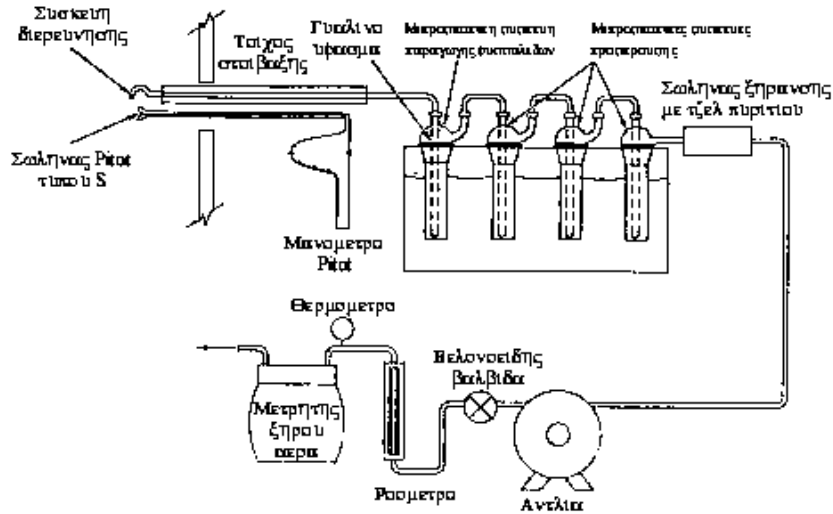
Ο δειγματολήπτης PM₁₀ λειτουργεί για 23.5 ώρες μ' ένα μέσο ποσοστό ροής 51 ft³/min. Το απόβαρο του φίλτρου ήταν 48.02 g και το μικτό βάρος του φίλτρου, στεγνωμένου στην ίδια υγρασία όπως το φρέσκο φίλτρο, ήταν 48.07 g. Ποια ήταν η μέση περιεκτικότητα σε αέρα του PM₁₀;

Από την εξίσωση (4.4) υπολογίζουμε ότι:

$$C_{avg} = \frac{(48.07-48.02) \text{ g}}{51 \text{ ft}^3/\text{min} \times 23.5 \text{ h}} \times \frac{\text{h}}{60 \text{ min}} \times \frac{35.31 \text{ ft}^3}{\text{m}^3} = 2.46 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 24.6 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

Αυτή η απάντηση θα ήταν φυσιολογικά 25 μg/m³. Εάν η θερμοκρασία και η πίεση δεν ήταν σταθερές τιμές, ο όγκος θα έπρεπε να διορθωθεί στον κανονικό όγκο. Σ' αυτό το παράδειγμα βλέπουμε ότι το μέγεθος του δείγματος για έναν κλασικό δειγματολήπτη PM₁₀ είναι αρκετά μικρό. Η τιμή των 25 μg/m³, η οποία είναι το μισό του μέσου ετήσιου NAAQS,

είναι τυπική, και η μετρούμενη αλλαγή στο βάρος του φίλτρου είναι μόνον 0.05 g ή 50 mg. Είναι απαραίτητη η στάθμιση της υψηλής ποιότητας και ο έλεγχος της υγρασίας του δείγματος. Εάν οι σταθμίσεις είναι θετικές μόνον για ± 10 mg, τότε πιστεύουμε ότι η διαφορά των δύο μετρήσεων είναι ± 20 mg, και πιστεύουμε ότι η περιβάλλουσα συγκέντρωση είναι μόνο 2 μέρη περίπου στα 5 ή 40%. Εάν η αβεβαιότητα της στάθμισης ήταν ± 1 mg, τότε η αβεβαιότητά μας στην συγκέντρωση θα ήταν 2 μέρη στα 50 ή $\pm 4\%$. Το παράδειγμα δείχνει επίσης ότι η προκύπτουσα μέτρηση είναι ο μέσος όρος για τις περασμένες 24 ώρες. Αυτός ο τύπος οργάνου δεν είναι σχεδόν τόσο κατάλληλος για τον προσδιορισμό των ωριαίων μεταβολών ή τάσεων όσο για τα όργανα πραγματικού χρόνου. Αλλά οι προσπάθειες για να αναπτυχθεί ένα κατάλληλο όργανο πραγματικού χρόνου για το PM₁₀ δεν έχουν μέχρι τώρα επιτευχθεί πλήρως, κυρίως εξαιτίας αυτού του προβλήματος του μικρού μεγέθους του δείγματος. Μερικά παλιά σχήματα μέτρησης για αέριους ρυπαντές λειτουργούσαν κατά κάποιο τρόπο σαν αυτό, περνώντας έναν μετρημένο όγκο αερίου μέσα από μια συσκευή παραγωγής φυσαλίδων που περιείχε κάποιο διάλυμα που αντιδρούσε ειδικά (χωρίς παρεμβολές) με το αέριο που πρέπει να μετρηθεί και κατόπιν titrating το διάλυμα για να προσδιορίσουμε τη συγκέντρωση του ρυπαντή μέσα στο αέριο ή να μετρήσουμε το χρώμα του διαλύματος. Ο υπολογισμός είναι ο ίδιος όπως στην Εξ. (4.4) εκτός του ότι η μεταβολή του βάρους του φίλτρου αντικαθίσταται από την μεταβολή στον αριθμό των ισοδυνάμων του αντιδραστηρίου που αντιδρούν επί την αναλογία του μοριακού βάρους ή του χρώματος του διαλύματος επί έναν κατάλληλο παράγοντα μετατροπής βάρους.



Φιγούρα 4.5

Το γυάλινο ύφασμα αποκλείει τα αιωρούμενα σωματίδια από την υπόλοιπη σειρά δειγματοληψίας. Η μικροσκοπική συσκευή παραγωγής φυσαλίδων περιέχει κάποιο υγρό ισοπροπανικό διάλυμα το οποίο απομακρύνει το SO_3 αλλά όχι το SO_2 , οι περιεκτικότητες του ξεδιαλέγονται μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας.

Οι δύο πρώτες μικροσκοπικές συσκευές πρόσκρουσης περιέχουν κάποιο υγρό διάλυμα υπεροξειδίου του υδρογόνου, η τρίτη συσκευή πρόσκρουσης είναι άδεια και παγιδεύει το μεταφερόμενο ρευστό από την δεύτερη. Στο τέλος του ελέγχου, οι περιεκτικότητες των τριών μικροσκοπικών συσκευών πρόσκρουσης, συν το νερό που χρησιμοποιήθηκε για να τις εκπλύνει, συνδυάζονται και titrated με υπερχλωρικό βάριο, χρησιμοποιώντας έναν ενδείκτη θορίνης. Ο σωλήνας ξήρανσης με τζελ πυριτίου προστατεύει την αντλία, το ροόμετρο και τον μετρητή ξηρού αερίου από την υγρασία που μεταφέρεται από τις συσκευές πρόσκρουσης.

Παρόμοια, πολλές συσκευές πηγής δειγματοληψίας χρησιμοποιούν αυτά τα σχήματα αθροιστικής μέτρησης. Για παράδειγμα το σχ. 4.5 δείχνει μια σειρά δειγματοληψίας που προτείνεται από το EPA για την μέτρηση της συγκέντρωσης του SO₂ σε ένα πλήθος. Ο σωλήνας Pitot χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ταχύτητα του αερίου μέσα στη στοίβα. Το δείγμα του αερίου έλκεται από την αντλία μέσα στον ανιχνευτή της δειγματοληψίας, την μικροσκοπική συσκευή παραγωγής φυσαλίδων, και τις τρεις μικροσκοπικές συσκευές πρόσκρουσης (δηλαδή υαλώδεις συσκευές παραγωγής φυσαλίδων, στις οποίες το αέριο έρχεται σε επαφή με ένα κατάλληλο αντιδραστήριο). Κατόπιν, το αέριο περνάει μέσα από μια βελονοειδή βαλβίδα, και ένα ροόμετρο, που χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν το ρυθμό ροής του αερίου ότι βρίσκεται στην σωστή κλίμακα και μέσα στο μετρητή ξηρού αερίου, που είναι η τελική μέτρηση της ποσότητας του αερίου που έχει διαρρεύσει μέσα στο σύστημα. Στην πράξη, μια σειρά δειγματοληψίας σαν αυτή του σχ. 4.5 θα χρησιμοποιείτο για να πάρει δείγματα σε διάφορα σημεία της στοίβας, με το ρυθμό ροής σε κάθε σημείο ρυθμιζόμενο από την βελονοειδή βαλβίδα, το ροόμετρο έτσι ώστε οι ρυθμοί δειγματοληψίας να είναι αναλογικοί στις τοπικές ταχύτητες όπως υποδηλώθηκε από τον σωλήνα Pitot. Κατ' αυτόν τον τρόπο η συγκέντρωση προσδιορίστηκε από μια απλή χημική ανάλυση των αντιδραστηρίων στις συσκευές πρόσκρουσης και από την αθροιστική ένδειξη του μετρητή ξηρού αερίου που είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική της μέσης συγκέντρωσης στη στοίβα. Αυτή η διαδικασία δίνει τον μέσο όρο των ενδείξεων όπως ακριβώς έγινε στο Παράδειγμα 4.1 και βρίσκει την μετρούμενη με ένα σύνολο μετρήσεων της συγκέντρωσης παρά από τον μέσο όρο αριθμητικής ομάδας πολλών μεμονωμένων μετρήσεων.

4.5 Προσδιορισμός ρυθμών ροής ρυπαντή.

Οι κανονικές αναλυτικές μέθοδοι έγιναν αποδεκτές από την EPA για διάφορους ρυπαντές. Ο ρυθμός ροής της μάζας του ρυπαντή είναι το προϊόν της συγκέντρωσης μέσα στο αέριο και το ποσοστό ροής της μάζας ή του γραμμομορίου του αερίου, πχ.

Μοριακό ποσοστό ροής του ρυπαντή =(μοριακό ποσοστό ροής του ρυπαντή) x (μοριακή συγκέντρωση του ρυπαντή μέσα στο αέριο) (4.5)

Πίνακας 4.1: Μέθοδοι ελέγχου για σημαντικούς ρυπαντές του αέρα

Στην ορολογία EPA, για κάθε έναν σημαντικό ρυπαντή του αέρα υπάρχει μια μέθοδος αναφοράς, η οποία είναι η μέθοδος ελέγχου που λαμβάνεται ως κανονική έναντι της οποίας άλλες μέθοδοι μπορούν να ελεγχθούν, και υπάρχουν ισοδύναμες μέθοδοι, οι οποίες έχουν ελεγχθεί έναντι της μεθόδου αναφοράς και βρέθηκαν να δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ο Πίνακας αυτός καταγράφει μόνον τις μεθόδους αναφοράς.

Εναιωρούμενο Υλικό, 10 μ ή λιγότερο σε διάμετρο (PM₁₀). Σ' έναν δειγματολήπτη μεγάλου όγκου με ένα ακροφύσιο σχεδιασμένο για να αποκλείει σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μικρά σε διάμετρο, ένας μεγάλος, μετρημένος όγκος αέρα σύρεται μέσα σε ένα προζυγισμένο φίλτρο, το οποίο κατόπιν επαναζυγίζεται (βλ. Παράδειγμα 4.2). Αυτή η συσκευή είναι, από όλες τις πρακτικές απόψεις, μια υψηλής ποιότητας εκδοχή της ηλεκτρικής σκούπας, με την επιπρόσθετη ικανότητα μέτρησης της αθροιστικής ροής του αέρα μέσα σ' αυτήν.

Διοξείδιο του Θείου (SO₂). Κατά την μέθοδο West-Gaeke ένας γνωστός δεδομένος όγκος αέρα αναβράζει μέσα σε ένα διάλυμα νατρίου, τετραχλωρικού υδραργύρου, που σχηματίζει ένα μίγμα με SO₂. Μετά από

μερικές ενδιάμεσες αντιδράσεις, το διάλυμα κατεργάζεται με pararosaniline για να σχηματίσει ένα έντονα χρωματισμένο pararosaniline methyl sulfonic acid, του οποίου η συγκέντρωση προσδιορίζεται με έναν μετρητή χρώματος.

Όζον (O₃). Ο αέρας αναμιγνύεται με αιθυλένιο, το οποίο αντιδρά με όζον με μια αντίδραση εκπομπής φωτός (χημειοφωτεινή). Το φως μετράται με έναν αγωγό φωτοπολλαπλασιαστή.

Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO). Η συγκέντρωση μετράται μέσω της απορρόφησης μη διαχεόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR). Εδώ το μη διαχεόμενο σημαίνει ότι η υπέρυθρη ακτινοβολία δεν διαχέεται από ένα πρίσμα ή με δημιουργία ειδικών μηκών κύματος, τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για να αποκτηθεί ένα μήκος κύματος το οποίο απορροφά έντονα CO.

Υδρογονάνθρακες (Όχι μεθάνιο). Το κλασικό για τους υδρογονάνθρακες είναι η αποκλεισμός του μεθανίου. Το αέριο περνά μέσα από έναν ανιχνευτή με φλόγα ιονισμού (FID), όπου οι υδρογονάνθρακες καίγονται σε φλόγα υδρογόνου. Οι υδρογονάνθρακες προκαλούν περισσότερο ιονισμό απ' ότι το υδρογόνο. Αυτός ο ιονισμός ανιχνεύεται ηλεκτρονικά. Μέρος του δείγματος εκτρέπεται σε έναν χρωματογράφο αερίου, όπου το μεθάνιο χωρίζεται από τα άλλα αέρια και κατόπιν ποσοτικοποιείται. Η συγκέντρωσή του αφαιρείται από την συνολική τιμή του υδρογονάνθρακα από το FID.

Διοξείδιο του Αζώτου (NO₂). Το NO₂ μετατρέπεται σε NO, το οποίο κατόπιν αντιδρά με όζον. Μετράται το φως από αυτή την χημειοφωτεινή αντίδραση. Επειδή ο αέρας του περιβάλλοντος περιέχει NO (συνχά περισσότερο από ότι NO₂), ένα παράλληλο δείγμα κινείται χωρίς μετατροπή του NO₂ σε NO, και η ένδειξη του προκύπτοντος NO αφαιρείται από το συνδυασμένο NO και η ένδειξη του NO₂ για να δώσει

την τιμή του NO₂. Το όργανο συνήθως αναφέρει και την συγκέντρωση του NO.

Μόλυβδος. Ένα φίλτρο παρόμοιο ή πανομοιότυπο προς το φίλτρο PM₁₀ εξάγεται με νιτρικά και υδροχλωρικά οξείδια για να διαλύσει το μόλυβδο. Η φασματοσκοπία της ατομικής απορρόφησης χρησιμοποιείται κατόπιν για να προσδιορίσει το ποσόν του μολύβδου στην εξαγωγή.

Παράδειγμα 4.3

Η σειρά δειγματοληψίας που παρουσιάζεται στο Σχ. 4.5 υποδηλώνει ότι η συγκέντρωση του SO₂ μέσα στη στοίβα είναι 600 ppm. Ο σωλήνας Pitot και το μανόμετρο στο ίδιο σχήμα υποδηλώνουν ότι η ταχύτητα ροής είναι 40 ft/s. Η διάμετρος της στοίβας είναι 5 ft. Η θερμοκρασία του αερίου στην στοίβα και η πίεση είναι 450° F και 1 atm. Ποιο είναι το ποσοστό ροής του SO₂ σε lb/h; Το μοριακό ποσοστό ροής του αερίου είναι:

Μοριακό ποσοστό ροής αερίου

$$= VAr = 40 \frac{ft}{s} \times \frac{P}{4} (5 ft)^2 \times 2.59 \times 10^{-3} \frac{lbmol}{stdft^3} \times \frac{528^{\circ} R}{910^{\circ} R} = 1.18 \frac{lbmol}{2} = 536 \frac{mol}{s}$$

Το μοριακό ποσοστό ροής του SO₂ είναι:

$$1.18 \text{ lbmol/s} \times 600 \times 10^{-6} = 7.08 \times 10^{-4} \text{ lbmol/s} = 0.32 \text{ mol/s}$$

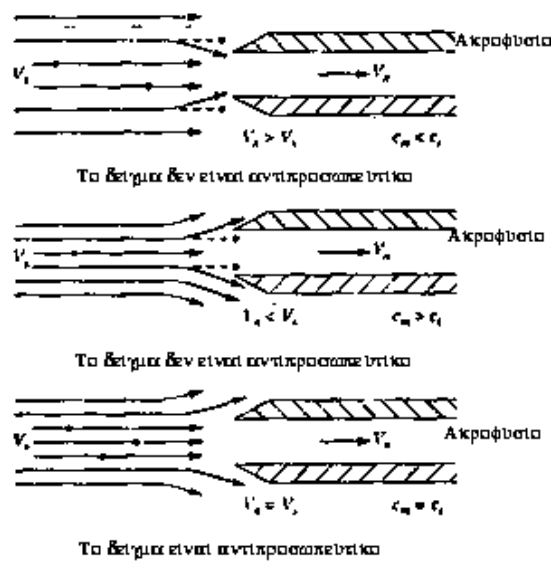
Πολλαπλασιάζοντας με το μοριακό βάρος του SO₂ έχουμε:

$$7.08 \times 10^{-4} \times 64 = 4.53 \times 10^{-2} \text{ lb/s} = 163 \text{ lb/h} = 20.6 \text{ g/s} = 74.1 \text{ kg/h}$$

Αυτός ο απλός υπολογισμός θα ήταν κατάλληλος για μια στοίβα της οποίας η ταχύτητα και η συγκέντρωση είναι τα ίδια σε κάθε σημείο και χρόνο μέσα στη στοίβα. Διαφορετικά, θα είναι απαραίτητη η εύρεση του μέσου όρου.

4.6 Ισοκινητική δειγματοληψία.

Στην δειγματοληψία της στοίβας για τα εν αιωρήσει σωματίδια - αλλά όχι σε οποιαδήποτε δειγματοληψία για τα αέρια - πρέπει να διατηρείται μια ισοκινητική ροή μέσα στη συσκευή διερεύνησης της δειγματοληψίας. Το πρόβλημα απεικονίζεται στο Σχ. 4.6.



Φιγούρα 4.6:

Το πρόβλημα ισοκινητικής δειγματοληψίας για τα αιωρούμενα σωματίδια.

Εάν η ταχύτητα του αερίου μέσα στη συσκευή ανίχνευσης της δειγματοληψίας είναι η ίδια όπως η ταχύτητα του αερίου μέσα στη στοίβα, από την οποία λαμβάνεται το δείγμα, η κατάσταση της δειγματοληψίας (κάτω μέρος του Σχ. 4.6) είναι ισοκινητική ($V_n = V_s$) και η μετρούμενη συγκέντρωση (c_m) θα ισούται με την πραγματική συγκέντρωση (c_t). Όμως, εάν η ταχύτητα στο ακροφύσιο υπερβαίνει

εκείνη μέσα στη στοίβα (πάνω μέρος του Σχ. 4.6), τότε οι γραμμές του ρεύματος αερίου θα κατευθυνθούν μέσα στο ακροφύσιο, και η αδράνεια των σωματιδίων θα μεταφέρει κάποια απ' αυτά πέρα από το ακροφύσιο ακόμα κι αν το αέριο που βρίσκεται σ' αυτά θα συλλεγεί και έτσι η μετρούμενη συγκέντρωση θα είναι λιγότερη από την πραγματική συγκέντρωση. Αντίθετα, εάν η ταχύτητα μέσα στο ακροφύσιο είναι μικρότερη από την ταχύτητα μέσα στη στοίβα (μεσαίο σχέδιο του Σχ. 4.6), τότε οι γραμμές του ρεύματος αερίου θα κατευθύνονται μακριά από το ακροφύσιο και η αδράνειά τους θα μεταφέρει κάποια σωματίδια μέσα στο ακροφύσιο, μακριά από το αέριο που τα συνοδεύει. Η μετρούμενη συγκέντρωση θα ήταν τότε μεγαλύτερη απ' ότι η πραγματική συγκέντρωση. Διάφορα επινοητικά σχέδια ερευώθηκαν για να προσαρμόσουν τη ροή μέσα στο ακροφύσιο για να διατηρήσουν την ταχύτητά της ίδια όπως την ροή μέσα στη στοίβα και κατ' αυτόν τον τρόπο να διατηρήσουν τις ισοκινητικές συνθήκες.

4.7 Παράγοντες εκπομπής.

Ο έλεγχος εκπομπής είναι δαπανηρός. Για απλές, καλοκαθορισμένες πηγές (πχ. μια στοίβα εργοστασίου ισχύος), μπορεί να είναι κουραστική, αλλά δεν είναι δύσκολη. Σε μια φτωχά καθορισμένη πηγή (πχ. σκόνη δρόμου από έναν δρόμο χωρίς πεζοδρόμιο ή CO από μια φωτιά σε δάσος), είναι δύσκολα να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα ελέγχων. Επιπλέον, ένας τέτοιου είδους έλεγχος είναι δυνατός εάν ο χώρος είναι καθορισμένος συχνά θέλουμε να ξέρουμε ποιες θα είναι οι εκπομπές πριν να κατασκευαστεί ο νέος χώρος. Για ν' αντιμετωπίσουμε αυτές τις ανάγκες η EPA παρήγαγε ένα πολύ χρήσιμο σύνολο τεκμηρίων του παράγοντα εκπομπής. Αυτά είναι περιλήψεις των αποτελεσμάτων των

προηγούμενων δοκιμών εκπομπής, που οργανώθηκαν για να τα κάνουν εύκολα προς εφαρμογή.

Παράδειγμα 4.4:

Ο Πίνακας 4.2 είναι μια απλή σελίδα από την βιβλιοθήκη του EPA για τους παράγοντες εκπομπής. Δείχνει τις υπολογισμένες εκπομπές από την καύση του ασφαλτούχου άνθρακα εάν χρησιμοποιούνται οι συσκευές ελέγχου. Αυτές είναι οι εκπομπές που εισέρχονται στις συσκευές ελέγχου. Συγκρίνοντάς τες με τις επιτρεπόμενες εκπομπές που εξέρχονται από την εγκατάσταση (βλέπε Πίνακα 3.1), μπορεί κάποιος να υπολογίσει τον απαιτούμενο βαθμό ελέγχου. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον πίνακα, υπολογίστε τις εκπομπές από ένα εργοστάσιο παραγωγής ισχύος 500 MW σε πλήρη φόρτωση, καίγοντας μια τυπική φλέβα κάρβουνου (άνθρακα). Η θερμική απόδοση είναι 35% (αυτή είναι η μέγιστη απόδοση, σύγχρονη εγκατάσταση, η βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος θα παρέπεμπε σ' αυτό έχοντας ένα ποσοστό θερμότητας 9751 Btu/kWh). Το εργοστάσιο ισχύος υποτίθεται ότι είναι του τύπου «κονιοποιημένος, γενικός». Το σύνολο του Πίνακα 4.2 είναι σε τόνους του καιγόμενου άνθρακα. Μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό κατανάλωσης άνθρακα από:

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό} \\ \text{Κατανάλωσης άνθρακα} \end{array} \right) &= \frac{\text{Ισχύς Εξόδου}}{\text{Απόδοση} \cdot \text{Τιμή θέρμανσης άνθρακα}} = \\ &= \frac{500 \text{ MW}}{0.35 \times 13.600 \text{ Btu/lb}} \times \frac{3413 \text{ Btu}}{\text{kWh}} \times \frac{1000 \text{ kW}}{\text{MW}} \\ &= 3.585 \times 10^5 \frac{\text{lb}}{\text{h}} = 179 \frac{\text{ton}}{\text{h}} = 163 \frac{\text{tonne}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Το ποσοστό εκπομπής εναιωρήματος είναι:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό εκπομπής} \\ \text{εναιωρήματος} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Παράγοντας} \\ \text{εκπομπής} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό ροής} \\ \text{άνθρακα} \end{array} \right) = \frac{16 \text{ Alb}}{\text{ton}} \left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό ροής} \\ \text{άνθρακα} \end{array} \right) =$$

= 16 x 8.7 lb/ton x 179 ton/h = 2.5 x 10⁴ lb/h = 12.5 ton/h = 11.3 tonne/h
 (Βλέπε σημείωση b στον Πίνακα 4.2 για τις έννοιες του A και S). Κατά τον ίδιο τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό εκπομπής SO₂, ότι είναι:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό εκπομπής} \\ \text{SO}_2 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Παράγοντας} \\ \text{εκπομπής} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό ροής} \\ \text{άνθρακα} \end{array} \right) = 38S \frac{\text{lb}}{\text{ton}} \left(\begin{array}{c} \text{Ποσοστό ροής} \\ \text{άνθρακα} \end{array} \right) =$$

$$= 38 \times 1.6 \text{ lb/ton} \times 179 \text{ ton/h} = 1.09 \times 10^4 \text{ lb/h} = 5.4 \text{ ton/h} = 4.9 \text{ tonne/h}.$$

Στο μονοξείδιο του άνθρακα μπορούμε να δούμε ότι το ποσοστό ροής είναι 1 lb/ton x 179 ton/h = 179 lb/h, και στους υδρογονάνθρακες 54 lb/h, οξείδια του αζώτου 3.220 lb/h και στις αλδεύδες 0.90 lb/h. Ο Πίνακας 4.2 περιέχει δύο τύπους παραγόντων εκπομπής, εκείνους που μπορούν να υπολογιστούν κατά προσέγγιση και εκείνους που βασίζονται εξ ολοκλήρου στην μέτρηση.

Παράδειγμα 4.5:

Εάν το σύνολο της τέφρας μέσα στον άνθρακα στο Παράδειγμα 4.4 εκπέμφθηκαν με το ρεύμα του αερίου, ποιος θα μπορούσε να είναι ο παράγοντας εκπομπής στα εναιωρήματα; Ο παράγοντας είναι 16 A lb/ton, όπου A είναι το ποσοστό της τέφρας μέσα στον άνθρακα. Εάν ο άνθρακας είναι 1% σε τέφρα, τότε ο άνθρακας περιέχει:

$$\text{Περιεκτικότητα σε τέφρα} = 0.01 \times 2000 \text{ lb/ton} = 20 \text{ lb/ton}$$

και κατ' αυτόν τον τρόπο, εάν το σύνολο αυτού εκπέμφθηκε, ο παράγοντας θα ήταν 20 A αντί 16 A.

Εάν δεν γνωρίζαμε τίποτα γύρω από την συμπεριφορά των κλιβάνων κονιοποιημένου άνθρακα, μπορούμε να υπολογίσουμε τον παράγοντα εκπομπής εναιωρήματος μέσω απλής στοιχειομετρίας, όπως παρουσιάστηκε στο Παράδειγμα 4.5, θα βρούμε κάποια απάντηση ότι

είναι 125% της τιμής στον Πίνακα 4.2. Τα δεδομένα σε εκείνον τον Πίνακα αντανακλούν την παρατήρηση αυτή, κατά μέσο όρο, 20% της τέφρας σ' αυτόν τον τύπο του κλιβάνου πέφτει στον πυθμένα (τέφρα πυθμένα), ενώ το υπόλοιπο 80% μεταφέρεται κατά μήκος με το ρεύμα αερίου (αιωρούμενη τέφρα). Αυτό είναι ένα παράδειγμα ενός ημιυπολογισμένου παράγοντα εκπομπής. Ο παράγοντας εκπομπής για το SO₂ είναι επίσης ημι-υπολογισμός. (βλ. Πρόβλημα 4.10). Στον Πίνακα 4.2 δεν υπάρχει κανένας απλός τρόπος για να υπολογιστούν οι παράγοντες εκπομπής για το μονοξείδιο του άνθρακα και τις αλδεύδες, που είναι προϊόντα της ατελούς καύσης. (Βελτιωμένα μοντέλα καύσης μπορούν να τα υπολογίσουν). Αντίθετα, οι τιμές τους στον Πίνακα 4.2 είναι απλά ο μέσος όρος πολλών αποτελεσμάτων του ελέγχου.

Μπορούμε να ετοιμάσουμε μια εκτίμηση των εκπομπών από μια νέα ή υπάρχουσα πηγή γρήγορα και φτηνά χρησιμοποιώντας παράγοντες εκπομπής. Ο τίτλος στον Πίνακα 4.2 περιέχει τη φράση «Διαβάθμιση Α Παράγοντα Εκπομπής» υποδηλώνοντας ότι οι τιμές σ' αυτόν τον πίνακα είναι αξιόπιστες. Σε άλλες σελίδες, στην ίδια πηγή, δίνονται μικρότερες διαβαθμίσεις, υποδηλώνοντας ότι οι παράγοντες βασίζονται σε λιγότερα και/ή φτωχότερης ποιότητας δεδομένα ελέγχου. Συνήθως παρατίθενται τα δεδομένα ελέγχου των αρχικών πηγών. Ένας προνοητικός μηχανικός πάντα συμβουλεύεται τον παράγοντα εκπομπής του πίνακα πριν αποφασίσει να προβεί σε κάποιον έλεγχο εκπομπής. Ίσως να μην είναι αναγκαίος ο έλεγχος. Εάν είναι απαραίτητο, ο πίνακας θα παράσχει μια καλή εκτίμηση του τι να αναμένεται από τον έλεγχο και οδηγεί στην βιβλιογραφία όσον αφορά τον τρόπο που οι προηγούμενοι ερευνητές έλεγχαν την εκπομπή αυτού του τύπου πηγής και ποιες δυσκολίες λάμβαναν υπόψη.

Πίνακας 4.2

Παράγοντες εκπομπής για καύση ασφαλτούχου άνθρακα χωρίς εξοπλισμό ελέγχου, διαβάθμιση παράγοντα εκπομπής A.

Μέγεθος κλιβάνου, 10 ⁶ Btu/h εισαγωγή θερμότητας	Αιωρούμενα σωματίδια		Οξείδια του θείου		Μονοξείδιο του άνθρακα		Υδρογονάνθρακες		Οξείδια του αζώτου		Αλδεΰδες	
	lb/ton καίόμενου άνθρακα	kg/MT καίόμενου άνθρακα	lb/ton καίόμενου άνθρακα	kg/MT καίόμενου άνθρακα	lb/ton καίόμενου άνθρακα	kg/MT καίόμενου άνθρακα	Lb/ton καίόμενου άνθρακα	kg/MT καίόμενου άνθρακα	lb/ton καίόμενου άνθρακα	kg/MT καίόμενου άνθρακα	lb/ton καίόμενου άνθρακα	kg/MT καίόμενου άνθρακα
Μεγαλύτερο από 100 (χρησιμότητα και μεγάλοι βιομηχανικοί ατμολέβητες)												
Κονιοποιημένος Γενικός	16A	8A	38S	19S	1	0.5	0.3	0.15	18	9	0.005	0.0025
Υγρός πυθμένας	13A ^e	6.5A	38S	19S	1	0.5	0.3	0.15	30	15	0.005	0.0025
Ξηρός πυθμένας	17A	8.5A	38S	19S	1	0.5	0.3	0.15	18	9	0.005	0.0025
Κυκλώνιο	2A	1A	38S	19S	1	0.5	0.3	0.15	55	27.5	0.005	0.0025
10 προς 100 (μεγάλος εμπορικός και γενικοί βιομηχανικοί ατμολέβητες)												
Οριζόντιος τροφοδότης καυσίμων	13A ^e	6.5A	38S	19S	2	1	1	0.5	15	7.5	0.005	0.0025
Λιγότερο από 10 (εμπορικοί και εσωτερικοί κλιβάνοι)												
Οριζόντιος τροφοδότης καυσίμων	2A	1A	38S	19S	10	5	3	1.5	6	3	0.005	0.0025
Μονάδες χειροκίνητης καύσης	20	10	38S	19S	90	45	20	10	3	1.5	0.005	0.0025

Πηγή: Πίνακας 1-1 του EPA για τους Παράγοντες Εκπομπής [7]. Το αρχικό δίνει αναφορές στη βιβλιογραφία πάνω στην οποία βασίζονται οι τιμές.

a 1 Btu/h = 0.252 kcal/h.

b Το γράμμα A σε όλες τις μονάδες εκτός του χειροκίνητου εξοπλισμού καύσης δηλώνει ότι το ποσοστό βάρους της τέφρας στο κάρβουνο θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τη δεδομένη τιμή. Παράδειγμα. Εάν ο παράγοντας είναι 16 και η περιεκτικότητα σε τέφρα είναι 10%, οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων πριν τον εξοπλισμό ελέγχου θα ήταν 10 x 16 ή 160 lb των αιωρούμενων σωματιδίων ανά τόνο άνθρακα 10 x 8 kg, ή 80 kg, των εναιωρημάτων ανά MT άνθρακα).

c_s Περιεκτικότητα σε θείο, που παίζει τον ίδιο ρόλο όπως το A για την περιεκτικότητα σε τέφρα στην προηγούμενη υποσημείωση.

d Εκφρασμένο ως μεθάνιο

e Χωρίς την επανέγερση αιωρούμενης τέφρας

f Για όλους τους άλλους τροφοδότες καυσίμου, χρησιμοποιήστε 5 A (2.5 A) σε παράγοντα εκπομπής εναιωρήματος.

Κατ' αρχήν, δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των ελέγχων εκπομπής σε σταθερές πηγές (πχ. εργοστάσια) και σε κινητές πηγές (πχ. αυτοκίνητα). Στην πράξη, είναι διαφορετικά, επειδή η κανονική λειτουργία για μια κινητή πηγή είναι να κινείται ενώ για δοκιμαστικούς σκοπούς πρέπει φυσιολογικά να είναι σταθερή επειδή τα όργανα μέτρησης είναι σταθερά. Οι πολιτείες και τα τοπικά γραφεία συχνά χρησιμοποιούν τις εκπομπές στο ρελαντί για να βρουν και να διορθώσουν την μη προσαρμογή και τη δυσλειτουργία των αυτοκινήτων. Για την πιστοποίηση των νέων αυτοκινητιστικών μοντέλων οι έλεγχοι γίνονται σε ένα δυναμόμετρο του σασί, κατά το οποίο τοποθετούνται οι κινητήριοι τροχοί του αυτοκινήτου πάνω σε κυλίνδρους που επιτρέπουν στο όχημα να λειτουργεί σε σημαντικές ταχύτητες της μηχανής ενώ στέκεται ακίνητο και μεταβάλλοντας την αντίσταση των κυλίνδρων για να φαίνεται ότι επιταχύνεται ή ότι ανεβαίνει σε λόφο ή ότι κατεβαίνει από το λόφο.

4.8 Ορατές εκπομπές.

Η παράγραφος 2.3 έδειξε ότι τα σωματίδια που παράγονται από τον αέρα μπορούν να διαχέουν και να απορροφούν το φως. Εάν η συγκέντρωση σωματιδίων στην έξοδο κάποιας πηγής (μια στήλη καπνού, ένα φορτηγό με ντηζελομηχανή, ένα αυτοκίνητο καύσης λαδιού) είναι αρκετά υψηλή, η στήλη καπνού θα είναι ορατή. Καθώς η στήλη καπνού ρέει προς τα κάτω και αναμιγνύεται με τον αέρα του περιβάλλοντος η συγκέντρωση σωματιδίων διαλύεται και η αδιαφάνεια της στήλης καπνού ή η οπτική πυκνότητα μειώνεται. Γενικά, θα μπορούσε κάποιος να κοιτάξει σε κάποια εκπομπή και να εκτιμήσει το ποσοστό εκπομπής σωματιδίων από αυτό που βλέπει. Στην πράξη, είναι σχετικά εύκολο να μετρηθεί η αδιαφάνεια, χρησιμοποιώντας είτε εκπαιδευμένους παρατηρητές ή ηλεκτροοπτικές συσκευές. Αλλά σχετίζοντας την αδιαφάνεια προς το

ποσοστό εκπομπής της μάζας των σωματιδίων στην στήλη καπνού, η οποία είναι συνήθως η ρυθμισμένη ποσότητα, δεν είναι εύκολο.

Ο λόγος γι' αυτή τη δυσκολία είναι προφανής στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{pmatrix} \text{Αδιαφάνεια} \\ \text{στήλης} \\ \text{καπνού} \end{pmatrix} = f \left[\begin{pmatrix} \int c dx \\ \text{Διαμέσου της} \\ \text{στήλης κκαπνο} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{Κατανομή} \\ \text{μεγέθους} \\ \text{σωματιδίου} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{Οπτικές} \\ \text{ιδιότητες} \\ \text{σωματιδίου} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{Γωνία} \\ \text{ηλιακού} \\ \text{φωτισμού} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{Περιεκτικότητα} \\ \text{σε υγρασία της} \\ \text{στήλης κκαπνο} \end{pmatrix} \right] \quad (4.6)$$

όπου $c =$ σωματιδιακή συγκέντρωση

$x =$ απόσταση στην εξεταζόμενη κατεύθυνση.

Εάν όλοι οι όροι εκτός του $\int c dx$ ήταν σταθεροί και γνωστοί, τότε θα μπορούσαμε εύκολα να συσχετίσουμε την αδιαφάνεια της στήλης καπνού προς το βαθμό εκπομπής μάζας (εάν γνωρίζαμε την ταχύτητα του ανέμου και τις παραμέτρους διάχυσης. Αλλά οι υπόλοιποι όροι στην Εξ. (4.6) ποικίλουν από τη μια στήλη στην άλλη και από τον ένα χρόνο της ημέρας στον άλλον, έτσι ώστε η συσχετιζόμενη αδιαφάνεια προς τον βαθμό εκπομπής μάζας να είναι δύσκολη. Παρ' όλη αυτή τη δυσκολία, οι οπτικές μετρήσεις της αδιαφάνειας της στήλης καπνού έπαιξαν έναν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα. Ο καθηγητής Maximilian Ringleman δημιούργησε ένα σύστημα για να κάνει τέτοιες μετρήσεις το 1890 περίπου. Σημείωσε πέντε πλέγματα διαφόρων πυκνοτήτων πάνω σε κομμάτι χαρτόνι. Ένας παρατηρητής εξέτασε την στήλη καπνού και κατόπιν το χαρτόνι, συγκρίνοντας την οπτική πυκνότητα της στήλης καπνού μ' εκείνη των διαφόρων πλεγμάτων. Απ' αυτή την οπτική σύγκριση ο παρατηρητής μπορούσε να προσδιορίσει εάν η στήλη καπνού ήταν φωτεινότερη ή σκουρότερη από εκείνη των πέντε πλεγμάτων (καλούμενο Ringleman #1, ..., #5, ανταποκρινόμενο στο 20%,

..., 100% της αδιαφάνειας). Στην πράξη, εκπαιδευμένοι παρατηρητές μπορούν να κάνουν αυτόν τον προσδιορισμό χωρίς τα πλέγματα του Ringleman κρατικά γραφεία ελέγχου της μόλυνσης του αέρα διηύθυναν συνήθως (και μερικά ακόμα διευθύνουν) «σχολεία καπνού» στα οποία οι μαθητές μάθαιναν να προσδιορίζουν την αδιαφάνεια έως $\pm 10\%$ κοιτάζοντας απλώς την στήλη καπνού, αποκτώντας έτσι «οξυδερκείς οφθαλμούς». Πριν το 1970 δεν υπήρχαν καθόλου αριθμητικά όρια εκπομπής (της μορφής «όχι περισσότερο από x lb/h του ρυπαντή Y») για τις πιο πολλές πηγές εκπομπής. Τα πιο πολλά γραφεία ελέγχου της μόλυνσης στηρίζονταν κυρίως πάνω στην μέτρηση της αδιαφάνειας για τις ρυθμιζόμενες πηγές εκπομπής εναιωρημάτων. Οι κανονισμοί συνήθως απαγόρευαν την αδιαφάνεια της στήλης καπνού να είναι μεγαλύτερη από 20% ή σε μερικές περιπτώσεις 40%, για περισσότερο από ελάχιστα λεπτά του χρόνου. Η εκτέλεση ελέγχου από το γραφείο έδινε την δυνατότητα στους υπαλλήλους να κάνουν μια μέτρηση από το δρόμο έξω από το κατηγορούμενο εργοστάσιο, χωρίς να ενημερωθεί ο ιδιοκτήτης του εργοστασίου. Το κόστος του ελέγχου ήταν αμελητέο, και μπορούσε να γίνει σε σύντομο χρόνο. (Αυτό είναι το μόνο είδος ελέγχου που αναλύθηκε σε αυτό το κείμενο που δεν χρειάζεται μια συσκευή ή σύνολο συσκευών, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1). Τα δικαστήρια επικύρωσαν την ισχύ αυτών των ελέγχων και σκόπευαν να ενισχύσουν τους κανόνες. Σ' εκείνη την περίοδο πολλές σημαντικές πηγές υπερέβησαν αυτές τις τιμές αδιαφάνειας, οι επιθεωρητές των γραφείων ελέγχου χρησιμοποιώντας αυτή την οικονομική και απλή μέθοδο, βοηθήθηκαν ώστε να κάνουν αρκετά καλύτερο έλεγχο. Από την έκδοση της παραγράφου του Νόμου για Καθαρό Αέρα του 1970, πολλές σημαντικές πηγές δημιουργίας αερίων εναιωρημάτων στις ΗΠΑ πρέπει να υποβάλλονται σε τακτικούς ελέγχους των στηλών καπνού για να συμμορφωθούν με τα αριθμητικά όρια της εκπομπής. Αν και οι κανονισμοί ορατών εκπομπών κατέστησαν

λιγότερο σημαντικοί, οι κανονισμοί συχνά περιέχουν ένα όριο στην αδιαφάνεια της στήλης καπνού, και απαιτούν μεγάλες πηγές για να εγκαταστήσουν μέσα στη στοίβα ηλεκτρο-οπτικούς ανιχνευτές για να καταγράψουν την αδιαφάνεια της στήλης καπνού. Αυτό εξυπηρετεί την ανίχνευση υψηλών ποσοστών εκπομπής σε τακτικές περιόδους και ανταποκρίνονται επίσης στην πεποίθηση του κόσμου ότι κανένας δεν θα έπρεπε να επιτρέψει την εκπομπή μιας πυκνής στήλης καπνού. Αλίμονο, αυτή η πεποίθηση κάνει πολλές βιομηχανικές πηγές να δαπανήσουν χρήματα και πόρους για να εξαλείψουν τις στήλες ατμού, οι οποίες είναι απλά συμπυκνωμένο νερό, αλλά τις οποίες ο κόσμος θεωρεί επιβλαβείς.

Υπάρχει συνεχές ενδιαφέρον ως προς την χρησιμοποίηση οπτικών μεθόδων για να υπολογιστούν οι ρυπογόνες συγκεντρώσεις. Για παράδειγμα, αναπτύσσονται τώρα συσκευές που διαπερνούν μια υπέρυθρη δέσμη μέσω των καυσίμων των μεμονωμένων αυτοκινήτων καθώς περνούν από την πλευρά ανίχνευσης ενός δρόμου ή μιας ράμπας αυτοκινητόδρομου. Εκείνα τα οχήματα που εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες CO ανιχνεύονται εύκολα. Αυτή η μέθοδος ή άλλες σαν αυτή, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον μελλοντικό έλεγχο εκπομπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΜΙΚΡΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί τα περισσότερα από τα μικροσωματίδια είναι δευτερεύοντα σωματίδια. Ο έλεγχος των κύριων σωματιδίων είναι το κύριο κομμάτι της μηχανική ελέγχου της μόλυνσης του αέρα. Πολλά από τα κύρια σωματίδια όπως ο αμίαντος και τα βαριά μέταλλα είναι πιο τοξικά από τα δευτερεύοντα σωματίδια. Παρόλο που γενικά τα κύρια σωματίδια είναι μεγαλύτερα από τα δευτερεύοντα σωματίδια πολλά κύρια σωματίδια είναι αρκετά μικρά ώστε να είναι αναπνεύσιμα και είναι έτσι ανησυχητικά για την υγεία. Ο μέσος μηχανικός είναι πιο πιθανό να αντιμετωπίσει ένα πρόβλημα ελέγχου μόλυνσης του αέρα. Αν είναι δυνατόν τα συγκεντρωμένα σωματίδια είναι ανακυκλώσιμα σε κάποιο σημείο της διεργασίας που τα παράγει. Πιο συχνά όμως (στάχτη και αιθάλη από την καύση του άνθρακα) τα συγκεντρωμένα σωματίδια πηγαίνουν στο έδαφος.

5.1 Συσκευές συγκέντρωσης τοίχου.

Οι τρεις πρώτοι τύποι μηχανισμοί ελέγχου, που μπορούμε να δούμε είναι: βαρύτητας (έλξης), κυκλωνοδιαχωριστές, ηλεκτροστατικοί συγκεντρωτήρες. Όλοι τους λειτουργούν καθοδηγώντας τα σωματίδια σ' ένα τοίχωμα όπου όλα προσκολλούνται μεταξύ τους απ' όπου μπορούν να μετακινηθούν από τον μηχανισμό αυτό συλλογής και να καταστραφούν. Αν και οι μηχανισμοί αυτοί διαφέρουν μεταξύ τους,

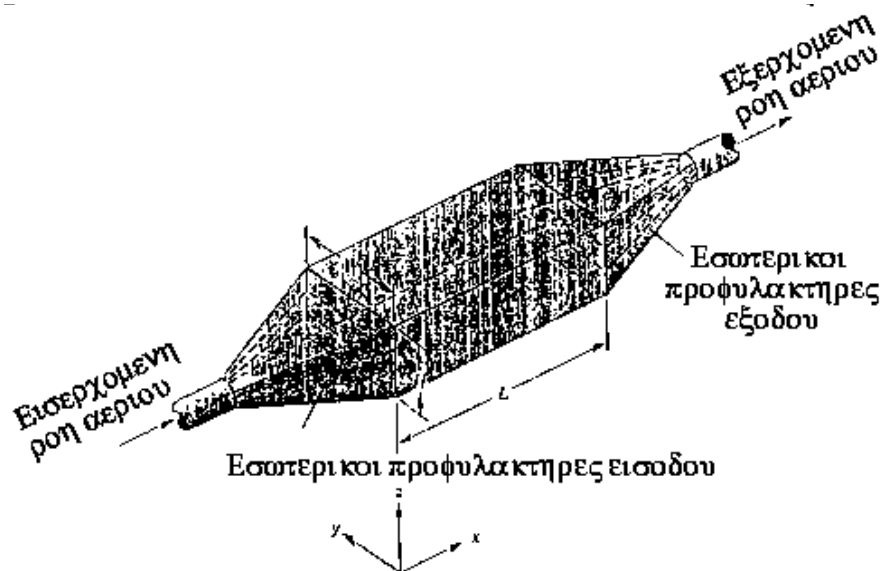
όλοι τους λειτουργούν κάτω από την ίδια γενική ιδέα και βεβαίως περιγράφονται με τις ίδιες σχεδιαστικές εξισώσεις.

5.1.1 Εγκαταστάσεις βαρύτητας (GRAVITY SETTLERS).

Ο συγκεντρωτής βαρύτητας είναι απλά ένας μακρύς θάλαμος όπου το μολυσμένο αέριο διαπερνά σιγά – σιγά δίνοντας έτσι το χρόνο στα μόρια να συγκεντρωθούν εξαιτίας της βαρύτητας στον πυθμένα. Φυσικά πρόκειται για έναν απλό μηχανισμό που πρέπει να καθαρίζεται συχνά με το χέρι. Αλλά είναι απλός στην κατασκευή και απαιτεί ελάχιστη συντήρηση, επίσης έχει και κάποια δυνατότητα χρήσης σε βιομηχανίες που ασχολούνται με μολυσμένα αέρια (σε μεταλλουργικές διαδικασίες). Επιπλέον η μαθηματική του ανάλυση είναι πανεύκολη, επαναμφανίζεται ελαφρώς αλλαγμένο στους κύκλωνες και τους ηλεκτροστατικούς συγκεντρωτήρες. Το σχέδιο 5.1 δείχνει ένα συγκεντρωτή βαρύτητας. Η περιοχή (WH) είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του εισερχόμενου ή εξερχόμενου αγωγού αερίου, έτσι ώστε η ταχύτητα αερίου μέσα σ' αυτό να είναι πολύ κατώτερη απ' ότι στους αγωγούς. Κάποιου είδους αδρανοποιητές χρησιμοποιούνται για να απλώσουν την εισερχόμενη ροή αερίου στο θάλαμο, δίχως τους αδρανοποιητές το μεγαλύτερο μέρος του αερίου θα διασχίσει το μέσον και το αποτέλεσμα συλλογής μορίων δεν θα 'ναι ικανοποιητικό. Για να υπολογιστεί η συμπεριφορά τέτοιου μηχανισμού χημικοί μηχανολόγοι συνήθως στηρίζονται σ' ένα από τα δύο μοντέλα. Είτε υποθέτουμε ότι πως το υγρό που εισέρχεται εντελώς μη αναμειγμένο ή πλήρως αναμειγμένο (block flow or plug flow model), είτε στο συνολικό μηχανισμό, είτε κατά το πέρασμα από το κατακόρυφο τμήμα της ροής (μη-ανεμηγμένο ή ανεμηγμένο μοντέλο) κάθε μια απ' αυτές τις υποθέσεις μας οδηγούν σε απλούς

υπολογισμούς. Η υπάρχουσα συμπεριφορά της φύσης έγκειται σ' αυτούς τους δυο, έτσι μ' αυτούς τους δυο υπολογισμούς, μηχανισμούς-μοντέλα μπορούμε να δώσουμε τα όρια της φύσης. Και οι δυο μηχανισμοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε υπολογισμούς ελέγχου μολυσμένου αέρα. Θα υπολογίσουμε την συμπεριφορά του συγκεντρωτή βαρύτητας και με τους δυο τρόπους. Για κάθε αναμειγμένη ή όχι ροή αερίου, η κατά μέσο όρο οριζόντια ταχύτητα αερίου στο θάλαμο έχει ως εξής:

$$V_{\text{arg}} = \frac{Q}{WH} \quad (5.1)$$



Φιγούρα 5.1:

Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συγκεντρωτή βαρύτητας.

Για το block flow model μπορούμε να υποθέσουμε:

1. Η οριζόντια ταχύτητα του αερίου στον θάλαμο ισούται με V_{arg} οπουδήποτε στον θάλαμο.

2. Το οριζόντιο διάνυσμα της ταχύτητας των σωματιδίων στο αέριο είναι πάντα ίσο με V_{arg} .
3. Το κάθετο συστατικό μέρος της ταχύτητας των σωματιδίων είναι ίσο της τελικής ταχύτητας εξαιτίας της έλξης (βαρύτητας), V_t .
4. Εάν ένα σωματίδιο εγκατασταθεί στο πάτωμα, μένει εκεί και δεν υπεισέρχεται ξανά.

Μ' αυτές τις υποθέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την συμπεριφορά της έλξης (βαρύτητας) στον θάλαμο σύμφωνα με το μοντέλο ροής-block. Θεωρούμε ότι ένα σωματίδιο εισέρχεται στον θάλαμο με κάποια απόσταση h πάνω από το πάτωμα του θαλάμου. Ο χρόνος που το αέριο χρειάστηκε για να εισέλθει στο θάλαμο στην κατεύθυνση της ροής και είναι:

$$t = \frac{L}{V_{\text{arg}}} \quad (5.2)$$

Κατά την διάρκεια του χρόνου που το μόριο θα ηρεμήσει λόγω βαρύτητας η απόσταση, είναι:

$$\text{Κάθετη απόσταση εγκατάστασης} = tV_t = V_t \frac{L}{V_{\text{arg}}} \quad (5.3)$$

Εάν αυτή η απόσταση είναι μεγαλύτερη ή ίση του h (είναι η κατακόρυφη απόσταση πάνω από τον πυθμένα), τότε θα φτάσει στο πάτωμα του θαλάμου και θα εγκλωβιστεί. Εάν τα μόρια είναι ίδιου μεγέθους και επομένως έχουν την ίδια τιμή ταχύτητας V_t , τότε υπάρχει κάποια απόσταση πάνω από το πάτωμα (εσωτερικά) όπου όλα τα μόρια θα παγιδευτούν, στο κάτω μέρος, ενώ στο επάνω κανένα μόριο δεν θα

παγιδευτεί. Εάν τώρα θεωρήσουμε ότι όλα τα μόρια είναι του ίδιου μεγέθους και ότι ενοχλούνται ανομοιόμορφα εντός του θαλάμου και δεν αντιδράσουν μεταξύ τους μπορούμε να πούμε ότι ένα μέρος των μορίων που θα παγιδευτεί, το οποίο είναι μια κλασματική απόδοση συγκέντρωσης είναι:

$$\text{Παγίδευση κλάσματος} = n = \frac{LV_t}{HV_{\text{arg}}} \text{ (block flow)} \quad (5.4)$$

Για τον υπολογισμό της απόδοσης-διαμέτρων σχέσης σωματιδίων αντικαθιστούμε την ταχύτητα (5.4) με την βαρύτητα. Με ανάλογη αντικατάσταση βρίσκουμε:

$$n = \frac{LgD^2 r_{\text{part}}}{HV_{\text{arg}} 18m} \text{ (block flow)} \quad (5.5)$$

Για να δούμε το μοντέλο μικτής ροής, υποθέτουμε ότι η ροή αερίου είναι εντελώς μεικτή στην κατεύθυνση z όχι όμως στην κατεύθυνση x (οι περισσότερες πραγματικές ροές αερίων είναι στροβιλώδης οδηγώντας σε εσωτερική μίξη). Αυτό είναι λογικό εφόσον η μίξη στην κατεύθυνση x μετακινεί τα μόρια πάνω – και κάτω, με ελάχιστη επίπτωση στην απόδοση συγκέντρωσης, ενώ η μίξη στην κατεύθυνση z παρουσιάζει μείωση της απόδοσης (συγκέντρωσης).

Θεωρούμε μια διατομή μήκους dx . Σ' αυτή την περίπτωση το κλάσμα των σωματιδίων που φτάνουν στο πάτωμα ισούται με την κάθετη απόσταση, όταν ένα φυσιολογικό σωματίδιο πέφτει εξαιτίας της έλξης (βαρύτητας) προς το ύψος της διατομής οπότε και γράφουμε:

$$\text{Συλλογή κλάσματος} = \frac{V_t d_t}{H} \quad (5.6)$$

Η αλλαγή σε συμπύκνωση διαπερνώντας αυτό το μέρος είναι:

$$d_c = -c \cdot (\text{συλλογή κλάσματος}) = -\frac{c V_t d_t}{H} \quad (5.7)$$

Ο χρόνος κατά μέσο όρον για ένα σωματίδιο να περάσει είναι:

$$d_t = \frac{d_x}{V_{\text{arg}}} \quad (5.8)$$

$$\text{Ενώνοντας τις εξισώσεις τότε έχουμε: } \frac{d_c}{c} = -\frac{V_t}{H V_{\text{arg}}} d_x \quad (5.9)$$

το οποίο μπορεί να ενοποιηθεί από την είσοδο ($x=0$) με την έξοδο ($x=L$) βρίσκοντας (x =σωματίδιο).

$$\ln \frac{c_{\text{out}}}{c_{\text{in}}} = -\frac{V_t L}{H V_{\text{arg}}} \text{ ανάμεικτη ροή} \quad (5.10)$$

ή

$$n = 1 - \left(\frac{c_{\text{out}}}{c_{\text{in}}} \right) = 1 - \exp\left(-\frac{V_t L}{H V_{\text{arg}}}\right) \quad (5.11)$$

Τέλος μπορούμε να αντικαταστήσουμε για V_t από τον νόμο του Stokes βρίσκοντας:

$$n = 1 - \exp\left(-\frac{L g D^2 r_{\text{part}}}{H V_{\text{arg}} 18 m}\right) \text{ ανάμεικτη ροή} \quad (5.12)$$

Συγκρίνοντας αυτό το αποτέλεσμα με αυτό για block ή plug ροή βλέπουμε, Eq. (5.5) και Eq. (5.12) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$n_{mixed} = 1 - \exp(-n_{block\ flow}) \quad (5.13)$$

Παράδειγμα 5.1:

Υπολογίστε την σχέση απόδοσης διαμέτρου για ένα συγκεντρωτή βαρύτητας που έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά: $H = 2m$, $L = 10m$, και $V_{arg} = 1m/s$ και για τα δυο μοντέλα βάση του νόμου του Stoke.

$$n = \frac{LgD^2 r_{part}}{18mHV_{arg}} = \frac{(10m)(9.81m/s^2)(10^{-6}m)^2(2000kg/m^3)}{(18)(1.8 \times 10^{-5}kg/m \cdot s)(2m)(1m/s)} = 3.03 \times 10^{-4}$$

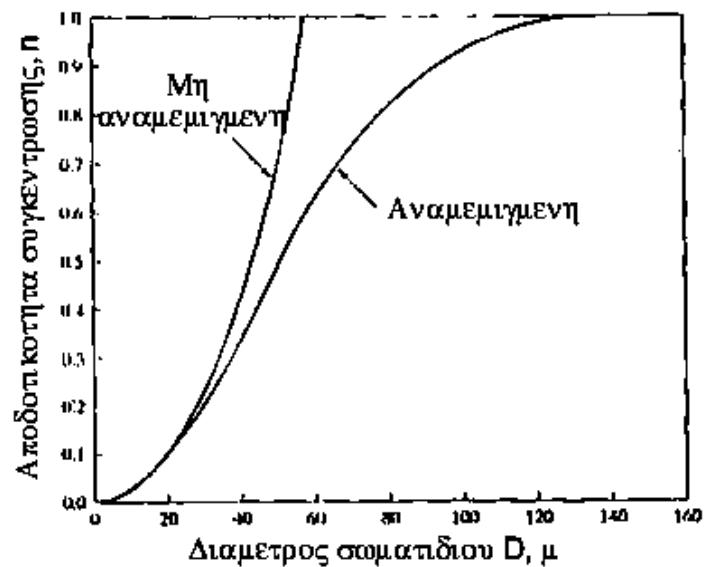
για σωματίδια διαμέτρου $1\mu m$ η σχέση block flow οδηγεί σε απόδοση 3.03×10^{-4} . Η ανάμεικτη υπόθεση μας οδηγεί σχεδόν στο ίδιο αποτέλεσμα:

$$n_{mixed} = 1 - \exp(-3.03 \times 10^{-4}) = 3.029 \times 10^{-4}$$

Για να βρούμε αποδόσεις για άλλες διαμέτρους σωματιδίων, παρατηρούμε ότι οι block αποδόσεις είναι ανάλογες με το τετράγωνο της διαμέτρου του σωματιδίου. Έτσι μπορούμε να κάνουμε έναν πίνακα των αποδόσεων για block ροή με βάση τους απλούς λόγους, δηλ.: για διάμετρο $1\mu m$ έχουμε $n_{block} = 0.000303$, για διάμετρο $10\mu m$ έχουμε $n_{block} =$; Κατόπιν υπολογίζουμε για το n_{mixed} .

Διάμετρος σωματ.(μm)	N_{block}	n_{mixed}
1	0.000303	0.000303
10	0.0303	0.0298
30	0.273	0.239
50	0.76	0.53
57.45	1.00	0.63
80	-	0.86
100	-	0.95
120	-	0.99

Οι τιμές φαίνονται στο σχεδιάγραμμα 9.2



Φιγούρα 9.2:

Σύγκριση των αποδόσεων για μια δεξαμενή καθίζησης λόγω βαρύτητας υπολογισμένη από τα μοντέλα μη αναμεμιγμένης και αναμεμιγμένης ροής (βλέπε παράδειγμα 5.1).

Για μικρά σωματίδια, για τα οποία οι υπολογισμένες n (αποδοτικότητες συγκέτρωσης) είναι τα μοντέλα αναμιγμένης και μη αναμιγμένης ροής δίνουν πρακτικά την ίδια απάντηση. Για μεγαλύτερα σωματίδια οι υπολογισμένες n γίνονται μεγαλύτερες και τα δύο μοντέλα δίνουν

διαφορετικές απαντήσεις. Το μοντέλο αναμιγμένης ροής δείχνει ότι το n γίνεται 100% για σωματίδια διαμέτρου 57.45 μm , ενώ το μοντέλο αναμιγμένης ροής δείχνει ότι το n ασυμπτωτικά πλησιάζει το 100% για σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερα από 100 μm . Εάν αντικαταστήσουμε διάμετρο 100 μm στην ισότητα για μοντέλο μη αναμιγμένης ροής βρίσκουμε $n=303\%$ που είναι άτοπο. Μπορούμε να πάρουμε περισσότερες πληροφορίες από αυτά τα δυο μοντέλα εάν για μια χρονική περίοδο πειραματιστούμε με συγκεκριμένα μέτρα και σταθμά σκόνης. Στο block flow μοντέλο θα προσδοκούσαμε μια ομοιομορφία ύψους στο σωρό σκόνης τελειώνοντας χρονικό σημείο όπου και $L = HV_{\text{arg}}/V_f$. Για το mixed μοντέλο θα βλέπαμε έναν σωρό μεγαλύτερο του εσωτερικού και που το βάθος του θα έπεφτε πλησιάζοντας σε μηδενικό βάθος ασυμπτωτικά καθώς το L γίνεται μεγαλύτερο. Αυτού του είδους συσκευή θα ήταν χρήσιμη για συλλογή σωματιδίων ίσως των 100 μm , αλλά όχι για σωματίδια μολυσμένου αέρα που η διάμετρος τους φτάνει σε κλάσμα του 1 μm . Θα μπορούσαμε να αυξήσουμε την απόδοση κάνοντας το L μεγαλύτερο το οποίο κάνει την συσκευή πολύ μεγάλη και ακριβή, κάνοντας το H μικρότερο, το οποίο μερικές φορές γίνεται με την υποδιαίρεση του θαλάμου με οριζόντιες πλάτες που κάνει το καθάρισμα πολύ πιο δύσκολο και ελαττώνοντας το V_{arg} , το οποίο απαιτεί μεγαλύτερο τμήμα εισόδου και επομένως μεγαλύτερη και πιο ακριβή συσκευή ή αυξάνοντας το g . Το τελευταίο είναι ίσως και το πιο δυνατό να γίνει. Αυτό απαιτεί αντικατάσταση μερικών άλλων δυνάμεων από την δύναμη της βαρύτητας για την καθοδήγηση των σωματιδίων από την ροή του αερίου στην επιφάνεια συλλογής. Μικρής έλξης βαρύτητας settlers χρησιμοποιούν για δείγματα σωματιδίων μερικές φορές δείγματα που ονομάζονται horizontal elutriators. Σ' αυτά η ροή είναι πολύ αργή και τα σωματίδια

συσσωρεύονται σε λεπτώδεις επιφάνειες από την βαρύτητα για εκτενέστερη μικροσκοπική εξέταση.

5.1.2 Φυγόκεντρος διαχωριστήρας.

Ήταν εύκολο να κατανοήσουμε τι σημαίνουν τα μαθηματικά στις εγκαταστάσεις λόγω βαρύτητας. Αλλά έχουν ελάχιστη βιομηχανική χρήση, διότι είναι αναποτελεσματικά με μικρότερα σωματίδια. Για να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να βρεθεί κάτι άλλο που είναι πιο δυνατό από την δύναμη βαρύτητας που χρησιμοποιούν για να οδηγήσουν τα σωματίδια στην επιφάνεια συλλογής. Βιβλία Φυσικής και Μηχανολογίας δείχνουν ότι η φυγόκεντρος δύναμη είναι μια ψευτοδύναμη. Είναι εύκολο και εύχρηστο να χρησιμοποιηθεί η ψευτοδύναμη για μαθηματικούς και υπολογιστικούς λόγους. Εάν ένα σώμα κινείται σε κυκλική διαδρομή, με ακτίνα r και ταχύτητα V_c κατά μήκος της διαδρομής, τότε έχει μια γωνιακή ταχύτητα $w = V_c / r$, και:

$$\text{Φυγόκεντρος δύναμη} = \frac{mV_c^2}{r} = mw^2r \quad (5.14)$$

Παράδειγμα 5.2:

Ένα σωματίδιο κινείται με ταχύτητα 60ft /s και ακτίνα 1ft. Ποια είναι η αναλογία της φυγοκεντρικής δύναμης προς την δύναμη έλξης που ασκείται σ' αυτό;

$$\text{Φυγόκεντρος Βαρυτική δύναμη} = \frac{mV_c^2 / r}{mg} = \frac{(60 \text{ ft} / \text{s})^2 / (1 \text{ ft})}{32.2 \text{ ft} / \text{s}^2} = 111.8$$

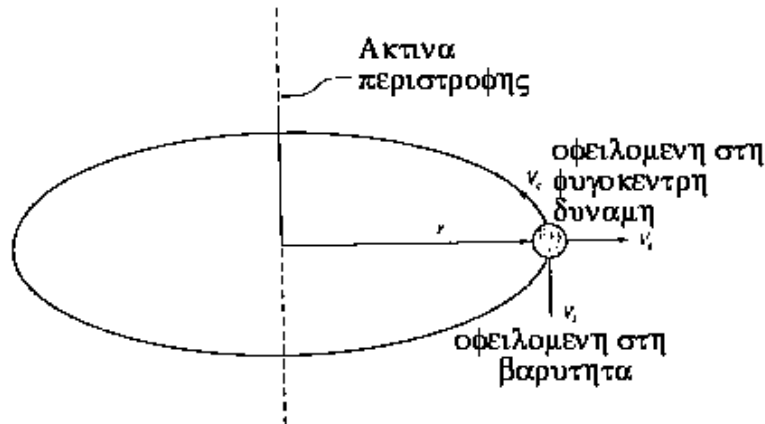
Σε σχετικά μεγαλύτερες ταχύτητες οι φυγόκεντρες δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια μπορεί να είναι δυο φορές μεγαλύτερες από τις δυνάμεις βαρύτητας. Γι' αυτό το λόγο οι φυγοκεντρικοί διαχωριστές είναι και πιο χρήσιμοι. Για εκτενέστερη εργασία θα χρησιμοποιήσουμε το αντίστοιχο φυγοκέντρου του νόμου του Stokes. Υπολογίσαμε το νόμο του Stokes με το να υπολογίσουμε τη δύναμη του Stokes από αυτήν της οπισθέλκουσας. Για να αποκτήσουμε το αντίστοιχο της φυγοκεντρικής χρειαζόμαστε να αντικαταστήσουμε τη φυγόκεντρο δύναμη για τη δύναμη της βαρύτητας. Αντικαθιστούμε g ή με V_c^2/r με w^2r . Αυτό φυσικά μας δίνει κάποιο πρόβλημα διότι εδώ έχουμε δυο δυσανάλογες ταχύτητες. Για να αποφευχθεί κάποιο λάθος έχουμε ονομάσει ταχύτητα V_t την τελική στην ακτινική διεύθυνση και στην κυκλική διαδρομή ταχύτητα V_c . (Σχέδιο 5.3). Στο σχέδιο αυτό μπορούμε επίσης να δούμε ότι η φυγόκεντρος δύναμη είναι συνήθως περισσότερο από 100 φορές δυνατώτερη της δύναμης της βαρύτητας, εφόσον η βαρύτητα της δύναμης είναι μόλις 1/100 της φυγοκέντρου και μπορούμε να μην την λάβουμε υπ' όψιν. Αντικαθιστούμε την φυγόκεντρο δύναμη με εκείνη της βαρύτητας κι εφόσον βάλουμε r_{fluid} βρίσκουμε ότι:

$$V_t = \frac{V_c^2 D^2 r_{part}}{18\mu r} \quad (5.15)$$

Παράδειγμα 5.3:

Επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς με ροή αερίου ταχύτητας $V_c = 60 \text{ ft/s}$ (18.29 m/s) και ακτίνα 1 ft (0.3048 m). Η πυκνότητα του υγρού μπορεί να μη ληφθεί υπόψιν. Με απευθείας αντικατάσταση στην σχέση 5.15 βρίσκουμε τα κάτωθι:

$$V_t = \frac{(18.29 \text{ m/s})^2 (10^{-6} \text{ m})^2 (2000 \text{ kg/m}^3)}{(18)(1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})(0.3048 \text{ m})} = 0.0068 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.68 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0.022 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$



Φιγούρα 9.3:

Σχέση των καθοριζόμενων όρων για την περιστροφική κίνηση

Αυτή η απάντηση είναι τουλάχιστον 112 φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή και μας δείχνει ότι μ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να αποκτήσουμε μεγαλύτερες ταχύτητες. Εδώ μπορούμε να δούμε ότι ο Reynolds του σωματιδίου είναι περίπου 0.00046. Οπότε λογική φαίνεται η υπόθεση του Stokes. Ο διορθωτικός συντελεστής του Cunningham είναι ανεπηρέαστος από το πόσο γρήγορα κινούνται τα μόρια, δίχως διαφοροποιήσεις εάν αλλάξουμε από την συσσώρευση της βαρύτητας σ' εκείνη της φυγόκεντρου. Σ' αυτό το σημείο αξανασκεφτούμε την παραδοχή του νόμου του Stokes. Εάν αναλογιστούμε την ολική ροή του αερίου, με ταχύτητες της τάξης των 60 ft/s οι αριθμοί

Reynolds είναι της τάξης του μισού εκατομμυρίου. Η ροή είναι υψηλά παραχώδης. Πώς μπορούμε να προσαρμόσουμε το νόμο του Stokes, που απαιτεί του αριθμούς Reynolds του μορίου να είναι μικρότεροι από 0.3 και τη ροή του αερίου γύρω από το μόριο να είναι ελασματοειδής; Εάν σκεφτούμε ένα άτομο στο μόριο, μπορούμε να δούμε ότι η ροή του υγρού που μας περικυκλώνει είναι ελασματοειδής, γρήγορη κυκλική κίνηση, με μια δίνη που μας κινεί προς το κέντρο, ύστερα μας απομακρύνει από αυτό κτλ.. Ωστόσο στη θέση του μορίου υπάρχει μια μικρή δικτυακή κίνηση του μορίου σχετική με αυτήν του αερίου που προκαλείται από την φυγόκεντρη δύναμη. Αυτή η δικτυακή κίνηση είναι τόσο αργή, έτσι που τα μόρια του αερίου μπορούν εύκολα να φύγουν από την διεύθυνση του σε ελασματοειδή μορφή. Αυτή η δικτυακή κίνηση του μορίου που υπερτίθεται στη ροή του αερίου είναι που προκαλεί τη μέση κίνηση του μορίου και είναι αυτή η κίνηση που συζητείται σ' αυτό το κεφάλαιο. Πώς μπορεί να κατασκευαστεί ένας πρακτικός φυγοκεντρικός συσσωρευτής σωματιδίων; Υπάρχουν πολλών ειδών αλλά ο επιτυχέστερος είναι στο σχέδιο 5.4. Γενικώς ονομάζεται cyclone seperator ή απλώς cyclone. Είναι ο γενικότερος και ευρύτερο χρησιμοποιημένος μηχανισμός παγκοσμίως. Σε οποιοδήποτε βιομηχανικό χώρο ένας μαθητής μπορεί να τους εντοπίσει τουλάχιστον από αυτούς τους διαχωρηστές. Στο σχέδιο βλέπουμε την κάθετη κυλινδρική του κατασκευή μ' ένα κυνικό άνοιγμα στο κάτω μέρος. Το αέριο εισέρχεται σ' αυτό το κυλινδρικό σώμα και η ροή του γίνεται περιστροφικά στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Το αέριο περιστρέφεται στο εξωτερικό μέρος του κυλίνδρου προς τα κάτω και μετά περιστροφικά ανέρχεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου και ελευθερώνεται στο επάνω μέρος της συσκευής. Κατά την διάρκεια αυτή που το αέριο περιστρέφεται σε σχήμα σπирάλ τα σωματίδια οδηγούνται στα τοιχώματα της συσκευής, με φυγοκεντρική δύναμη,

όταν συσσωρευτούν και προσκολληθούν μεταξύ τους διογκώνονται και γλιστρούν λόγω βαρύτητας και μαζεύονται σαν σκόνη στο κάτω μέρος της συσκευής. Κατά βάθος αυτός ο διαχωριστής έχει κατασκευαστεί από δυο κεντρικούς έλικες. Μόνον ο εξωτερικός έλικας συνεισφέρει στην συλλογή, σωματίδια που εισέρχονται στον εσωτερικό έλικα και ρέουν ανοδικά προς την έξοδο του αερίου τότε αυτά δραπετεύουν. Οπότε και ο εξωτερικός έλικας είναι ισότιμος αυτού της βαρύτητας. Η μεγαλύτερη απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα σωματίδιο για να φτάσει στα τοιχώματα είναι W_i . Η αντίστοιχη απόσταση στον άλλο μηχανισμό είναι H . Το μήκος ροής NpD_o , όπου N αριθμός στροφών αερίου στον εξωτερικό έλικα πριν εισέλθει στον εσωτερικό έλικα και D_o η εξωτερική διάμετρος. Το μήκος ροής αντιστοιχεί με L στον συγκεντρωτήρα βαρύτητας, κάνοντας αυτές τις αντικαταστάσεις έχουμε:

$$n = \frac{NpD_oV_t}{WiV_c} \quad \text{μη αναμεμιγμένη ροή} \quad (5.16)$$

και

$$n = 1 - \exp\left(-\frac{NpD_oV_t}{WiV_c}\right) \quad \text{αναμεμιγμένη ροή} \quad (5.17)$$

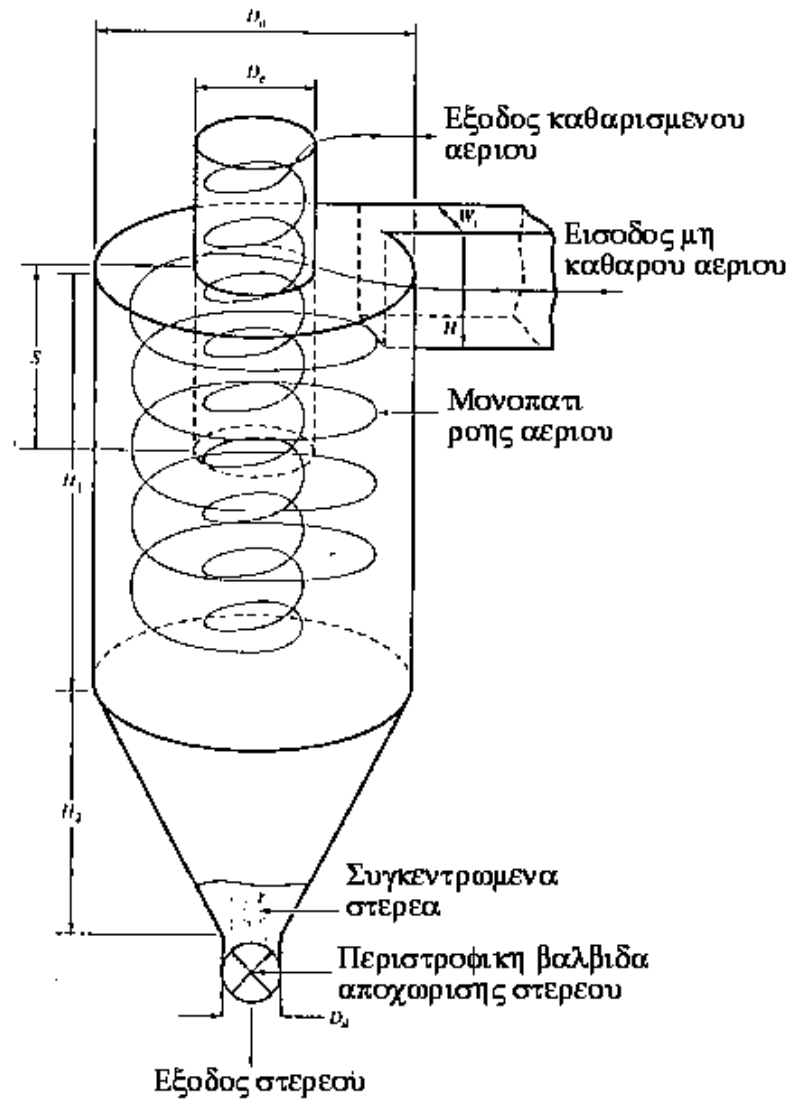
Επιπλέον μπορούμε να έχουμε:

$$n = \frac{pNV_cD^2r_{part}}{9W_im} \quad \text{μη αναμεμιγμένη ροή} \quad (5.18)$$

και

$$n = 1 - \exp\left(-\frac{pNV_cD^2r_{part}}{9W_im}\right) \quad \text{αναμεμιγμένη ροή} \quad (5.19)$$

D =διάμετρος σωματιδίου, D_o =εξωτερική διάμετρος κύκλωνα



Φιγούρα 5.4:

Σχηματική απεικόνιση ενός κυκλωνικού διαχωριστήρα. Οι διαστάσεις βασίζονται τυπικά στην συνολική διάμετρο D_o . Λαμβανόμενες ως αναλογίες σ' αυτή τη διάσταση, $W_i = 0.25$, $H = 0.5$, $H_1 = 2$, $H_2 = 2$, $D_e = 0.5$, $S = 0.625$, $D_d = 0.25$. Για παράδειγμα, εάν $D_o = 1$ ft, τότε $W_i = 0.25$ ft κλπ. Οι πρωταρχικές διαφορές είναι οι κυκλώνες υψηλής απόδοσης έχουν μικρότερες τιμές του W_i , ενώ υψηλά συνδεδεμένα κυκλώνια δίνουν μεγαλύτερες τιμές της W_i και της D_e .

Επίσης παρατηρήστε ότι η δεξιά πλευρά Eq (5.18) είναι η ελεγχόμενη απόσταση του Stokes διαιρεμένη με $W_i/2pN$. Η παράμετρος N μας δίνει τον αριθμό στροφών του αερίου στον κυκλώνα πριν φύγει από τον χώρο συγκέντρωσης. Δεν έχουμε κάποια ικανοποιητική θεωρία για τον υπολογισμό του N. Τιμή N=5 ίσως το καλύτερο πιθανόν. Εκτός και αν υπάρχει κάποια άλλη πληροφορία θα πρέπει να θεωρούμε γενικώς αποδεκτή τιμή N=5.

Παράδειγμα 5.4

Υπολόγισε τη σχέση αποτελεσματικότητας-διαμέτρου για έναν κυκλώνα που έχει $W_i = 0.5ft$, $V_c = 60ft/s$, και $N=5$ για τις παραδοχές και του μπλοκαρίσματος και τις αναμειγμένης ροής καταλήγοντας στο νόμο του Stokes. Όπως στο παράδειγμα 5.1 μπορούμε να έχουμε ως εξής υπολογισμούς:

$$n = \frac{pNV_c D^2 r_{part}}{9W_i m} = \frac{(p)(5)(60ft/s)(10^{-6}m)^2(124.8lbm/ft^3)}{(9)(0.5ft)(1.8 \times 10^{-2}cp)[6.72 \times 10^{-4}lbm/(ft \cdot s \cdot cp)]} = 0.0232$$

Ύστερα, όπως κάναμε στο παράδειγμα 5.1, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτόν τον αριθμό μαζί με το γεγονός ότι η διάμετρος του μορίου εισάγει την εξίσωση τη δεύτερη δύναμη, για να δημιουργηθεί ο ακόλουθος πίνακας. Κι ως εκ τούτου έχουμε τον κάτωθι πίνακα:

Διάμετρος σωματ.	n_{block}	n_{mixed}
0.1	0.000232	0.000232
1	0.0232	0.0230
2	0.0930	0.0888
3	0.209	0.189
4	0.372	0.311
5	0.582	0.441
6.559	1.00	0.632
10	-	0.902
15	-	0.995

Αν συγκρίνουμε αυτό το αποτέλεσμα με το παράδειγμα 5.1 το αποτέλεσμα είναι ίδιο, ενώ το μέγεθος σωματιδίων είναι σχετικά μικρότερο. Όπως και στο 5.2 παρατηρούμε $(6.559/57.45) = 0.114$. Αυτό συμβαίνει διότι τα μοντέλα και τα μαθηματικά τους αποτελέσματα είναι τα ίδια, εκτός από την αντικατάσταση της φυγόκεντρης δύναμης. Ένας καινούργιος όρος cut diameter, χρησιμοποιείται για την περιγραφή μηχανισμών συλλογής σωματιδίων. Αυτό μας δίνει την μέτρηση του μεγέθους των μορίων που συλλαμβάνονται στον συγκεντρωτήρα. Ένα σουρωτήρι κουζίνας έχει cut diameter, όλα τα μόρια που μπορούν να περάσουν μέσα από τρύπες σε κάθε κατεύθυνση θα περάσουν, ενώ αυτά που είναι μεγαλύτερα από τις τρύπες δεν θα περάσουν. Εάν σκεφτούμε σφαιρικά μπιζέλια σε ένα σουρωτήρι με ομοιόμορφες κυκλικές τρύπες, τότε η cut diameter θα είναι η διάμετρος των τρυπών. Για μπιζέλια μεγαλύτερα από την cut diameter η αποτελεσματικότητα συγκέντρωσης θα είναι 100%, ενώ για τα μικρότερα θα είναι 0%. Όταν τα σωματίδια μπορούν να περάσουν μέσα από τις τρύπες προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και αυτό είναι δυνατό τότε λέμε πως έχουν cut diameter, ενώ εκείνα μεγαλύτερα της τρύπας δεν μπορούν να προσπεράσουν. Ο διαχωρισμός για συγκεντρωτήρες δεν είναι τόσο αποτελεσματικός, δεν υπάρχει διάμετρος όπου η αποδοτικότητα μπορεί να διακυμανθεί 0% - 100%. Γενικώς στον κόσμο της μόλυνσης του αέρα περιγράφουμε ή αναφέρουμε cut diameter την διάμετρο ενός σωματιδίου όπου η καμπύλη απόδοσης του έχει την τιμή των 0.50 – 50%. Μπορούμε να αντικαταστήσουμε αυτή την ερμηνεία με την εξίσωση (5.18) και έχουμε με το Νόμο Stokes:

$$D_{cut} = \left(\frac{9W_i m}{2\rho N V_c r_{part}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ μη αναμεμιγμένα} \quad (5.20)$$

Παρότι λογικά μπορούμε να αναμένουμε ρεαλιστικότερα αποτελέσματα (5.19) και καλύτερο data από (5.18) που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι γνωστό ότι η εξίσωση Rosin – Rammler είναι σχετικά σωστή, αποδοτικότερη στο να υπολογίσουμε την απόδοση των κυκλώνων.

Παράδειγμα 5.5:

Υπολογίστε την κομμένη διάμετρο ενός κύκλωνα με εσωτερικό πλάτος $0.5ft$ $V_c = 60ft/s$ και $N=5$

$$D_{cut} = \left(\frac{(9)(0.5ft)(1.8 \times 10^{-5} kg/m \cdot s)}{2p(5)(60ft/s)(2000kg/m^3)} \right)^{\frac{1}{2}} = 4.63 \times 10^{-6} m \approx 5m$$

Αυτό δείχνει την ταχύτητα ενός κοινού κυκλώνα καθώς και του αερίου, ενώ το cut diameter είναι 5μ. Με σύγκριση το παράδειγμα 5.4 έχουμε κάποιες διαφορές αλλά όχι τόσο μεγάλες, έχουμε θετικά αποτελέσματα λειτουργίας με μικρά και σχετικώς μεγαλύτερα μεγέθους σωματίδια και βεβαίως πρόκειται για μια φτηνή κατασκευή και συντήρηση. Δεν είναι τόσο ικανοποιητική για κυκλώνες σωματίδια όπως σταγόνες πίσσας. Εάν χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί ο κυκλωνο-διαχωριστής για μικρότερα σωματίδια έχουμε τις εξής εναλλακτικές λύσεις: να κάνουμε το Wi μικρότερο ή το V_c μεγαλύτερο. Εάν μεγεθύνουμε το V_c βλέπουμε πως είναι πολυδάπανο. Για να μικρύνουμε το Wi γενικώς για να υπάρξουν και οι ανάλογες αναλογίες πρέπει να μικρύνουμε και τον κυκλώνα. Πολύ μικροί κυκλώνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την συλλογή μικρής ροής αερίων για έρευνα και δειγματοληπτικούς λόγους. Κατόπιν έρευνας και πειραματισμού ένας μεγάλος αριθμός μικρών κυκλώνων έχουν τοποθετηθεί παράλληλα για να

λειτουργήσουν σε μεγάλη ροή αερίων καθώς και στη συλλογή μικρών μορίων αυτή η μορφή σύνδεσης, τακτοποίηση ονομάζεται multiclone σχέδιο 5.5. Εάν ο κάθε κυκλώνας ήταν μισό πόδι σε διάμετρο, τότε θα έχουμε 0.125ft, επαναλαμβάνοντας το παράδειγμα 5.5 για W_i 0.125ft βρίσκουμε μια διάμετρο 2.3μ όπου και είναι το πραγματικό κόστιμο της διαμέτρου αυτών των συσκευών. Αν και τα αποτελέσματα του (5.20) είναι σχετικά υποφερτά το (5.18) στο οποίο βασίστηκαν το προηγούμενο έχει σχετικά φτωχά αποτελέσματα η εξίσωση (5.18) καθώς και (5.19) συγκρίνονται από το σχέδιο (5.6) μπορούν ικανοποιητικά να ολοκληρωθούν στην κάτωθι εξίσωση:

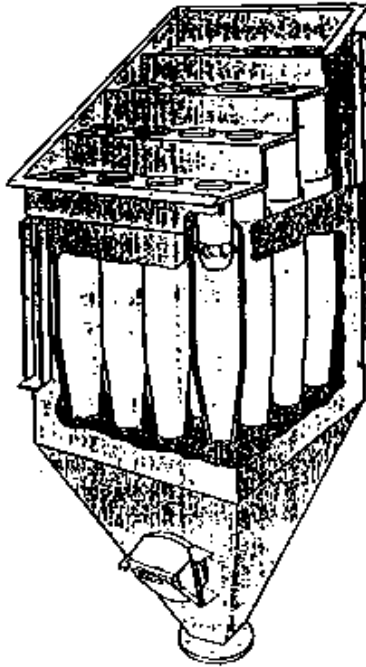
$$n = \frac{(D/D_{cut})^2}{1+(D/D_{cut})^2} \quad (5.21)$$

Παράδειγμα 5.6:

Όταν έχουμε κατανομή αερίων – σωματιδίων με $D_m = 20\mu$ και $c = 1.25$ περνάμε σ' έναν κυκλωνικό διαχωριστήρα cut diameter 5μ και παρατηρούμε την απόδοση βάση της εξίσωσης 5.21 (σχέδιο 5.6) Ποιο είναι το ποσοστό κατακράτησης μορίων;

Το πρόβλημα δεν λύνεται αναλυτικά (Βλ. αποτελέσματα στον πίνακα 9.1). Στην πρώτη στήλη έχουμε κλασματική διανομή από 0 – 0.1 στην συνέχεια 0.1 – 0.2 κτλ. Τα βλέπουμε στον πίνακα με ισοτιμία Φ αντί για ισοτιμίες του z . Η τρίτη στήλη δείχνει αξία (τιμή) (D/D_{mean}) βάση εξίσωσης για μια φυσιολογική λογαριθμική διανομή. Η τιμή του πρώτου:

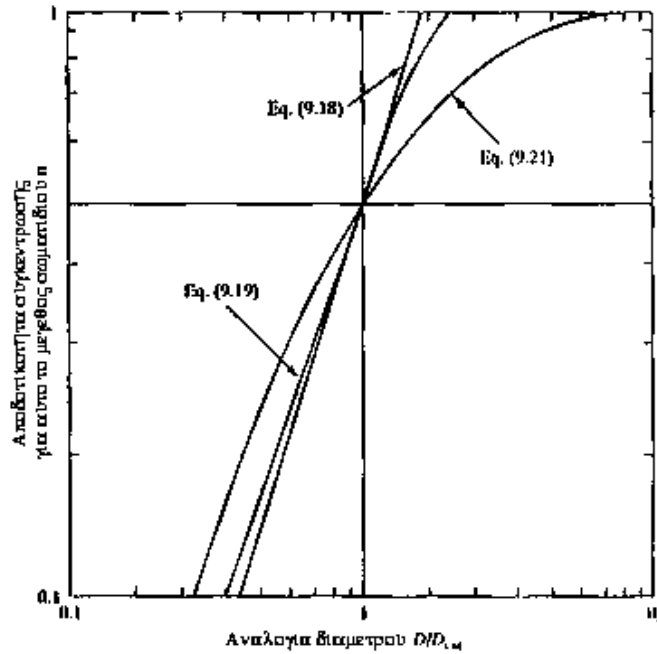
$$\frac{D}{D_{mean}} = \exp(zs) = \exp(-1.282 \times 1.25) = 0.2014$$



Φιγούρα 5.5:

Ένας πολυκυκλώνας τοποθετεί ένα μεγάλο αριθμό μικρών κυκλώνίων παράλληλα.

Αυτός ο υπολογισμός μας δείχνει ότι 0.1 =10% μορίων διαμέτρου $(0.2014 \times 20\mu) = 4.02\mu$. Μέσος όρος διαμέτρου μικρότερη του 10% μορίων περίπου μισού μεγέθους ή 2μ. Η τέταρτη στήλη δείχνει μέσο όρο διάμετρο $(D / D_{\text{mean}})_{\text{mid}}$. Για την πρώτη είσοδο αξία μέσου όρου =0. Στην τελική είσοδο τιμών βλέπουμε μόνον ένα μικρό λάθος.



Φιγούρα 5.6:

Απόδοση συγκέντρωσης συναρτήσεις καμπυλών διαμέτρου σωματιδίου για κυκλώνες. Εδώ και οι τρεις καμπύλες πρέπει να περάσουν από το 0.5 στο $D = D_{cut}$, εξαιτίας του ορισμού του D_{cut} . Η Εξ. (5.21) είναι πολύ κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα για τα τυπικά κυκλώνια.

Πίνακας 5.1

Εκτέλεση υπολογισμού για έναν διαχωριστήρα κυκλωνίου

Φ	Z	$(D/D_{mean})_{end}$	$(D/D_{mean})_{mid}$	n	$P\Delta\Phi$	$\Sigma p\Delta\Phi$
0.1	-1.282	0.2014	0.1007	0.1396	0.0860	0.860
0.2	-0.842	0.3491	0.2752	0.5479	0.0452	0.1312
0.3	-0.524	0.5194	0.4343	0.7511	0.0249	0.1561
0.4	-0.253	0.7289	0.6242	0.8617	0.0138	0.1700
0.5	0	1.0000	0.8644	0.9228	0.0077	0.1777
0.6	0.253	1.3720	1.1860	0.9575	0.0043	0.1819
0.7	0.524	1.9251	1.6486	0.9775	0.0022	0.1842
0.8	0.842	2.8648	2.3950	0.9892	0.0011	0.1853
0.9	1.282	4.9654	3.9151	0.9959	0.0004	0.1857
1		1.0000	4.9654	0.9975	0.0003	0.1859

Η 5^η στήλη του 5.1 δείχνει αποδοτικότητα συλλογής η για μέσου όρου διάμετρο βάση εξίσωσης (5.21)

$$n = \frac{(D/D_{cut})^2}{1+(D/D_{cut})^2} = \frac{[(D/D_{mean})(D_{mean}/D_{cut})]^2}{1+[(D/D_{mean})(D_{mean}/D_{cut})]^2} = \frac{(0.1007 \cdot 20m/5m)^2}{1+(0.1007 \cdot 20m/5m)^2} = 0.1396$$

Στην 6^η στήλη $p\Delta\Phi$ ποσότητα όγκου που πέρασε δίχως όμως να περισυλλεχθεί π.χ.

$$p\Delta\Phi = (1 - 0.1396)(0.1 - 0) = 0.0860$$

Βλέπουμε ότι 86% μορίων αυτού του μεγέθους διαπερνά από τον διαχωριστή. Η τελευταία στήλη είναι όλες οι τιμές από όλες τις στήλες. Κάτω χαμηλά οι τιμές δείχνουν 0.186 = 18.6% μορίων που δεν συλλέγονται, οπότε έχουμε αποδοτικότητα συλλογής 0.814 = 81%. Όλοι οι μηχανισμοί που θα συζητηθούν στο υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου, οι υπολογισμοί έχουν γίνει βάση του πίνακα 5.1. Η χαμηλή δυνατότητα συλλογής 81% του παραδείγματος 5.1 δείχνει ότι ένας τυπικός κυκλώνας δεν μπορεί να σταθεί ικανοποιητικά στα σημερινά στάνταρ, για οποιαδήποτε ομάδα μορίων που κλασματικά είναι μικρότερη των 5μ σε διάμετρο. Αν και η εξίσωση (5.20) καθώς και το παράδειγμα 5.5 δείχνει περιορισμένη διάμετρο, η φυσική αιτία χάνεται κάπου στα μαθηματικά. Για να έχουμε υψηλή τιμή V_t , χρειαζόμαστε υψηλή τιμή V_c ; αλλά όταν έχουμε υψηλή τιμή V_c αυτό σημαίνει ότι η ροή του αερίου που περνά στον κυκλώνα περνάει για πολύ λίγο χρονικό διάστημα για να μπορέσει να ενεργοποιηθεί η υψηλή φυγοκεντρική δύναμη.

Παράδειγμα 5.7:

Στο παράδειγμα 5.5 πόσο χρόνο ξοδεύει το αέριο σε μεγάλη φυγοκεντρική δύναμη κοντά στο τοίχωμα όπου τα σωματίδια έχουν καλή πιθανότητα να παγιδευτούν;

$$t = \frac{L}{V} = \frac{NpD_0}{V_c} = \frac{5p \cdot 2ft}{60ft/s} = 0.525s$$

Η απόσταση με την οποία κινείται το σωματίδιο προς το τοίχωμα ισούται με το προϊόν και V_t , αλλά V_t ανάλογο με το $(V_c)^2$, για καλύτερη αποδοτικότητα συλλογής πρέπει να χαμηλώσουμε τους χρόνους του κύκλωνα. Τυπική ταχύτητα εσωτερικά του κυκλώνα 60ft/s (1829 m/s). Αν μετρήσουμε την ασκούμενη πίεση στον σωλήνα του κυκλώνα που οδηγεί το αέριο στον κυκλώνα καθώς επίσης και όταν φεύγει βλέπουμε ότι η εσωτερική πίεση είναι μεγαλύτερη, αναπαράσταση σε μορφή εξίσωσης έχουμε:

$$\text{Πτώση πίεσης} = P_{in} - P_{out} = K \left(\frac{r_g V_i^2}{2} \right) \quad (5.22)$$

όπου r_g πυκνότητα αερίου και V_i ταχύτητα εντός του κυκλώνα. Κατασκευαστές κλιματιστικών έχουν παρατηρήσει ότι η πίεση που ασκείται στα κυκλώματα που δουλεύουν αντιπροσωπεύεται με την εξίσωση (5.22) με κάθε είδους συσκευή έχοντας την δική της K . Οι πιο πολύ διαχωριστές έχουν K 's περίπου 8. Κοινότυπο στις κατασκευές κλιματισμών αναφέρεται στην ποσότητα $(r_g V^2/2)$ ως κατακεφαλήν ταχύτητα, και έτσι και έτσι θα μπορούσε κάποιος να πει ότι οι περισσότεροι κυκλώνες έχουν μειώσεις στην πίεση περίπου 8 ταχυτήτων.

Παράδειγμα 5.8:

Ένας κυκλώνας έχει ταχύτητα εισόδου 60 ft/s και αναφερόμενη μείωση πίεσης 8 ταχυτήτων ($K=8$). Ποια είναι η πτώση πίεσης σε μονάδες πίεσης. Βάσει της εξίσωσης (5.22), έχουμε:

$$\begin{aligned}\text{Πτώση πίεσης} &= 8 \left(0.075 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right) \left(60 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\text{lbf} \cdot \text{s}^2}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft}} \right) \left(\frac{\text{ft}^2}{144 \text{ in.}^2} \right) = 0.23 \frac{\text{lbf}}{\text{in.}^2} \\ &= 8 \left(1.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(18.29 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right) = 1606 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1.61 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Τυπικά αυτή η μείωση πίεσης πρέπει να ξεπεραστεί με ανεμιστήρα. Εάν το σύστημα είναι κάτω από πίεση, αυτό δεν θέτει κανένα πρόβλημα για τον κατασκευαστή. Ωστόσο εάν αυτό είναι καινούργιο σύστημα τότε πρέπει να αποτελείται από κυκλώνα ανεμιστήρα και συνδυασμό σωλήνα τότε ο κατασκευαστής έχει 2 επιλογές που και οι δύο παρουσιάζουν μειονεκτήματα. Εκεί ο ανεμιστήρας βρίσκεται πριν το σωλήνα που είναι η συσκευή ελέγχου της μόλυνσης σ'αυτή την περίπτωση. Το μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι ο ανεμιστήρας εκτίθεται σε βρωμικά αέρια. Τα μόρια μπαίνουν στα ρουλεμάν και μαζεύονται στα πτερύγια του ανεμιστήρα με αποτέλεσμα να τον αποσταθμίζουν. Στην άλλη περίπτωση ο ανεμιστήρας τοποθετείται προς την κατεύθυνση της ροής του μηχανισμού ελέγχου της μόλυνσης (κυκλώνας), όπου δουλεύει σε καθαρό αέρα και έχει λιγότερα προβλήματα συντήρησης όμως ο κυκλώνας τώρα λειτουργεί με αδύναμη αναρρόφηση και αν το πώμα στη βαλβίδα των υγρών δεν είναι καλά σφραγισμένο ο αέρας θα αναμειχθεί μειώνοντας την αποδοτικότητα στην συλλογή μορίων. Θα μπορούσαν και οι δυο τρόποι να έχουν ικανοποιητική λειτουργικότητα με επαρκή προσοχή στη μηχανολογική λεπτομέρεια.

Υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες στη φυγόκεντρη ιδέα του συλλέκτη, αλλά κανένας δεν πλησιάζει τον κυκλώνα στη λειτουργία. Αυτές οι συσκευές είναι απλές και δίνουν σχεδόν ελεύθερο σέρβις συντήρησης. Επειδή κάθε μεσαίο κατάστημα συγκόλλησης μπορεί να κάνει ένα, οι μεγάλοι προμηθευτές συσκευής ελέγχου της μόλυνσης, οι οποίοι έχουν δοκιμάσει τα δεδομένα στοιχεία στα αποτελέσματα μικρών αλλαγών στην εσωτερική γεωμετρία, είναι απρόθυμοι να δημοσιοποιήσουν αυτά τα στοιχεία. Ωστόσο δεν φαίνεται να υπάρχουν σχέδια σημαντικά καλύτερα από το απλό που φαίνεται στην κατασκευή 5.2. Ο εναλλακτικός λόγος των διαστάσεων επιτρέπουν μικρότερη διάμετρο για μεγαλύτερη πτώση της πίεσης ή υψηλότερη ποιότητα για μεγαλύτερη διάμετρο, αλλά όχι βελτίωση στην απόδοση χωρίς κόστος στα πλαίσια κάποιας άλλης παραμέτρου. Δεν υπάρχει κανένας λόγος γιατί κάποιος δεν μπορεί να έχει καλύτερη αποδοτικότητα στη συλλογή βάζοντας έναν κυκλώνα στην κατεύθυνση της ροής ενός άλλου. Το βασικό σχέδιο για καταλυτικές γεννήτριες έχει δυο κυκλώνες σε σειρά για να μετακινήσει ο καταλύτης μόρια από τα αέρια που αποβάλλονται. Η ίδια βασική συσκευή όπως ο κυκλώνας χρησιμοποιείται και σε άλλες βιομηχανικές μονάδες, όταν στόχος δεν είναι ο έλεγχος της μόλυνσης του αέρα, αλλά κάποιο άλλο είδος διαχωρισμού. Όταν χρησιμοποιείται για να διαχωρήσει στερεά από υγρά γενικά ονομάζεται air-swept classifier όταν είναι προσαρτημένος σε πολλές βιομηχανικές μηχανές. Περνά αυτά τα μόρια στο έδαφος και μαζεύει αυτά που είναι ακατέργαστα, επιστρέφοντάς τα στη μηχανή.

5.1.3 Ηλεκτροστατικοί Μηχανισμοί Καθίζησης (ESP).

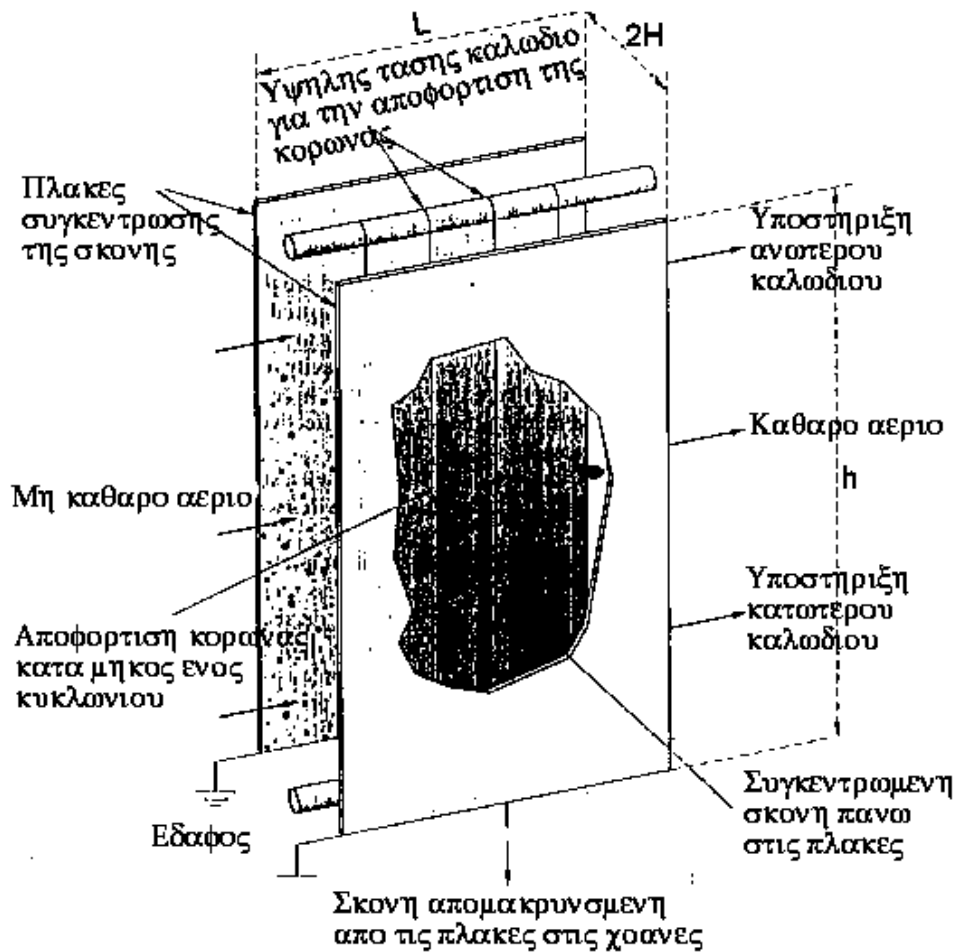
Εάν συγκεντρωτήρες έλξης και διαχωριστές φυγοκεντρικής είναι συσκευές που οδηγούν τα μόρια ενάντια σε στερεό τοίχο και εάν δεν

λειτουργούν αποτελεσματικά για μόρια διαμέτρου μικρότερης των 5μ τότε ο ηλεκτροστατικός συγκεντρωτήρας για να είναι αποτελεσματικότερος σε μικρότερα μόρια, πρέπει να ασκήσει δυνάμεις πιο ισχυρές από τη βαρύτητα ή τη φυγοκεντρική δύναμη. Ο ηλεκτροστατικός μηχανισμός καθίζησης είναι σαν συγκεντρωτήρας έλξης ή φυγοκεντρικός διαχωριστής, αλλά ηλεκτροστατική δύναμη οδηγεί τα μόρια στον τοίχο. Είναι αποτελεσματικό σε πολύ μικρότερα μόρια από ότι οι δύο προηγούμενες συσκευές. Σ' όλες τις συσκευές η αντίσταση των μορίων κατά την καθοδήγηση τους στους μηχανισμούς αυτούς είναι σε σχέση ανάλογη με την διάμετρο του μορίου. Όσον αφορά την έλξη και φυγοκεντρική διαχωριστικότητα η δύναμη που ασκείται είναι ανάλογη του όγκου του μορίου, σε συνεχή πυκνότητα, ανάλογη δε της κυβικής διαμέτρου των. Ο λόγος της κατευθυντήριας δύναμης προς την δύναμη της αντίστασης είναι πρακτικά ανάλογος στην τετραγωνισμένη διάμετρο του μορίου. Όσο η διάμετρος μικραίνει, αυτός ο λόγος μειώνεται ταχέως. Σε έναν ESPs η δύναμη αντίστασης είναι ακόμα η δύναμη τροφοδότησης, αλλά η δύναμη που κινεί το μόριο προς τον τοίχο είναι ηλεκτροστατική. Αυτή η δύναμη είναι πρακτικά ανάλογη στην τετραγωνισμένη διάμετρο του μορίου και επίσης ο λόγος της κινητήριας δύναμης προς την δύναμη αντίστασης είναι ανάλογος προς την διάμετρο. Ως εκ τούτου δυσκολότερη είναι η συγκέντρωση μικρών μορίων για ένα (ESP) απ' ότι για μεγαλύτερα, η δυσκολία όμως είναι ανάλογη του $(1/D)$ από του $(1/D^2)$ ως συμβαίνει στους μηχανισμούς έλξης και φυγοκέντρου.

Η βασική ιδέα όμως των ESP's είναι να δώσει στα μόρια ηλεκτροστατική ώθηση και μετά να τα τοποθετήσει σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο που τα οδηγεί στα τοιχώματα συγκέντρωσης. Αυτή είναι μια διαδικασία δυο σταδίων. Σε έναν τύπο ESP, που ονομάζεται two-stage preupitator, η φόρτιση και η συλλογή διεξάγονται

σε ξεχωριστά μέρη του ESP. Αυτός ο τύπος που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε κτιριακά κλιματιστικά συχνά ονομάζεται ηλεκτρονικό φίλτρο αέρος. Ωστόσο στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές τα δυο ξεχωριστά βήματα διεξάγονται ταυτόχρονα στο ίδιο μέρος του ESP. Η λειτουργία φόρτισης γίνεται πολύ πιο γρήγορα από ότι η λειτουργία συλλογής και το μέγεθος του ESP είναι σε μεγάλο βαθμό καθορισμένο από τη λειτουργία συλλογής. Το σχέδιο 5.7 δείχνει μια απλή φόρμα wire – and – plate ESP με δυο πλάκες. Το αέριο διαπερνά ανάμεσα από τις πλάκες, τα οποία είναι ηλεκτικά γειωμένα (π.χ. βολτ =0) ανάμεσα από τις πλάκες υπάρχουν σειρές από καλώδια, που κρατούν τυπικά το ύψος των βολτ σε 40.000. Η δύναμη αποκτιέται αλλάζοντας το συνηθισμένο εναλλασόμενο ρεύμα, σε ρεύμα υψηλότερης τάσης και ύστερα ανορθώνοντάς το μέσα από έναν στερεής κατάστασης ανορθωτή. Ο συνδυασμός φορτισμένων καλωδίων και γειωμένων πλακών παράγουν ηλεκτρόνια για να υποχρεώσουν τα μόρια και το πεδίο να τα οδηγήσουν ενάντια στις πλάκες. Στις πλάκες τα μόρια χάνουν την φόρτιση τους και έτσι προσκολλούνται το ένα πάνω στο άλλο και στην πλάκα σχηματίζοντας ένα στρώμα. Το καθαρό αέριο κατόπιν περνά από την απόμακρη πλευρά του διαχωριστή, όπως δείχνει το σχέδιο 5.7. Στερεά στρώματα μετακινούνται κτυπώντας τις πλάκες σε συχνά χρονικά διαλείμματα με έναν μηχανικό ή ηλεκτρομαγνητικό κτυπητή που δίνει ένα κάθετο ή οριζόντιο κτύπημα στην άκρη της πλάκας. Με την επιστήμη, την τέχνη και την εμπειρία οι σχεδιαστές έχουν μάθει να φτιάχνουν κτυπητές που έχουν ως αποτέλεσμα το περισσότερο από το στρώμα που έχει συλλεχθεί να πέφτει μέσα σε κλίβανους κάτω από τις πλάκες (δεν φαίνεται στο σχέδιο 5.7). Κάποιο μέρος του στρώματος πάντοτε επανέρχεται, μειώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος. Αν τα μόρια που έχουν συλλεχθεί είναι υγρά, π.χ. θειϊκή όξινη ομίχλη, διατρέχουν την πλάκα και πέφτουν στάζοντας. Για τις υγρές σταγόνες η

πλάκα συχνά αντικαθίσταται από έναν κυκλικό σωλήνα με τα καλώδια κάτω από το κέντρο του. Υπάρχουν πολλών ειδών ESP 's, στο σχέδιο 5.8 βλέπουμε τον πιο κοινό ESP που χρησιμοποιείται σήμερα στις Η.Π.Α. Η ροή αερίου είναι από αριστερά προς δεξιά. Το αέριο εισέρχεται από αριστερά μέσα από δύο εσωτερικά στόμια, ακολουθούμενο από διάκριτες πλάκες (συσκευές διανομής αερίου) που βοηθούν να διανεμηθεί το αέριο κατά μήκος της κεντρικής εισόδου του μηχανισμού καθίζησης. Ένα παρόμοιο σύνολο από πλάκες και συγκλίνοντα στόμια βρίσκεται στην απόμακρη (διέξοδος) πλευρά (δεν φαίνεται στο σχήμα 5.8). Επίσης στο σχέδιο μπορούμε να δούμε μια σειρά καλωδίων με τις πλάκες μετακινημένες. Τα καλώδια ακομπούν στα πλαίσια που τα κρατούν αυστηρά στη θέση τους. Σε μια άλλη σειρά βλέπουμε τις πλάκες, όχι τα καλώδια· οι πλάκες είναι φτιαγμένες από κομμάτια μεταλλικών ελασμάτων με κάθετους συνδέσμους που συλλέγουν μόρια. Κάθε ζευγάρι πλάκες με τα καλώδια στο ενδιάμεσο λειτουργούν όπως στην μονοκάναλη απλή μορφή του ESP που δείχνει το σχέδιο 5.7. Ο κτυπητής, που φαίνεται δεξιά στο κάτω μέρος του σχεδίου, δίνει ένα οριζόντιο χτύπημα στον πάτο των πλακών για να εκτοπίσει το στρώμα. Η πολλαπλή δύναμη τροφοδοτεί τον μετασχηματιστή/ανορθωτή, καθένας από τους οποίους τροφοδοτεί μέρος του μηχανισμού καθίζησης που φαίνεται στο επάνω μέρος. Οι κλίβανοι στους οποίους συγκεντώνονται τα συλλεκθέντα μόρια και από τους οποίους μετακινούνται αυτόματα φαίνονται στον πάτο. Το σχέδιο επίσης δείχνει την μεγάλη μεταλλική κατασκευή που στηρίζει όλα αυτά τα μέρη του ESP καθώς επίσης και άλλα μέρη της κατασκευής.

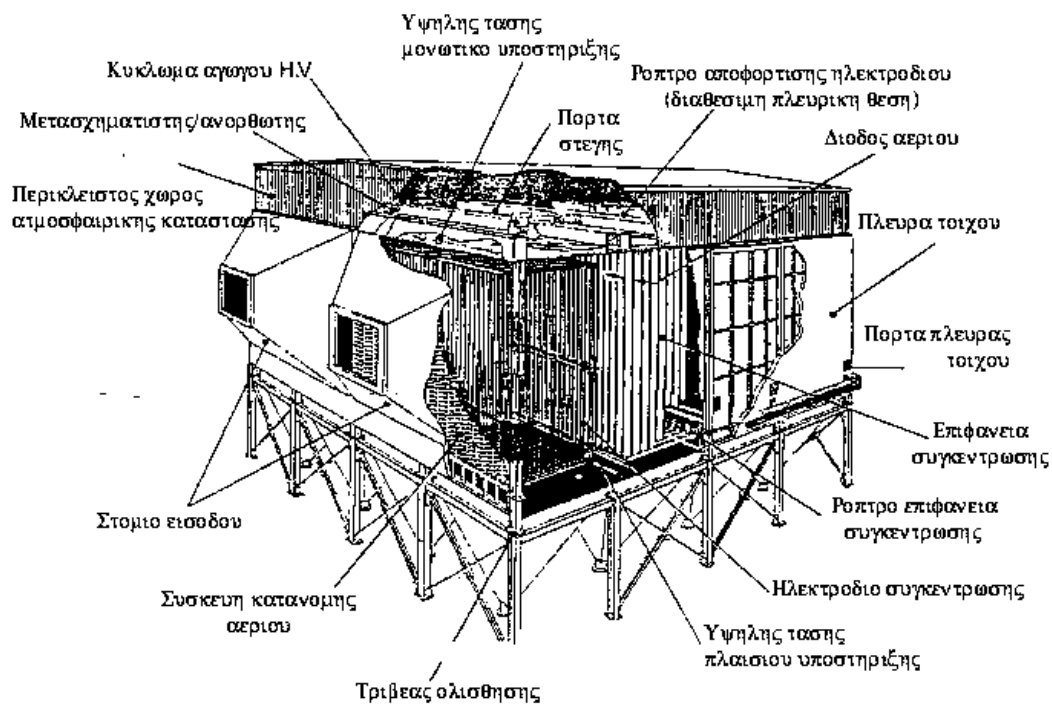


Φιγούρα 5.7:

Διαγραμματική απεικόνιση ενός απλοποιημένου ESP με δύο πλάκες τέσσερα κυκλώνια και ένα κανάλι ροής. Οι βιομηχανικού μεγέθους ESP έχουν πολλά τέτοια κανάλια παράλληλα, βλ. σχ. 5.8.

Κάθε σημείο στο διάστημα έχει κάποιο δυναμικό V . Εάν υπάρξει διαφοροποίηση στο ηλεκτρικό δυναμικό από μέρος σε μέρος τότε έχουμε ηλεκτρικό πεδίο: $E = qV / qx$, σ' αυτό το διάστημα. Εάν συνδέσουμε δύο τέτοια σημεία με έναν αγωγό, τότε το ρεύμα ρέει. Αυτό

το V είναι η τάση με την οποία είμαστε εξοικειωμένοι και E είναι η κλίση του προς κάθε κατεύθυνση· οι μονάδες του E είναι V/M . Σ' ένα τυπικό wire – and – plate όπως δείχνει 9.8 η απόσταση του καλωδίου μέχρι την πλάκα είναι περίπου 4 ίντσες, ή 0.1μ. Με μια διαφορά βολτικής των 40kV υποθέτουμε ότι δύναμη πεδίου είναι $40kV/0.1m = 400kV/m$. Παρ' όλα αυτά, όλη η ηλεκτρική ροή που φτάνει την πλάκα έρχεται από τα καλώδια και η επιφάνεια των καλωδίων είναι πολύ μικρότερη από της πλάκας. Έτσι το δυναμικό που οδηγεί κοντά στα καλώδια πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο. Τυπικά είναι από 5 μέχρι 10MV/m. (Το πρώτο πρόσωπο που χρησιμοποίησε αυτό το γεγονός, ήταν πιθανώς ο Benjamin Franklin που ανακάλυψε το αλεξικέραυνο).



Φιγούρα 5.8:

Αποψη τομής ενός μέρους ενός μεγάλου σύγχρονου ESP που δείχνει τα διάφορα τμήματα.

Οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο απ' οποιαδήποτε πηγή ενέργειας όταν έλθει σ' επαφή μ' ένα τόσο δυνατό πεδίο αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα και αν συγκρουστεί με μόρια – αερίου, έχει τόση δύναμη να απελευθερώσει περισσότερα ηλεκτρόνια ιονίζοντας τα μόρια αερίου. Αυτά τα ηλεκτρόνια αποκτούν μεγάλες ταχύτητες από το πεδίο και ελευθερώνουν πολύ περισσότερα μόρια εως ότου υπάρχουν αρκετά ελεύθερα μόρια για να σχηματίσουν σταθερό corona discharge. Σ' ένα σκοτεινό δωμάτιο αυτό δείχνει σαν ένα όχι πολύ δυνατό φως που φτιάχνει μια ασπίδα γύρω από το καλώδιο. Τα θετικά ιόντα που σχηματοποιούνται στην corona φεύγουν προς το καλώδιο και εκφορτίζονται. Τα ηλεκτρόνια φεύγουν από το καλώδιο και πλησιάζουν την πλάκα. Και όσο αποκτούν μεγάλη απόσταση από το καλώδιο, για τη δύναμη του πεδίου για να είναι πολύ χαμηλή για να επιταχύνει αρκετά γρήγορα ώστε να ιονίσουν μόρια αερίου η ορατή στεφάνη χάνεται και αυτά απλώς ρέουν σαν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Καθώς τα ηλεκτρόνια ρέουν κοντά στην πλάκα συναντούν μόρια τα οποία μπορούν να συλλέξουν αυτά ιονίζοντας έτσι τα μόρια. Τότε το ίδιο ηλεκτρικό πεδίο που δημιούργησε τα ηλεκτρόνια και που τα οδήγησε κοντά στην πλάκα, οδηγεί και τα φορτισμένα μόρια κοντά στην πλάκα.

Για μόρια μεγαλύτερα 0.15μ ο κύριος μηχανισμός φόρτισης είναι ο φορτητής πεδίου. Αυτό είναι ισότιμο με την συλλογή ηλεκτρονίων από οποιοδήποτε μόριο που βρίσκεται μπροστά του. Όσο όμως τα μόρια φορτίζονται λυγίζουν τους δρόμους των ηλεκτρονίων μακριά απ' αυτούς, οπότε και η φόρτιση μεγαλώνει σιγά – σιγά έχοντας την αξία.

$$q = 3p \left(\frac{e}{e+2} \right) e_0 D^2 E_0 \quad (5.23)$$

q =φόρτιση μορίου

ϵ = διηλεκτρική σταθερά του μορίου. Η διηλεκτρική σταθερά είναι ένα απειραστήμαντο νούμερο 1.0 για αναρρωφική έλξη 1.0006 για αέρα και 4 – 8 για τυπικού μεγέθους στερεά μόρια. Το επιτρεπτό ελεύθερου χώρου E_0 είναι μια απειρελάχιστη σταθερά της οποίας η αξία στο SI μονάδων έχει ως εξής $8.85 \times 10^{-12} C/(V \cdot m)$. D είναι διάμετρος μορίου, και E_0 είναι τοπική ισχύς πεδίου.

Παράδειγμα 5.9:

Ένα μόριο διαμέτρου 1μ αποτελούμενο από υλικό με διηλεκτρική σταθερά 6, έχει φθάσει τη φόρτιση για την ισορροπία του σε έναν ESP σε σημείου όπου η δύναμη πεδίου είναι 300KV/m. Πόση ηλεκτρονική φόρτιση έχει;

Από την εξίσωση (5.23) μπορούμε να γράψουμε:

$$\begin{aligned} q &= 3p \left(\frac{6}{8} \right) \left(8.85 \times 10^{-12} \frac{C}{V \cdot m} \right) (10^{-6} m)^2 \left(300 \frac{kV}{m} \right) \\ &= 1.88 \times 10^{-7} C \times \left(\frac{1.602 \times 10^{19} electrons}{C} \right) = 300 electrons \end{aligned}$$

Η τιμή του παραδείγματος 5.9 είναι τυπική για ένα τόσο μεγάλο μόριο. Η φόρτιση είναι ανάλογη της διαμέτρου στο τετράγωνο έτσι ώστε 1/3μ μοριακή διάμετρος θα αναμενόταν να έχει περίπου 33 ηλεκτρονικές φορτίσεις. Αυτή η φόρτιση που είναι η ισοσταθμική τιμή, επιτεύχθηκε αφού τα μόρια ήταν στο μηχανισμό καθίζησης για πολύ ώρα. Θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι για τα περισσότερα μόρια στους περισσότερους μηχανισμούς καθίζησης αυτός ο μεγάλος χρόνος είναι πολύ λιγότερος από το μέσο χρόνο που το μόριο ξοδεύει στον

μηχανισμό καθίζησης οπότε βεβαίως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την ισοσταθμική τιμή σαν το μόριο να την είχε από τη στιγμή της εισόδου του δίχως σοβαρό λάθος. Εάν το μόριο είναι μικρότερο από 0.15μ, τότε θα κάναμε ένα σοβαρό λάθος αν υπολογίζαμε την φόρτιση του με την εξίσωση (5.23). Πρέπει να σκεφτούμε την πρόσθετη φόρτιση που αποκτάται με την μεταδιδόμενη φόρτιση. Τα τελευταία αυτά αποτελέσματα από τις συγκρούσεις μορίων-ηλεκτρονίων που δεν προκλήθηκαν από τη δικτυακή κίνηση των ηλεκτρονίων εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά από την τυχαία κίνηση υπερτεθιμένα σ' αυτή την κίνηση των μορίων των αερίων, οι οποίες κάνουν το ηλεκτρόνιο να συμπεριφέρεται σαν μόριο αερίου με κατανομή της ταχύτητας Boltzmann.

Για τους αναγνώστες (μελετητές) που ενδιαφέρονται στη πεδιακή φόρτιση, ο απαραίτητος χρόνος για να φορτιστεί ένα μόριο από τα μαθηματικά οδηγούμαστε στην εξίσωση (5.23) ή μια προσεκτική μεταχείριση όλων των πτυχών του ESPs. Η ηλεκτροστατική πίεση σ' ένα μόριο είναι:

$$F = qE_p \quad (5.24)$$

Εδώ E_p είναι η τοπική ηλεκτρική πεδιακή δύναμη που προκαλεί τη δύναμη. Γιατί χρησιμοποιούμε E_p σ' αυτή την εξίσωση και E_0 στην προηγούμενη; Ένα μόριο απαιτεί την φόρτιση του στην ψηλή περιοχή του E κοντά στο καλώδιο και κατόπιν κινείται στην χαμηλότερη περιοχή του E κοντά στην πλάκα. Εάν αντικαταστήσουμε για q από την εξίσωση (5.23) βρίσκουμε:

$$F = 3p \left(\frac{e}{e+2} \right) e_0 D^2 E_0 E_p \quad (5.25)$$

Οι δύο υποσημειώσεις για τα E_s μας υπενθυμίζουν ότι το ένα αντιπροσωπεύει πεδιακή δύναμη την ώρα φόρτισης, ενώ το άλλο την απευθείας τοπική πεδιακή δύναμη. Για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιούμε μέσο όρο E και στο υπόλοιπο του κεφαλαίου χρησιμοποιούμε $E_0 = E_p = E$ και ως εκ τούτου οι εξισώσεις γράφονται με E . Εάν η αντίσταση των μορίων για να οδηγηθεί με ηλεκτροστατικές δυνάμεις στα τοιχώματα δίνεται από την εξίσωση (8.3) της δύναμης εισαγωγής του Stokes μπορούμε να θέσουμε δύναμη αντίστασης ίση με την ηλεκτροστατική δύναμη στην εξίσωση (5.25) και να υπολογίσουμε την ταχύτητα.

$$V_t = \frac{De_o E \left(\frac{e}{e+2} \right)}{m} = w \quad (5.26)$$

Η ταχύτητα ονομάζεται drift velocity στην ορολογία του ESP και συμβολίζεται με W . Εδώ χρησιμοποιούμε αυτό το σύμβολο εάν και είναι ξεκάθαρα το ίδιο όπως το V_t όπου βρίσκουμε την έλξη ή την φυγοκεντρική τελική ρύθμιση των ταχυτήτων.

Παράδειγμα 5.10:

Υπολογίστε την drift velocity για το μόριο στο παράδειγμα 5.9.

$$w = \frac{(10^{-6} m)(8.85 \times 10^{-12} C/V \cdot m)(3 \times 10^5 V/m)^2 (6/8) \times (N \cdot m/C \cdot V)}{(1.8 \times 10^{-5} kg/m \cdot s)(N \cdot s^2/kg \cdot m)} = 0.033 \frac{m}{s} = 0.109 \frac{ft}{s}$$

Αφού η υπολογισμένη drift velocity είναι ανάλογη στη διάμετρο του μορίου κάποιος θα υπολόγιζε μεγαλύτερες τιμές για μεγαλύτερα μόρια παρόνται στη ροή του αερίου.

Η εξίσωση (5.26) δείχνει ότι η drift velocity είναι ανάλογη του τετραγώνου του E , που είναι περίπου ίσο με την τάση του καλωδίου διαιρεμένη από την αντίσταση του wire-to-plate. Εάν μπορούσαμε να αυξήσουμε την τάση ή να χαμηλώσουμε την αντίσταση του wire-to-plate, θα έπρεπε να είμαστε ικανοί να πετύχουμε απεριόριστες drift velocities. Ο περιορισμός εδώ είναι μικρός. Οι συνθήκες μεταξύ του καλωδίου και της πλάκας είναι οι ίδιες που υπάρχουν μεταξύ ενός συννέφου που μπορεί να προκαλέσει κεραυνό και του εδάφους κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Περιστασιακά ένα ιονισμένο αγωγίμο μονοπάτι θα σχηματιστεί μεταξύ του καλωδίου και της πλάκας. Αυτό το ιονισμένο μονοπάτι είναι επομένως ένας καλός αγωγός και σχηματίζει έναν συνεχή σπινθήρα η οποία είναι ισοδύναμη με κάθε τρόπο με την αστραπή. Η τροφοδοσία ισχύος στο καλώδιο πρέπει να αντιληφθεί αυτή την απότομη αύξηση στο ρεύμα και να σταματήσει τη ροή μέσα σ' αυτό για να εμποδιστεί βραχυκύκλωμα του μετασχηματιστή. Κανονικά το ρεύμα διακόπτεται για ένα κλάσμα του δευτερολέπτου, το χτύπημα της αστραπής τελειώνει και ύστερα το πεδίο επαναεγκαθιδρύεται. Καθώς κάποιος αυξάνει τις τιμές του E , η συχνότητα των σπινθουρισμών αυξάνεται. Αυτοί οι σπινθηρισμοί είναι ενεργειακά γεγονότα που διαμελίζουν το στρώμα στην πλάκα (όπως οι αστραπές προκαλούν καταστροφές όπου αγγίζουν τη γη) κι έτσι μειώνεται η αποτελεσματικότητα στη συλλογή. Επομένως ένας μεγάλος αριθμός σπινθήρων είναι κακός. Πειραματικά έχει ακόμα βρεθεί ότι θέτοντας την τάση αρκετά χαμηλά για να έχεις μηδέν σπινθήρες, αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλό E για άριστη αποτελεσματικότητα. Τα περισσότερα συστήματα ελέγχου ESP έχουν κατασκευασθεί για 50 έως 100 σπινθήρες το λεπτό, που φαίνεται ότι η άριστη ισοροπία μεταξύ της επιθυμίας να αυξηθεί το E και της επιθυμίας να μην υπάρχει πολύ σπινθήρες. Ακόμα, είναι κοινή πρακτική να υποδιαιρείται η τροφοδοσία

της ισχύος ενός μεγάλου μηχανισμού καθίζησης σε πολλές υποτροφοδοσίες, έτσι ώστε κάθε μέρος του μηχανισμού καθίζησης να μπορεί να λειτουργήσει στην άριστη τάση για τις τοπικές του συνθήκες και ακόμα κατά τη διάρκεια του κλάσματος του δευτερολέπτου κατά την οποία το σύστημα είναι κλειστό, για να μπορέσει να εξουδετερώσει έναν σπινθήρα ένα μόνο μικρό τμήμα από ολόκληρο τον ESP είναι κλειστό. (Ο μετασχηματιστής/ανορθωτής φαίνονται στην κορυφή του ESP στο σχήμα 5.8). Εάν συγκρίνουμε την drift velocity εδώ με την τελική ρύθμιση της ταχύτητας για το ίδιο μόριο στον κυκλωνικό διαχωριστή, παράδειγμα 5.3, βλέπουμε ότι είναι 5 φορές ταχύτερο. Γιατί όμως ένας ESP είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από έναν κυκλώνα για τη συλλογή μορίων; Όπως προαναφέραμε η drift velocity είναι ανάλογη του D για ένα ESP και το D^2 για έναν κυκλώνα. Για να έχουμε high drift velocity (ψηλή ταχύτητα) στον κυκλώνα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε high gas velocity (ψηλή ταχύτητα αερίου). Στο παράδειγμα 5.7 ο χρόνος που το μόριο εκτίθεται στην φυγοκεντρική δύναμη στον κυκλώνα είναι ελάχιστος. Αντιθέτως η ταχύτητα αερίου δεν εισέρχεται στην εξίσωση (5.26) και η ταχύτητα που το μόριο πλησιάζει το τοίχωμα είναι ανεξάρτητο ταχύτητας αερίου.

Σχετικά μοντέρνα ESPs έχουν ταχύτητα αερίου 1 - 10ft/s (0.3 - 3m/s) το αέριο ξοδεύει 1 - 10 δευτερόλεπτα μέσα σ' αυτά. Αυτή είναι μια σαφής σύγκριση προς τις υψηλές ταχύτητες του αερίου (και χαμηλές τιμές αντίστασης), απαραίτητη για να κάνει τους διαχωριστές φυγοκεντρικής να δουλέψουν. Αφού ένας μηχανισμός καθίζησης είναι στην πραγματικότητα ένας ρυθμιστής έλξης στον οποίο έχουμε αντικαταστήσει τη δύναμη βαρύτητας με μια ηλεκτροστατική δύναμη καθώς ο μηχανισμός που οδηγεί τα μόρια στα τοιχώματα, φαίνεται λογικό να συμπεράνουμε ότι μπορούμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά ενός ESPs χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 5.5 και 5.11 και αντικαθιστώντας

την drift velocity w για V_t . Το σχήμα 5.7 είναι συμπερασματικά, δύο ρυθμιστές έλξης, όπου ο ένας είναι το διάστημα μεταξύ των καλωδίων και της απομακρυσμένης πλάκας και ο άλλος είναι το διάστημα μεταξύ των καλωδίων και στην κοντινή πλάκα. Τα μόρια οδηγούνται από τα καλώδια κοντά στις δύο πλάκες, σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η μεγαλύτερη απόσταση κάθετη στη ροή που ένα μόριο πρέπει να διατρέξει, είναι η απόσταση από το καλώδιο στην πλάκα που είναι ίση με H στο σχήμα 5.1. Εάν σκεφτούμε το τμήμα μεταξύ της σειράς καλωδίων και μιας πλάκας στο σχ. 5.7 βλέπουμε ότι η περιοχή συλλογής του είναι:

$$A = Lh \quad (5.27)$$

Η ογκομετρική ροή σ' αυτό το τμήμα είναι:

$$Q = HhV_{\text{arg}} \quad (5.28)$$

Κάνοντας τις αντικαταστάσεις στην εξίσωση (5.5) και (5.11)

κι έχουμε:

$$n = \frac{wA}{Q} \quad (5.29)$$

$$\text{και } n = 1 - \exp\left(-\frac{wA}{Q}\right) \text{ ανάμεικτη ροή} \quad (5.30)$$

Στην βιβλιογραφία, η εξίσωση (5.29) περιστασιακά καλείται "εξίσωση θεωρητικής κλασματικής ροής" η οποία θα κρατούσε εάν είχαμε block flow αερίου χωρίς καμία ανάμειξη. Δεν έχει καμία πρακτική χρησιμότητα. Η εξίσωση (5.30) είναι η Deutsch-Anterson εξίσωση η οποία χρησιμοποιείται ευρέως, απλή εξίσωση για σχέδιο, ανάλυση και σύγκριση των ESPs. Είναι η ίδια εξίσωση που έχουμε χρησιμοποιήσει για τους ρυθμιστές έλξης και τους κυκλώνες με τους όρους επανομαζομένου.

Παράδειγμα 5.11:

Υπολογίζουμε την σχέση διαμέτρου-αποδοτικότητας για ένα ESP με μόρια διηλεκτρικής σταθεράς 6 και $(A/Q) = 0.2 \text{ min/ft} (\approx 0.060 \text{ m/s})$. Θα χρησιμοποιήσουμε μόνο την εξίσωση mixed flow. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του παραδείγματος 5.10 γνωρίζουμε ότι 1 – μ διάμετρο το μόριο θα έχει drift velocity 0.109ft/s ανάλογη της διαμέτρου του μορίου. Οπότε έχουμε:

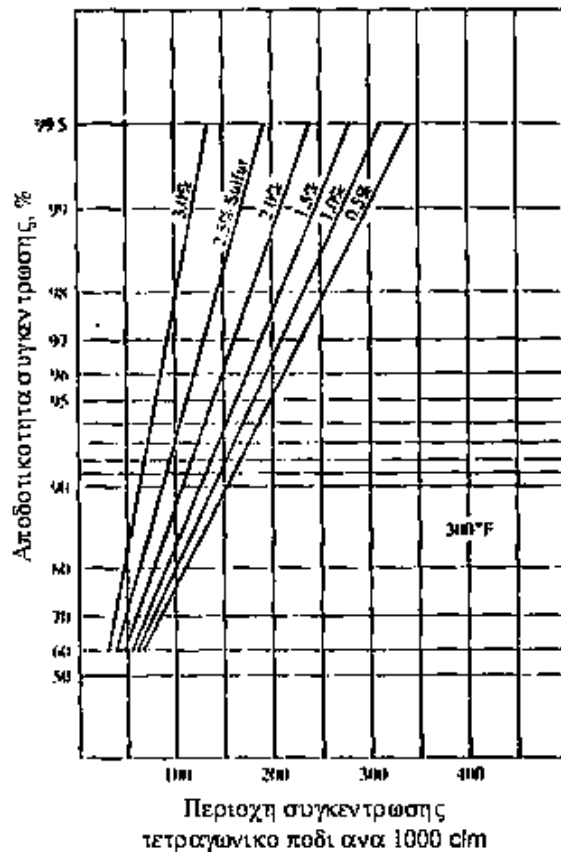
$$n = 1 - \exp\left(-\frac{wA}{Q}\right) = 1 - \exp\left[-\left(0.109 \frac{\text{ft}}{\text{s}}\right) \left(0.2 \frac{\text{min}}{\text{ft}}\right) \left(\frac{60\text{s}}{\text{min}}\right)\right] = 0.73$$

Όπως στα παραδείγματα 5.1 και 5.4 έχουμε τον κάτωθι πίνακα χρησιμοποιώντας την μία υπολογισμένη τιμή παίρνοντας ως πλεονέκτημα το γεγονός ότι η υπολογισμένη drift velocity είναι ανάλογη της διαμέτρου του μορίου.

Διάμετρος σωματ.,μ	n
0.1	0.12
0.5	0.48
1	0.73
3	0.98
5	0.998

Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι αυτός ο συγκεντρωτήρας έχει διάμετρο 0.5μ, 1/10 διαμέτρου ενός τυπικού κυκλώνα. Εάν σχεδιάσουμε αυτές τις

τιμές σε ένα διάγραμμα αποτελεσματικότητας-διαμέτρου όπως στο σχήμα 5.2, θα βρίσκαμε ένα κάπως διαφορετικό σχήμα επειδή η drift velocity σε έναν ESPs εξαρτάται από το D , ενώ η τελική ρύθμιση της ταχύτητας σε ένα ρυθμιστή έλξης ή σε έναν κυκλώνα εξαρτάται σε D^2 . Από την πιο πάνω θεωρία θα ευχόταν κανείς να υπολογίσει την τιμή w και να κατασκευάσει συγκεντρωτήρες βάση της εξίσωσης (5.30) με σιγουριά. Εάν κάθε μόριο που έφτανε στο τοίχωμα έμενε εκεί τότε θα μπορούσαμε μέσω υπολογισμών να δούμε και την λειτουργικότητα του. Δυστυχώς, το τύλιγμα που ελευθερώνει τα μόρια από το τοίχωμα επανέρχονται μερικά απ' αυτά στο αέριο, και διάφορα μόρια έχουν ποικίλα χαρακτηριστικά. Παρ' όλα αυτά, η εξίσωση (5.30) προτείνει ότι εάν περάσουμε ένα ενδεδημένο μοριακό αέριο σε διάφορους συγκεντρωτήρες θα σχηματίσει μια ευθεία γραμμή σε ένα διάγραμμα όπου λογαριθμικά έχουμε $\log p$ vs A/Q . Το σχέδιο 5.9 είναι ένα τέτοιο διάγραμμα στο οποίο η τρίτη μεταβλητή είναι το θείο σε κάρβουνο. Αφού η διαδικασία επαναφοράς είναι πιθανώς ίδια με την τυχαία στατιστική διαδικασία καθώς και η διαδικασία ταραχής και αφού το ποσό που υπεισέρχεται είναι πιθανό να είναι ανάλογο της πυκνότητας του τοπικού στρώματος, το οποίο τελικά θα είναι μια λειτουργία της τοπικής συγκέντρωσης μορίων δεν εξεπλησώμαστε που αυτή η πειραματική data πέφτει σε ευθείες γραμμές.



Φιγούρα 5.9:

Συνοπτικά δεδομένα μεγέθους-αποδοτικότητας σε μηχανισμούς καθίζησης σε εργοστάσια που λειτουργούν με καύση λιθάνθρακα. Κάθε γραμμή αναπαριστά λιθάνθρακα μιας συγκεκριμένης περιεκτικότητας σε θείο. Το μέγεθος του μηχανισμού καθίζησης καθορίζεται σε τετραγωνικό πόδι (ft²) της περιοχής συγκέντρωσης ανά 1000 cfm ροής αερίου, αυτή είναι η συνήθης χρήση στην ESP βιομηχανία.

Παράδειγμα 5.12:

Από το σχέδιο 5.9 υπολογίστε την τιμή w για περιεκτικότητα άνθρακα που περιέχει 1% θείο. Απ' αυτό το σχήμα στα 99.5% αποτελεσματικότητα, διαβάζουμε ότι για 1%.

Έχουμε:

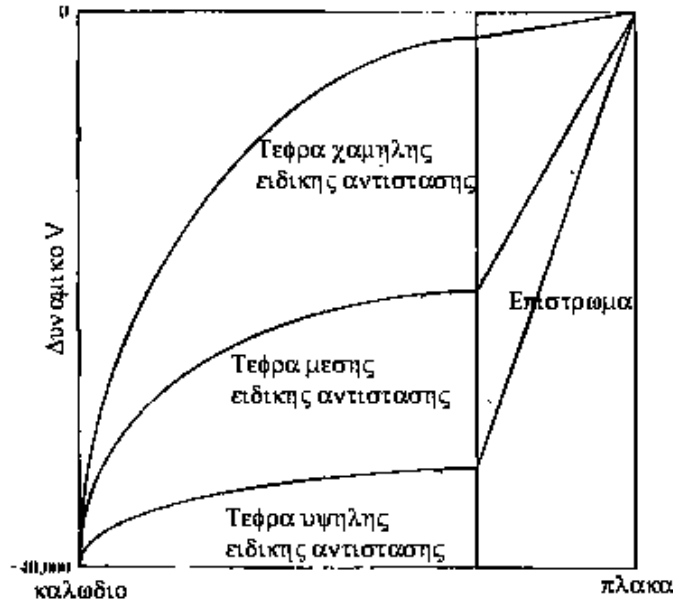
$$\frac{A}{Q} = \frac{310 \text{ ft}^2}{1000 \text{ ft}^3 / \text{min}} = 0.31 \frac{\text{min}}{\text{ft}}$$

Από την εξίσωση (5.30) υπολογίζουμε:

$$w = -\frac{\ln p}{A/Q} = -\frac{\ln 0.005}{0.3 \text{ min/ft}} 17.09 \frac{\text{ft}}{\text{min}} = 0.28 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 0.086 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Οι διαφορετικές γραμμές για περιεκτικότητα θείου στο σχέδιο 5.9 προκαλείται από του θείου την μη ευθεία επίδραση στην αντίσταση της στάχτης. Τα ESP_s λειτουργούν πολύ καλά με μέση – αντίσταση στερεών, αλλά όχι πολύ καλά με χαμηλή – αντίσταση ή υψηλής – αντίστασης στερεά. Βλέπουμε το γιατί αν αναφερθούμε στο σχέδιο 5.10 που μας δείχνει τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Σε κάθε κατάσταση η τάση στο καλώδιο είναι 40KV και τάση στην πλάκα είναι μηδέν. Αυτές είναι συνηθισμένες συνθήκες για έναν μηχανισμό καθίζησης. Στην περίπτωση της χαμηλής αντίστασης στερεού, όπως για παράδειγμα carbon black, το υλικό σχηματίζει ένα στρώμα που είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Η κλίση της τάσης στο στρώμα είναι μικρή. Καθώς φθάνουν τα μόρια την πλάκα εκφορτίζονται και εμπόδιο είναι μια πολύ μικρή ηλεκτροστατική δύναμη που κρατά τα συλλεχθέντα μόρια στην πλάκα. Τα συλλεχθέντα μόρια δεν προσκολλώνται και εύκολα υπεισέρχονται. Η γενική συλλογή είναι φτωχή. (Σε μία περίπτωση ένας ESP χρησιμοποιήθηκε για να συσσωρευτούν μόρια carbon παρ' όλο που δεν μπορεί να τα συλλέξει, αυτά συγκεντρώθηκαν εν συνεχεία σε έναν κυκλώνα ο οποίος δεν μπορούσε να συλλέξει τα μη-συσσωρευμένα μόρια). Εξαιτίας της μικρής προσκόλλησης στρώματος για χαμηλής

αντίστασης μόρια, οι ESPs γενικά δεν χρησιμοποιούνται για να συλλέξουν μόρια με αντίσταση λιγότερη από $10^7 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$.



Φιγούρα 5.10:

Σχέση τάσης-απόστασης μεταξύ πλάκας και καλωδίου για χαμηλής, μέσης και υψηλής ειδικής αντίστασης τέφρας. $E = \partial V / \partial x$: είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-απόστασης.

Το σχέδιο 5.10 επίσης δείχνει μια επίστρωση μέσης – αντίστασης μορίων συλλεγμένα στην πλάκα. Η κλίση της τάσης στην επίστρωση είναι αρκετή να προμηθεύσει ηλεκτροστατική δύναμη για να συντηρήσει την επίστρωση στη θέση της, όχι όμως αρκετή για να δημιουργήσει πρόβλημα. Το σχέδιο 5.10 μας δείχνει επίσης μόρια πολύ υψηλής – αντίστασης για παράδειγμα θείο στην πλάκα. Η μεγαλύτερη κλίση της τάσης επέρχεται μέσα στο στρώμα, προκαλώντας τουλάχιστον δύο προβλήματα. Πρώτον η κλίση της τάσης κοντά στο καλώδιο έχει πέσει ώστε να μην μπορεί να παράγει μια καλή κορώνα εκφόρτισης. Συνεπώς τα μόρια δεν είναι σωστά φορτισμένα. Και

επιπλέον είναι τόσο υψηλή η κλίση της τάσης μέσα στο στρώμα έτσι ώστε στα διαστήματα μεταξύ των μορίων του αερίου μόρια ηλεκτρονίου διαφεύγουν και επιταχύνουν σε υψηλές ταχύτητες όπου θα αποκολλήσουν ηλεκτρόνια από τα μόρια αερίου και θα σχηματίσουν back corona εντός της επίστρωσης. Αυτού του είδους κορώνα είναι μια βίαιη ενεργειακή μετατροπή από ηλεκτροστατική ενέργεια που μπορεί να προκαλέσει ανατινάξεις και η οποία αφαιρεί το στρώμα από την πλάκα καθιστώντας αδύνατη τη συλλογή μορίων. Θεωρείται μη πρακτικό το να συλλέγονται μόρια με αντιστάσεις μεγαλύτερες από $2 \times 10^{10} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$. Η πρακτική αντίσταση είναι μεγαλύτερη του 10^7 και μικρότερη του $2 \times 10^{10} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$. Εάν η αντίσταση των μορίων είναι πολύ χαμηλή πολύ ελάχιστα μπορούν να συμβούν. Η αντίσταση της στάχτης από λιθάνθρακα στους 300°F για μια καλή συλλογή είναι πολύ υψηλή αλλά ικανοποιητικά χαμηλή στους 600°F . (Η αλλαγή στη αντίσταση γίνεται εξαιτίας της βελτίωσης της αγωγιμότητας μερικών μετάλλων στην στάχτη με αύξηση της θερμοκρασίας). Έτσι ένας μηχανισμός καθίζησης λειτουργώντας μετά τον προθερμαντήρα του αέρα στους 300°F , μπορεί να μην δουλέψει καλά σ' αυτή τη στάχτη, αλλά ένας ESP τοποθετημένος πάνω από τον προθερμαντήρα στους 600°F , ονομάζεται hot side μηχανισμός καθίζησης, μπορεί να δουλέψει καλά. Hot side ESPs χρησιμοποιούνται σε μερικές βιομηχανίες που λειτουργούν με φλεγόμενο λιθάνθρακα. Η στάχτη μπορεί να έχει υψηλή αντίσταση επειδή η επιφάνεια της είναι φτωχός αγωγός. Εάν μπορούσαμε να συμπυκνώσουμε την επιφάνεια μ' ένα υγροσκοπικό υλικό η αντίσταση της στάχτης θα μειωνόταν. Μια τέτοια συμπύκνωση αντανακλάται από πολλές γραμμές στο σχήμα 5.9. Κάποιο από το θείο στον λιθάνθρακα μετατρέπεται στον κλίβανο σε SO_3 , το οποίο συλλέγεται στην στάχτη, απορροφά νερό και κάνει την στάχτη πιο αγωγίμη. Χαμηλό – θειούχο κάρβουνο παράγει μια στάχτη αρκετά

δύσκολη να περισυλλεχθεί απ' ότι το υψηλό – θειούχο κάρβουνο όπως βλέπουμε στο σχεδ. 5.9. Μια λογική οδός είναι να προσθέσουμε SO_3 στην δίοδο αερίου που φτάνει στον συγκεντρωτήρα για να φέρουμε σε μια αναλογία την στάχτη. Αυτό έχει αποδεκτά αποτελέσματα μερικές φορές. Η στάχτη λιθάνθρακα είναι βάση γι' αυτό ένας όξινος ρυθμιστής φαίνεται καλύτερος. Το κονίαμα είναι όξινο και μια βάση, όπως η αμμωνία φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα γι' αυτό. Υπάρχουν πολλοί ρυθμιστές στην αγορά, εργαζόμενοι στην περιοχή μεταξύ τέχνης και επιστήμης (SO_3 προστιθέμενο όπως ένας ρυθμιστής αυξάνει τις εκπομπές θειούχου οξέος κανονικά όμως με ένα αμελητέο ποσό). Μια άλλη προσέγγιση της αντίστασης της στάχτης είναι να διαχωρίσουμε τις λειτουργίες της φόρτισης και εκείνες της συσσώρευσης. Εάν τα μόρια φορτιστούν σε διαφορετικό φορτιστή τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υψηλότερα βολτ και να μην προβληματιζόμαστε με τα αποτελέσματα των σπινθήρων επειδή δεν περνούν μέσα στο στρώμα και το διαλύουν. Αυτό φυσικά είναι ακόμη σε πειραματικό στάδιο, σε εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας. Για να υπολογιστεί η τιμή w για να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση (5.30) θα πρέπει να γνωρίζουμε το μέγεθος διανομής του μορίου, τα διηλεκτρικά συστατικά του υλικού, την αντίσταση του και αν τα μόρια μπορούν να φτιάξουν μια εφικτή επίστρωση. Γενικά όμως αυτές οι πληροφορίες δεν είναι δυνατές για ένα καινούργιο υλικό, οπότε και ερευνάται. Ο πίνακας 5.2 δείχνει κάποιες τιμές του w για βιομηχανικούς συγκεντρωτήρες.

Πίνακας 5.2:

Τυπικές τιμές της ταχύτητας εκτροπής που συναντάται βιομηχανικά σωματίδια.

Εφαρμογή	Ταχύτητα εκτροπής w, ft/s
Κονιοποιημένος άνθρακας (αιωρούμενη τέφρα)	0.33-0.44
Μύλοι χάρτου	0.25
Ανοικτής εστίας κλίβανος	0.19
Βοηθητική υψικάμινος (80% χυτηρίου σιδήρου)	0.41
Γύψος	0.52-0.64
Θερμός φωσφόρος	0.09
«Ομίχλη» οξέος (H ₂ SO ₄)	0.19-0.25
«Ομίχλη» οξέος (TiO ₂)	0.19-0.25
Φούρνος ψησίματος με ανάφλεξη	0.25
Πολλαπλής εστίας φούρνος ψησίματος	0.26
Βιομηχανική κατασκευή τσιμέντου Portland (υγρή μέθοδος επεξεργασίας)	0.33-0.37
Βιομηχανική κατασκευή τσιμέντου Portland (ξηρή μέθοδος επεξεργασίας)	0.19-0.23
Καταλύτες σωματίδια	0.25
Θόλος γκρι σιδήρου (αναλογία σιδήρου- κωκ = 10)	0.10-0.12

Παράδειγμα 5.13:

Το ESP έχει μετρηθεί σε αποδοτικότητα 90% θέλουμε να το αυξήσουμε στο 99%. Πόσο πρέπει να αυξηθεί η περιοχή συγκέντρωσης;

Χρησιμοποιώντας εξίσωση (5.30) υπολογίζουμε:

$$\begin{aligned}
p_{part} &= 1 - n_{existing} = 0.1 = \exp\left(\frac{-wA_{existing}}{Q}\right) \\
p_{new} &= 1 - n_{new} = 0.01 = \exp\left(\frac{-wA_{new}}{Q}\right) \\
\frac{\ln 0.1}{\ln 0.01} &= 0.5 = \frac{(-wA_{existing}/Q)}{(-wA_{new}/Q)} = \frac{A_{existing}}{A_{new}} \\
\frac{A_{new}}{A_{existing}} &= 2
\end{aligned}$$

Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι αν η εξίσωση Deutsch – Anderson ακολουθηθεί σωστά τότε από 90% μπορούμε να φτάσουμε 99% αποδοτικότητα και βεβαίως απαιτείται μια μεγέθυνση ακριβώς εις διπλούν της περιοχής συγκέντρωσης, από 90% σε 99.9% απαιτεί τριπλασιασμό κτλ.. Στην εξίσωση (5.26) βρήκαμε ότι η ταχύτητα είναι ανάλογη της διαμέτρου του μορίου (μέχρι τα πιο μικρά μόρια), όπου η διάδοση της φόρτισης γίνεται σημαντική. Ως αποτέλεσμα τα μεγάλα μόρια που έχουν περισσότερο όγκο μετακινούνται πρώτα και καθώς το ποσοστό αποδοτικότητας αυξάνεται λόγω βάρους, τα υπόλοιπα μόρια γίνονται όλο και μικρότερα και πολύ πιο δύσκολα μπορούν να περισυλλέγουν λαμβάνοντας υπόψη αυτό το φαινόμενο. Μερικοί σχεδιαστές χρησιμοποιούν την εξίσωση Dentsch – Anderson τροποποιημένη ως εξής:

$$p = 1 - n = \exp-(wA/Q)^k \quad (5.31)$$

όπου K είναι ένας αυθαίρετος εκθέτης περίπου 0.5.

Παράδειγμα 5.14:

Δουλέψτε το παράδειγμα 5.13 χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (5.31). Αντί για (5.30) και K =0.5

$$(wA/Q) = (-\ln p)^{\frac{1}{k}} = (-\ln 0.1)^2 = 5.30$$

Για συγκεντρωτήρα με κλίση προς τα πάνω χρειαζόμαστε $(wA/Q) = (-\ln 0.01)^2 = 21.20$, οπότε η καινούργια τιμή (A/Q) – υποθέτουμε $w - (21.20/5.30) = 4.0$ φορές την παλιά τιμή (A/Q) . Θα πρέπει να τετραπλασιαστεί το μέγεθος του συγκεντρωτήρα απ' ότι να διπλασιαστεί. Η εξίσωση 5.31 δεν έχει θεωρητική βάση, είναι ένας απλός τρόπος να αντιμετωπιστεί το γεγονός ότι καθώς οι συγκεντρώσεις μειώνονται σε όλο ένα και μικρότερες τιμές τα μόρια που απομένουν γίνονται όλο ένα και μικρότερα, κάνοντας τη συλλογή τους πιο δύσκολη. Θεωρητικά πρέπει να δημιουργήσουμε w που να έχει λειτουργία του ρ (w γίνεται μικρότερο όσο το ρ μικραίνει), αλλά χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.31) είναι πιο απλό. Ισότιμη διανομή αερίου στον συγκεντρωτήρα είναι πολύ σημαντική. Ανόμοια διανομή αερίου στο ESP μειώνει την απόδοση συλλογής. Αυτό φαίνεται αν χρησιμοποιήσουμε Εξίσωση (5.30) στο ESP με ισότιμες και μη διανομές ροής.

Παράδειγμα 5.15:

Ένας συγκεντρωτήρας έχει δυο όμοιους τομείς παράλληλους, ο καθένας ενεργοποιώντας το 1/2 του αερίου. Λειτουργεί με αποδοτικότητα 95%. Διατηρούμε τη ροή αερίου συνεχή, αλλά διανέμουμε τη ροή με σφάλμα έτσι ώστε τα 2/3 αερίου περνάνε από τον ένα τομέα και το άλλο 1/3 από τον άλλο. Ποια είναι η αναμενόμενη αποδοτικότητα συλλογής;

Για την υπάρχουσα κατάσταση υπολογίζουμε:

$$p = 0.05 = \exp\left(\frac{-wA}{Q}\right) \quad \frac{wA}{Q} = -\ln 0.05 = 2.995$$

Στη νέα περίπτωση έχουμε:

$$p_1 = \exp(-2.995)\left(\frac{1/2}{2/3}\right) = 0.1057$$

$$p_2 = \exp(-2.995)\left(\frac{1/2}{2/3}\right) = 0.011$$

$$Q_1 p_1 = \frac{2}{3} Q (0.1057) = 0.070Q$$

$$Q_2 p_2 = \frac{1}{3} Q (0.011) = 0.004Q$$

Προσθέτοντας αυτά έχουμε:

$$(Q_1 + Q_2)p = 0.074Q$$

$$p = 0.074; \quad n = 1 - p = 92.6\%$$

Μαθηματικά αυτό το παράδειγμα δείχνει πως η κακή διανομή μειώνει την αποτελεσματικότητα (λειτουργικότητα) του συγκεντρωτήρα. Σε μια κακή διανομή της ροής το μεγαλύτερο ποσό του αερίου περνά μέσα από το μέρος της υψηλής ταχύτητας, όπου ξοδεύει λιγότερο από το μέσο χρόνο στον συγκεντρωτήρα και από αυτό η απόδοση στην αποτελεσματικότητα είναι χαμηλότερη. Έτσι το πέρασμα του αερίου μέσα από το τμήμα όπου έχουμε υψηλή ταχύτητα, συμβάλλει περισσότερο στην διείδυση από ότι θα συνέβαλε στην περίπτωση της όμοιας ροής. Αξιοσημείωτες προσπάθειες γίνονται για να διανεμηθεί ομαλά η ροή μέσα στον συγκεντρωτήρα. Στο σχέδιο 5.8 το αέριο εισέρχεται μέσα από ένα σύνολο διάτρητων πλακών που εξομαλύνουν τη

ροή. Σε μια νέα εγκατάσταση όπου υπάρχουν εκτενές ευθείς αγωγοί από και προς τους ESP, αυτό είναι ικανοποιητικό. Από τη άλλη ένας ESP πρέπει συχνά να ενσωματώνεται σε μια βιομηχανική εγκατάσταση κοντά σε άλλα μεγαλύτερα τμήματα εξοπλισμού και συνδεδεμένα με τον υπόλοιπο εξοπλισμό με μικρά τμήματα από αγωγούς που έχουν κοφτερούς συνδέσμους. Αυτοί οι συνδέσμοι εισάγουν παράσιτα στη ροή που πολλαπλασιάζονται μέσα στον ESP και έχουν ως αποτέλεσμα φτωχή αποδοτικότητα. Εσωτερικά και εξωτερικά φίλτρα και διαφράγματα μπορούν να εξομαλύνουν τη ροή, προκαλούν όμως μείωση στην πίεση η οποία είναι εκτεταμένη για μεγάλη ροή του αερίου. Αυτή η συναλλαγή μεταξύ της επιθυμίας να κρατηθεί η πτώση της πίεσης χαμηλά (κανονικά λίγες ίντσες από το νερό) και της ανάγκης να έχουμε ομαλή ροή είναι αρκετά σημαντική για μεγάλες εγκαταστάσεις ESP σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με περιορισμένο διάστημα, ενώ ένα μηχανικό μοντέλο κλίμακας από 1/4 έως 1/8 κατασκευάζεται και δοκιμάζεται στο εργοστάσιο με διάφορα μοντέλα για να εξασφαλιστεί ότι θα υπάρχει επαρκής ομοιότητα στη ροή χωρίς εκτεταμένη πτώση στην πίεση.

Σε μια εγκατάσταση ή σε έναν κυκλώνα, όλο το αέριο που πρόκειται να επεξεργαστούμε περνά μέσα από τη ζώνη συγκέντρωσης. Το ίδιο δεν είναι αλήθεια για έναν ESP. Στο σχήμα 5.8 βλέπουμε ότι τα καλώδια και οι πλάκες δεν μπορούν να πλησιάσουν τελείως στην κορυφή και στον πάτο της περιοχής συγκέντρωσης, κάποιο διάστημα πρέπει να είναι ελεύθερο για το ένα ή το άλλο εξαιτίας της υψηλής φόρτισης στο ένα. Έτσι κάποιο μέρος του αερίου πρέπει να περάσει μέσα από μια περιοχή με φτωχή συγκέντρωση. Αυτό ονομάζεται "sneakage" στη βιβλιογραφία του ESP. Σημαντικές προσπάθειες γίνονται για να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφράγματα. Η γενική ταραχή στον συγκεντρωτήρα αναμειγνύει το αέριο μεταξύ των περιοχών φτωχής απόδοσης και της κύριας που έχει καλή απόδοση. Οι ειδικοί που διορθώνουν τα όποια λάθη

σε έναν συγκεντρωτήρα με κακή εκτεταμένη sneakage σαν μια πιθανή αιτία. Η τυπικά γραμμική ταχύτητα του αερίου μέσα σε έναν ESP είναι από 3 έως 5 ft/s, πολύ χαμηλότερη δηλαδή από ότι σε έναν κυκλώνα. Η πτώση της πίεσης στους αγωγούς είναι γενικά μεγαλύτερη από ότι στον ίδιο τον ESP. Ακριβώς επειδή υπάρχει ένα σοβαρό πρόβλημα στο όσον αφορά την διανομή αερίου έχουμε πλέον φτάσει μετά από μεγάλες έρευνες και πανάκριβα σχέδια στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μονάδων ESP με μικρή ροή (τόσο μικρά όσο οικιακά airconditioners) και πολύ μεγαλύτερες μονάδες για μεγάλες επιχειρήσεις να φτάσουν στο κόστος των 30 εκατομμυρίων δολαρίων. Το σχέδιο 9.8 μας δείχνει μια μονάδα ευρέως γνωστή. Η περισυλλογή των 90 – 95% τυπικά έχουν αυξηθεί από το 1965 μέχρι το 99.5%.

5.2 Συσκευές Τμηματοποίησης της Συγκέντρωσης.

Οι ρυθμιστές έλξης, οι κυκλώνες και οι ESPs συλλέγουν μόρια οδηγώντας τα εναντίον στερεού τοιχώματος. Φίλτρα και καθαριστές δεν οδηγούν τα μόρια σε τοίχωμα, αλλά χωρίζουν τη ροή σε μικρότερα μέρη όπου μαζεύονται τα μόρια. Σ' αυτή τη φάση πρέπει πρώτα να θεωρήσουμε τους δυο τύπους φίλτρου που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο μόλυνσης του αέρα, επιφανειακά φίλτρα και φίλτρα βάθους. Ύστερα θα συζητήσουμε για τους καθαριστές.

5.2.1 Φίλτρα επιφανείας.

Όλοι μας λίγο πολύ έχουμε έλθει σ' επαφή με επιφανειακά φίλτρα όπως αυτά στις καφετιέρες. Η λειτουργία του πολύ απλή, το φίλτρο είναι μια μεμβράνη (καθαρό ατσάλι, ύφασμα ή φίλτρο από

χαρτί) με τρύπες μικρότερες των διαστάσεων των μορίων που συγκρατεί. Παρ' όλα αυτά το είδος φίλτρου που χρησιμοποιείται μερικές φορές για τον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα δεν είναι συνηθισμένο καθώς η κατασκευή ενός φίλτρου με τρύπες τόσο μικρές όσο τα μόρια που επιθυμούμε να συλλέξουμε είναι πολύ δύσκολο. Πρέπει ακόμα να σκεφτούμε το μηχανικό πρόβλημα της δημιουργίας τρυπών διαμέτρου 0.1μ ή της ύφανσης ινών με κλωστές διαχωρισμένες από 0.1μ για να δούμε ότι τέτοια φίλτρα δεν είναι εύκολο να κατασκευαστούν. Αυτό μπορεί να γίνει σε ένα εργαστήριο ακτινοβολώντας πλαστικά ελάσματα με νετρόνια και ύστερα απομακρύνοντάς την κατεστραμμένη από τα νετρόνια περιοχή. Τα φίλτρα αυτά έχουν ποικίλες χρήσεις, δεν χρησιμοποιούνται όμως για τον βιομηχανικό έλεγχο της μόλυνσης του αέρα (παρ' όλο που χρησιμοποιούνται βιομηχανικά για να φιλτράρουν κάποιες μύρες ή άλλα προϊόντα, μετακινώντας μικρά ποσά βακτηρίων). Το σχήμα 5.11 δείχνει κρυστάλλους ασβέστου παγιδευμένους σε ένα τέτοιο φίλτρο. Παρ' όλο που τέτοια φίλτρα είναι πολύ χρήσιμα στον καθορισμό της χημικής ταυτότητας και του μεγέθους διανομής των μορίων της μόλυνσης του αέρα, είναι πολύ ακριβά και εύθραυστα για να χρησιμοποιηθούν ως βιομηχανικοί καθαριστές. Παρ' όλο που τα βιομηχανικά φίλτρα για τον αέρα έχουν σπάνια τρύπες μικρότερες από τα μικρότερα μόρια που εγκλωβίζονται συχνά συμπεριφέρονται σαν να είχαν. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι καθώς τα μόρια πιάνονται στις άκρες των τρυπών ενός φίλτρου, τείνουν να "γεφυρώνουν" τις τρύπες κάνοντας τις μικρότερες. Έτσι καθώς το ποσό των συλλεκθέντων μορίων αυξάνει, το στρώμα του συγκεντρωμένου υλικού μετατρέπεται σε φίλτρο και το μέσο φίλτρο (συνήθως ένα ύφασμα) που κανονικά βοηθά το φίλτρο να συλλέξει το στρώμα, τώρα βοηθά μόνο στην υποστήριξη του στρώματος και όχι πια σαν φίλτρο. Αυτό το στρώμα των συλλεκθέντων μορίων θα έχει μέσο μέγεθος πόρων μικρότερο από τη διάμετρο των

μορίων στην επερχόμενη ροή του αερίου και έτσι θα λειτουργεί σαν ένα "κόσκινο" γι' αυτά. Τα μόρια συγκεντρώνονται στην μπροστινή επιφάνεια του αυξανόμενου στρώματος. Γι' αυτόν το λόγο καλείται φίλτρο επιφάνειας.



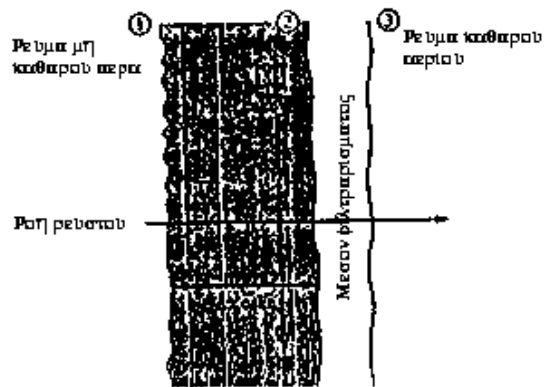
Φιγούρα 5.11:

Διερεύνηση με ηλεκτρονικό μικρογράφο των κρυστάλλων χρυσολιθικής ασβέστου που συλλέγεται πάνω σε αναλυτικό φίλτρο από πολυανθρακικό άλας νουκλεϊνικού πόρου με οπές διαμέτρου 0.4 μ κατά προσέγγιση.

Κάποιος μπορεί να οπτικοποιήσει αυτήν την κατάσταση με ένα φίλτρο με τρύπες 0.79 in (1.91cm) ως προς τη διάμετρο. Θα μπορούσαμε να συγκεντρώσουμε ένα στρώμα από μπαλάκια του ring-rong εύκολα σ' αυτό το φίλτρο. Από τη στιγμή που θα είχαμε ένα τέτοιο στρώμα θα μπορούσαμε τότε να συλλέξουμε κεράσια που θα μπορούσαν να περάσουν μέσα από τις τρύπες στο φίλτρο όχι όμως μέσα από τα διαστήματα μεταξύ των μπαλάκων του ring-rong. Από τη στιγμή που έχουμε ένα στρώμα από κεράσια, θα μπορούσαμε να τοποθετίσουμε ύστερα ένα στρώμα από αχλάδια, έπειτα από ρύζι και τέλος από άμμο. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαμε να συλλέξουμε άμμο σε ένα φίλτρο με τρύπες 0.75 ίντσες στη διάμετρο. Στα τυπικά βιομηχανικά φίλτρα τα μόρια έχουν μια τεράστια ποικιλία στα μεγέθη έτσι που δεν πάνε πάνω στο φίλτρο σε στρώματα, αλλά μονομιás. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο:

πολύ μικρά μόρια συλλέγονται από το στρώμα που είχε συγκεντρωθεί προηγουμένως σαν υποστήριξη σ' αυτό καθώς οι τρύπες είναι πολύ μεγαλύτερες από τα μικρότερα συλλεκθέντα μόρια. Η θεωρία της συγκέντρωσης στρώματος και πτώση της πίεσης γι' αυτόν τον τύπο συσκευής είναι γνωστή από το βιομηχανικό φιλτράρισμα. Η ροή μέσα σε ένα απλό φίλτρο φαίνεται σχηματικά στο σχέδιο 5.12. Ένα υγρό που περιέχει στερεά στοιχεία (σ' αυτή την περίπτωση ένα βρωμικό αέριο) ρέει μέσα σε ένα μέσο φίλτρο που είναι πιο συχνά ένα ύφασμα, αλλά και ένα χαρτί, ένα μέταλλο με πόρους ή ένα στρώμα άμμου. Τα στερεά μόρια στη ροή εναποθέτονται στο επάνω μέρος του φίλτρου σχηματίζοντας το στρώμα του φίλτρου. Το καθαρό αέριο ελεύθερο από στερεά ρέει διαμέσου του στρώματος και του μέσου φίλτρου. Εάν ακολουθήσουμε τη ροή του αερίου από το σημείο 1 στο σημείο 3 θα μπορούσαμε να δούμε ότι η ροή είναι οριζόντια και ότι έχει μια μικρή αλλαγή στην ταχύτητα, επειδή η πίεση πέφτει προκαλώντας στο αέριο διαστολή και επειδή το αέριο αφήνει πίσω τα συγκρατημένα μόρια. Για τα περισσότερα φίλτρα, για την μόλυνση του αέρα το συνδυασμένο αποτέλεσμα αυτών των αλλαγών είναι αμελητέο. Γι' αυτό το μόνο μηχανικό αποτέλεσμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η μείωση στη πίεση εξαιτίας της αντίστασης της τριβής κατά τη ροή διαμέσου του στρώματος και του φίλτρου. Στα περισσότερα βιομηχανικά φίλτρα, τόσο για τα αέρια όσο και για τα υγρά, η ταχύτητα της ροής στους πόρους είναι τόσο μικρή, ώστε η ροή είναι ελασματοειδής. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις ροής το οποίο καταγράφεται ως:

$$V_t = \frac{Q}{A} = \left(\frac{-\Delta P}{m} \right) \left(\frac{k}{\Delta x} \right) \quad (5.32)$$



Φιγούρα 5.12:

Ροή μέσω ενός επιφανειακού φίλτρου.

Εδώ η k είναι η διαπερατότητα, ένα στοιχείο του στρώματος (ή του φίλτρου). Για κάθε απλό στρώμα όπως οι σφαίρες, η k μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από τις μηχανικές αρχές των υγρών. Η τιμή k χρησιμοποιείται τελείως πειραματικά αν και η υπολογίσιμες τιμές για τις σφαίρες αναλόγου μεγέθους μπορεί να χρησιμοποιηθούν για υπολογισμούς κατά προσέγγιση. Για τη ροή ενός υγρού μέσα από το στρώμα-φίλτρο, υποστηριζόμενο από ένα μέσο φίλτρο υπάρχουν δύο αντιστάσεις για την ροή σε σειρές, η κλίμακα όμως της ροής είναι ίδια μέσα σε κάθε μία από αυτές.

Γράφουμε Εξ. (5.32)

$$V_t = \left(\frac{P_1 - P_2}{m} \right) \left(\frac{k}{\Delta x} \right)_{cake} = \left(\frac{P_2 - P_3}{m} \right) \left(\frac{k}{\Delta x} \right)_{f.m.} \quad (5.33)$$

Λύνοντας το P_2 , έχουμε:

$$P_2 = P_1 - mV_s \left(\frac{\Delta x}{k} \right)_{cake} = P_3 + mV_s \left(\frac{\Delta x}{k} \right)_{f.m.} \quad (5.34)$$

Και κατόπιν για V_s , έχουμε:

$$V_s = \frac{(P_1 - P_3)}{m[(\Delta x / k)_{cake} + (\Delta x / k)_{f.m.}]} = \frac{Q}{A_{filter}} \quad (5.35)$$

* όπου f .m =filter medium

Αυτή η εξίσωση περιγράφει την στιγμιαία ροή μέσα από ένα φίλτρο. Είναι ανάλογη με το νόμο του Ohm για δύο αντιστάσεις σε σειρά. Το κλάσμα $\Delta x/k$ καλείται resistance ή cloth resistance. Η αντίσταση του φίλτρου συνήθως υπολογίζεται ότι είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τον χρόνο, γι' αυτό $(\Delta x/k)_{f.m.}$ αντικαθίσταται από τη σταθερά a .

Εάν η κρούστα του φίλτρου είναι ομοιόμορφη, τότε η αντίσταση είναι ανάλογη του πάχους του. Ωστόσο, η στρώση είναι σε σχέση του όγκου αερίου που περνάει μέσα από την κρούστα με την ακόλουθη διαφορά:

$$\Delta x_{\mu\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} = \left(\frac{\mu\acute{\alpha}\zeta\alpha \mu\acute{\iota}\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}{\text{περιοχή}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{\mu\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} \right) = \left(\frac{1}{r_{\mu\gamma\mu\alpha\tau\omicron\varsigma}} \right) \left(\frac{\acute{o}\gamma\kappa\omicron\upsilon\upsilon \alpha\epsilon\rho\acute{\iota}\omicron\upsilon}{\text{περιοχή}} \right) \left(\frac{\mu\acute{\iota}\zeta\alpha \alpha\pi\omicron\mu\alpha\kappa\rho\upsilon\omicron\mu\acute{\epsilon}\nu\omicron\upsilon \text{ stere\acute{o}}}{\acute{o}\gamma\kappa\omicron\upsilon\upsilon \alpha\epsilon\rho\acute{\iota}\omicron\upsilon} \right) \quad (5.36)$$

Και εξακριβώνουμε:

$$W = \left(\frac{\text{μάζα απομακρυνόμενου στερεού}}{\text{όγκος αερίου}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{\text{μίγματος}}} \right) = \left(\frac{\text{όγκοV μίγματοV}}{\text{όγκοV επεξεργασμένου αερίου}} \right) \quad (5.37)$$

και έτσι:

$$\Delta x_{\text{cake}} = \left(\frac{V}{A} \right) W \quad \text{και} \quad \frac{d(\Delta x_{\text{cake}})}{dt} = V_s W \quad (5.38)$$

Εδώ V τιμή αερίου καθαρισμένου ($V = \int Q dt$) και η αποδοτικότητα συλλογής φίλτρου στο 100%. Αντικαθιστώντας εξίσωση (5.38), για το πάχος της κρούστας στην εξίσωση (5.35) έχουμε:

$$V_s = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \left(\frac{dV}{dt} \right) = \frac{(P_1 - P_3)}{m[(VW/kA) + a]} \quad (5.39)$$

Για τα περισσότερα βιομηχανικά φιλτραρίσματα το φίλτρο προμηθεύεται από κεντροφικό ανεμιστήρα σε συνεχή πίεση, έτσι $(P_1 - P_3)$ είναι συνεχές και εξίσωση (5.39) μπορεί να έχει ως εξής:

$$\left(\frac{V}{A} \right)^2 \left(\frac{mW}{2k} \right) + \left(\frac{V}{A} \right) ma = (P_1 - P_3)t \quad (5.40)$$

Για πολλά φιλτραρίσματα η αντίσταση a του medium filter είναι αμελητέα αν συγκριθεί με την αντίσταση της επίστρωσης, και έτσι το δεύτερο μέρος της εξίσωσης (5.40) μπορεί να μην ληφθεί υπόψιν σ' αυτές τις περιπτώσεις ο όγκος αερίου που επεξεργάζεται

είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας χρόνου φιλτραρίσματος. Για μερικά βιομηχανικά φιλτραρίσματα αερίων η εκτόπιση του ανεμιστήρα η οποία είναι πρακτικά μια συσκευή συνεχής ροής, τροφοδοτεί το φίλτρο με πίεση που συνεχώς αυξάνεται κατά τη διάρκεια του φιλτραρίσματος. Από την εξίσωση (5.40) βλέπουμε ότι για συνεχή K και αμελητέα α η πίεση αυξάνει γραμμικά με τον χρόνο, επειδή το πάχος της επίστρωσης αυξάνεται εξίσου γραμμικά με τον χρόνο. Η θεωρία εδώ γίνεται εξίσου εφαρμόσιμη στο φιλτράρισμα των στερεών από τα αέρια ή από τα υγρά. Στις τυπικές εφαρμογές του καθαρισμού των αερίων, η k είναι μια σταθερά ανεξάρτητη της πίεσης. Σε πολλά φιλτραρίσματα υγρών και κυρίως σε φιλτραρίσματα μαλακών υλικών το K μειώνεται όσο η πίεση αυξάνεται, έτσι οι προηγούμενες ενσωματώσεις που θεωρούν την K σαν σταθερά, πρέπει να επαναληφθούν με το K δεδομένο σαν λειτουργία του P . Οι δυο πιο διαδεδομένες κατασκευές που χρησιμοποιούνται σαν βιομηχανικά φίλτρα επιφάνειας φαίνονται στα σχήματα 5.13 και 5.14. Εξαιτίας του εσωτερικού μεταλλικού κατασκευάσματος και στα δυο σχέδια βλέπουμε ένα σχήμα σχεδόν στο σχήμα ενός σπιτιού και αυτού του είδους φίλτρο ονομάζεται baghouse. Το σχήμα στην φιγούρα 5.13 πιο συχνά καλείται shake-deflate filter κυλινδρικών υφασμάτων σάκκων που κλείνουν στην κορυφή σαν μια γιγάντια λαβή κατευθυνόμενη προς τα επάνω. Αυτές κρέμονται από ένα στήριγμα. Τα χαμηλότερα τμήματα συνδέονται με κυλινδρικούς σωλήνες που προεξέχουν προς τα πάνω από μια πλάκα στον πάτο. Το μη καθαρό αέριο ρέει μέσα στο διάστημα κάτω από την πλάκα και πάνω μέσα στους σάκκους. Το αέριο ρέει κατευθυνόμενο προς τα έξω μέσα στους σάκκους, αφήνοντας πίσω τα στερεά. Το καθαρό αέριο ύστερα ρέει μέσα στο διάστημα έξω από τους σάκκους και μέσω αγωγού φθάνει στην καπνοδόχο εξαγωγής ή υφίσταται επιπλέον επεξεργασία.

Για τα baghouse σχ. 5.13 πρέπει να υπάρχει κάποιος τρόπος να μπορούμε να αποσύρουμε την επίστρωση των μορίων που έχουν συσσωρευτεί στα φίλτρα. Συνήθως αυτό δεν γίνεται κατά την διάρκεια του καθαρισμού του αερίου. Αντιθέτως το baghouse βγαίνει από την ροή για καθαρισμό. Όταν η ροή έχει σταματήσει, οι σάκκοι τινάζονται έτσι ώστε να ελευθερωθούν οι συσσωρευμένες επιστρώσεις. Μια αδύναμη ροή αερίου στην αντίστροφη κατεύθυνση μπορεί επίσης να βοηθήσει να εκτοπιστεί η επίστρωση, ξεφουσκώνοντας έτσι τους σάκκους. Αυτή η επίστρωση πέφτει στο κάτω μέρος του θαλάμου σακκών και από εκεί περισυλλέγεται ή το πετούν. Επειδή δεν μπορεί να φιλτράρει το αέριο καθώς καθορίζεται, a shake-deflate baghouse δεν μπορεί να βοηθήσει όπως μια συσκευή ελέγχου της μόλυνσης για μια πηγή που παράγει συνεχή ροή μη καθαρού αερίου. Γι' αυτόν τον λόγο κάποιος ή χρησιμοποιεί ένα αρκετά μεγάλο baghouse έτσι που να μπορεί να καθοριστεί κατά τη διάρκεια περιοδικών διακοπών από την πηγή του μολυνσμένου αερίου, ή εγκαθιστά baghouses παράλληλα. Τυπικά για μια κύρια συνεχόμενη πηγή όπως μια αυτοδύναμη βιομηχανική εγκατάσταση περίπου πέντε baghouses θα χρησιμοποιηθούν παράλληλα μαζί με άλλα τέσσερα που λειτουργούν ως καθαριστές αερίου, όταν ο άλλος καθαρίζεται. Κάθε baghouse μπορεί να λειτουργήσει για δυο ώρες και ύστερα να καθαρίζεται για 10 λεπτά. Ένα baghouse θα μπορούσε να τεθεί εκτός λειτουργίας για καθαρισμό ή περιμένοντας να τεθεί και πάλι σε λειτουργία για πάντα. Έτσι το baghouse πρέπει να σχηματιστεί, έτσι ώστε τέσσερα από αυτά λειτουργώντας μαζί να παρέχουν ικανοποιητική αποδοτικότητα για την αναμενόμενη ροή αερίου.

Ο άλλος τύπος θαλάμου σακκών ονομάζεται σχέδιο ανατάραξης – ξεφουσκώματος και φαίνεται στο σχ.5.14. Η ροή κατά την διάρκεια του φιλτραρισμού κινείται προς τα έσω μέσα από τις σακούλες, που είναι όμοιες μ' εκείνες στο σχ. 5.13 εκτός από τα άκρα που είναι

ανοικτά στο επάνω μέρος. Οι σάκοι υποστηρίζονται με εσωτερικά καλώδια για να μην καταρρέουν. Οι σάκοι καθαρίζονται από διακοπτόμενες αναπηδήσεις συμπιεσμένου αέρα που ρέει στο σάκκο καταστρέφοντας το στρώμα.

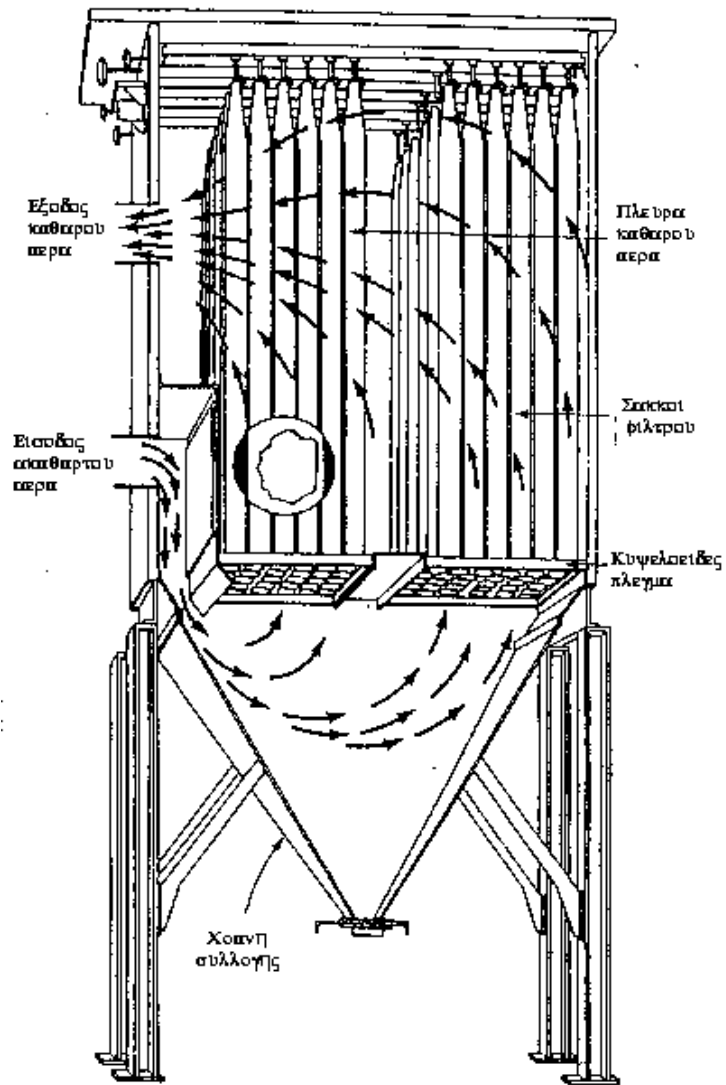
Παράδειγμα 5.16:

Ο θάλαμος σάκκων στο NPS έχει 6 διαμερίσματα καθένα με 112 σάκους που είναι 8 ίντσες διαμ. και 22 πόδια μήκος, σε μια ενεργή έκταση 46ft^2 ανά σάκκο. Το αέριο που καθαρίζεται έχει ροή των $86.240\text{ft}^3/\text{min}$. Η πίεση πέφτει σ' ένα καθαρό θάλαμο σάκκων και υπολογίζεται να είναι 0.5 ίντσες H_2O . Οι σάκοι λειτουργούν μέχρι όπου η πτώση πίεσης είναι 3 ίντσες H_2O απ' όπου αφαιρούνται και καθαρίζονται. Πρέπει να καθαρίζεται μια φορά την ώρα. Το εισερχόμενο αέριο έχει φόρτιση μορίου των $13\text{gram}/\text{ft}^3$. Η συλλογή φτάνει στο 99% και η κρούστα στο φίλτρο φτάνει στο 50% στερεών. Υπολογίστε το πάχος της κρούστας όταν αφαιρούνται οι σάκοι για να καθαριστούν. Τι είναι διαπερατότητα k για το στρώμα;

Πρώτα υπολογίζουμε τη μέση ταχύτητα που έρχεται στην επιφάνεια του φίλτρου V_s :

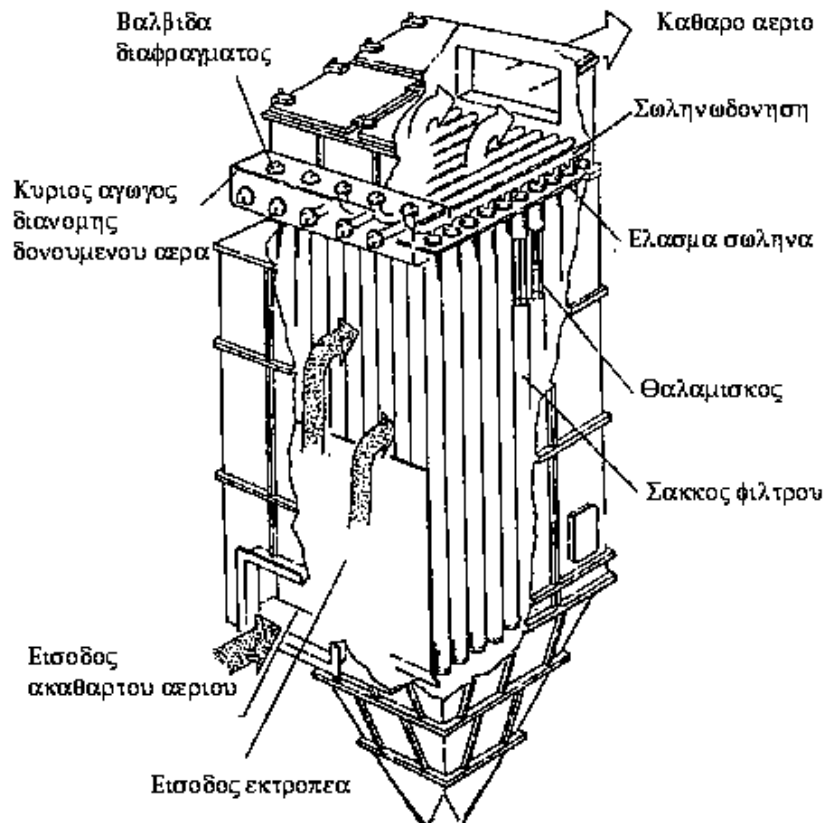
$$V_s = \frac{Q}{A} = \frac{86,240\text{ft}^3/\text{min}}{(5)(112)(46\text{ft}^2)} = 3.35 \frac{\text{ft}}{\text{min}} = 1.02 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Χρησιμοποιούμε το νούμερο 5 διότι ένα από τα 6 διαμερίσματα πάντοτε είναι εκτός λειτουργίας όταν γίνετε ο καθαρισμός. Στην βιβλιογραφία για το baghouse, το V_s αναφέρεται ως air-to-cloth ratio ή ταχύτητα επιφανείας. Η διάσταση (ft/min) σταδιακά εγκαταλείπεται και έτσι αυτό το φίλτρο θα λέγαμε ότι έχει έναν air-to-cloth λόγο του 3.35 σε χώρες που χρησιμοποιούν Αγγλικές μονάδες.



Φιγούρα 5.13:

Τυπικός βιομηχανικός θάλαμος σάκκων του σχεδίου ανατάραξης - ξεφουσκώματος



Φιγούρα 5.14:

Τυπικός βιομηχανικός θάλαμος σάκκων σχεδίου δόνησης - αεριοπροώθησης.

Στους μηχανισμούς με υγρό αυτό θα λεγόταν επιφανειακή ταχύτητα για να δειχθεί ότι είναι ολική ογκομετρική ροή χαρισμένη από την περιοχή του φίλτρου. Είναι αξριβώς ίδια όπως μέσα στην επίστρωση-φίλτρο. Η ταχύτητα εντός των πόρων του φίλτρου αποκαλείται *interstitial velocity* για να ξεχωρίζει από την *superficial velocity*. Είναι μεγαλύτερη διότι το Q είναι το ίδιο και για τα δυο, αλλά το A είναι λιγότερο εσωτερικά της κρούστας. Γενικώς είναι γνωστή η *superficial velocity* επειδή η προεκβαλλόμενη περιοχή της επίστρωσης είναι γνωστή

η interstitial velocity όμως δεν είναι γνωστή, γιατί η προεκβαλλόμενη interstitial περιοχή δεν είναι γνωστή. Εάν το φίλτρο παραμείνει σε υπηρεσία για 1 ώρα πριν τον καθαρισμό, ένας σάκος ενός τετραγωνικού ποδιού θα συλλέξει τα κάτωθι ποσοστά μορίων:

$$\frac{m}{A} = cV_s n t = \left(13 \frac{gr}{ft^3}\right) \left(3.35 \frac{ft}{min}\right) (0.99) \left(\frac{60 min}{h}\right) \left(\frac{lbm}{7000 gr}\right) = 0.369 \frac{lbm}{ft^2} = 1.80 \frac{kg}{m^2}$$

Το πάχος της κρούστας που περισυλλέχτηκε σε 1 ώρα είναι:

$$\text{Πάχος } V = \frac{m/A}{r} = \frac{0.369 lbm/ft^2}{(2g/cm^3)(0.5)(62.4 lbm \cdot cm^3 / ft^3 \cdot g)} = 5.9 \times 10^{-3} ft = 0.071 in. = 1.8 mm$$

Παίρνοντας $\alpha = 0$ μπορούμε να λύσουμε την εξίσωση (5.35) για K και βρίσκουμε:

$$k = \frac{V_s \Delta x m}{(-\Delta P)} = \frac{(3.35 ft/min)(0.71 ft/12)(0.018 cp)(2.09 \times 10^{-5} lbf \cdot s / ft^2 \cdot cp)(min/60s)}{(3 in.H_2O)(5.202 lbf / ft^2 \cdot in.H_2O)} = 7.96 \times 10^{-12} ft^2 = 7.40 \times 10^{-13} m^2$$

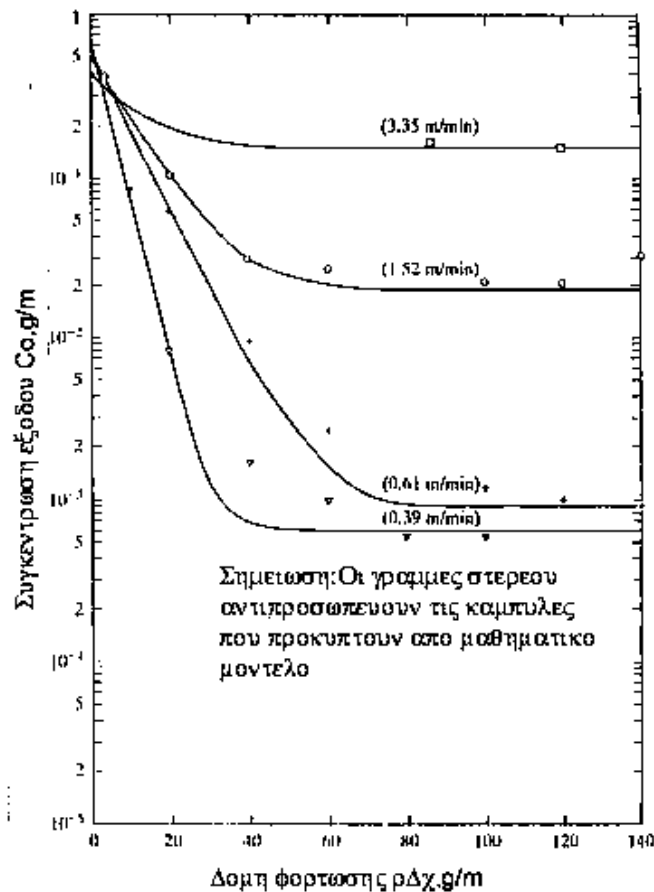
Αυτό οικείο με τη ροή των υγρών στα μέσα των πόρων, μπορούμε να το συγκρίνουμε με τις τιμές που βρίσκονται στη ροή των λαδιών υπογείου μετατρέποντάς το στη συμβατική μονάδα της διαπερατότητας.

$$k = (7.96 \times 10^{-12} ft^2) \left(\frac{darcy}{1.06 \times 10^{-11} ft^2} \right) = 0.75 darcies$$

Η υπολογισμένη διαπερατότητα αυτού του υλικού είναι σχεδόν ίδια με αυτή μιας αμμόπετρας με υψηλή διαπερατότητα. Οι ταχύτητες της ροής σε τέτοια φίλτρα είναι πολύ χαμηλές, τυπικά λίγα πόδια για κάθε λεπτό:

Αντίθετα σε συσκευές όπως οι κυκλώνες η ροή είναι περίπου 60 πόδια το δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα του ανέμου ίση με την τυποκή ροή μέσα σε ένα τέτοιο φίλτρο είναι τόσο χαμηλή που κάποιος εάν στεκόταν σ' αυτή δεν θα μπορούσε να πει προς ποια κατεύθυνση φυσάει και μάλιστα θα ανέφερε ότι δεν φυσούσε καθόλου. Αυτός ο υπολογισμός δείχνει ότι η συγκεντρωμένη επίστρωση έχει πάχος περίπου 0.07 ίντσες, που είναι η μέση αύξηση κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Ωστόσο είναι δύσκολο ή αδύνατο να καθοριστούν οι σάκκοι ολοκληρωτικά και σε μια βιομηχανική εγκατάσταση κατά τη λειτουργία της είναι συνηθισμένο το μέσο πάχος της επίστρωσης στους σάκκους να είναι 10 φορές αυτό το ποσό. Κατά τη διάρκεια του καθαρισμού σε κάθε κύκλο κάποιο μέρος της επίστρωσης χάνεται ολοκληρωτικά αφήνοντας κενά διαστήματα πάνω στο σάκκο και το μεγαλύτερο μέρος της επίστρωσης δεν χάνεται τελικά. Εάν κάποιος εξετάσει έναν σάκκο μετά τον καθαρισμό, θα έβλεπε ότι τα εννέα δέκατα της επιφάνειας είναι καλυμμένα με επίστρωση πάχους 0.7 ιντσών και το ένα δέκατο της επιφάνειας του σάκκου κενό. Οι χειριστές θα ήθελαν να καθαριστούν οι σάκκοι πιο προσεκτικά. Πιο αυστηρές όμως διαδικασίες καθαρισμού τείνουν να φθείρουν τους σάκκους πιο γρήγορα και να οδηγήσουν σε πιο συχνές διακοπές για συντήρηση. Οι περισσότεροι χειριστές έχουν χρησιμοποιήσει μέσα καθαριστικά που οδηγούν σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για τους σάκκους και σε χαμηλό κόστος συντήρησης, αλλά σε μεγαλύτερη πτώση της πίεσης που θα ήταν αναγκαία εάν η επίστρωση αποβάλλονταν από το σάκκο σε κάθε κύκλο καθαρισμού. Ένα από τα πλεονεκτήματα του pulse-jet design είναι ότι καθαρίζει τους σάκκους πιο προσεκτικά, με κόστος μια πιο μικρή διάρκεια ζωής για τον σάκκο. Το σχέδιο 5.15 μας δίνει κάποια αποτελέσματα από διάφορα τεστ αποτελεσματικότητας συλλεκτικότητας γι' αυτού του είδους φίλτρα. Οι μεμονωμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν διαφορετικές αξίες από την υπερφυσική

ταχύτητα. Θεωρούμε την πρώτη καμπύλη για 0.39 m/min. Βλέπουμε ότι σ' ένα καθαρό ύφασμα η εξωτερική εστίαση είναι ψηλή και σχεδόν ισότιμη της εσωτερικής εστίασης περίπου 0.8g/m^3 . Καθώς η κρούστα μεγαλώνει η εξωτερική εστίαση πέφτει και τελικά σταθεροποιείται στην τιμή περίπου του 0.001 φορές της εσωτερικής εστίασης (π.χ. $n = 99.9\%$). Εφόσον η κρούστα έχει κανονικά καθιερωθεί, η αποτελεσματικότητα του φιλτραρισμού παραμένει συνεχής. Γιατί άραγε τα μόρια να προσπερνάνε; Η απλή εικόνα που παρουσιάστηκε προηγουμένως υποδήλωνε ολοκληρωτικό εγκλωβισμό των μορίων. Εν συνεχεία συγκρίνοντας τις 4 καμπύλες σ' αυτή την φιγούρα, βλέπουμε ότι εάν η υπερφυσική ταχύτητα αυξάνεται, η αποδοτικότητα πέφτει για μια υπερφυσική ταχύτητα των 3.35m/min η εξωτερική συγκέντρωση είναι 20% της εσωτερικής συγκέντρωσης. Τα μόρια που περνούν μέσα από τέτοια φίλτρα δεν προσπερνάνε την κρούστα αλλά από τις τρύπες που έχουν γίνει στο καρφίτσωμα και που εκεί η κρούστα δεν μπορεί να πιαστεί. Το σχέδιο 5.16 δείχνει ακριβώς αυτό που λέμε τώρα. Είναι προφανώς 100μ στη διάμετρο πολύ μεγαλύτερα για ένα απλό μόριο να μπλοκάρει επειδή σπάνια υπάρχουν στη ροή μ' όμοια διαμέτρου 100-μ. Όσο μεγαλύτερη η υπερφυσική ταχύτητα όλο και περισσότερες τρύπες σχηματίζονται και συνεπώς μεγαλύτερου μεγέθους μόρια θα περνούν μέσα από τις τρύπες. Το μέγεθος της διανομής του μορίου από τις τρύπες είναι πρακτικά όμοιο με το μέγεθος της διανομής του μορίου στο αέριο που εισέρχεται στο φίλτρο. Η παρατήρηση είναι πιθανή μόνο εάν τα μόρια ήταν μέρος της ροής του αερίου που πέρασε μέσα από το φίλτρο.



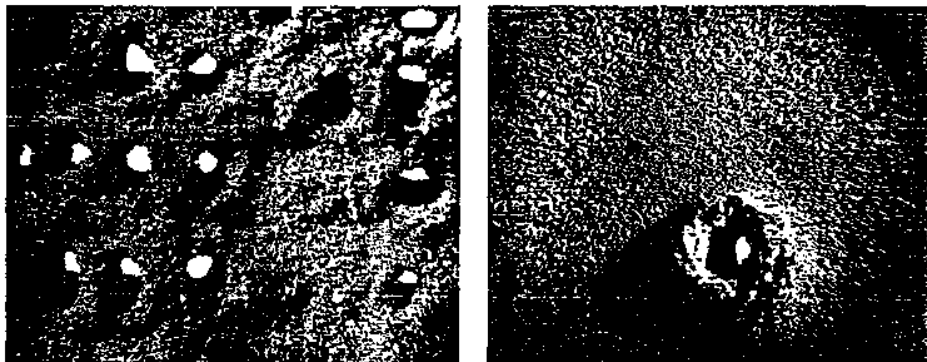
Φιγούρα 5.15:

Επίδραση της δομής φόρτωσης (ποσότητα συλλεγόμενης τέφρας ανά μονάδα περιοχής) και της επιφανειακής ταχύτητας στην έξοδο του φίλτρου συγκέντρωσης. Σε όλες τις δοκιμές, η συγκέντρωση εισόδου ήταν περίπου 0.8 g/m^3 .

Παράδειγμα 5.17:

Υπολογίστε την ταχύτητα μέσα από την τρύπα σ' ένα φίλτρο με πτώση πίεσης 3 inches νερού. Αν υπολογίσουμε ότι αυτή η πτώση πίεσης αντιστοιχεί στην καμπύλη για 0.39 m/min του σχ. 5.15 όπου η σταθερή εισχώρηση σ' αυτή την ταχύτητα είναι 0.001 , και ότι η

τρύπα έχει διάμετρο 100μ, υπολόγισε πόσες τρύπες σε κάθε μονάδα υπάρχουν στην κρούστα.



Φιγούρα 5.16:

Φωτογραφίες διαρροών οπών σε μέγεθος κεφαλιού καρφίτσας σε επιφανειακά φίλτρα με την επιφάνεια του φίλτρου να φωτίζεται από μέσα: (α) Διαρροή οπής κεφαλιού καρφίτσας που δείχνει χαρακτηριστικό ύψωμα (20 x μεγέθυνση) και (β) μαζικές διαρροές οπής κεφαλιού καρφίτσας με μονονηματικό διάφραγμα, χωρίς χαλαρές ίνες. Τα πιο πολλά υφάσματα φίλτρου για την μόλυνση του αέρα κατασκευάζονται από συνθετικά μίγματα με χαλαρές άκρες, που καθιερώνουν το επίστρωμα του φίλτρου. Αυτό οδηγεί σε λιγότερες μικροσκοπικές οπές και αρκετά καλύτερη αποδοτικότητα συλλογής που κάνει το μονονηματικό ύφασμα που φαίνεται δεξιά, το οποίο δεν έχει τέτοιου είδους χαλαρές άκρες.

Αν και η τρύπα είναι μικρή η ροή μέσα από αυτή περιγράφεται καλύτερα από του Bernoulli την εξίσωση, όπου βρίσκουμε τη μέση ταχύτητα ως:

$$V = C \left(\frac{2\Delta P}{r} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.61 \left[\frac{2(3in.H_2O)}{1.20kg/m^3} \left(\frac{249Pa}{in.H_2O} \right) \left(\frac{kg}{Pa \cdot m \cdot s^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 21.5 \frac{m}{s} = 70.6 \frac{ft}{s}$$

Εδώ η (έκταση. ταχύτητα) της τρύπας πρέπει να είναι 0.001 φορές την (έκταση. ταχύτητα) του υπολοίπου της κρούστας.

Οπότε:

$$\frac{A_{pinholes}}{A_{cake}} = (0.001) \frac{V_s}{V_{pinholes}} = \frac{00.001(0.39m / \text{min})}{21.5m / s(60s / \text{min})} = 3.0 \times 10^{-7} \frac{m^2}{m^2}$$

Κάθε τρύπα έχει $A = (100 \times 10^{-6} m)^2 (\rho / 4) = 7.85 \times 10^{-9} m^2$ και έτσι πρέπει να υπάρχει:

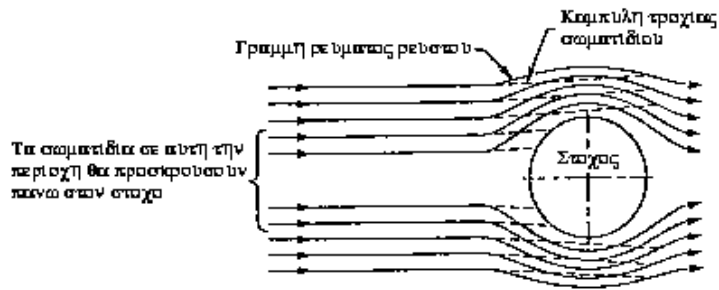
$$\frac{(3.0 \times 10^{-7})}{(7.85 \times 10^{-9} m^2)} = 38 \frac{pinholes}{m^2}$$

Η υπολογίσιμη ταχύτητα μέσα από την τρύπα είναι $(21.6 \times 1060) / 0.39 = 3300$ φορές την ταχύτητα μέσα από την κρούστα. Η περιοχή της τρύπας δεν πρέπει να είναι μεγάλη για να μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος της ροής: Για τις υπολογισμένες συνθήκες κάθε τρύπα περικυκλώνεται από μια περιοχή των $0.026 m^2 (= m^2 / 38)$ που θα μπορούσε να είναι τετράγωνο των $0.16 m$ (6.4 ίντσες) στο ένα μέρος. Μέχρις ότου το φίλτρο φωτιστεί από κάτω (όπως στη φιγούρα 5.16) κάποιος δεν θα μπορούσε να δει τον μικρό αριθμό των πολύ μικρών τρυπών. Εάν επιφανειακά φίλτρα ή φίλτρα κρούστας τεθούν σε λειτουργία σε χαμηλές υπερφυσικές ταχύτητες μπορούν να έχουν μεγάλη αποδοτικότητα, και γενικώς συλλέγουν λεπτά μόρια όπως και μεγαλύτερα εξίσου καλά. Γι' αυτούς τους δύο λόγους χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά εργοστάσια μιας και οι κανονισμοί περί αποβολής μορίων είναι όλο και πιο αυστηροί κάνοντας

απαραίτητο το να συλλέξουν μόρια μεγέθους 0.1 – 0.5μ που είναι δύσκολο για ένα ESP να τα συλλέξει.

5.2.2 Φίλτρα βάθους.

Άλλη μια σειρά φίλτρων ευρέως χρησιμοποιημένα στον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα που δεν σχηματίζουν επιφανειακή κρούστα, αλλά συλλέγουν μόρια σ' όλο το φίλτρο λέγονται depth filters, σε αντίθεση με τα επιφανειακά φίλτρα για τα οποία συζητήσαμε στην ενότητα 5.2.1. Παραδείγματα με τα οποία ο μαθητής μπορεί να είναι εξοικειωμένος είναι για παράδειγμα τα φίλτρα τσιγάρων και τα φίλτρα σε πολλούς σπιτικούς φούρνους. Και στις δύο περιπτώσεις ένας σωρός από ίνες συλλέγουν μόρια καθώς το αέριο περνά μέσα από αυτό. Στο σχ 5.17 βλέπουμε μόρια να οδηγούνται προς τον στόχο όπου μπορούμε να σκεφτούμε σαν κυλινδρικό ύφασμα σε φίλτρο. Στο σχήμα 5.17 κοιτάμε κατά μήκος μιας ίνας. Η ροή του αερίου πρέπει να κατευθυνθεί γύρω από τη ίνα όπως ο άνεμος κατευθύνεται γύρω από ένα κτίριο ή όπως η ροή ενός ποταμού κατευθύνεται γύρω από έναν βράχο που βρίσκεται στη μέση. Παρ' όλα αυτά τα μόρια τα οποία είναι πολύ πυκνότερα (2000 φορές) απ' ότι το αέριο εισέρχονται και συνεχίζουν να προχωρούν σε ευθεία. Έτσι ώστε μερικά από αυτά να χτυπούν τον στόχο τους απ' ότι να περιστρέφονται γύρω από αυτό.



Φιγούρα 5.17:

Ροή αερίου και σωματιδίων γύρω από έναν κύλινδρο.

Για καθοριστεί εάν ένα μόριο κτυπά πάνω στον στόχο ή ρέει γύρω από αυτόν, μπορούμε να υπολογίσουμε το μονοπάτι του χρησιμοποιώντας τα γνωστά πεδία ροής για τη ροή γύρω από εμπόδια, υπολογίζοντας τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του μορίου και του αερίου χρησιμοποιώντας τα σχετικά ισοδύναμα από το νόμο του Stokes. Αυτό το έργο είχε πρώτα επιχειρηθεί από τους Langmuir και Blodgett, οι οποίοι εργάζονταν στο πρόβλημα της διαμόρφωσης του πάγου στην άκρη των φτερών του αεροπλάνου. Στο σχέδιο 5.17 μπορούμε να σκεφτούμε με τον στόχο σαν ένα φτερού αεροπλάνου που κινείται προς τα αριστερά μέσα σε αέρα και τα μόρια καθώς το νερό πέφτει σε σύννεφο. Εάν έρθουν σε επαφή με το φτερό μπορεί να προσκολληθούν και να παγώσουν προκαλώντας προβλήματα. Η μαθηματική λύση των Langmuir και Blodgett είναι πολύ μεγάλη για να περιληφθεί εδώ, αλλά το σχέδιο 5.18 το συνοψίζει για τα μικρά μόρια τα οποία μας ενδιαφέρουν στην εργασία για την μόλυνση του αέρα. Για να δούμε πως το απέκτησαν, σκεφτόμαστε ένα μοναδικό μόριο στο περιστρεφόμενο μέρος του αερίου όπως φαίνεται στο σχέδιο 5.19. Το μόριο εάν κινηθεί τελείως ευθεία θα βρει τον στόχο του. Η

δύναμη που το κινεί προς τα επάνω όπως δίνετε στο σχεδιάγραμμα από τον Stokes. Παρ' όλα αυτά η κατάλληλη ταχύτητα για να χρησιμοποιηθεί στο νόμο του Stokes δεν είναι η ολική ταχύτητα αλλά μάλλον η διαφορά του y – κατευθυνόμενης ταχύτητας ανάμεσα στο μόριο και στην ροή αερίου. Γενικώς η ροή αερίου θα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα απ' ότι το μόριο και έτσι έχουμε:

$$F_{y-drag} = 3\pi\eta D(V_{y-gas} - V_{y-particle}) \quad (5.41)$$

Η δύναμη αντίστασης του μορίου είναι:

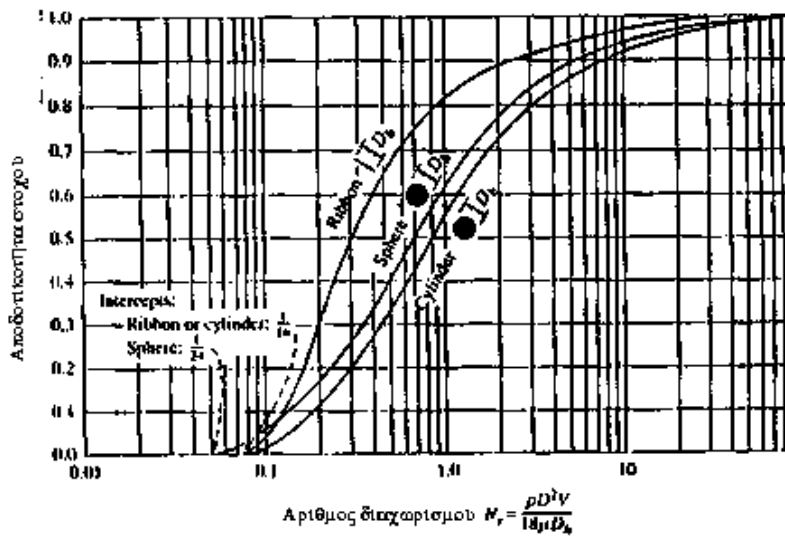
$$F_{y-inertial} = ma = \frac{\rho}{6} rD^3 \frac{dV_{y-particle}}{dt} \quad (5.42)$$

Εάν δεν υπάρχουν ηλεκτροστατικές, μαγνητικές ή άλλες δυνάμεις τότε όλα αυτά είναι όμοια και αντίθετα, και έτσι μπορούμε να λύσουμε ως προς την επιτάχυνση του μορίου στην y - κατεύθυνση.

$$\frac{dV_{y-particle}}{dt} = \frac{18\eta(V_{y-gas} - V_{y-particle})}{rD^2} \quad (5.43)$$

Μετά τον διαχωρισμό μπορούμε να έχουμε:

$$\int \frac{dV_{y-particle}}{(V_{y-gas} - V_{y-particle})} = \frac{18\eta\Delta t}{rD^2} \quad (5.44)$$

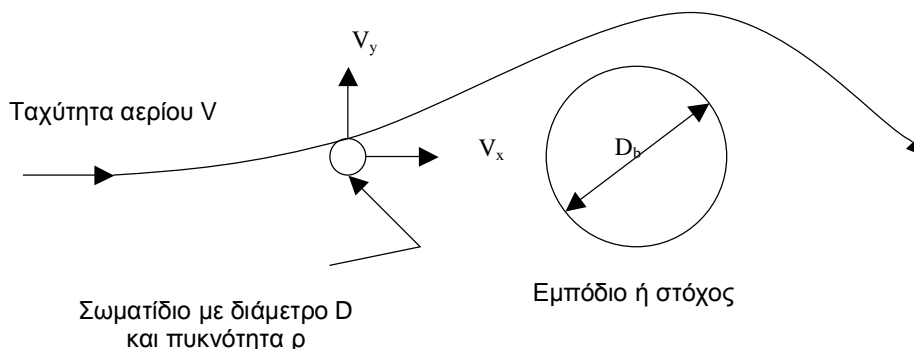


Φιγούρα 5.18:

Η αποδοτικότητα του στόχου σαν συνάρτηση του αριθμού διαχωρισμού για κυλίνδρους, ταινιών και σφαιρών.

Μπορούμε να το τροποποιήσουμε ακόμη περισσότερο λέγοντας ότι το Δt στα δεξιά είναι ο χρόνος που διατίθεται για τις y -κατευθυνόμενες δυνάμεις ώστε να κινήσουν το μόριο γύρω από τον στόχο που πρέπει να είναι ανάλογος προς το χρόνο που χρειάζεται το αέριο για να πάει γύρω από τον προηγούμενο στόχο. Αυτή την φορά $\Delta t = D_b/V$, όπου D_b διάμετρος και έτσι αντικαθιστούμε στην εξίσωση 5.44 και βρίσκουμε:

$$\int_{y_1}^{y_2} \frac{dV_{y\text{-particle}}}{(V_{y\text{-gas}} - V_{y\text{-particle}})} \propto \frac{18mD_b}{rD^2V} = \frac{1}{N_s} \quad (5.45)$$



Φιγούρα 5.19:

Μονοπάτια αερίου και σωματιδίων που χρησιμοποιούνται προς αξιοποίηση.

Το όριο στα δεξιά είναι $(1/N_s)$ όπου N_s είναι ο αριθμός διαχωρισμού που εμφανίζεται στον οριζόντιο άξονα στο σχέδιο 5.18. Αυτό είναι ίσο με τη διάμετρο του ορίου χωρισμένο στα δύο από την αντίσταση του Stokes. Κάποιοι συγγραφείς ονομάζουν το N_s ως παράμετρο συμπίεσης ή παράμετρο αδράνειας. Στην εξίσωση (5.45) μπορούμε να δούμε, εάν ο ακέραιος στα αριστερά είναι ένας μεγάλος αριθμός, τότε υπάρχει αρκετός χρόνος και δύναμη για τη ροή να κινήσει το μόριο γύρω από τον στόχο. Έτσι με μια υψηλή τιμή του ακεραίου (μια χαμηλή τιμή του N_s), υπάρχει πιθανότητα ότι το μόριο θα κινηθεί γύρω από το εμπόδιο και η αποτελεσματικότητα του στόχου θα μειωθεί. Αντίστροφα, εάν ο ακέραιος είναι μικρός (μια μεγάλη τιμή του N_s) τότε ο χρόνος και η δύναμη δεν είναι αρκετές ώστε να κινήσουν το μόριο γύρω από το στόχο και τα περισσότερα μόρια θα έρθουν σε επαφή με το στόχο. Η αποτελεσματικότητα στόχου η_t στο σχ.5.18 αντιπροσωπεύει τον αριθμό μορίων που έρχονται σ' επαφή με τον στόχο. Για να σχηματιστεί σχ. 5.18 Langmuir και Blodgett συμπλήρωσαν την χωρισμένη στα δύο από

τον αριθμό που θα είχαν έρθει σε επαφή, εάν όλα τα μόρια είχαν κινηθεί ακριβώς ευθεία και κανένα δεν είχε καταυθυνθεί γύρω από το στόχο από τη ροή του αερίου εξίσωση (5.45) χρησιμοποιώντας την γνωστή ροή υγρών και πέρνοντας υπόψη τα πικίλα μονοπάτια των μορίων. Για παράδειγμα σε έναν N_s του 0.8 για κυλινδρικό στόχο η αποτελεσματικότητα στόχου στο σχ. 5.18 είναι περίπου 0.5. Αυτό σημαίνει ότι τα μόρια που θα εκτοξευτούν σε τέλεια ευθεία θα χτυπούσαν κατά 50% τον στόχο αλλά εξωτερικά και δεν θα ερχόντουσαν σε τέλεια επαφή. Έχουμε παρουσιάσει τα όρια στην εξίσωση (5.45) ως y_1 και y_2 χωρίς καμία εξήγηση. Στην εργασία Langmuir και Blodgett αυτές οι τιμές υπολογίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για να φτιαχτεί σχ. 5.18.

Παράδειγμα 5.18:

Ποιο θα ήταν το ποσοστό συλλεκτικότητας μορίων σ' ένα μονοκυλινδρικό fiber 10μ σε διάμετρο τοποθετούμενο κάθετα στην ροή αερίου που κινείται με 1m/s. Το αέριο περιέχει μόρια 1μ διαμέτρου και η μοριακή πυκνωση είναι 1mg/m³.

$$\text{Μέγιστο δυνατό ποσοστό} = VD_b c = \left(1 \frac{m}{s}\right) (10^{-5} m) (10^{-3} g / m^{-3}) = 10^{-8} \frac{g}{m \cdot s} = 6.7 \times 10^{-12} \frac{lbm}{ft \cdot s}$$

Εάν γίνει ολική συλλογή θα έχουμε 10⁻⁸ g/s για κάθε μέτρο fiber μήκους. Το πραγματικό ποσό που συλλέγεται θα είναι κάποιες φορές η αποτελεσματικότητα του στόχου. Ο διαχωριστικός αριθμός είναι:

$$N_s = \frac{(2000 kg / m^3)(10^{-6} m)^2 (1 m / s)}{(18)(1.8 \times 10^{-5} kg / m \cdot s)(10^{-5} m)} = 0.617$$

Από το σχέδιο 5.18 βλέπουμε ότι για κυλίνδρους αυτή η τιμή N_s αντιστοιχεί στην αποτελεσματικότητα στόχου περίπου 0.42, έτσι αναμένεται να συλλέξουμε περίπου $0.42 \times 10^{-8} \text{ g/m} \cdot \text{s}$.

Παράδειγμα 5.19:

Ένα φίλτρο αποτελείται από μια σειρά παράλληλων ινών κατά μήκος της ροής, όπως περιγράφηκε στο παράδειγμα 5.18 με την center-to-center απομάκρυνση των ινών ίση με πέντε διαμέτρους. Ποια θα είναι η αποτελεσματικότητα της συλλογής μορίων; Υπολόγισε ότι οι ίνες είναι αρκετά μακριά έτσι που κάθε μια συμπεριφέρεται σαν να ήταν ένα ατελείωτο υγρό. Γνωρίζουμε ότι 42% των μορίων ούτως ή άλλως συλλέγονται εφόσον ταξιδεύουν απευθείας προς τις ίνες. Εάν οι ίνες έχουν μια απόσταση μεταξύ τους τότε το άνοιγμα είναι 80% $[(5-1)/5]$ και η μπλοκαρισμένη περιοχή είναι 20% $(1/5)$. Η αποτελεσματικότητα, όπως έχει περιγραφεί, αναφέρεται μόνο στα μόρια που κινούνται ενάντια στην μπλοκαρισμένη περιοχή κι έτσι η ολική αποτελεσματικότητα της συλλογής είναι:

$$\begin{aligned} \text{Αποδοτικότητα συλλογής} &= (\text{αποδοτικότητα στόχου})(\text{ποσοστό ελεγχόμενης}) \\ &= 0.42 \times 0.2 = 0.084 = 8.4\% . \end{aligned}$$

Παράδειγμα 5.20:

Ένα φίλτρο αποτελείται από 100 σειρές παράλληλων ινών όπως περιγράφεται στο παράδειγμα 5.19. Έχουν αρκετή απόσταση μεταξύ τους, η δε ροή είναι ομοιόμορφη ανάμεσα στις σειρές. Ποια είναι η συλλεκτική αποδοτικότητα σ' όλο το φίλτρο;

Κι εδώ υπολογίζουμε:

$$n_{overall} = 1 - p_{overall} = 1 - (p_{individual})^n = 1 - (1 - 0.084)^{100} = 0.9998$$

Μετά απ' αυτά τα τρία παραδείγματα βλέπουμε την ιδανικοποιημένη μορφή των φίλτρων. Τα περισσότερα τέτοια φίλτρα δεν έχουν μια κανονική σειρά παράλληλων ινών. Τα μεσαία φίλτρα αποτελούνται από ένα "κουβάρι" ινών σε έναν τυχαίο προσανατολισμό, φτιάχνοντας ένα παχύ στρώμα. Το στρώμα περιβάλλεται με το υλικό που χρησιμοποιείται για να φτιαχτούν καπέλα κ.ά. (Ο μαθής θα πρέπει να εξετάσει ένα υλικό για να δει πόσο διαφορετικό είναι από ένα μάλλινο ύφασμα). Η ιδανικοποίηση ότι οι ατομικές ίνες δεν αλληλεπιδρούν είναι καθαρά ένας υπολογισμός. Αλλά αυτά τα στρώματα ινών δεν λειτουργούν ολοκληρωτικά με συμπίεση μερικές φορές καλείται σύγκρουση. Όπως υπολογίστηκε εδώ. Τα μεμονωμένα μόρια έχουν πολλές ευκαιρίες να έρθουν σ' επαφή με ένα μεμονωμένο στέλεχος ίνας στην διαδρομή τους, και βεβαίως η πιθανότητα να εγκλωβιστούν είναι εμφανέστατη στο σχ. 5.18. Τέτοια φίλτρα συχνά χρησιμοποιούνται εκεί όπου τα μόρια που πρόκειται να πιαστούν είναι σταγόνες υγρών που είναι μέτρια παχύρρευστες. Τέτοιες σταγόνες προσκολλώνται στις ίνες και ύστερα φεύγουν σαν μεγαλύτερες σταγόνες αφήνοντας τις ίνες έτοιμες να πιάσουν κι άλλες σταγόνες. Εάν τα μόρια ήταν στερεά, τότε αυτός ο τύπος του φίλτρου θα απαιτούσε συχνό καθαρισμό. Στην εφαρμογή δεν χρειάζεται. Τα φίλτρα βυθού – βάθους χρησιμοποιούνται επίσης για την συλλογή υγρών σταγονιδίων, sulfuric acid mist που παράγεται σε εργοστάσια θειούχων οξέων. Παρόμοιες συσκευές χρησιμοποιούνται σε πολλές συσκευές αερίων-υγρών για να πιάσουν τις σταγόνες. Κάποια εταιρεία χρησιμοποιεί το όνομα Demister. Αυτό το είδος συσκευής χρησιμοποιείται ακόμα για τη μετακίνηση στερεών

μορίων από αέρια που περιέχουν λίγα από αυτά, πχ. Για τον καθαρισμό των βιομηχανικών αιθουσών ή των χειρουργείων στα νοσοκομεία ή για προσωπική προστασία στις μάσκες για τη σκόνη. Τα φίλτρα πετάγονται όταν έχουν συλλέξει αρκετά μόρια όπου η πτώση πίεσης αρχίζει να αυξάνεται. Συνήθως σ' αυτές τις περιπτώσεις τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται ονομάζονται υψηλής αποδοτικότητας φίλτρα αέρα (HEAF) ή τέλεια φίλτρα. Τα φίλτρα στα νοικοκυριά στα καλοριφέρ λειτουργούν κατ' αυτόν τον τρόπο. Τα φίλτρα βυθού συλλέγουν μόρια με συμπίεση. Κάποιοι παλιότεροι τύποι των συγκεντρωτήρων μορίων χρησιμοποιούσαν επίσης τη συμπίεση για να πιάσουν μόρια σε στερεό τοίχωμα, αλλά τώρα χρησιμοποιούνται σπάνια. Κάποιοι size-specific αναλυτές μορίων χρησιμοποιούν τη συμπίεση σε επιφάνειες συγκέντρωσης για να συλλέξουν μόρια συγκεκριμένου μεγέθους. Στους υγρούς καθαριστές, ένας από τους βασικούς μηχανισμούς είναι η σύγκρουση μεταξύ ενός μορίου κι ενός υγρού σε κίνηση (συνήθως νερό). Θα έχουμε περαιτέρω χρήση του σχεδίου 5.18 όταν θα μιλήσουμε για καθαριστές. Η κίνηση Brownian ή η διάχυση είναι ένας δεύτερος μηχανισμός για την συλλογή μορίων σ' αυτού του είδους φίλτρα. Εάν ένα μόριο είναι μεγάλο, τότε σε μικρά διαστήματα χρόνου θα πραγματοποιήσει πολλές συγκρούσεις με τα μόρια του αερίου καθώς το κτυπούν από όλες τις πλευρές και η τελική δύναμη του δικτύου θα είναι αρκετά πιο μικρή σχετικά με τον όγκο του μορίου. Έτσι δεν βλέπουμε σπίτια ή μάρμαρα να μετακινούνται από την κίνηση Brownian. Αν το μόριο είναι αρκετά μικρό, έτσι ώστε να περιμένει λίγες συγκρούσεις το δευτερόλεπτο και η αδράνειά του είναι μικρή, επειδή έχει μικρό μέγεθος, τότε η δύναμη μιας μόνο σύγκρουσης είναι αρκετή για να το κάνει να μετακινηθεί. Οι επόμενες συγκρούσεις των οποίων οι διευθύνσεις είναι τυχαίες, θα το μετακινήσουν προς άλλες κατευθύνσεις, έτσι που το time-series θα είναι μια σειρά από μικρά πηδήματα προς μια κατεύθυνση κα

ύστερα προς μια άλλη. Κάποιος πρέπει να χρησιμοποιήσει μικροσκόπιο για να παρατηρήσει τέτοια συμπεριφορά επειδή το μέγεθος του μορίου στο οποίο αυτό γίνεται σημαντικό, είναι πολύ μικρό για τα μάτια μας να το παρατηρήσουν. Η Brownian κίνηση δεν προκαλεί αλλαγές όπου και αν βρίσκεται. Όπως πολλά μόρια κινούνται προς μία κατεύθυνση, έτσι κινούνται και προς μια άλλη. Εάν στην συγκέντρωση δεν υπάρξει ομοιομορφία τότε η κίνηση Brownian τείνει να ισοσκελίσει την συγκέντρωση. Μ' αυτό τον τρόπο τα μόρια κινούνται με διάχυση όπως τα μόρια των αερίων όταν κινούνται ανομοιομορφα. Γνωρίζουμε λοιπόν από την θεωρία της διάχυσης ότι:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (5.46)$$

όπου D =διάδοση (φυσιολογικές μονάδες m^2/s)

c =συγκέντρωση – συμπύκνωση

η εξίσωση (5.46) ελαττώνει την διάδοση βάσει του νόμου του Fick 's.

$$\text{Ροή} = \frac{\text{ποσοστό διαχεόμενης ροής}}{\text{περιοχή μονάδας}} = -D \frac{dc}{dx} \quad (5.47)$$

Για σφαιρικά μόρια που αιωρούνται σε ένα αέριο έχουμε για το D την κινητική θεωρία αερίων όπως:

$$D = \frac{kTC}{3\pi\eta D} \quad (5.48)$$

όπου K =σταθερά Boltzmann

C = Cunningham ορθολογιστικός παράγοντας

Παράδειγμα 5.21:

Υπολογίστε την διάδοση 1 – μ διαμέτρου μορίου στον αέρα στους 20° C και 1 atm.

Λαμβάνοντας υπόψιν τον Cunningham μπορούμε να δούμε ότι:

$$D = \frac{(1.38 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2 \cdot \text{K})(293.15 \text{ K})(1.16)}{(3p)(1.8 \times 10^{-5} \text{ kg} / \text{m} \cdot \text{s})(10^{-6} \text{ m})} = 2.8 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Τα περισσότερα αέρια διδίδονται στον αέρα με $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, ενώ για διαλυμένα σώματα στα υγρά είναι περίπου $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Έτσι τα μόρια δεν διαδίδονται γρήγορα. Μπορούμε τώρα να επιστρέψουμε στο σχέδιο 8.1 και να παρατηρήσουμε ότι οι τιμές για το D είναι για μόρια στον αέρα και στο νερό. Ο μαθητής μπορεί να επαληθεύσει ότι το αποτέλεσμα στο παράδειγμα 5.21 είναι το ίδιο με την τιμή που φαίνεται στο σχήμα. Γνωρίζοντας ότι τα μόρια διαδίδονται σαν αέριο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε προγενέστερης εξέλιξης λύσεις για μαζική μεταφορά για να υπολογιστεί η αποδοτικότητα με τα οποία μόρια θα διαδοθούν στην επιφάνεια. Στο σχέδιο 5.17 σκεφτείτε την περίπτωση ένα πολύ μικρό μόριο για το οποίο ο αριθμός διαχωρισμού είναι τόσο μικρός ώστε πρακτικά δεν υπάρχει καμία περίπτωση να χτυπήσει το στόχο. Εάν ωστόσο, είναι στη ροή του αερίου που περνά κοντά στο στόχο και η κίνηση Brownian στα δεξιά κατευθύνεται προς την κύρια ροή, κινώντας το ενάντια στο στόχο πιθανώς θα προσκολληθεί. Σ' αυτή την περίπτωση, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είχε συλληχθεί από διάχυση παρά από συμπίεση. Χρησιμοποιώντας αυτήν την ιδέα, ο Freidlander ανέπτυξε μια θεωρητική εξίσωση, με σταθερές καθορισμένες από τα πειράματα για την περίπτωση της συγκέντρωσης μορίων με διάχυση από αέριο που ρέει σε έναν κύλινδρο σε συνθήκες

όπου η συμπίεση είναι αμελητέα. Οι περισσότερες δημοσιοποιημένες πληροφορίες μπορούν να παρουσιαστούν ως εξής:

$$n_i = \frac{6D^{\frac{2}{3}}}{v^{\frac{1}{6}}D_b^{\frac{1}{2}}V^{\frac{1}{2}}} + \frac{3D^2V^{\frac{1}{2}}}{v^{\frac{1}{2}}D_b^{\frac{3}{2}}} \quad (5.49)$$

όπου όλοι οι όροι είναι όπως προσδιορίστηκαν προηγουμένως και V είναι η κινηματική ταχύτητα. Ο πρώτος όρος στα δεξιά είναι για τη συλλογή με διάχυση, ενώ ο δεύτερος είναι για τη συλλογή με επαφή. Οι υπολογισμοί των Langmuir και Blodgett είναι βασισμένες σε όγκους; Τελικώς η εξίσωση (5.49) λαμβάνει υπόψιν ότι τα μόρια έχουν τέλειους διαμέτρους και βεβαίως θα έρθουν σε επαφή με τον στόχο εάν το κέντρο τους περάσει μόλις εντός D/2 απ' αυτό. Αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται interception – παρεμπόδιση.

Παράδειγμα 5.22:

Επαναλάβετε παράδειγμα 5.18 για μόρια που έχουν διάμετρο 0.1μ. Λάβετε υπόψιν διάδοση και διασταύρωση παρεμπόδιση.

$N_s (0.1)^2 = 0.01$ φορές προηγούμενης αξίας, ή 0.062 για το οποίο από σχ. 5.18 διαβάζουμε $n_i = 0$. Επομένως ένα μόριο τέτοιου μεγέθους δεν θα συλληχθεί με συμπίεση και η διάδοση είναι περίπου $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{s} (6 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s})$. Και έτσι:

$$n_i = \frac{6(6 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s})^{\frac{2}{3}}}{(1.49 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s})^{\frac{1}{6}} (10^{-5} \text{ m})^{\frac{1}{2}} (1 \text{ m} / \text{s})^{\frac{1}{2}}} + \frac{3(10^{-7} \text{ m})^2 (1 \text{ m} / \text{s})^{\frac{1}{2}}}{(1.49 \times 10^{-5} \text{ m}^2)^{\frac{1}{2}} (10^{-5} \text{ m})^{\frac{3}{2}}} = 0.0086 + 0.00025 = 0.0088$$

Ο όρος διάδοσης είναι $(0.0086/ 0.00025) = 34.4$ φορές του όρου παρεμπόδισης. Καθώς το μόριο γίνεται μικρότερο, ο όρος διάχυσης γίνεται σχετικά πιο σημαντικός, ενώ ο όρος παρεμπόδισης αυξάνεται σημαντικά καθώς τα μόρια αυξάνονται σε μέγεθος. Οι μηχανισμοί παρεμπόδισης και συμπίεσης ανταποκρίνονται με τον ίδιο τρόπο σε αλλαγές στην ταχύτητα και στη διάμετρο του μορίου. Οι μηχανισμοί συγκρίνονται στο ταμπλό 5.3. Εκεί υπάρχει κάποιο μέγεθος μορίου όπου εκεί υπάρχει η ελάχιστη αποδοτικότητα συλλογής (πρόβλημα 5.49). Τυπικά αυτό το μέγεθος στην κλίμακα από 0.1 έως 1 μέτρο, που είναι το μέγεθος που είναι πιο πιθανό να κατατεθεί στον ανθρώπινο πνεύμονα. Θα θέλαμε να έχουμε μια συσκευή συλλογής μορίων που να ήταν πιο αποτελεσματικό γι' αυτό το μέγεθος μορίων δεν έχουμε όμως μια τέτοια συσκευή. Ο πίνακας 5.3 μας δίνει τα συγκριτικά:

Πίνακας 5.3:

Σύγκριση των μηχανισμών συλλογής

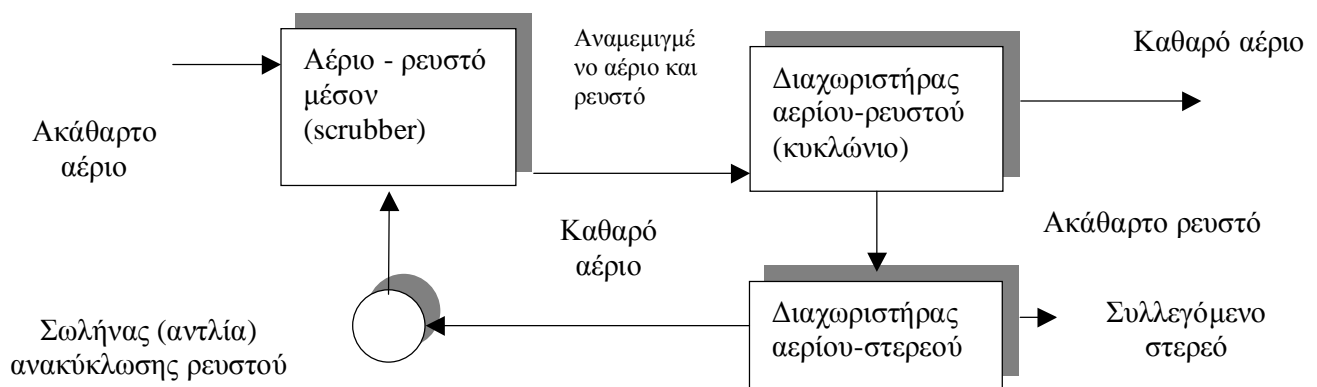
	Πρόσκρουση και παρεμπόδιση	Διάχυση
Το αυξανόμενο μέγεθος του σωματιδίου επιφέρει αποδοτικότητα σε	Αύξηση	Μείωση
Η αυξανόμενη ταχύτητα αερίου επιφέρει αποδοτικότητα σε	Αύξηση	Μείωση
Η αύξηση της διαμέτρου του στόχου επιφέρει αποδοτικότητα σε	Μείωση	Μείωση

5.2.3 Συσκευές συλλογής λεπτών σωματιδίων σε ρευστή μορφή για τον έλεγχο των εν αιωρήσει σωματιδίων.

Όπως τα φίλτρα λειτουργούν χωρίζοντας τη ροή ενός αερίου σε άλλες μικρότερες, έτσι και οι καθαριστές χωρίζουν τη ροή ενός αερίου στέλνοντας πολλές μικρές σταγόνες μέσα σ' αυτό. Στην μηχανολογία ελέγχου καθαρισμού αέρος, ο όρος scrubber σήμαινε ότι ο μηχανισμός συλλέγει μικρά μόρια σε υδρο – σταγόνες. Τότε, όταν οι υγρο-σταγόνες χρησιμοποιούνταν για να συλλέξουν sulfur dioxide. Οι συσκευές που έκαναν αυτό λέγονταν scrubbers. Πρόσφατα μερικοί άλλοι τύποι μηχανισμοί έχουν βγει στην αγορά σαν dry – scrubbers. Σ' αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιούμε την αρχική έννοια – του μηχανισμού scrubber: είναι μια συσκευή που συλλέγει μόρια φέρνοντας σε επαφή το μη καθαρό αέριο με υγρο-σταγόνες. Τα περισσότερα μόρια θα προσκολληθούν στην υγρο-σταγόνα, εάν έρθουν σε επαφή μ' αυτήν, Έτσι εάν κάνουμε τη σταγόνα και το μόριο να έρθουν σε επαφή, τότε το μόριο θα προσκολληθεί στη σταγόνα. Μόρια 50μ και μεγαλύτερα εύκολα συλλέγονται στους κυκλώνες. Εάν θέλουμε να συλλέξουμε μόρια 0.5μ, τότε έχουμε πρόβλημα και οι κυκλώνες δεν λειτουργούν. Ωστόσο, εάν επρόκειτο να εισάγουμε ένα μεγάλο αριθμό υγρο-σταγόνων ενός υγρού με διάμετρο 50-μ μέσα στο αέριο για να συλλέξει τα μόρια, τότε θα μπορούσαμε να περάσουμε τη ροή μέσα από έναν απλό κυκλώνα και να συλλέξουμε τις σταγόνες και τα μόρια καλυμένα σ' αυτές. Αυτή η ιδέα είναι βάση για όλους τους καθαριστές.

Όπως βλέπουμε στο σχ. 5.20 ένας ολοκληρωμένος scrubber έχει αρκετά μέρη. Πολλές φορές ο υδρο – διαχωριστής είναι ένας απλός κυκλώνας του είδους που συζητήθηκε στο 5.1.2. Εάν είναι δυνατόν, ο μηχανικός θα έπρεπε να προσπαθήσει να αποταμιεύσει χρήματα εντοπίζοντας μια τοποθεσία όπου το μολυσμένο νερό (χειμάρος –

ρυάκι) μπορεί να ανακυκλωθεί δίχως την μετακόμιση των στερεών. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου έχει πραγματοποιηθεί πιτυχώς. Φανερά, εάν εκεί δεν υπάρχει κανένας καλύτερος τρόπος να αντιμετωπιστεί το μολυσμένο νερό, τότε ο καθαριστής έχει αλλάξει το πρόβλημα της μόλυνσης του αέρα σε πρόβλημα μόλυνσης του νερού.



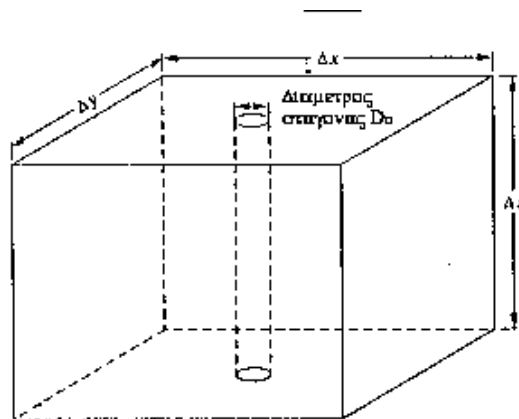
Φιγούρα 5.20:

Συστατικά μέρη της εγκατάστασης της συσκευής συλλογής λεπτών σωματιδίων σε ρευστή μορφή (scrubber).

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, θα συμπεράνουμε ότι οι διαχωρισμοί των αερίων-υγρών και των υγρών στερεών είναι σχετικά εύκολοι. Εμείς θα ασχοληθούμε μόνο το διαχωρισμό αερίων-υγρών όπου τα μόρια πιάνονται στις σταγόνες. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της συλλογής πραγματοποιείται, είτε με συμπίεση, είτε με πρόσκρουση όπως περιγράφηκε στα σχέδια 5.18 και 5.19.

5.2.3.1 Συλλογή σωματιδίων σε μια καταγίδα.

Ξεκινάμε με μια μηχανή (συσκευή) συλλογής όπου όλοι οι μαθητές γνωρίζουν – την καταγίδα. Από εδώ μπορούμε να εισχωρήσουμε σε δυσκολότερες γεωμετρίες βιομηχανικού ενδιαφέροντος. Το σχέδιο 5.21 δείχνει την γεωμετρία για την οποία θα κάνουμε μια υλική ισορροπία ανάμεσα στα μόρια και τις σταγόνες. Παίρνουμε έναν χώρο διαστάσεων Δx , Δy , Δz . Η συμπύκνωση μορίων σ' αυτό τον χώρο είναι c (lbm/ft^3 και kg/m^3). Αφήνουμε μια σφαιρική σταγόνα νερού διαμέτρου D_D μέσα σ' αυτό το χώρο. Πόσο απ' αυτό το ειδικό υλικό στο χώρο θα μεταφερθεί στην σταγόνα;



Φιγούρα 5.21:

Περιοχή που λαμβάνεται υπόψη στην ισορροπία ενός υλικού σε μια καταγίδα.

Βλέπουμε ότι ο όγκος που παρασύρθηκε από την σταγόνα είναι η κυλινδρική τρύπα που φαίνεται στο σχ. 5.21 του οποίου ο όγκος είναι:

$$V_{\text{swept by one drop}} = \frac{p}{4} D_D^2 \Delta_z \quad (5.50)$$

Ο ολικός όγκος των μορίων που ήταν στον όγκο που παρασύρθηκε είναι η συγκέντρωση των μορίων c . Το τμήμα που θα συλλεχθεί από τη σταγόνα είναι η αποδοτικότητα που στοχεύουμε, η οποία μπορεί να καθοριστεί από το σχήμα 5.18 ή ισοδύναμό του. Οπότε ο όγκος μορίων που μεταφέρονται από το αέριο προς την πτώση:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Μεταφερόμενη μάζα} \\ \text{σε μια σταγόνα} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Όγκος} \\ \text{διαμόρφωσης} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Συγκέντρωση} \\ \text{στοχού} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Αποδοτικότητα} \\ \text{στοχού} \end{array} \right) = \frac{p}{4} D_D^2 \Delta_z c n_i \quad (9.51)$$

Στη συνέχεια σκεφτόμαστε μια περιοχή διαστήματος $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ που είναι μεγαλύτερη αναφορικά με το μέγεθος μιας σταγόνας της βροχής μέσα από την οποία ένας μεγάλος αριθμός σταγόνων πέφτουν με σταθερό ρυθμό N_D που εκφράζεται και ως σταγόνες/χρόνο. Κάθε μια από τις σταγόνες αναταράσσει την περιοχή του αερίου, έτσι που δεν υπάρχει διάκριση ανάμεσα στον όγκο "που παρασύρεται από τη σταγόνα" και στον όγκο "που δεν παρασύρεται από την σταγόνα".

Για την περιοχή $\Delta x \Delta y \Delta z$ θέλουμε να μάθουμε πως η συγκέντρωση μορίων στον αέρα αλλάζει κατά την διάρκεια της καταιγίδας. Μπορούμε από την διαφορά – ισοροποίηση μορίων στον χώρο να συμπεράνουμε ότι:

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} &= - \frac{\left(\begin{array}{l} \text{Μεταφερόμενη μάζα} \\ \text{σε κάθε σταγόνα} \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} \text{Αριθμός σταγόνων} \\ \text{/ χρόνο} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{όγκο} \\ \text{thV περιοχής} \end{array} \right) V} = \quad (5.52) \\ &= - \frac{(p/4)(D_D^2 \Delta_z c n_i N_D)}{\Delta x \Delta y \Delta z} = - \frac{p}{4} D_D^2 c n_i \left(\frac{N_D}{\Delta x \Delta y} \right) \end{aligned}$$

Πολλαπλασιάζουμε το επάνω και κάτω μέρος της εξίσωσης με τον όγκο της μονής σφαιρικής σταγόνας και απλώς έχουμε:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\rho}{4} D_D^2 c n_t \left(\frac{N_D}{\Delta x \Delta y} \right) \frac{\rho}{6} D_D^3 = -1.5 \frac{c n_t}{D_D} \left(\frac{N_D \frac{\rho}{6} D_D^3}{\Delta x \Delta y} \right) \quad (5.53)$$

Ο τελευταίος όρος στην παρένθεση στην εξίσωση (5.53) αναπαριστά τον όγκο της βροχής που πέφτει ανά μονάδα χρόνο, χωρισμένη από την οριζόντια περιοχή μέσα από την οποία πέφτουν (Δελτία καιρού συχνά λένε ότι η βροχή πέφτει με ρυθμό μίας ίντσας κάθε ώρα που είναι ένας πολύ γρήγορος ρυθμός). Κάποιος μπορεί ακόμα να σκεφτεί αυτό σαν το ρυθμό κατά τον οποίο το επίπεδο σε ένα δοχείο, όπως ένα ποτήρι θα ανέβει εάν η βροχή πέφτει, ενώ αυτό είναι ανοιχτό επάνω χωρίς άλλες εξόδους. Για το υπόλοιπο του κεφαλαίου η ολική υδρο – ογκομετρική ροή θα συμβολίζεται με Q_L (m^3/s) και έτσι Q_L/A , όπου A είναι η οριζόντια προεκβολή της περιοχής. Αντικαθιστώντας αυτό στην εξίσωση (5.53) μπορούμε να δούμε ότι:

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} &= -\frac{1.5}{D_D} c n_t \frac{Q_L}{A} \\ \frac{dc}{dt} &= -\frac{1.5}{D_D} n_t \frac{Q_L}{A} dt \end{aligned} \quad (5.54)$$

$$\ln p = \ln \frac{c}{c_0} = -\frac{1.5}{D_D} n_t \frac{Q_L}{A} \Delta t \quad (5.55)$$

Παράδειγμα 5.23:

Μια καταιγίδα τοποθετεί 0.1in./η, σε σφαιρικό σχήμα σταγόνες 1mm in διαμέτρου. Ο αέρας μέσω του οποίου πέφτουν οι σταγόνες

περιέχουν 3 –μ διαμέτρου μόρια συγκέντρωσης 100hg/m^3 . Ποια θα είναι η συγκέντρωση μετά από μια ώρα;

Λύνοντας εξ. (5.55) για c βρίσκουμε:

$$c = c_0 \exp\left(-\frac{1.5n_i Q_L \Delta t}{D_p A}\right)$$

Γνωρίζουμε όλες τις ποσότητες στα δεξιά εκτός από nt . Από το σχήμα 8.5 μπορούμε να διαβάσουμε ότι η τελική ταχύτητα μιας σταγόνας διαμέτρου 1-mm σε αέρα είναι $14\text{ft/s}=4\text{m/s}$. Μπορούμε όμως να υπολογίσουμε N_s από την εξίσωση (5.45).

$$N_s = \frac{rD_p^2 V}{18mD_b} = \frac{(2000\text{kg/m}^3)(3 \times 10^{-6}\text{m})^2(4.2\text{m/s})}{(18)(1.8 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s})(10^{-3}\text{m})} = 0.23$$

Εδώ $D_b = D_D$. Από το σχ. 5.18 διαβάζουμε $n_i \approx 0.22$, και έτσι:

$$c = 100 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \exp\left[-\frac{(1.5 \cdot 0.3)(0.1\text{in./h})(1\text{h})}{10^{-3}\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{39.37\text{in.}}\right] = 43 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Τα αποτελέσματα τελικά κρίνονται από την ποσότητα βροχόπτωσης $Q_L \Delta t/A$, όπου είναι 0.1 in σ' αυτή την περίπτωση. Η τμηματική μετακίνηση είναι ανεξάρτητη της αρχικής συγκέντρωσης, c/c_0 δεν εξαρτάται από την τιμή του c_0 . Αν και η βροχή συλλέγει μεγάλα μόρια δεν τα καταφέρει εξίσου καλά με μικρά μόρια. Εάν το παράδειγμα ζητούσε την αποτελεσματικότητα συγκέντρωσης μορίων με διάμετρο 1-μ, θα είχαμε υπολογίσει το N_s 1/9 μεγαλύτερο και από το σχήμα 5.18 θα είχαμε υπολογίσει ότι $nt=0$. Θυμίσουν ότι το σχήμα 5.18 περιγράφει το μηχανισμό συμπίεσης που θα ήταν μηδέν σ' αυτήν την περίπτωση. Ο

μηχανισμός διάδοσης θα είχε οδηγήσει σε κάποια συλλογή, αλλά η αποτελεσματικότητα θα ήταν πολύ μικρή.

Αυτός ο υπολογισμός τελικά είναι αντίθετος με την δημοφιλή γνώμη ότι η βροχή καθαρίζει την ατμόσφαιρα. Είναι μια κοινή παρατήρηση στα βόρεια και δυτικά των Ηνωμένων Πολιτειών ότι ο αέρας είναι πολύ καθαρότερος μετά από βροχόπτωση. Ο λόγος γι' αυτό δεν είναι ότι οι σταγόνες καθαρίζουν τον αέρα, αλλά κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης εισέρχεται αέρας πιο καθαρός από αυτόν που αντικαθιστά.

5.2.3.2 Συλλογή σωματιδίων σε συσκευή συλλογής λεπτών σωματιδίων σε ρευστή μορφή (scrubber) εγκάρσιας ροής, αντιρροής και συρροής.

Για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στο όσον αφορά την μετακίνηση μικρών μορίων πρέπει να αυξηθεί η τιμή του N_s για να αποκτηθεί υψηλότερη αξία – τιμή του n_t .

Crossflow scrubbers.

Ας ρίξουμε μια ματιά στο σχ. 5.22 που δείχνει τις διαστάσεις γενικότερα και κάποιες σημειώσεις. Πρόκειται για ένα μεγάλο κουτί το οποίο εκτοξεύει το εισερχόμενο υγρό Q_L ομοιόμορφα στην οριζόντια επιφάνεια με μια υδρορροή στο πάτωμα που συλλέγει το υγρό. Το αέριο υπολογίζετε ότι κινείται ομοιόμορφα σε μια ογκομετρική ροή σε βαθμό Q_G . Ο αέρας που κινείται μέσα από το scrubber συμπεριφέρεται όπως ο αέρας σε μια καταιγίδα. Εάν θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε τον χρόνο που παίρνει ο αέρας να ταξιδέψει μέσα από το scrubber μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε στην εξ. (5.55) για να υπολογίσουμε την αποτελεσματικότητα συλλογής. Αυτή η ταχύτητα

αερίου είναι ($Q_G / \Delta y \Delta z$) και ο χρόνος που απαιτείται για την μάζα αέρα να περάσει κατά μήκος του scrubber διαιρείται με την εσωτερική ταχύτητα ή

$$\text{Χρόνος ταξιδιού} = \Delta t = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{Q_G} \quad (5.56)$$

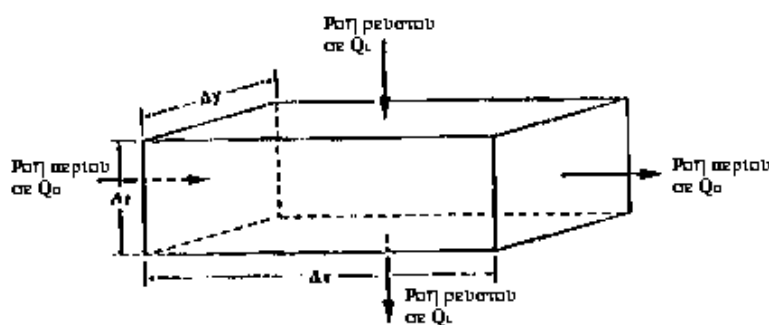
Μπορεί κανείς επίσης να θεωρήσει αυτόν σαν τον όγκο του scrubber διαιρεμένο με την ογκομετρική ροή αερίου, και βεβαίως σαν την ποσότητα (1/αριθμός scrubber ποσότητες αερίου που επιτρέπονται ανά μονάδα την φορά).

Αντικαθιστώντας αυτή την αξία για χρόνο που ταξιδεύει στην εξ. (5.55) βρίσκουμε ότι:

$$\ln p = \ln \frac{c}{c_0} = -\frac{1.5 n_i Q_L \Delta x \Delta y \Delta z}{D_D A Q_G} = -1.5 \cdot \frac{n_i}{D_D} \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \cdot \Delta z \quad (5.57)$$

Αυτή η εξίσωση μας υπενθυμίζει ότι όσο μικρότερη η πτώση και όσο υψηλότερο το scrubber, συνεπώς πιο αποτελεσματική η αποκόλληση μορίων. Θα πρέπει βεβαίως να λάβουμε υπόψιν την διαδρομή που θα παρθεί από μια σταγόνα μέσα στο scrubber. Μια μεγάλη σταγόνα θα πέσει κατευθείαν προς τα κάτω η κάθετη ταχύτητα, εξαιτίας της βαρύτητας είναι μεγαλύτερη της οριζοντίου ταχύτητας του αερίου. Αλλά μια μικρή σταγόνα έχει πολύ χαμηλότερη κάθετη ταχύτητα κι έτσι θα μετακινηθεί κατά μήκος της ροής από το αέριο. Αν προσπαθήσουμε να αποκτήσουμε μια καλή και αποτελεσματική συλλογή (χαμηλή αξία του $p = c/c_0$) αυξάνοντας Δz ή ελατώνοντας D_D , βλέπουμε ότι οι σταγόνες θα περάσουν έξω μαζί με το αέριο και έτσι δεν θα περισυλλεχθεί εντός του

scrubber. Γι' αυτό το λόγο αυτός ο τύπος δεν χρησιμοποιείται ευρύτατα. Εάν όμως κάποιος θέλει να συλλέξει αξιόλογη σκόνη ή σχετικά μεγαλύτερα μεγέθους μόρια σ' ανάλογο υδρο – υλικό τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι συνηθισμένη πρακτική να αποκλείονται οι αντλίες ψεκασμού μόνο στο ανώτερο τμήμα της οροφής του scrubber. Η απόσταση ανάμεσα στην κατώτερη αντλία και την έξοδο του scrubber έχει υπολογιστεί για να επιτρέπει στις περισσότερες σταγόνες να φτάνουν στη βάση του scrubber πριν φτάσουν στην έξοδο.



Φιγούρα 5.22:

Σχηματική απεικόνιση ενός scrubber εγκάρσιας ροής.

Counterflow scrubbers.

Η επόμενη γεωμετρία που θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν είναι το scrubber με αντίθετη ροή, όπως δείχνει το σχ. 5.23. Το υγρό εισέρχεται από την κορυφή του καθαριστή μέσα από μια σειρά από αντλίες ψεκασμού, έτσι που να διανέμεται ομοιόμορφα και πέφτει από τη βαρύτητα. Το αέριο εισέρχεται από τη βάση του καθαριστή και ρέει ομοιόμορφα προς τα επάνω.

Μπορούμε να το προσεγγίσουμε όπως με το scrubber σταυρωτής ροής και απλά να υπολογίσουμε τον χρόνο μεταφοράς του αερίου και να το αντικαταστήσουμε στην εξ. (5.55) αλλά ατυχώς υπάρχουν

δυσκολίες. Στο πρόβλημα της βροχόπτωσης και στον καθαριστή σταυρωτής ροής, η απόσταση που μια σταγόνα διανύει, είναι η ίδια απόσταση που διανύει σχετικά με το αέριο. Εδώ δεν ισχύει η προηγούμενη περίπτωση επειδή, εάν η σταγόνα βρίσκεται στην τελική προκαθορισμένη ταχύτητα V_t , σχετική με το αέριο που περικλείει, αλλά αυτά το αέριο κινείται με κατεύθυνση προς τα πάνω με ταχύτητα $V_G = Q_G / \Delta_X \Delta_Y$, τότε η ταχύτητα της σταγόνας σε σχέση με τις συντεταγμένες του scrubber είναι $V_{D-Fixed} = V_t - V_G$, όπου κι έχουμε:

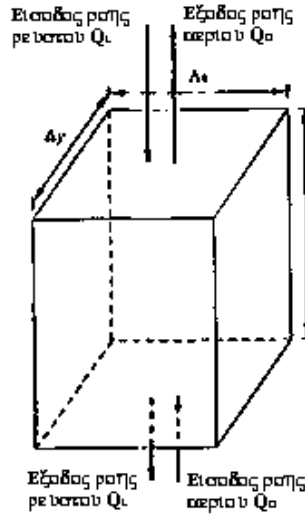
$$\left(\begin{array}{l} \text{Μάζα μεταφερόμενων σωματιδίων} \\ \text{σε σταγόνα } V \text{ ανά μονάδα χρόνου} \\ \text{ανά μονάδα όγκου} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} - \text{μάζα μεταφερόμενων σωματιδίων έχω από} \\ \text{το αέριο ανά μονάδα χρόνου} \\ \text{ανά μονάδα όγκου} \end{array} \right) =$$

$$= (\text{όγκος διαμόρφωσης/χρόνο}) \times (\text{συγκέντρωση σωματιδίου}) \times (\text{αποδοτικότητα στόχου}) =$$

$$= - \left(\begin{array}{l} \text{βαθμός ογκομετρικής} \\ \text{ροής αερίου} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{μεταβολή στη} \\ \text{συγκέντρωση σωματιδίων} \end{array} \right) \quad (5.58)$$

Για να υπολογιστεί η ποσότητα πρέπει να υπολογίσουμε τον αυτοστιγμααίο αριθμό σταγόνων ανά μονάδα όγκου. Η υδρο-ροή μέσα στο σύστημα είναι Q_L (m^3/s), κι αυτό είναι αποτελούμενο από N_8 σταγόνες / χρόνος, κάθε όγκου όπου $(\pi/6) D_D^3$. Ο χρόνος που κατά μέσο όρο κάθε σταγόνα ξοδεύει στο scrubber είναι η κάθετη απόσταση διαιρεμένη με την κάθετη ταχύτητα σε σχέση με τις σταθερές συντεταγμένες ή

$$\text{Χρόνος κατά μέσο όρο} = \frac{\Delta z}{(V_t - V_G)} \quad (5.59)$$



Φιγούρα 5.23:

Σχηματική αναπαράσταση ενός scrubber αντιρροής

Οπότε οποιαδήποτε στιγμή ο αριθμός σταγόνων στο σύστημα είναι:

$$\text{Σταγόνες} \text{ παρούσε} \text{ οποιαδήποτε στιγμή} = \frac{N_D \Delta z}{(V_t - V_G)} \quad (5.60)$$

Ο όγκος αερίου που αυτές οι σταγόνες σκουπίζουν ανά χρ. Μονάδα είναι ο αριθμός τους επί την διασταυρωθήσα περιοχή επί της απόστασης που κινούνται σε σχέση με το αέριο, το οποίο είναι V_t . Κι έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Όγκος διαμόρφωση}}{\text{Χρόνος}} &= \left(\frac{N_D \Delta z}{(V_t - V_G)} \right) \left(\frac{p D_D^2}{4} \right) V_t = \left(\frac{Q_L}{p D_D^3 / 6} \right) \left(\frac{\Delta z p}{4} \right) \left(\frac{D_D^2 V_t}{V_t - V_G} \right) = \\ &= Q_L \left(\frac{1.5}{D_D} \right) (\Delta z) \left(\frac{V_t}{V_t - V_G} \right) \end{aligned} \quad (5.61)$$

Αντικαθιστούμε εξ. (5.61) με την εξ. (5.58) βρίσκοντας:

$$Q_L \left(\frac{1.5}{D_D} \right) (\Delta z) \left(\frac{V_t}{V_t - V_G} \right) c n_t = -Q_G \Delta c \quad (5.62)$$

Εάν τώρα υποθέσουμε πως το ύψος του scrubber είναι απειροελάχιστα μικρό, έτσι ώστε Δz και Δc να γίνουν d_z και d_c , μπορούμε να κάνουμε τον διαχωρισμό και να βρούμε:

$$\frac{dc}{c} = -1.5 \cdot \frac{n_t}{D_D} \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \cdot \frac{V_t}{(V_t - V_G)} dz \quad (5.63)$$

$$\ln p = \ln \frac{c}{c_0} = -1.5 \cdot \frac{n_t}{D_D} \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \cdot \frac{V_t}{(V_t - V_G)} \Delta z \quad (5.64)$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση (5.64) για καθαριστές αντίστροφης ροής με την εξίσωση (5.57) για καθαριστές σταυρωτής ροής, βλέπουμε ότι η μόνη διαφορά είναι η προσθήκη ενός $[V_t/(V_t - V_G)]$ όρου που έχει να κάνει με το γεγονός ότι κάθε σταγόνα κινείται άσχετα με το αέριο, ενώ κινείται σχετικά με την καθορισμένη γεωμετρία του scrubber. Ο υπολογισμός της εξ. (5.64) μα δίνει να δούμε τους περιορισμούς αυτού του είδους scrubber. Μπορούμε να έχουμε 100% αποτελεσματικότητα ($c/c_0=0$) εάν έχουμε $V_t = V_G$ διότι αυτό κάνει την αξία της δεξιάς πλευράς άπειρα αρνητικά. Από φυσικής πλευράς αυτό σημαίνει ότι εάν η ανοδική ταχύτητα του αερίου είναι ισότιμη με την τελική ταχύτητα του υγρού, τότε η κάθε μεμονωμένη σταγόνα θα μένει ακίνητη στο scrubber και θα περισυλλεκτεί από μια στήλη αερίου καθώς το αέριο προσπερνά. Εάν όμως συνεχίσουμε να βάζουμε υγρό στο

scrubber ($Q_L \neq 0$) και δεν έχουμε απώλεια υγρού, τότε απλά γεμίζουμε το scrubber με υγρό. Θα υπερχυλίσει και θα σταματήσει πλέον να λειτουργεί σαν scrubber. Από τη στιγμή που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε τις μικρότερες πρακτικά σταγόνες ως προς το μέγεθος για να πάρουμε ψηλές τιμές για το N_s κι επομένως για το n_t , η υπερχύλιση θέτει έναν πολύ σημαντικό πρακτικό περιορισμό σ' αυτό το είδος του scrubber. Υπάρχουν κάποιες εφαρμογές, αλλά δεν παίζουν πρωταρχικό ρόλο στον μοριακό έλεγχο της μόλυνσης το αέρα.

Co-flow scrubbers.

Σίγουρα χρειαζόμαστε μια γεωμετρική τακτοποίηση τέτοια ώστε να μπορούμε να συλλέξουμε μικρές σταγόνες δίχως όμως να τις φυσάει ο αέρας από τα πλευρικά πλαϊνά του scrubber σε υψηλές ταχύτητες για να μπορέσουμε να επιτύχουμε N_s και υψηλό n_t . Η απάντηση αυτού του προβλήματος είναι συνεργασία ροής – scrubber, όπως δείχνει σχηματικά το σχ. 5.24. Σε αυτό αέριο και υγρό εισέρχονται στα αριστερά κι εξέρχονται από τα δεξιά. Ωστόσο το υγρό εισέρχεται από τη δεξιά γωνία στη ροή του αερίου εισέρχεται με πολύ μικρότερη ταχύτητα στην κατεύθυνση x από ότι το αέριο. Εφόσον και τα δύο ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση δεν υπάρχει το πρόβλημα να φύγουν οι σταγόνες προς λάθος κατεύθυνση. Μεγάλες ταχύτητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτού του είδους scrubber τόσο όσο 400 ft/s ήτοι (122 m/s). Το υγρό εισέρχεται με μηδενική ταχύτητα σε χ κατεύθυνση, έτσι ώστε εσωτερικά η ταχύτητα σχετικά μπορεί να φτάσει 400 ft/s. Αυτό μπορεί να είναι 100 φορές της μέγιστης ανεκτής ταχύτητας σε ένα διασταυρωτό ή αντίθετης ροής scrubber. Για να δημιουργήσουμε μια μικρή υλική ισορροπία για έναν co-flow scrubber ξεκινάμε με την εξίσωση (5.58). Εδώ το πρόβλημα μας είναι πιο δύσκολο, επειδή η ταχύτητα για τις υγρές σταγόνες αλλάζει καθώς κινούνται στην κατεύθυνση x . Στην είσοδο έχουν μηδενική ή πρακτικά

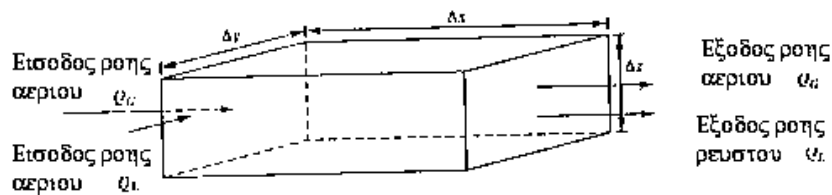
μηδενική ταχύτητα, αλλά από τη στιγμή που φτάνουν στην έξοδο κανονικά, θα πρέπει να αποκτήσουν την ίδια ταχύτητα με το αέριο. Εάν γράψουμε τη σχέση για ένα διαφοροποιημένο μήκος dx του καθαριστή, μπορούμε να πούμε ότι ο μέσος χρόνος που χρειάζεται μια σταγόνα για να περάσει αυτό το τμήμα είναι:

$$\text{Μέσο } \nu \text{ χρόνος} = \frac{dx}{V_{D-Fixed}} = \frac{dx}{V_G - V_{Rel}} \quad (5.65)$$

Κατόπιν μπορούμε να γράψουμε τη αναλογία της εξ. (5.61) χρησιμοποιώντας V_{Rel} στη θέση του V_t και εξ. (5.65) στη θέση της εξ. (5.60). Βρίσκουμε:

$$d\left(\frac{\text{όγκος } \nu \text{ } \nu \text{ } \nu}{\text{χρόνος}}\right) = \left(\frac{N_D \Delta x}{V_G - V_{Rel}}\right) \left(\frac{\rho D^2}{4}\right) V_{Rel} = Q_L \left(\frac{1.5}{D_D}\right) \left(\frac{V_{Rel}}{V_G - V_{Rel}}\right) dx \quad (5.66)$$

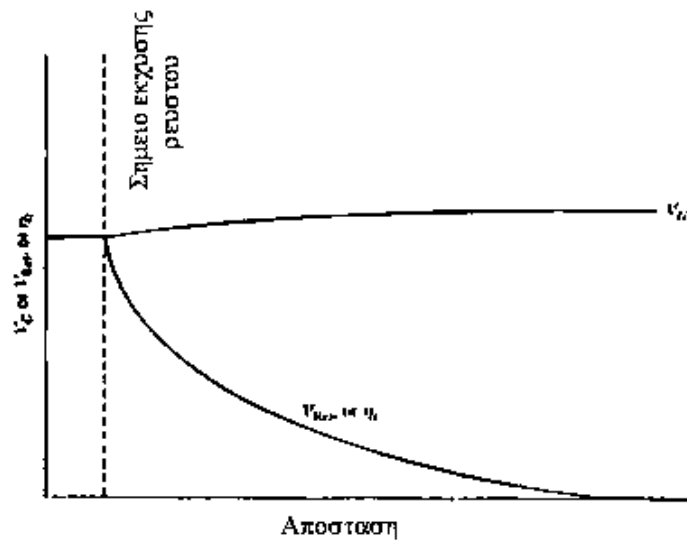
$$\text{και } \frac{dc}{c} = -\frac{1.5}{D_D} \cdot n_t \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \cdot \frac{V_{Rel}}{V_G - V_{Rel}} dx \quad (5.67)$$



Φιγούρα 5.24:

Σχηματική αναπαράσταση ενός scrubber συρροής (co-flow).

Για τα προηγούμενα παραδείγματα θα μπορούσαμε να ολοκληρώσουμε τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στην εξίσωση (5.67), επειδή όλοι οι όροι στα δεξιά ήταν ανεξάρτητοι της απόστασης ή του χρόνου. Για έναν co-flow scrubber δεν είναι. Το σχέδιο 5.25 δείχνει πως από αυτές τις μεταβλητές αλλάζουν για μια απλή σταθερά της περιοχής του καθαριστή. Στο σημείο που εκσφενδονίζεται το υγρό υπάρχει και μικρή αύξηση ταχύτητας αερίου. Αυτό φαίνεται παράξενο όμως είναι αληθινό. Το αέριο πρέπει να αποκτήσει και να μεταφέρει δύναμη προς το υγρό για να υπάρξει επιτάχυνση. Αυτό σημαίνει πτώση στην πίεση και η πυκνότητα του αερίου πέφτει. Αλλά ο όγκος αερίου και ροή του είναι συνεχές μέσα στο scrubber, κι έτσι η ταχύτητα πρέπει να αυξηθεί για να ξεκινήσει η μείωση της πυκνότητας. Στην αρχή η σχετική ταχύτητα είναι σχεδόν ίση με την ταχύτητα του αερίου διότι έχουμε $V_{Rel} = V_G - V_{D-Fixed}$, αλλά V_{Rel} πέφτει γρήγορα καθώς οι σταγόνες επιταχύνονται. Εάν το scrubber είναι αρκετά μεγάλο σε μήκος, V_{Rel} θα φτάσει στο μηδέν (0) καθώς τα υγροποιημένα σταγονίδια φτάνουν την ταχύτητα του αερίου. Διότι N_s , είναι ανάλογο του V_{rel} , και n_t μονοτικά αυξάνει την λειτουργικότητα του N_s , είναι ξεκάθαρο πλέον ότι n_t πάνω – κάτω θ' αλλάξει ανάλογα προς το V_{rel} , όπως δείχνει το σχέδιο 5.25. Εάν αυτές οι αλλαγές με την απόσταση αναμειγνύονταν όλες, θα μπορούσαμε πιθανώς να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις για τη δύναμη που αναφέρθηκε προηγουμένως για να υπολογίσουμε τη V_{Rel} σαν μια λειτουργία της απόστασης, υπολογίζουμε τη n_t σε κάθε σημείο και ύστερα συμπληρώνουμε την εξίσωση (5.67) για να βρούμε την προβλεπόμενη αποδοτικότητα κάθε τέτοιου καθαριστή. Δύο άλλοι παράγοντες κάνουν το πρόβλημα ακόμα πιο περίπλοκο.

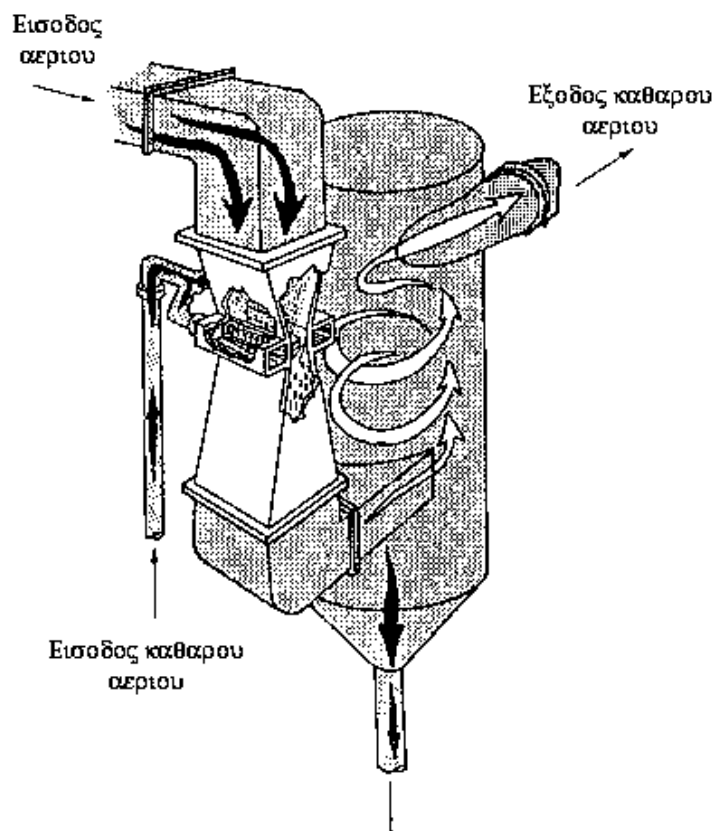


Φιγούρα 5.25:

Σχήμα συμπεριφοράς των V_G , V_{rel} , και της απόστασης η_t , vs σε μια περιοχή εγκάρσιας τομής ενός co-flow scrubber.

Πρώτον όταν ρίξουμε υγρό στο ήδη γρήγορα εισερχόμενο ρεύμα – ροή αυτό σπάζει και γίνεται μικρότερες σταγόνες με ποικίλα μεγέθη. Και στην συνέχεια σπάζουν σε ακόμη μικρότερα τμήματα. Αυτός ο διαμελισμός δεν γίνεται μια και καλή αλλά μακροχρόνια. Οπότε η υπόθεση μεγέθους σταγόνων που ήταν ανεκτή για τη βροχόπτωση και τους καθαριστές σταυρωτής και αντίθετης ροής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εδώ. Καμία προσπάθεια που δεν λαμβάνει υπόψη το διαφοροποιούμενο μέγεθος της σταγόνας κατά τη διανομή έχει πολλές πιθανότητες επιτυχίας. Δεύτερον, παρόλο που η απλή γεωμετρία που φαίνεται στο σχέδιο 5.24 χρησιμοποιείται περιστασιακά (πιο συχνά σε έναν σωλήνα μικρής διαμέτρου που μεταχειρίζεται μια μικρή ροή ενός

μη καθαρού αερίου), για εκτεταμένες ροές το σχέδιο που φαίνεται στη φιγούρα 5.26 είναι πολύ πιο οικονομικό.



Φιγούρα 5.26:

Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού scrubber με ροή προς τα κάτω στον κώνο διάχυσης με έγχυση ρευστού στο άνοιγμα και η εκφόρτωση περνά σε έναν μεγάλο διαχωριστήρα κυκλωνίου.

Το scrubber που δείχνει το σχ. 5.26 έχει ένα τμήμα κάθετο σταυρωτό που έχει γίνει ιδιαίτερη η επιλογή του εδώ. Το υγρό ρίχνεται με σύριγγα μέσα στο στόμιο του venturi, το υλικό που εισέρχεται αμέσως περνάει σ' ένα μεγάλο κυκλωνικό - διαχωριστή. Το σχέδιο Venturi χρησιμοποιείται διότι εξοικονομεί ενέργεια του

ανεμιστήρα. Ξέρουμε από τους μηχανισμούς υγρών, ότι για ένα τέτοιο σχέδιο η ταχύτητα σε κάθε σημείο είναι ίση με το ρυθμό ογκομετρικής ροής Q που είναι πρακτικά συνεχόμενη μέσα στη συσκευή, χωρισμένη από τη σταυρωτή-τμηματική περιοχή. Για το venturi που φαίνεται στο σχέδιο 5.26, το στόμιο της σταυρωτής-τμηματικής περιοχής είναι περίπου το 1/5, έτσι που η ταχύτητα πρέπει να είναι πέντε φορές την ταχύτητα κατά την είσοδο ή έξοδο. Για να επιτύχουμε υψηλές ταχύτητες στη ροή αερίου πρέπει να έχουμε πτώση στην πίεση, και βεβαίως γνωρίζουμε για οριζόντια άνευ – τριβής ροή έχουμε:

$$P_2 - P_1 = \left(\frac{r}{2}\right)(V_1^2 - V_2^2) \quad (5.68)$$

Η ροή στο συγκλίνον τμήμα ενός venturi υπακούει στην εξίσωση ελλείψης της τριβής, πολύ καλά. Στο αποκλίνον τμήμα στο κάτω μέρος της ροής του στομίου, θα βρούμε ότι η εξίσωση (5.68) εφαρμόζεται, εάν είχαμε ροή χωρίς τριβή και ακόμα θα πέρναμε πίσω όλη την πίεση που χάθηκε επιταχύνοντας τη ροή. Τα πραγματικά venturi γνωρίζουμε ότι δεν λειτουργούν πολύ καλά παρ'όλα αυτά στην πράξη μπορούμε να έχουμε υψηλή ταχύτητα στη ροή ενός αερίου δίχως να χάνουμε μεγάλη πίεση όπως δείχνει το σχ. 5.26 απ'ότι σ'οποιαδήποτε άλλη συσκευή. Αυτή η συσκευή venturi co – flow scrubber είναι τελικά ο οικονομικότερος τρόπος για υψηλή ταχύτητα, για γρήγορο τεμαχισμό υγρού σε σταγόνες και σταγονιδίων και βεβαίως υψηλή αποδοτικότητα συλλεκτικότητας με την ελάχιστη δύναμη του ανεμιστήρα.

Παράδειγμα 5.24:

Στο στόμιο του venturi η ταχύτητα είναι $400\text{ft/s} = 122\text{μ/δ}$. Τα μόρια που πρέπει να γίνει η συλλογή τους έχουν διάμετρο 1μ , και τα σταγονίδια διάμετρο 100μ . Βρίσκουμε 10^{-3}m^3 υγρού ανά m^3 αερίου στο scrubber ($Q_L/Q_G = 10^{-3}$). Σε σημείο όπου $V_{\text{Rel}} = 0.9V_G$ ποιο το ποσοστό μείωσης σε μοριακή συγκεντρωτικότητα; Αρχίζουμε υπολογίζοντας N_s η ανάλογη ταχύτητα για να χρησιμοποιηθεί στο N_s είναι V_{Rel} .

$$N_s = \frac{rD_p^2 V}{18mD_b} = \frac{(2000\text{kg/m}^3)(10^{-6}\text{m})^2(0.9 \times 122\text{m/s})}{(18)(1.8 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s})(10^{-4}\text{m})} = 6.78$$

Από το σχ. .18 βλέπουμε ότι $n_t = 0.92$ και από την εξ. 5.67 γράφουμε:

$$\frac{dc/c}{dx} = -\left(\frac{1.5}{10^{-4}\text{m}}\right)(0.92)(10^{-3})\left(\frac{0.9V_G}{V_G - 0.9V_G}\right) = -\frac{124}{\text{m}} = -\frac{0.124}{\text{mm}}$$

Εδώ βλέπουμε μια μείωση κατά 12.4% για κάθε m αερίου που ταξιδεύει στην κατεύθυνση της ροής.

Παράδειγμα 5.25:

Πόσο γρήγορα αλλάζει το V_{Rel} για την πτώση στο παράδειγμα 5.24; Ο μοριακός αριθμός Reynolds για σταγόνες είναι:

$$R_p = \frac{DrV}{m} = \frac{(10^{-4}\text{m})(1.20\text{kg/m}^3)(0.9 \cdot 122\text{m/s})}{1.8 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}} = 732$$

Αυτός ο αριθμός Reynolds είναι πολύ υψηλός εξαιτίας της πολύ υψηλής ταχύτητας. Αν όμως ψάξουμε για την αναλογία που αντιστοιχεί για σφαιρικές σταγόνες βρίσκουμε ότι είναι περίπου 0.7, οπότε και υπολογίζουμε ότι η επιτάχυνση είναι:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{dV}{dt} = \frac{F}{m} = \frac{(\rho/4)D_D^2 C_d r_{air} (V^2/2)}{(\rho/6)D_D^3 r_D} = 1.5 C_d r_{air} \frac{V^2}{2D_D r_D} \\
 &= \frac{(1.5)(0.7)(1.20 \text{ kg/m}^3)(106.7 \text{ m/s})^2}{(2)(10^{-4} \text{ m})(1000 \text{ kg/m}^3)} = 7.2 \times 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.4 \times 10^5 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \\
 &= 3700 \text{ for } \dot{V} \text{ thn epitáxunsh thV élxhV}
 \end{aligned}$$

Αυτά τα δυο παραδείγματα μας δείχνουν πόσο γρήγορα έχουμε συμβάντα και γεγονότα στο λαιμό του venturi, όπου και ο καθαρισμός είναι αποτελεσματικός και οι επιταχύνσεις των σταγονιδίων είναι ραγδαίες. Είναι ακόμα η περιοχή όπου η σταυρωτή-τμηματική περιοχή κάθετη στη ροή αλλάζει πολύ γρήγορα. Αυτά τα δυο παραδείγματα μας δείχνουν επίσης ότι εάν γνωρίζουμε την σχέση της πτώσης – μεγέθους προς άλλους λειτουργικούς παραμέτρους, μπορούμε να λύσουμε την εξ. (5.67) και να μαντέψουμε την αποδοτικότητα venturi κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Δεν υπάρχει καμιά απλή δημοσιευμένη λύση στο πρόβλημα. Ο Calvert έκανε πολλές απλοποιήσεις και έτσι ήταν ικανός να πραγματοποιήσει τη συμπλήρωση αριθμητικά αυτής της συμπλήρωσης για έναν τυπικό venturi scrubber, συνοψίζονται στη φιγούρα 5.27. Η φιγούρα που χρησιμοποιείται θα εικονογραφηθεί αργότερα.

5.2.3.3 Πτωτική πίεση στα scrubbers.

Οι δυο προηγούμενοι scrubbers crossflow – counterflow δείχνουν ότι έχουν χαμηλές επιδόσεις και μικρή πίεση. Venturi scrubbers έχουν υψηλότερες πτώσεις πίεσης και επιδόσεις. Το κόστος δύναμης του ανεμιστήρα που οδηγεί το μολυσμένο αέριο μέσω του ventruri scrubber είναι συχνά πιο σημαντικό απ' ό τι η αγορά ολόκληρου του scrubber.

Παράδειγμα 5.26:

Ένα τυπικό scrubber Venturi έχει περιοχή λαιμού 0.5m^2 με ταχύτητα 100m/s και πτώση στη πίεση 100cm νερού $=9806\text{N/m}^2$. Εάν έχουμε 100% αποτελεσματικότητα συσκευής μοτέρ και μπλόουερ – ανεμιστήρα, ποια είναι η δύναμη που χρειάζεται για να διωχθεί το αέριο μέσα από το Venturi;

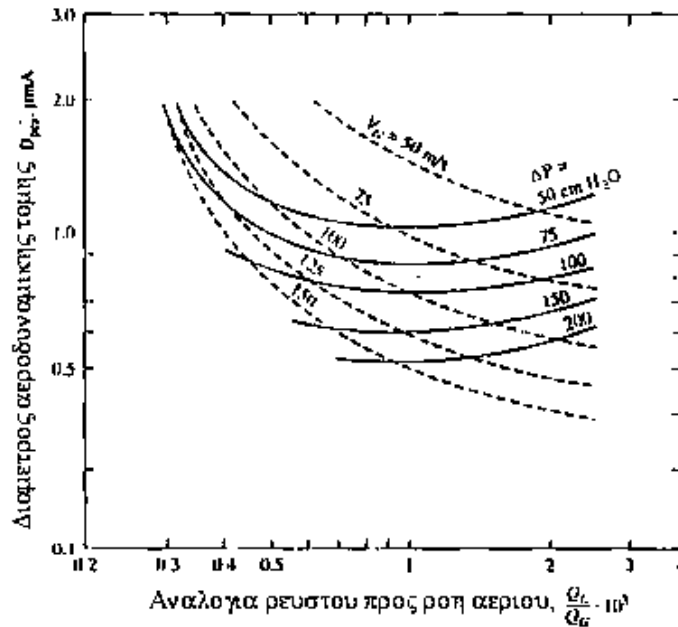
$$P_0 = Q_G \Delta P = (0.5\text{m}^2) \left(100 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left(9806 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{10^3 \text{N} \cdot \text{m}} \right) = 245\text{kW} = 328\text{hp}$$

Εάν αυτά λειτουργήσουν 8760 ώρες/ χρόνο και ηλεκτρικό κοστίζει 5cents/kWh το ετήσιο κοστολόγιο θα είναι:

$$\text{Κόστο} \Delta \text{όναμη} V = (245\text{kW}) \left(8760 \frac{\text{h}}{\text{yr}} \right) \left(\frac{\$0.05}{\text{kWh}} \right) = \frac{\$107.300}{\text{yr}}$$

Τώρα βλέπουμε γιατί υπάρχει υψηλή πτώση πίεσης στο σύστημα σχ. 5.24. Για σταθερή ροή και αμελητέα πλευρική τριβή έχουμε:

$$(P_1 - P_2)(\Delta x \Delta y) = Q_G r_G (V_{G_2} - V_{G_1}) + Q_L r_L (V_{L_2} - V_{L_1}) \quad (5.69)$$



Φιγούρα 5.27:

Διάμετρος αεροδυναμικής τομής και προβλέψεις πίεσης σταγόνας σ' έναν τυπικό κώνο διάχυσης ενός scrubber. V_G είναι η ταχύτητα στο άνοιγμα

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ταχύτητα αλλάζει ελάχιστα αν και μπορεί να έχει υψηλή τιμή στο στόμιο και έτσι ο πρώτος όρος στα δεξιά είναι αμελητέος. Φυσιολογικά η ταχύτητα εισόδου του υγρού V_{L_1} είναι αμελητέα, ενώ η ταχύτητα εξόδου του υγρού V_{L_2} είναι ίση με την ταχύτητα του αερίου. Και έτσι εξ. (5.69) απλοποιημένη έχει ως:

$$P_1 - P_2 = \frac{Q_L r_L V_G}{\Delta x \Delta y} = \frac{Q_L Q_G r_L}{A^2} = V_G^2 r_L \frac{Q_L}{Q_G} \quad (5.70)$$

Παράδειγμα 5.27:

Για το scrubber που χρησιμοποιεί νερό υπολογίζουμε την πτώση πίεσης για:

$$V_G = Q_G / \Delta x \Delta y = 100 \text{ m/s} \text{ και } Q_L / Q_G = 0.001$$

Αντικαθιστώντας το από την εξ. (9.70) έχουμε:

$$P_1 - P_2 = \left(100 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.001) \left(\frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}}\right) = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{ Pa} \approx 0.1 \text{ atm}$$

Δυστυχώς τα στοιχεία που προκαλούν τις υψηλές πτώσεις πίεσης σε έναν scrubber είναι τα ίδια που τους κάνουν αποτελεσματικούς συγκεντρωτήρες μορίων: η ραγδαία επιτάχυνση του υγρού από το γρήγορα κινούμενο αέριο παράγει και τα δύο φαινόμενα. Το σχήμα 5.28 δείχνει εργαστηριακά αποτελέσματα από τους Lapple και Kamack, όπου χρησιμοποίησαν ένα είδος μορίου σε μια ποικιλία σχεδίων για καθαριστή. Βρήκαν ότι παρόλο που ο πιο μεγάλος εξοπλισμός δούλεψε καλύτερα από ότι ο μικρότερος, ακόμα φαινόταν να υπάρχει μια μοναδική σχέση μεταξύ της εισχώρησης και της πτώσης πίεσης, με όλη τη data για μια μεγάλη ποικιλία καθαριστών. Φήμες και χρήματα περιμένουν τον μηχανικό που μπορεί να διαχωρίσει έναν scrubber του οποίου η απόδοση εξαρτάται σημαντικά από το χαμηλότερο αριστερό μέρος των πειραματικών κωδικοποιημένων πληροφοριών που φαίνονται στη φιγούρα 5.28. Επιστρέφοντας στη φιγούρα 5.27 μπορούμε να το εικονογραφήσουμε χρησιμοποιώντας ένα ακόμα παράδειγμα.

Παράδειγμα 5.28:

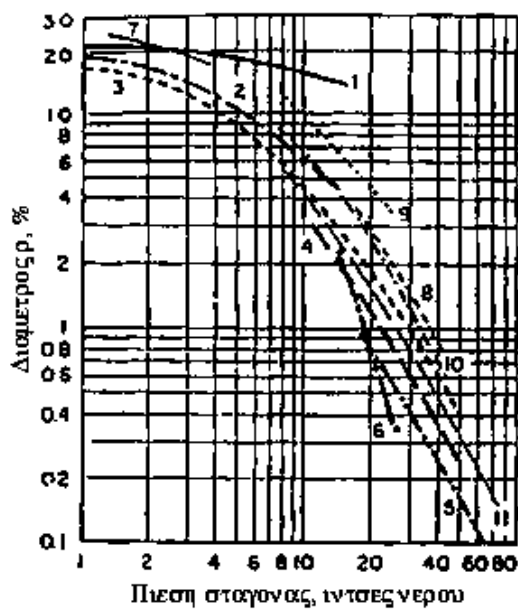
Θέλουμε να καθαρίσουμε τον χώρο ροής αερίου για να μετακινήσουμε τα περισσότερα μόρια. Συμπεραίνουμε εάν έχουμε μια διάμετρο 0.5μ τότε έχουμε έναν ικανοποιητικό καθαρισμό μορίων. Εάν χρησιμοποιήσουμε $Q_L / Q_G = 0.001$ τη ταχύτητα αερίου χρειαζόμαστε στο στόμιο, και ποια η αναμενόμενη πίεση;

Το σχ. 5.27 μας δείχνει αεροδυναμικούς διαμέτρους. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα για 0.5 – μ μπορούμε να υπολογίσουμε τον Cunningham παράγοντα όπως στο 1.24 οπότε και αεροδυναμική διάμετρος D_{pca} .

$$D_{pca} = (0.5\mu) \left(2 \frac{gm}{cm^3} \cdot 1.24 \right)^{\frac{1}{2}} = 0.79\mu \left(\frac{gm}{cm^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Από το σχ. 5.27 είναι ξεκάθαρο ότι θα χρειαζόταν ταχύτητα στομίου γύρω στα 90m/s και πίεση περίπου 80cm νερού. Ο venturi καθαριστής που συζητήθηκε προηγουμένως, είναι ο πιο ευρύτατα χρησιμοποιημένος καθαριστής μορίων. Στις πρώτες μέρες ελέγχου της μόλυνσης του αέρα μια μεγάλη ποικιλία σχεδίων για τον καθαριστή δοκιμάστηκαν, κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν. Οι περισσότεροι έχουν μικρές πτώσεις πίεσης και χαμηλή αποδοτικότητα συλλογής. Καθώς ο έλεγχος αποδοτικότητας αυξήθηκε οι χαμηλής-αποδοτικότητα scrubbers τέθηκαν εκτός λειτουργίας. Κάποιοι χρησιμοποιούνται ακόμα, αλλά λίγοι καινούριοι έχουν εγκατασταθεί. Ο venturi scrubber φαίνεται να έχει πάρα πολλές εφαρμογές στον μοριακό έλεγχο. Είναι σχετικά φτηνός να κατασκευαστεί και να εγκατασταθεί, κάνει πολύ καλύτερη δουλειά στα μόρια, παρά οτιδήποτε άλλο. Εάν τα μόρια που πρόκειται να συλλεχθούν είναι πισσωμένα, θα συγκολληθούν σε ένα φίλτρο ή σε έναν ESP. Οι λογικές επιλογές ελέγχου σ' αυτή την

περίπτωση είναι ή ένα φίλτρο ή ένας venturi scrubber. Για εκτεταμένη εφαρμογή ο venturi scrubber χρησιμοποιείται συνέχεια. Εάν ένα υγρό μπει σ' αυτή τη διαδικασία και τα μόρια του αερίου μπορούν να ξαναμπούν στη διαδικασία, τότε χρησιμοποιώντας την εισερχόμενη ροή του υγρού για να πιαστούν τα μόρια κι έτσι επαναφέροντας αυτά στη διαδικασία είναι συχνά πολύ οικονομικό.



Φιγούρα 5.28:

Αποτελέσματα δοκιμών των Lapple και Kamack για διείσδυση vs πίεσης σταγόνας σε ένα απλό είδος σωματιδίου σε μια ποικιλία τύπων και μεγεθών. Οι αριθμοί πάνω στις καμπύλες παραπέμπουν σε 11 τύπους και μεγέθη scrubbers, που ορίζονται στο αρχικό άρθρο.

5.3 Επιλογή ενός συλλεκτήρα.

Για την επιλογή μιας πρωταρχικής συσκευής συλλογής σωματιδίων πρέπει να εξεταστεί πρώτα το μέγεθος των σωματιδίων που πρόκειται να συλλεγούν, η απαιτούμενη αποδοτικότητα συλλογής, το μέγεθος της ροής του αερίου, ο επιτρεπόμενος χρόνος μεταξύ των καθαρισμών, και η λεπτομερής φύση των σωματιδίων. Οι παρακάτω πρακτικοί κανόνες μπορεί να είναι ωφέλιμοι:

(1).Οι μικρές και περιστασιακές ροές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από συσκευές μιας χρήσεως, πχ. φίλτρα τσιγάρου και λαδιού μηχανής, στις οποίες τα συλλεγόμενα σωματίδια παραμένουν μέσα στη συσκευή. Οι μεγάλες και σταθερές ροές απαιτούν συσκευές συλλογής που λειτουργούν συνεχώς ή κατά διαστήματα, και από τις οποίες τα συλλεγόμενα σωματίδια μπορούν να απομακρύνονται συνέχεια ή κατά διαστήματα. Η συσκευή μιας χρήσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια τελική συσκευή καθαρισμού, πχ. ένα υψηλής αποδοτικότητας φίλτρο μπορεί να απομακρύνει τα τελευταία ελάχιστα σωματίδια από τον αέρα που ρέει σε ένα μικροτσιπ παραγωγής καθαρού δωματίου.

(2).Κολλώδη σωματίδια (πχ. πίσσες) πρέπει να συλλέγονται είτε σε συσκευές μιας χρήσεως ή μέσα σε ένα ρευστό, όπως μέσα σε έναν scrubber ή κυκλώνιο, φίλτρο, ή ESP των οποίων οι επιφάνειες συλλογής καλύπτονται συνεχώς με ένα φιλμ ρευστού υγρού. Πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος επεξεργασίας του μολυσμένου υγρού που παράγεται κατ' αυτόν τον τρόπο.

(3).Τα σωματίδια που προσκολλώνται καλά το ένα στο άλλο αλλά όχι στις στερεές επιφάνειες είναι εύκολο να συλλεγούν. Εκείνα τα οποία συμπεριφέρονται αντίθετα χρειάζονται συχνά ειδικές επιφάνειες, πχ. ίνες καλυμμένες με τεφλόν στα φίλτρα που απελευθερώνουν συλλεγμένα σωματίδια κατά τη διάρκεια του καθαρισμού.

(4).Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των σωματιδίων είναι υπέρτατης σπουδαιότητας στα Esp., και συχνά είναι σημαντικές σε άλλες συσκευές ελέγχου όπου οι ηλεκτροστατικές φορτίσεις οι επαγόμενες από την τριβή πάνω στα σωματίδια μπορεί να βοηθήσουν ή να παρακωλύσουν την συλλογή.

(5).Για τα μη κολλώδη σωματίδια μεγαλύτερα από 5 μ περίπου, ο διαχωριστήρας κυκλωνίου είναι πιθανόν η μόνη συσκευή που χρειάζεται.

(6).Για σωματίδια αρκετά μικρότερα από 5 μ κάποιος λογικά εξετάζει τα ESPs, τα φίλτρα και στους scrubbers. Κάθε ένα από αυτά μπορεί να συλλέξει σωματίδια τόσο μικρά όσο το κλάσμα ενός micron.

(7).Για μεγάλες ροές το κόστος άντλησης καθιστά τους scrubbers πολύ δαπανηρούς, επιλέγονται άλλες συσκευές εάν είναι δυνατόν.

(8).Η αντίσταση στη διάβρωση και το σημείο υγροποίησης του οξέος πρέπει να εξετάζονται πάντοτε.

REFERENCES

- Halliday, E.C.: "A Historical Review of Atmospheric Pollution," in *World Health Organization Monograph Series*, No.46, Geneva, 1961.
- National Air Pollutant Emissions Estimates, 1900-1991*, EPA-454/R-92-013, 1992.
- "Comprehensive Technical Report on All Atmospheric Contaminants Associated with Photochemical Air Pollution," TM-(L)-4411/002/01, System Development Corporation, Santa Monica Calif., June 1970.
- "Air Quality Criteria for Oxides," AP-84, U.S.EPA, 1971.
- Tilling, R.I.: *Eruptions of Mt. St. Helens: Past, Present and Future*, U.S. Department of Interior/USGS (No date), p.17.
- Simmons, W. S., S. P. Rinne, N. S. Tesche, and B.R. Weir: "Toxicology of Fossil Fuel Combustion Products, Vols. 1 and 2." *EPRI EA-3920*. EPRI, Palo Alto, CA, 1985.
- Ferris, B. J. J.: "Health Effects of Exposure to Low Levels of Regulated Air Pollutants: A. Critical Review," *J. Air Pollut. Control Assoc.*, Vol.28, p. 482, 1978.
- Shy, C. M., J. R. Goldsmith, J. D. Hackney, M. D. Lebowitz, and D. B. Menzel: *Health Effects of Air Pollution*, American Lung Association, New York, 1978.
- Watson, A. Y., R. R. Bates, and D. Kennedy: *Air Pollution, The Automobile and Health*, National Academy Press, Washington, DC, 1988.
- Halliday, E. C.: "A Historical Review of Atmospheric Pollution," *World Health Organization Monograph Series*, No. 46, Geneva, Switzerland, pp. 9-37, 1961.
- Goldstein, Q., L. Aronow, And S. M. Kalman, *Principles of Drug Action*, 2d ed., John Wiley & Sons, New York, p. 89, 1974.
- Stokinger, H. E.: "Concepts of Thresholds in Standard Setting," *Arch. Environ. Health*, Vol. 25, p. 153, 1972.
- Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices*, American Conference of Governmental and Industrial Hygienists, Cincinnati, OH, annual editions.
- Ghering, P. J., P. G. Watanabe, J. D. Young, and J. E. Lebeau: "Metabolic Thresholds in Assessing Carcinogenic Hazard," in E. C. Blair (ed.), *Human Health and the Environment: A Collection of Dow Scientific Papers*, Vol. 2, Dow Chemical Company, Midland, MI, 1977.
- Shamberger, R. J.: *Biochemistry of Selenium*, Plenum, New York, p. 32, 1983.
- Coffin, D. L., E. J. Blommer, D. E. Gardner, and R. S. Holzman: "Effects of Air Pollution on Alteration of Susceptibility to Pulmonary Infection," *Proceedings of the Third Annual Conference on Atmospheric Contaminants in Confined Spaces*, Aerospace Medical Research Laboratory, Wright Patterson AF Base, Dayton, OH, pp. 71-80, 1968.
- Ambur, M. O.: "Aerosols Formed by Oxidation of Sulfur Dioxide: Review of Their Toxicology," *Arch. Environ Health*, Vol. 23, p. 459, 1971.
- Higgins, I. T. T.: "Effects of Sulfur Oxides and Particulates on Health." *Arch. Environ. Health*, Vol. 22, p. 584, 1971.

“Health Consequences of Sulfur Oxides: A Report from CHES 1970-1971,” *EPA-650/1-74-004*, United States EPA, 1974.

Subcommittee on Special Studies, Investigation and Oversight and the Subcommittee on Environment and Atmosphere of the Committee on Science and Technology. “The Environmental Protection Agency’s Research Program with Primary Emphasis on the Community Health and Environmental Surveillance System (CHES): An Investigative Report, ”*USGPO NO 77-590*, U. S>. House of Representatives, 1976.

Knelson, J. H.: “Evidence for the Influence of Sulfur Oxides and Particulates on Morbidity,” *Bull. N. Y. Acad. Med.*, Vol. 54. Pp. 1137-1154, 1978.

Ambur. M. O.: “Sulfuric Acid: The Animals Tried to Tell Us, ”*Appl. Ind. Hyg.*, Vol. 4, pp. 189-197,1989.

Lave, L. B., and E. P. Seskin: *Air Pollution and Human Health*, Johns Hopkins Baltimore, MD, 1977.

Dockery, D. W., Arden Pope, III, Xiping Xu, J. D. Spengler, J. H. Ware, M. E. Fay, B. G. Ferris, Jr., and F. E. Speizer: “An Association between Air Pollution and Mortality in Six U. S. Cities,” *New England J. of Medicine*. Vol. 54. Pp. 1753-1759, 1993.

Buechley, R. W., W. B. Riggan, and V. Hasselblad: “SO₂ Levels and Perturbations in Mortality: A Study in the New York- New Jersey Metropolis,” *Arch. Environ. Health*, Vol. 27, p. 134, 1973.

Schimmel, H.: “Evidence for Possible Acute Health Effects from Ambient Air Pollution from Time Series Analysis: Methodological Questions and Some New Results Based on New York City Daily Mortality, 1963-1976.” *Bull. N. Y. Acad. Med.*, vol. 54, pp. 1052-1108. 1978.

Pope, C. A., III, J. Schwarz, and M. R. Ransom: “Daily Mortality and PM₁₀ Pollution in Utah Valley,” *Arch. Environ, Health*, Vol. 47, no. 3, pp. 211-217, 1992.

MacLean, D. C.: “Stickstoffoxide als phytotoxische Luftverunreinigungen (Nitrogen Oxides as Phytotoxic Air Contaminants),” *Staub Reihalt, Luft*, Vol.35, pp. 205-210, 1975.

Schmidt-Thomsen, K.: “Steinzerstoerung und-Konservierung in Westfalen-Lippe (Stone Destruction and Conservation in Lippe-Westfalia), *Third International Clean Air Congress, Dusseldorf*, VDI Verlag, pp. A93-A97, 1972.

Modest, M. F.: *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, p. 398, 1993.

National Research Council, *Protecting Visibility in National Parks and Wilderness Areas*, National Academy Press, Washington, DC, 1993.

Pitchford, M. L., and W. C. Malm: “Development and Applications of a Standard Visual Index,” *Atmospheric Environment*, Vol.28, pp. 1049-1054, 1994.

Upham, J. B.: “Atmospheric Corrosion Studies in Two Metropolitan Areas,” *J. Air Pollut. Control Assoc.*, Vol. 17. P. 398, 1967.

de Nevers, N., R. E. Neligan, and H. H. Slater: “Air Quality Management, Pollution Control Strategies, Modeling and Evaluation,” in A. C. Stern (ed.), *Air Pollution*, Vol. 5, 3d ed., pp. 3-40, Academy, New York,1977.

de Nevers, N.: “Air Pollution Control Philosophies,” *J. Air Pollut. Control Assoc.*, Vol. 27, pp. 197-205, 1977.

Halliday, E. C.: "A Historical Review of Atmospheric Pollution," *Air Pollution*, World Health Organization Monograph Series No. 46, pp. 9-37, Geneva, Switzerland, 1961.

Burdick, L. R.: "Ringleman Smoke Chart (a Revision of 6888 by R. Kudlich)," *U. S. Bur. Mines Inform. Circ. 7718*, Washington, DC, 1955.

"Control of Air Pollution from New Motor Vehicles and new Motor Vehicle Engines; Certification and Test Procedures," 40CFR86.

Mann, T.: "Statement on Behalf of Automobile Manufacturers Association," *Air Pollution-1967 (Automotive Air Pollution)*, Hearings before the U. S. Senate Subcommittee on Public Works, 90th Congress, U. S. Government Printing Office, Washington, DC. Part I, p. 395, 1967.

Iacocca, L. A.: "Testimony at Hearings Before the Subcommittee on Air Water Pollution of the Committee on Public Works, United States Senate," U. S. Government Printing Office, Washington, DC. No. 5270-01940, p. 1103, 1973.

National Emission Standards Study: Report of the Secretary of Health Education, and Welfare to the Congress in Compliance with the Clean Air Act of 1967, U. S. Government Printing Office, Washington, DC, p. 106, April 1970, See also J. E. Bonine, Letter in *J. Air Pollut. Control Assoc.*, Vol. 25, p. 1099, 1975.

The Clean Air of 1970, PL 91-604 Sec. 109(b)-1.

40CFR50, National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards.

Environmental Protection Agency: "Requirements for Preparation, Adoption, and Submittal of Implementation Plans," *Federal Register*, Vol. 36, p. 8186, April 1971.

The air quality standard document (Ref.10) (Sec. 410.2(c)) says: "The promulgation of national primary and secondary ambient air quality standards shall not be considered in any manner to allow significant deterioration of existing air quality in any portion of any state.; Furthermore, the Clean Air Act (Sec. 101b(1)) says: " The purposes of this are (1) to protect and enhance the quality of the Nation's air resources...." These two quotations plus the legislative history of the air act formed the basis for the conservation group's successful suit to prevent pollution of the air up to the level of the standards.

de Nevers, N.: "Some Alternative PSD Policies," *J. Air Pollut. Control Assoc.*, Vol. 29, pp. 1139-1144, 1979.

Knelson, J. H.: "Developing Health Standards from Epidemiological and Clinical Data," presented at the 3rd Life Sciences Symposium, Los Alamos, New Mexico, October 1975.

Nixon, R. M.: "The President's 1972 Environmental Program," *Weekly Compilation of Presidential Documents*, Vol. 8, Issue 7, p. 220, 1972.

Lees, L., et al.: "Smog-A Report to the People," California Institute of Technology Environmental Quality Laboratory EQL Report No. 4, Pasadena, CA, January 1972.

Anon.: "Council Report, National Industrial Pollution Control Council," U. S. Dept. of Commerce, p. 13, February 1971.

"Air Quality and Automobile Emission Control," Vol. 4: "The Costs and Benefits of Automobile Emission Control," *A Report by the Coordinating Committee on Air Quality Studies, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering*, prepared for the Committee on Public Works, U. S. Senate, Serial 93-24, p. 258 et seq., September 1974.

“The Clean Air Act” as amended, (42 USC 1857-1857I), as amended by PL 91-604 and PL 101-549. (The first version of this act was passed in 1963, but the major, sweeping revision was in 1970. There were also major revisions in 1977 and 1990.)

Clean Air Act of 1990, PL 101-549 Sec. 303, Risk Assessment and Management Commissions.

“Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point And Area Sources,” 4th ed., AP-42, (U. S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711), 1985, with updates through 9/91, pp. 8.6-8.

The EPA’s regulations for locating ambient air monitors are in 40CFR58 App. E. The description of the analytical methods to use for measuring pollutants in ambient air are in 40CFR50 App. A-H.

Hawksley, P. G., S. Badzioch, and J. H. Blackett: *Measurement of Solids in Flue Gases*, British Coal Utilization Association, Leatherhead, Surrey, England, 1961.

Paulus, H. j., and R. W. Thron: “Stack Sampling,” In A. C. Stern (ed.), *Air Pollution*, Vol. 3, 3d ed., Academic Press, New York, pp. 525-587, 1976.

The EPA’s Regulations for Source testing are found mostly in 40CFR60 App. A.

“Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides,” P/EPA-600/8-82-026, Chapter 4, p.7-9, U. S. Government Printing Office, Washington, DC. 1982.

Suggs, H. J.: “Systems for Sampling of Ducts and Stacks.” In S. V. Hering (ed.), *Air Sampling Instruments*, 7th ed., American Conference Industrial Hygienists, Cincinnati, OH, p. 275, 1989.

“Compilation of Air Pollutant Emissions Factors Volume I: Stationary Point and Sources,” 4th ed., AP-42, U. S. EPA, Office of Air Quality Planning Standards, 1985, with updates through September 1991. There is also Volume II, “Mobile Sources,” for autos and other vehicles (also regularly updated).

Purdum, P. W.: “Source Monitoring.” In A. C. Stern (ed.), *Air Pollution*, Vol. 2, 2d ed., Academic Press, New York, pp. 537-560, 1968, p. 541.

Hering, S. V., ed.: *Air Sampling Instruments*, 7th ed., American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH, 1989.

Cooper, H. B. B., Jr. and A. T. Rossano, Jr.: *Source Testing for Air Pollution Control*, Environmental Research and Applications, Inc., Wilton CT, 1971.

Katz, M., ed.: *Methods of Air Sampling and Analysis*, 2d ed., American Public Health Association, Washington, DC, 1977.

Brenchley, D. L., C. D. Turley, and R. F. Yarmac: *Industrial Source Sampling*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 1973.

Stevens, R. K., and W. F. Herget: *Analytical Methods Applied to Air Pollution Measurements*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 1974.

Leithe, W.: *The Analysis of Air Pollutants*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 1971.

Hering, S. V.: “Inertial and Gravitational Collectors,” in S. V. Hering (ed.), *Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants*, 7th ed., American Council of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH, p. 361, 1989.

Ashbee, E., and W. T. Davis: “Cyclones and Separators,” in A. J. Buonicore and W. T. Davis (eds.), *Air Pollution Engineering Manual*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 73-78, 1992.

Rosin, P., E. Rammler, and W. Intenmann: "Grundlage und Grenzen der Zyklonentstabung ("Basis and limits of cyclone dust removal")." *VDI*, Vol. 76, pp. 433-437, 1932.

Semrau, K. T.: "Air Pollution" section of "Solids Drying and Gas-Solids Systems," in R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney (eds.), *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 20-86, 1984.

Anonymous: "Flows of Fluids through Valves, Fittings, and Pipes," Tech. Paper No. 410, Crane Company, 475 n. Gary Ave., Carol Stream, Ill. 1957 (regularly reprinted).

Oglesby, S., Jr., and G. B. Nichols: *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker, New York, 1978.

Danielson, J. A. (ed.), *Air Pollution Engineering Manual*, U. S. Environmental Protection Agency Report PB 225-132/QAS. Government Printing Office, Washington, DC, p. 149, 1967.

Ramsdell, T. G., Jr.: "Design Criteria for Precipitators for Modern Central Station Power Plants," *Proc. Amer Power Conf.*, Vol. 30, pp. 444-449, 1968.

Rinard, G: "Proof of Concept Testing of ESP Retrofit Technology for Low and High Resistivity Flyash," in *Proceedings of the 7th Particulate Control Symposium*, R. F. Altman (ed.) Volume I, pp. 19-1 to 19-14, Electric Power Research Institute, Pub GS 6208, 1988.

Lloyd, D. A.; *Electrostatic Precipitator Handbook*, Adam Hilger, Bristol, England, p. 34, 1998.

de Nevers, N.: *Fluid Mechanics for Chemical Engineers*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, Chapter 12, 1991.

de Nevers, N.: "Product in the Way' Processes," *Chem. Eng. Educ.*, Vol. 12, pp. 146-151, 1992.

Ensor, D. S., R. Hooper, W. Scheck, and R. C. Carr: "Performance and Engineering Evaluation of the Nucla Baghouse," in *Symposium on Particulate Control in Energy Processes*, U. S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/7-76-010, U. S. Government Printing Office, Washington, DC, 1976.

Carr, R. C., and W. B. Smith: "Fabric Filter Technology for Utility Coal-Fired Power Plants, Parts I-VI." These six Articles appeared in the 1984 *Journal of the Air Pollution Control Association* and were reprinted by the Electrical Power Research Institute as *EPRI CS-3724-SR*.

Dennis, R., and N. F. Surprenant: "Particulate Control Highlights: Research on Fabric Filtration Technology," U. S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/8-87/005d, U. S. Government Printing Office, Washington, DC, 1978.

Langmuir, I., and K. B. Blodgett: "A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories," U. S. Army Air Forces Technical Report No. 5418, 1946. (Available from the U. S. Department of Commerce as PB-27565).

Friedlander, S. K.: "theory of Aerosol Filtration," *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 50, pp. 1161-1164, 1958.

Calvert, S., J. Goldshmid, D. Leigh, and D. Mehta: *Scrubber Handbook*, NTIS No. PB-213-016, NTIS, Springfield, VA, 1972.

Calvert, S.: "Scrubbing," in A. C. Stern (ed.), *Air Pollution*, 3d ed., Vol. 5, Academy Press, New York, 1977.

Lapple, C. E., and H. J. Kamack: "Performance of Wet Dust Scrubbers," *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 51, pp. 110-121, 1955.

- ter Linden, A. J.: "Investigations into Cyclone Dust Collectors," *Inst. Mech. Engrs. Proc.*, Vol. 160, pp. 233-251, 1949.
- Leith, D., and W. Licht: "The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors-A New Theoretical Approach," *AIChE Symp. Series*, Vol. 126, pp. 196-206, 1972.
- Turner, J. H., P. A. Lawless, T. Yamamoto, D. W. Goy, G. P. Greiner, J. P. McKenna, and W. M. Vataavuk: "Electrostatic Precipitators" in A. J. Buonicore and W. T. Davis (eds.), *Air Pollution Engineering Manual*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 89-114, 1992.
- Linoya, K., and C. J. Orr: "Source Control by Filtration," in A. C. Stern (ed.), *Air Pollution*, Vol. 3, 2d ed., Academic Press, New York, pp. 409-435, 1968.