

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Διευθυντής: Επικ. Καθηγητής Ε.Π. Χίνης

**ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ
ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΕ
ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ**

**CALIBRATION OF ACTIVATED CARBON
CANISTERS FOR INDOOR RADON
CONCENTRATION MEASUREMENTS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
ΜΑΡΙΝΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

Σπουδαστή της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Λέκτορας Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	viii
ABSTRACT	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στις μετρήσεις συγκέντρωσης Ραδονίου	
1.1 Γενικά.....	1-1
1.2 Παραγωγή Ραδονίου.....	1-1
1.3 Ραδόνιο στη φύση.....	1-2
1.4 Ξαναανακαλύπτοντας το Ραδόνιο	1-2
1.5 Επικινδυνότητα Ραδονίου	1-3
1.6 Επικινδυνότητα θυγατρικών Ραδονίου.....	1-4
1.7 Φυσική συμπεριφορά θυγατρικών πυρήνων Ραδονίου	1-7
1.8 Συνέπειες από τη φυσική συμπεριφορά θυγατρικών Ραδονίου	1-8
1.9 Επισκοπήσεις Ραδονίου	1-9
1.10 Σκοπιμότητα επισκοπήσεων Ραδονίου	1-10
1.11 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας.....	1-11
Διαγράμματα του 1 ^{ου} Κεφαλαίου	1-13
Πίνακες του 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	1-16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Τεχνική παθητικών ολοκληρωτικών μετρήσεων συγκεντρώσεων Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους με χρήση ενεργού άνθρακα	
2.1 Εισαγωγή	2-1
2.2 Σκοπιμότητα χρήσης δοχείων με ενεργό άνθρακα	2-2
2.3 Αναδρομή στα πρώτα πειράματα βαθμονόμησης.....	2-6
2.4 Συμπεράσματα από τις πρώτες βαθμονομήσεις	2-8
2.5. Παράγοντες που επιδρούν.....	2-8
2.5.1 Επίδραση σχετικής υγρασίας	2-8
2.5.2 Επίδραση απελευθέρωσης Ραδονίου.....	2-9
2.5.3 Επίδραση κύμανσης στη συγκέντρωση Ραδονίου	2-9
2.5.4 Επίδραση στεγανότητας δοχείων	2-10
2.6 Πρώτες πρακτικές μετρήσεις.....	2-10
2.6.1 Μετρήσεις στην Eastern Pennsylvania.....	2-11

2.6.2 Μετρήσεις στο Maryland	2-11
2.7 Παρατηρήσεις και σχόλια	2-11
Διαγράμματα του 2 ^{ου} Κεφαλαίου	2-13
Πίνακες του 2 ^{ου} Κεφαλαίου	2-16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Τυποποίηση διαδικασιών μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδόνιου με χρήση δοχείων με ενεργό άνθρακα στην EPA-US	
3.1 Εισαγωγή	3-1
3.2 Υλικά και εξοπλισμός	3-1
3.2.1 Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα	3-1
3.2.2 Μετρητικά συστήματα	3-3
3.2.3 Θάλαμοι Ραδόνιου	3-4
3.2.4 Μεταλλικά δοχεία για βαθμονόμηση και μέτρηση υποστρώματος	3-5
3.2.5 Απόδοση μετρητικών συστημάτων	3-6
3.2.6 Ζύγιση	3-6
3.3 Βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα	3-6
3.3.1 Γενικά	3-6
3.3.2 Προετοιμασία μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα	3-7
3.3.3 Προετοιμασία θαλάμου Ραδόνιου	3-7
3.3.4 Ακολουθίες έκθεσης	3-8
3.3.5 Μέτρηση	3-8
3.3.6 Υπολογισμός συντελεστή βαθμονόμησης	3-8
3.3.7 Χάραξη καμπύλων βαθμονόμησης για 2 ήμερη έκθεση	3-9
3.3.8 Χάραξη καμπύλων βαθμονόμησης για έκθεση τυχαίας διάρκειας	3-10
3.4 Μέτρηση και υπολογισμός συγκέντρωσης Ραδόνιου	3-10
3.5 Σφάλμα μέτρησης και κατώτατο όριο ανίχνευσης	3-12
3.5.1 Σφάλμα μέτρησης	3-12
3.5.2 Κατώτατο όριο ανίχνευσης	3-12
3.6 Διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας	3-13
3.7 Παρατηρήσεις - σχόλια	3-14
Διαγράμματα του 3 ^{ου} Κεφαλαίου	3-16
Πίνακες του 3 ^{ου} Κεφαλαίου	3-22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Οργάνωση βαθμονόμησης δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

4.1 Εισαγωγή	4-1
4.2 Υλικά και εξοπλισμός	4-1
4.2.1 Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα	4-1
4.2.2 Μετρητικά συστήματα	4-3
4.2.3 Διαμόρφωση θωράκισης	4-6
4.2.4 Θάλαμοι Ραδονίου	4-8
4.2.5 Ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου	4-9
4.2.6 Πηγές Ραδονίου.....	4-11
4.2.7 Μετάγγιση Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου	4-13
4.2.8 Επιλογή πηγής και θαλάμου.....	4-13
4.2.9 Μεταλλικά δοχεία για βαθμονόμηση και μέτρηση υποστρώματος	4-16
4.2.10 Αναγέννηση	4-17
4.2.11 Ζύγιση	4-17
4.3 Συμπεράσματα.....	4-18
Διαγράμματα του 4 ^{ου} Κεφαλαίου	4-19
Πίνακες του 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	4-49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πρωτόκολλο πειραμάτων βαθμονόμησης δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδόνιο

5.1 Εισαγωγή	5-1
5.2 Διαδικασία πειράματος βαθμονόμησης	5-1
5.2.1 Ποιοτικός έλεγχος ενεργού άνθρακα	5-1
5.2.2 Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα – αναγέννηση – ζύγιση	5-1
5.2.3 Μηδενισμός πηγής "1"	5-2
5.2.4 Εξαερισμός θαλάμου "B"	5-4
5.2.5 Παραγωγή Ραδονίου από την πηγή "1"	5-5
5.2.6 Μετάγγιση Ραδονίου από την πηγή "1" στον θάλαμο "A"	5-5
5.2.7 Εκθεση σε συγκέντρωση Ραδονίου	5-7
5.2.8 Μέτρηση εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων	5-8
5.2.8.1 Γενικά.....	5-8
5.2.8.2 Μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN	5-10
5.2.8.3 Μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS.....	5-10

5.2.8.4 Σφάλματα μετρήσεων	5-11
5.2.9 Υπόστρωμα	5-12
5.2.9.1 Γενικά	5-12
5.2.9.2 Υπόστρωμα με τον ανιχνευτή VICTOREEN	5-12
5.2.9.3 Υπόστρωμα με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS	5-13
5.3 Απόδοση ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου	5-13
5.3.1 Γενικά	5-13
5.3.2 Μέτρηση μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης με τον ανιχνευτή VICTOREEN	5-14
5.3.3 Μέτρηση μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS	5-14
5.3.4 Σύνοψη βαθμών απόδοσης	5-15
5.4 Εκτίμηση αβεβαιότητας πρωτοκόλλου βαθμονόμησης	5-16
5.4.1 Γενικά	5-16
5.4.2 Εκτίμηση διαρροών Ραδονίου από τα μεταλλικά δοχεία	5-19
5.4.3 Αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας βαθμονόμησης	5-23
5.5 Ελάχιστος ανιχνευόμενος ρυθμός κρούσεων	5-23
5.6 Βελτιστοποίηση του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης	5-24
Διαγράμματα του 5 ^{ου} Κεφαλαίου	5-27
Πίνακες του 5 ^{ου} Κεφαλαίου	5-39
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα πειραμάτων βαθμονόμησης – συμπεράσματα και σχόλια	
6.1 Εισαγωγή	6-1
6.2 Συντελεστής βαθμονόμησης	6-2
6.3 Κατώτερο όριο ανίχνευσης	6-4
6.4 Πειράματα βαθμονόμησης	6-4
6.4.1 Χαρακτηριστικά μετρητικών διατάξεων	6-4
6.4.2 Χαρακτηριστικά πειραμάτων	6-5
6.4.3 Χαρακτηριστικά μετρήσεων	6-6
6.5 Αποτελέσματα	6-7
6.5.1 Κατηγοριοποίηση αποτελεσμάτων	6-7
6.5.2 Ανάλογα με το χρόνο έκθεσης για τον ανιχνευτή VICTOREEN	6-7
6.5.3 Ανάλογα με το χρόνο έκθεσης για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS	6-7

6.5.4 Ανάλογα με το δοχείο για τον ανιχνευτή VICTOREEN	6-10
6.5.5 Ανάλογα με το δοχείο για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS.....	6-11
6.5.6 Ανάλογα με την περιοχή χρόνου t για τον ανιχνευτή VICTOREEN	6-12
6.5.7 Ανάλογα με την περιοχή χρόνου t για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS	6-13
6.6 Επίλογος	6-15
6.6.1 Προτεινόμενη διαδικασία έκθεσης.....	6-15
6.6.2 Ελαχιστοποίηση συναλλαγής Ραδονίου με το περιβάλλον	6-15
6.6.3 Περαιτέρω διερεύνηση	6-17
6.6.4 Σχόλια.....	6-17
Πίνακες του 6 ^{ου} Κεφαλαίου	6-19
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	B-1

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το Ραδόνιο-222 είναι το βαρύτερο γνωστό αέριο στη φύση με ατομικό αριθμό 86, το οποίο επιπλέον είναι ευγενές και χημικά αδρανές. Το Ραδόνιο-222 παράγεται από την φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου-238 και ονομάζεται συνήθως απλά Ραδόνιο. Παρόλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας α σωματίδια. Δεδομένου ότι το Ουράνιο-238 είναι στερεό μέταλλο που συναντάται στο έδαφος, γίνεται αντιληπτό, ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ραδονίου βρίσκονται στο εδαφικό αέριο. Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης στο νερό των πηγών και στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα. Στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα η συγκέντρωση μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή $0 - 10 \text{ Bq m}^{-3}$. Στον ατμοσφαιρικό αέρα των εσωτερικών χώρων η συγκέντρωση του υπόψιν αερίου είναι πολύ πιο αυξημένη διότι όπως είναι φυσικό ο ρυθμός ανανέωσης είναι χαμηλός και το Ραδόνιο εισέρχεται συνεχώς από το εδαφικό αέριο γύρω από τα θεμέλια των χώρων με τη βοήθεια διαδικασιών διάχυσης ή μεταφοράς. Από ραδιενεργή άποψη το Ραδόνιο, διασπώμενο εκπέμπει α σωματίδια σχετικά μεγάλης ενέργειας - περί τα 5.5 MeV και ταυτόχρονα παράγει επίσης ραδιενεργά στερεά θυγατρικά που διασπώνται και αυτά εκπέμποντας α σωματίδια. Αν υπάρχει Ραδόνιο στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα τότε τα εκπεμπόμενα α σωματίδια από το εισπνεόμενο Ραδόνιο και τα θυγατρικά του, δυνατόν να δημιουργήσουν τραύματα στον εσωτερικό μαλακό ιστό του πνεύμονα, τα οποία έχουν σοβαρές πιθανότητες αν επαναλαμβάνονται συχνά με τον ίδιο τρόπο στο ίδιο ή κοντινό σημείο να οδηγήσουν σε καρκίνο. Δεδομένης της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του για τον άνθρωπο, επιβάλλεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους κατ' αρχήν των κατοικιών και κατά δεύτερο λόγο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων στα οποία συναθροίζονται μαζικά άνθρωποι, είτε για εργασία είτε για άλλους λόγους (π.χ. εκπαίδευση, νοσηλεία κ.α.). Απαιτούνται για αυτό το σκοπό: τεχνικές και πρωτόκολλα μετρήσεων της συγκέντρωσης του Ραδονίου που να πληροφορούν για την επικρατούσα συγκέντρωση Ραδονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Το διάστημα 1965 - 1980, αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Οι πιο ακριβείς μέθοδοι διαπιστώθηκε ότι ήταν οι ενεργητικές, όπως π.χ. οι ανοιχτοί θάλαμοι ιονισμού. Οι ενεργητικές μέθοδοι δεν έχουν αποκλειστικά πεδία εφαρμογής και δίνουν τη συγκέντρωση του Ραδονίου σχεδόν σε

πραγματικό χρόνο δηλ. συνήθως ανά 10 min αλλά απαιτούν ακριβό εξοπλισμό, πηγές ενέργειας, διαρκή ανθρώπινη επιτήρηση, τακτική συντήρηση και κατά συνέπεια έχουν υψηλότατο κόστος. Το κόστος αυτό κάνει απαγορευτική την εφαρμογή τους σε επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων και γενικά σε έρευνες μεγάλης κλίμακας. Στην πράξη, προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος από το Ραδόνιο δεν χρειάζεται παρά ο προσδιορισμός της μέσης συγκέντρωσής του για διαστήματα ημερών, εβδομάδων ή μηνών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν υπάρχουν παθητικές - ολοκληρωτικές μέθοδοι, οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των πολύπλοκων και χρηματοβόρων ενεργητικών μεθόδων. Μία βραχυ-μεσοπρόθεσμη παθητική – ολοκληρωτική τεχνική, μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, βέλτιστο χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου περίπου 48 h, αλλά σχετικά υψηλή αβεβαιότητα (~ 20%), είναι η τεχνική μέτρησης με τη χρήση δοχείων με ενεργό άνθρακα. Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζεται η αρχή στην οποία βασίζεται αυτή η τεχνική, εξετάζονται οι διαδικασίες βαθμονόμησης της τεχνικής αυτής που ακολουθούνται σε Εργαστήρια των Η.Π.Α., διερευνώνται οι δυνατότητες εφαρμογής τέτοιων διαδικασιών βαθμονόμησης στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ και τέλος γίνονται αντίστοιχα πειράματα βαθμονόμησης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Λέκτορα κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για τη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικά για τη συμβολή του στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας Επίκουρο Καθηγητή κ. Ε.Π. Χίνη για τη διάθεση αναγκαίων μικροποσών για δαπάνες προκειμένου για την πραγματοποίηση των αναγκαίων πειραμάτων και το προσωπικό του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας για τη τεχνική βοήθεια και την συμπαράστασή τους, όπου χρειάστηκε. Οι ευχαριστίες επεκτείνονται και στον Υποψήφιο Διδάκτορα του Τομέα κ. Κ. Καρφόπουλο, συνάδελφο Μηχανολόγο Μηχανικό για την πραγματοποίηση ορισμένων αναγκαίων – γ φασματοσκοπικών αναλύσεων καθώς και στον κ. Ε. Γεωργιάδη, ΙΔΑΧ, Προϊστάμενο Τμήματος Δ': "Γραμματεία Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης", της Γραμματείας ΕΔΕΙΑ ΕΜΠ, για την παροχή μεταλλικών δοχείων κατάλληλων για τα αναγκαία πειράματα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ
ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ
ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Διπλωματική Εργασία του Γ. Μαρινάκη

Σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία απασχολεί η βαθμονόμηση της τεχνικής μέτρησης της συγκέντρωσης του Ραδονίου που χρησιμοποιεί ενεργό άνθρακα και είναι δυνατόν να πληροφορεί για την επικρατούσα συγκέντρωση Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα των εσωτερικών χώρων. Η τεχνική αυτή είναι παθητική – ολοκληρωτική, έχει μικρό κόστος και χρησιμοποιεί απλά υλικά και διατάξεις. Επιπλέον, απαιτεί βραχυ-μεσοπρόθεσμη έκθεση σε εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα της τάξεως των 48 h. Πολλοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει πειράματα προκειμένου να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά προσρόφησης και κατακράτησης Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα, ώστε αυτός να χρησιμοποιείται –μέσα σε μεταλλικά δοχεία- ως παθητικές – ολοκληρωτικές συσκευές για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Τα δοχεία αυτά είναι προφανώς απλά και φθηνά, και δεν χρειάζονται καμία συντήρηση. Με τα πειράματα αυτά διαπιστώθηκε ότι 150 – 200 g ενεργού άνθρακα, είναι αρκετά για να μετρήσουν τη συγκέντρωση Ραδονίου σε έναν εσωτερικό χώρο με βολικό και εύκολο τρόπο. Τα δοχεία τοποθετούνται στον εσωτερικό χώρο που ενδιαφέρει και αφήνονται εκεί (αλλιώς "εκτίθενται") για περίπου 24 έως 72 h. Η συγκέντρωση του Ραδονίου στον εξεταζόμενο χώρο διαπιστώνεται από το πλήθος των θυγατρικών του που υπάρχουν στο εκτεθέν δοχείο μετά το τέλος της έκθεσης. Η μέθοδος όπως την επεξεργάστηκε πειραματικά ο George (1984) παρουσιάζει ελάχιστο όριο ανίχνευσης Ραδονίου περί τα 10 Bq m^{-3} ($\sim 0.2 \text{ pCi L}^{-1}$). Τα πειράματα έδειξαν ότι για σταθερή σχετική υγρασία, το πλήθος των θυγατρικών στα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα είναι κατευθείαν ανάλογο με την μέση συγκέντρωση του Ραδονίου στο χώρο που αυτά εκτέθηκαν. Τα αποτελέσματα που δίνει η μέθοδος φαίνεται ότι γενικά είναι επαναλήψιμα με αβεβαιότητα εύρους το πολύ $\pm 20\%$. Η αναφερόμενη αβεβαιότητα του $\pm 20\%$ παρότι χαμηλή, κρίνεται ικανοποιητική διότι είναι μέσα στην μεταβλητότητα που παρουσιάζουν οι πραγματικές συγκεντρώσεις Ραδονίου μέσα στις κατοικίες. Η μέθοδος αυτή συγκρινόμενη με άλλες παθητικές μεθόδους παρουσιάζει βέβαια πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα το κυριότερο των οποίων είναι ότι, αν η σχετική υγρασία του εσωτερικού χώρου είναι

υψηλότερη από τη συνήθως επικρατούσα 40 – 50% για την ανθρώπινη άνεση, τότε οι προσροφητικές ικανότητες Ραδονίου για τον ενεργό άνθρακα μειώνονται με αποτέλεσμα να απαιτείται ειδική βαθμονόμηση. Οι προσροφητικές ιδιότητες του ενεργού άνθρακα, δεν επιτρέπουν την ομοιόμορφη ολοκλήρωση για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου σε ένα χώρο στην χρονική έκταση της περιόδου έκθεσης. Η προφανής αιτία είναι ότι ο ενεργός άνθρακας εκτός από προσρόφηση παρουσιάζει και απελευθέρωση Ραδονίου. Διορθώσεις επίσης πρέπει να γίνονται και λόγω της ραδιενεργού διασπάσεως του προσροφηθέντος στον ενεργό άνθρακα Ραδονίου. Όπως όμως αποδείχθηκε, παρόλα τα προβλήματα, μπορεί να γίνει βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα προκειμένου να μετράται με αυτά η συγκέντρωση του Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Μάλιστα ο χρόνος έκθεσης των δοχείων αρκεί να είναι μόλις 48 h. Η υπηρεσία Environmental Protection Agency (Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος) των Η.Π.Α (EPA-US) έχει προχωρήσει στην ποιοτικότερη τυποποίηση για τη βαθμονόμηση αυτή. Οι σχετικές πρότυπες διαδικασίες αναφέρονται στην έκθεση του Gray (1987). Παρόλη την πληρότητα της έκθεσης αυτής σε ότι αφορά τις αναγκαίες διαδικασίες βαθμονόμησης και τον αντίστοιχο ποιοτικό τους έλεγχο, δεν γίνεται ικανοποιητική αναφορά στις προκύπτουσες αβεβαιότητες. Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) διαθέτει πολλαπλές δυνατότητες υλικών και εξοπλισμού προκειμένου για την οργάνωση της βαθμονόμησης μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου. Οποσδήποτε αυτές οι δυνατότητες δεν είναι ταυτόσημες με εκείνες της υπηρεσίας EPA-US. Παρόλαυτά, σημειώνεται ότι με κανέναν τρόπο δεν λείπουν τα απολύτως απαραίτητα, δηλαδή διατίθενται ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου διαφόρων τύπων, κατάλληλες θωρακίσεις των ανιχνευτών, θάλαμοι Ραδονίου και τέλος πηγές ^{226}Ra για τη δημιουργία συγκεντρώσεων Ραδονίου στους θαλάμους. Ο εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, φαίνεται ότι επαρκεί με πληρότητα για την οργάνωση πειραμάτων βαθμονόμησης δοχείων με ενεργό άνθρακα. Από τη διαθέσιμη ποικιλία έγιναν οι κατάλληλες επιλογές εργαστηριακών συσκευών και υλικών, ώστε να γίνει δυνατό να πραγματοποιηθούν πειράματα βαθμονόμησης. Δύο από τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τις επιλογές αυτές είναι (α) η χρησιμοποίηση συσκευών και διατάξεων όσο το δυνατόν μικρότερης αγοραίας αξίας, προκειμένου να βελτιστοποιείται ο λόγος απόδοση προς κόστος, και (β) η ΦΟΡΗΤΟΤΗΤΑ της προκύπτουσας μετρητικής μεθόδου για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου με μεταλλικά δοχεία με ενεργό

άνθρακα. Ειδικά για τη φορητότητα επισημαίνεται ότι εξασφαλίζεται από δύο συνιστώσες της βαθμονόμησης: (α) τη φορητότητα των προτεινόμενων χρησιμοποιούμενων ανιχνευτών και (β) τη φορητότητα της προτεινόμενης λυόμενης θωράκισης. Έτσι με αυτές τις διαφοροποιήσεις είναι δυνατόν, μικρή εργαστηριακή ομάδα αποτελούμενη από ένα – δύο άτομα να μεταβαίνει στην ομάδα κατοικιών προς μέτρηση συγκέντρωσης Ραδονίου και επιτόπου μετά από μικρή παραμονή για την έκθεση των δοχείων (48 – 72 h) να προβαίνει στις σχετικές μετρήσεις χωρίς να εμπλέκονται εργαστηριακοί χώροι και σταθερές εγκαταστάσεις. Το πρωτόκολλο των πειραμάτων βαθμονόμησης (οι κανόνες δηλαδή της πειραματικής διαδικασίας βαθμονόμησης) που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ παρουσιάζεται κατά τη σειρά των απαιτούμενων βημάτων. Σημαντικό βάρος δίνεται στην παρουσίαση του τρόπου που υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης των ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου και ο ελάχιστος ανιχνευόμενος ρυθμός κρούσεων. Επίσης βάρος δίνεται στην εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης. Τα πειράματα βαθμονόμησης των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, πραγματοποιήθηκαν με βάση το υπόψιν πρωτόκολλο. Ο προφανής στόχος των πειραμάτων είναι ο προσδιορισμός δύο μεγεθών: του συντελεστή βαθμονόμησης CF και του κατώτατου ορίου ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου (σε $Bq\ m^{-3}$) LLD . Τα πειράματα σε ό,τι αφορά την έκθεση σχεδιάστηκαν για να καλύψουν τις περισσότερες περιπτώσεις μετρήσεων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι έγιναν εκθέσεις 24 h και 48 h και κατασκευάστηκαν διάφορες βαθμονομημένες συγκεντρώσεις Ραδονίου στην περιοχή 1 – 3 $kBq\ m^{-3}$. Στο σύνολό τους τα πειράματα έγιναν στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες: τις περιβαλλοντικές συνθήκες του Εργαστηρίου. Με βάση αυτά τα πειράματα βαθμονόμησης μπορεί κανείς να πει με απόλυτη βεβαιότητα, ότι τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα, μετά από έκθεση μπορούν οπωσδήποτε να δείξουν αν η συγκέντρωση Ραδονίου υπερβαίνει τη σύσταση των 200 $Bq\ m^{-3}$ (90/143/EURATOM) και να προσδιορίσουν με ικανοποιητική ακρίβεια την τιμή της συγκέντρωσης αυτής.

ABSTRACT

CALIBRATION OF ACTIVATED CARBON CANISTERS FOR INDOOR RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS

Diploma Dissertation of G. Marinakis

Radon-222 (or simply Radon) is the heaviest naturally occurring gas with an atomic number of 86. It is one of the noble gases and chemically inert. Radon is generated within the natural radioactive chain of Uranium-238 and it decays to solid radioisotopes mainly by emitting α -particles. Considering the fact that Uranium-238 is a metal, which is usually found in the Earth's crust, it seems obvious that high values of radon concentration are expected to be met in soil gas. Radon concentrations are also detected in water springs and in environmental air outdoors. The concentrations outdoors typically range between 0 – 10 Bqm⁻³. However, radon concentrations indoors are much higher because of the low air exchange rate. Indoor Radon enters the inner building space at the foundation area through diffusion and advection processes. From the radioactive point of view, Radon emits α particles at 5.5 MeV, thus producing solid radioactive progeny, which also emit α particles. In case that there exists a Radon concentration indoors the produced α particles of inhaled Radon and Radon progeny may damage the lung tissue and even lead to cancer. Keeping in mind that Radon and its progeny may prove to be a health hazard, indoor Radon concentration measurements for both residential and public buildings are necessary. That is why there is a need for adequate techniques and protocols, which could measure Radon both precisely and accurately over the measurement period. Between 1965 and 1980 there were developed many such techniques for measuring indoor Radon concentration. The most precise and accurate are the active ones such as open ionization chambers. Active techniques have a wide range of application and give almost real time information on Radon concentration (usually every 10 minutes). Nevertheless, this kind of techniques need cost consuming equipment, external power, constant supervision, continuous maintenance and consequently they are very expensive, a fact that prohibits their wide application for large series of measurements. In practice, the danger from Radon could be estimated by its average concentration for a period of time e.g. for days, weeks or even months. This can be successfully accomplished using passive - integrating methods, replacing the complicated high cost active ones. A simple, cost - effective, short –mid term, passive -

integrating technique, that has an optimum time of exposure indoors of 48 h and relatively high uncertainty (~20%) is the charcoal canisters technique. The main scope of this Diploma Dissertation is, to present the principle behind this technique, to review the calibration procedures followed in U.S Laboratories, to investigate the possible application of such or similar calibration procedures in the Nuclear Engineering Laboratory at NTUA and last, but not least, to carry out an adequate set of calibration experiments.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

1.1 Γενικά

Το Ραδόνιο (Rn) είναι το βαρύτερο γνωστό αέριο στη φύση με ατομικό αριθμό 86, το οποίο επιπλέον είναι ευγενές και χημικά αδρανές. Διακρίνονται τέσσερα γνωστά ισότοπα του Ραδονίου: το ^{218}Rn , το ^{219}Rn , το ^{220}Rn και το ^{222}Rn . Από αυτά στη φύση του πλανήτη μας συναντώνται μόνο τα δύο: το Ραδόνιο-220 (^{220}Rn) και το Ραδόνιο-222 (^{222}Rn). Το Ραδόνιο-220 ονομάζεται συνήθως ΘΟΡΟΝΙΟ (thoron) διότι προέρχεται από τη φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Θορίου-232 (^{232}Th). Το Ραδόνιο-222 που προέρχεται από την φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου-238 (^{238}U) ονομάζεται συνήθως απλά ΡΑΔΟΝΙΟ (radon). Στη συνέχεια θα μας απασχολήσει πρακτικά μόνο το Ραδόνιο-222, το οποίο θα ονομάζουμε απλά Ραδόνιο. Σημειώνεται ότι το Ραδόνιο ανακαλύφθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα – αρχές του 20^{ου}. Η ανακάλυψή του χρεώνεται στον βρετανό E. Rutherford (1899) ή κατά άλλους, στον γερμανό F.E. Dorn (1900). Το γεγονός ότι το Ραδόνιο (και φυσικά το Θορόνιο) είναι ευγενή αέρια, οδήγησε την επιστημονική κοινότητα να τα αγνοήσουν ως παράγοντες κινδύνου για τον άνθρωπο, εξαιτίας της χημικής τους αδράνειας. Παρόλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας α σωματίδια.

1.2 Παραγωγή Ραδονίου

Το Ραδόνιο παράγεται από το ^{238}U , με διαδοχικές α διασπάσεις και β διασπάσεις, οι οποίες χονδρικά αναπαριστώνται στο με το Διάγραμμα 1.1. Σημειώνεται ότι τα ισότοπα σε αυτή τη σειρά των διασπάσεων έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

(α) πλην του Ραδονίου είναι στερεά, (β) ο χρόνος ημιζωής τους είναι γενικά πολύ μικρότερος από το χρόνο ημιζωής του ^{238}U και (γ) αν είναι $i = 1$ το ^{238}U και $i = 7$ το ^{222}Rn , τότε γενικά, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.1, $T_{1/2}(i) \gg T_{1/2}(i+1)$.

Αυτές οι ιδιότητες ως γνωστές ιδιότητες της φυσικώς ραδιενεργού σειράς του ^{238}U (M. Αγγελόπουλος, 1982), οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, στον πλανήτη μας, τα διαθέσιμα Bq Ραδονίου είναι όσα και τα Bq του ^{238}U . Με μαθηματικό τρόπο αυτή η παρατήρηση γράφεται ως:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_7 \quad (1.1)$$

ή αλλιώς:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_7 N_7 \quad (1.2)$$

όπου:

λ_i η πιθανότητα διασπάσεως του ισοτόπου i ($i = 1-7$), και

N_i ο αριθμός πυρήνων του ισοτόπου i

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ (secular equilibrium).

Δεδομένου ότι το ^{238}U είναι ένας από τους πολυπληθέστερους πυρήνες στη φύση του πλανήτη μας, γίνεται αντιληπτό ότι οι διαθέσιμη ραδιενέργεια από το Ραδόνιο είναι ποσοτικά εξαιρετικά σημαντική.

1.3 Ραδόνιο στη φύση

Δεδομένου ότι το Ραδόνιο παράγεται εμμέσως από το ^{238}U και αμέσως από το ^{226}Ra , τα οποία, όντας στερεά συναντώνται στο έδαφος, γίνεται αντιληπτό, ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ραδονίου βρίσκονται στο ΕΔΑΦΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (soil gas), στο αέριο δηλαδή που γεμίζει τους πόρους της στερεάς ύλης του εδάφους. Είναι προφανές, ότι το εδαφικό αέριο δεν έχει τη σύνθεση του ατμοσφαιρικού αέρα, διότι στο εσωτερικό του εδάφους διαχέονται ή / και παράγονται επίσης εκτός από το Ραδόνιο, και άλλα αέρια, όπως π.χ. οργανικά (μεθάνιο και άλλα καύσιμα αέρια), ή ευγενή (Ηλιον, Αργόν και άλλα). Η συγκέντρωση του Ραδονίου στο εδαφικό αέριο κυμαίνεται από 0.5 kBq m^{-3} έως αρκετά MBq m^{-3} . Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης στο νερό των πηγών (το οποίο υπενθυμίζεται, ότι είναι δυνατόν να "παρασύρει" Ραδόνιο από τους πόρους του εδάφους). Ως αντιπροσωπευτική τιμή θεωρείται η συγκέντρωση 10 Bq L^{-1} . Στο νερό της θάλασσας αντίθετα –το οποίο δεν είναι, όπως γίνεται κατανοητό, σε άμεση επαφή με το έδαφος- η συγκέντρωση του Ραδονίου είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη και γενικά μικρότερη από 1 Bq L^{-1} . Στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα, επίσης, η συγκέντρωση του Ραδονίου μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή $0 - 10 \text{ Bq m}^{-3}$.

1.4 Ξαναανακαλύπτοντας το Ραδόνιο

Μέχρι και την 1^η πετρελαϊκή κρίση (περί το 1973), οι δυτικές κοινωνίες, και κυρίως αυτές που κατοικούσαν σε βόρεια ή νότια πλάτη μεταξύ περίπου του 40° και του 60° γεωγραφικού παραλλήλου του πλανήτη, χρησιμοποιούσαν για τη διαμονή, την

εκπαίδευση, την εργασία και τη νοσηλεία, κτίρια, στα οποία διατίθονταν σύστημα θέρμανσης – εξαερισμού και κλιματισμού, το οποίο φρόντιζε για την υψηλή ποιότητα του ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ (indoor air), κυρίως μέσω της με μεγάλο ρυθμό ανανέωσής του με νέες ποσότητες εξωτερικού ελεύθερου ατμοσφαιρικού αέρα. Κάθε νέα ποσότητα από τον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα που έμπαινε στα κτίρια, έπρεπε να θερμανθεί ή να ψυχθεί, να υγρανθεί ή να ξηρανθεί με συνέπεια να καταναλώνονται σημαντικά ποσά ενέργειας για αυτό το σκοπό. Μετά την 1^η πετρελαϊκή κρίση, αυτό δεν μπορούσε φυσικά να συνεχισθεί. Ως αποτέλεσμα ο ρυθμός ανανέωσης του εσωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα περιορίστηκε μέχρι το σημείο που επέτρεψαν οι κανόνες υγιεινής. Άμεση συνέπεια αυτών των μέτρων ήταν η αύξηση των συγκεντρώσεων Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Ο λόγος είναι μάλλον προφανής. Ο περιορισμός των ποσοτήτων ελεύθερου ατμοσφαιρικού αέρα με πολύ χαμηλή συγκέντρωση Ραδονίου, που ανανέωνε τον αέρα στα κτίρια, επέτρεψε την αύξηση των συγκεντρώσεων του υπόψιν αερίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα, διότι δεν εξάγονταν πλέον προς τα έξω το Ραδόνιο που εισέρχονταν στα κτίρια από το εδαφικό αέριο γύρω από τα θεμέλιά τους, με τη βοήθεια διαδικασιών διάχυσης ή μεταφοράς. Η διαπίστωση αυτή έγινε πρώτα σε χώρους εφαρμογής πυρηνικών τεχνολογιών, στους οποίους υπήρχαν διαθέσιμα όργανα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων ραδιενεργών αερίων, για λόγους ασφαλείας.

1.5 Επικινδυνότητα Ραδονίου

Από ραδιενεργή άποψη το Ραδόνιο, διασπώμενο εκπέμπει –α σωματίδια σχετικά μεγάλης ενέργειας - περί τα 5.5 MeV. Αν υπάρχει Ραδόνιο στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα τότε εισπνεόμενο μαζί του, τα εκπεμπόμενα –α σωματίδια δυνατόν να δημιουργήσουν τραύματα στον εσωτερικό μαλακό ιστό του πνεύμονα, τα οποία έχουν σοβαρές πιθανότητες αν επαναλαμβάνονται συχνά με τον ίδιο τρόπο στο ίδιο ή κοντινό σημείο να οδηγήσουν σε καρκίνο. Παρόλαυτά, δεδομένου ότι ο χρόνος ημιζωής του ραδονίου είναι 3.5 ημέρες ($\approx 5000 \text{ min}$), η πιθανότητα διασπάσεως ενός πυρήνα του υπολογίζεται εύκολα σε $\ln(2)/(5000 \text{ min}) \approx 1.4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$. Με άλλα λόγια, μόλις 0.014% των υπαρχόντων πυρήνων Ραδονίου μέσα σε ένα χώρο θα διασπασθούν μέσα σε ένα λεπτό της ώρας. Εστω τώρα ότι αυτός ο χώρος είναι ο ανθρώπινος πνεύμονας. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, ο μέσος λευκός άνδρας, θα αναπνεύσει περίπου 0.02 m^3 στη διάρκεια του λεπτού (ICRP, 1975). Το πρακτικό συμπέρασμα αυτού του

συλλογισμού είναι, ότι ακόμα και αν ο εισπνεόμενος εσωτερικός αέρας περιέχει σημαντικό αριθμό πυρήνων Ραδονίου, αυτοί εισερχόμενοι στον ανθρώπινο πνεύμονα έχουν πολύ μικρή πιθανότητα να διασπασθούν και επομένως δεν αποτελούν ουσιαστική απειλή για το εσωτερικό του πνεύμονα.

1.6 Επικινδυνότητα θυγατρικών Ραδονίου

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η επικινδυνότητα των θυγατρικών πυρήνων του Ραδονίου μπορεί να διαμορφωθεί το Διάγραμμα 1.2, στο οποίο αναπαριστάται η φυσικά ραδιενεργή σειρά του ^{238}U , από το ισότοπο ^{226}Ra και μετά. Σημειώνεται ότι τα ισότοπα σε αυτή τη σειρά των διασπάσεων έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

(α) πλην του Ραδονίου είναι στερεά, (β) ο χρόνος ημιζωής τους είναι γενικά πολύ μικρότερος από το χρόνο ημιζωής του ^{226}Ra και (γ) αν είναι $i = 7$ το ^{226}Ra και $i = 16$ το ^{206}Pb , τότε γενικά, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.2, $T_{1/2}(i) \gg T_{1/2}(i+1)$.

Αυτές οι ιδιότητες ως γνωστές ιδιότητες της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ^{238}U (Μ. Αγγελόπουλος, 1982), οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, στον πλανήτη μας, τα διαθέσιμα Βq των θυγατρικών πυρήνων του Ραδονίου είναι όσα και τα Βq του ^{226}Ra . Με μαθηματικό τρόπο αυτή η παρατήρηση γράφεται, όπως είναι γνωστό, ως:

$$R_7 = R_8 = \dots = R_{16} \quad (1.3)$$

ή αλλιώς:

$$\lambda_7 N_7 = \lambda_8 N_8 = \dots = \lambda_{16} N_{16} \quad (1.4)$$

όπου:

λ_i η πιθανότητα διασπάσεως του ισότοπου i ($i = 7-16$), και

N_i ο αριθμός πυρήνων του ισότοπου i

Στον Πίνακα 1.2 περιλαμβάνονται επίσης στοιχεία για την ενέργεια των α σωματιδίων που εκπέμπονται από τους θυγατρικούς πυρήνες του Ραδονίου. Με βάση τα συγκεντρωμένα αυτά στοιχεία διατυπώνονται τα ακόλουθα συμπεράσματα, και γίνονται ορισμένα σχόλια, κυρίως για τους θυγατρικούς πυρήνες ^{218}Po και ^{214}Po , οι οποίοι θεωρούνται οι σημαντικότεροι, διότι διασπώνται δίνοντας α σωματίδια και έχουν μικρό χρόνο ημιζωής (πολύ μικρότερο από εκείνο του Ραδονίου):

(1) Αν στην ύλη υπάρχει μόνο ^{226}Ra ραδιενέργειας R_0 , τότε, εξαιτίας των ιδιοτήτων της ραδιενεργού σειράς του Διαγράμματος 1.2, μετά την πάροδο ευλόγου χρονικού διαστήματος, παράγεται Ραδόνιο ίσης ραδιενέργειας (ισοδύναμα το Ραδόνιο έρχεται σε ραδιενεργό ισορροπία με το ^{226}Ra). Το χρονικό διάστημα αυτό υπολογίζεται σε περίπου 20 ημέρες. Η ραδιενέργεια R του δημιουργούμενου Ραδονίου από τις διασπάσεις του ^{226}Ra , αυξάνει από 0 (τη χρονική στιγμή $t = 0$) έως R_0 , (τη χρονική στιγμή $t = 20$ ημέρες) σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = R_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.5)$$

όπου λ η πιθανότητα διάσπασης του Ραδονίου σε d^{-1} .

(2) Αν στην ύλη υπάρχει μόνο Ραδόνιο ραδιενέργειας R_0 , τότε, εξαιτίας των ιδιοτήτων της ραδιενεργού σειράς του Διαγράμματος 1.2, μετά την πάροδο ευλόγου χρονικού διαστήματος, παράγεται ^{218}Po ίσης ραδιενέργειας (το ^{218}Po έρχεται σε ραδιενεργό ισορροπία με το Ραδόνιο). Το χρονικό διάστημα αυτό υπολογίζεται σε περίπου 10 λεπτά της ώρας.

(3) Αν στην ύλη υπάρχει μόνο Ραδόνιο ραδιενέργειας R_0 , τότε, εξαιτίας των ιδιοτήτων της ραδιενεργού σειράς του Διαγράμματος 1.2, μετά την πάροδο ευλόγου χρονικού διαστήματος, παράγεται ^{214}Po ίσης ραδιενέργειας (το ^{214}Po έρχεται σε ραδιενεργό ισορροπία με το Ραδόνιο). Το χρονικό διάστημα αυτό υπολογίζεται σε περίπου 5 ώρες.

(4) Αν η εξεταζόμενη ύλη είναι ο εσωτερικός ατμοσφαιρικός αέρας, τότε αν σε αυτόν υπάρχει μόνο Ραδόνιο, πολύ σύντομα (5 ώρες) θα υπάρχουν θεωρητικά, ίσες ποσότητες ραδιενέργειας από τους θυγατρικούς του πυρήνες ^{218}Po και ^{214}Po .

(5) Οι θυγατρικοί πυρήνες του Ραδονίου ^{218}Po και ^{214}Po , όντας στερεά αιωρούνται στον ατμοσφαιρικό αέρα, διότι εύκολα δημιουργούν σε αυτόν ένα aerosol, το οποίο δεν είναι τίποτα άλλο από ένα κολλοειδές διάλυμα στερεού σε αέριο (όπως π.χ. είναι ο αιωρούμενος καπνός του τσιγάρου).

(6) Ως τμήμα πλέον του εσωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα οι υπόψιν θυγατρικοί πυρήνες του Ραδονίου ^{218}Po και ^{214}Po , εισπνέονται στον ανθρώπινο οργανισμό και παρουσιάζουν την εξής συμπεριφορά:

- (6α) Δεν εκπνέονται στο σύνολό τους, όπως θα συνέβαινε αν ήταν αέρια. Σημαντικότερο μέρος τους παραμένει στο εσωτερικό των πνευμόνων.

(6β) Διασπώνται με μεγάλη πιθανότητα στο εσωτερικό του πνεύμονα, δεδομένου ότι ο μεν πυρήνας ^{218}Po έχει χρόνο ημιζωής 3.05 min (δηλ. πιθανότητα διάσπασης περίπου $20\% \text{ min}^{-1}$ σε αντίθεση με την $0.014\% \text{ min}^{-1}$ του Ραδονίου), και ο πυρήνας ^{214}Po έχει χρόνο ημιζωής 19.9 min (δηλ. πιθανότητα διάσπασης περίπου $3.5\% \text{ min}^{-1}$ σε αντίθεση με την $0.014\% \text{ min}^{-1}$ του Ραδονίου).

(7) Τα εκπεμπόμενα α σωματίδια από τους δύο αυτούς θυγατρικούς πυρήνες του Ραδονίου έχουν ικανή ενέργεια ώστε να τραυματίσουν σημαντικά τον πνεύμονα, αν υπάρχουν στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα ικανές ποσότητες Ραδονίου ώστε να τα παράγουν σε αντίστοιχες βλαβερές συγκεντρώσεις.

Γίνεται αντιληπτό από τα προηγούμενα, ότι ο πραγματικός κίνδυνος από το Ραδόνιο, δεν οφείλεται στο Ραδόνιο αυτό καθεαυτό, αλλά στους (αναποφεύκτως) παραγόμενους θυγατρικούς πυρήνες του. Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην 90/143/EURATOM σύστασή της θεωρεί ότι ο κίνδυνος από τους θυγατρικούς πυρήνες γίνεται σημαντικός όταν η συγκέντρωση του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα φθάσει να είναι μεγαλύτερη από 200 Bq m^{-3} .

Η συνειδητοποίηση της επικινδυνότητας του Ραδονίου και των θυγατρικών του μετέβαλλε σημαντικά την αντίληψή μας σχετικά με την ενέργεια που δέχεται ο ανθρώπινος οργανισμός εξαιτίας ραδιενεργών πηγών. Ενώ μέχρι το 1980 (σύγκρισε UNSCEAR 1977 με UNSCEAR 1982; 1986) θεωρούνταν πρακτικά, ότι κατά μέσο όρο η ετήσια δόση τέτοιας ενέργειας ήταν περί το 1 mSv (milli – Sievert), η αναθεώρηση εξαιτίας του Ραδονίου επέβαλλε την νέα τιμή της κατά μέσο όρο ετήσιας δόσης να αυξηθεί 100% (!) στα 2 mSv. Στο Διάγραμμα 1.3 διακρίνονται οι διάφορες αιτίες της κατά μέσο όρο ετήσιας δόσης και το ποσοστό που τους αναλογεί στο σύνολο των 2 mSv.

Επίσης, το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του –με τον τρόπο που ξαναανακαλύφθηκαν μετά το 1973- βοήθησαν να εξηγηθούν καρκίνοι του πνεύμονα σε εργαζόμενους σε κλειστούς μη αεριζόμενους χώρους, όπως π.χ. σε ορυχεία, οι οποίοι παρουσιάζονταν παρόλο που είχαν ληφθεί μέτρα για την μείωση γνωστών παθογόνων παραγόντων όπως πυριτικές σκόνες κλπ. Επιπλέον δόθηκε αφορμή να ερευνηθεί μήπως το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του είναι αιτίες καρκίνου του πνεύμονα επειδή διαπιστώνονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα κατοικιών, σχολείων, εργοστασίων και νοσοκομείων.

1.7 Φυσική συμπεριφορά θυγατρικών πυρήνων Ραδονίου

Οι θυγατρικοί πυρήνες του Ραδονίου (στη συνέχεια: ΤΑ ΘΥΓΑΤΡΙΚΑ, radon progeny), του οποίου η συγκέντρωση μπορεί να θεωρείται γενικά ομοιόμορφη στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα, είναι στερεοί πυρήνες που παράγονται από τη ραδιενεργό διάσπασή του. Ως στερεοί πυρήνες, δεν υπακούουν φυσικά στους νόμους διαλυτότητας των αερίων, όπως αυτονόητα υπακούει το πατρικό τους αέριο Ραδόνιο που είναι διαλυμένο στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Με τη δημιουργία των θυγατρικών, αυτά άμεσα συμμετέχουν σε αυτό που λέγεται ατμοσφαιρικό aerosol, δηλαδή στο κολλοειδές διάλυμα στερεών σωματιδίων στο αέριο μίγμα που ονομάζεται εσωτερικός ατμοσφαιρικός αέρας. Τα θυγατρικά ως μέρος του aerosol, υπακούουν σε κινητική που συνοψίζεται στα ακόλουθα στοιχεία:

- (i) διαχέονται στον εσωτερικό χώρο (diffusion),
- (ii) προσκολλώνται (attachment) σε άλλα σωματίδια του εσωτερικού ατμοσφαιρικού aerosol,
- (iii) αποτίθενται (plate out) στις κατακόρυφες επιφάνειες του εσωτερικού χώρου, και
- (iv) κατακρημνίζονται (deposition) προς τις οριζόντιες επιφάνειες του εσωτερικού χώρου

Σε αυτό το σημείο παρατηρείται ότι, οι κινητικές (i) και (ii), σε αντίθεση με τις κινητικές (iii) και (iv), δεν αλλάζουν τη συγκέντρωση των θυγατρικών του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στην κινητική (ii), η οποία μπορεί να εξελιχθεί ως εξής:

(ii-α) Τα προσκολλημένα (attached) θυγατρικά πρωτευόντως κατακρημνίζονται (μηχανικά, λόγω μάζας) προς τις οριζόντιες επιφάνειες του εσωτερικού χώρου και δευτερευόντως αποτίθενται στις κατακόρυφες επιφάνειες.

(ii-β) Τα προσκολλημένα θυγατρικά, συναντούν άλλα σωματίδια του ατμοσφαιρικού aerosol με τα οποία συσσωματώνονται (coagulation) με αποτέλεσμα τα προκύπτοντα συσσωματώματα να αποκτήσουν μεγάλη σχετικά μάζα πράγμα που διευκολύνει την κατακρήμνισή τους προς τις οριζόντιες επιφάνειες του εσωτερικού χώρου.

(ii-γ) Η κινητική (ii) είναι γενικά πολύ ευαίσθητη στο ηλεκτρικό πεδίο της ατμόσφαιρας, το οποίο, υπό συνθήκες, μπορεί να ιονίσει (δηλ. φορτίσει) το ατμοσφαιρικό aerosol, με

αποτέλεσμα τη διάλυσή του λόγω ηλεκτροστατικών φαινομένων. Τέτοιο ρόλο σε ένα εσωτερικό χώρο μπορεί να παίζει π.χ. ένας ιονιστής ατμόσφαιρας. Ως αποτέλεσμα τέτοιων φαινομένων διαπιστώνεται ότι όλα τα προσκολλημένα θυγατρικά μεταβαίνουν από τον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα στις επιφάνειες του χώρου (οριζόντιες και κατακόρυφες). Στο χώρο παραμένουν τότε μόνο τα μη προσκολλημένα (unattached) θυγατρικά.

1.8 Συνέπειες από τη φυσική συμπεριφορά θυγατρικών Ραδονίου

Εστω ένας εσωτερικός χώρος όγκου $V \text{ m}^3$ στον οποίο υπάρχει Ραδόνιο σε ποσότητα $x \text{ Bq}$. Κατά συνέπεια, η συγκέντρωση του Ραδονίου στο χώρο είναι ίση με $C_{Rn} = x \text{ Bq}/(V \text{ m}^3)$. Σε διάστημα 5 ωρών θα παραχθούν από το Ραδόνιο αυτό ποσότητες θυγατρικών ^{218}Po και ^{214}Po , οι οποίες θα είναι ίσες και αυτές με $x \text{ Bq}$. Παρόλαυτά, θα είναι γενικά

$$C_{Po-218}, C_{Po-214} < C_{Rn} \quad (1.6)$$

διότι πολλά από τα $x \text{ Bq}$ των θυγατρικών ^{218}Po και ^{214}Po , αντί να βρίσκονται στον όγκο του εσωτερικού χώρου, εξαιτίας της κινητικής τους έχουν βρεθεί με διάφορους τρόπους στις επιφάνειες του εσωτερικού χώρου. Η ανισότητα 1.6 είναι τόσο πιο έντονη, όσο

(Α) ο λόγος επιφάνεια / όγκο (S/V) του χώρου είναι μεγαλύτερος (παραδείγμα: ένα δωμάτιο χωρίς έπιπλα παρουσιάζει μικρότερη ανισότητα 1.6 από το ίδιο δωμάτιο με έπιπλα),

(Β) ο χώρος είναι απαλλαγμένος από aerosol και σωματίδια σκόνης γενικότερα με αποτέλεσμα τα θυγατρικά να παραμένουν μη προσκολλημένα και σύντομα να αποτίθενται / κατακρημνίζονται προς τις όποιες επιφάνειες, και

(Γ) ο χώρος έχει ηλεκτροστατικά πεδία και ιόντα που κατακρημνίζουν το όποιο aerosol.

Η ανισότητα 1.6 δεν σημαίνει ότι υπάρχει απώλεια ύλης θυγατρικών, σημαίνει απλά ότι σημαντικό ποσοστό των θυγατρικών αντί να βρίσκεται στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα, βρίσκεται στις επιφάνειες του χώρου.

Ορίζεται ειδική ποσότητα, η οποία ονομάζεται ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ (equilibrium factor), η οποία παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, και αντιπροσωπεύει ένα μέτρο του ποσοστού των θυγατρικών που βρίσκονται στις επιφάνειες του χώρου. Ο ορισμός του συντελεστή ισορροπίας ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας αναπτύξεως. Σημειώνεται ότι, αν ο συντελεστής ισορροπίας έχει την τιμή "0", δεν υπάρχουν

θυγατρικά στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα (όλα έχουν αποτεθεί στις επιφάνειες του εσωτερικού χώρου) και αν ο συντελεστής ισορροπίας έχει την τιμή "1", τότε αντίθετα.

1.9. Επισκοπήσεις Ραδονίου

Δεδομένης της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν τα θυγατρικά του Ραδονίου για τον άνθρωπο, επιβάλλεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους κατ' αρχήν των κατοικιών και κατά δεύτερο λόγο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων στα οποία συναθροίζονται μαζικά άνθρωποι, είτε για εργασία είτε για άλλους λόγους (π.χ. εκπαίδευση, νοσηλεία κ.α.). Η μέτρηση της συγκέντρωσης Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους δεν μπορεί φυσικά να καλύψει όλο το οικιστικό / κτιριακό κεφάλαιο μιας περιοχής ή μίας χώρας και να παρακολουθήσει τις μεταβολές της συγκέντρωσής του με το χρόνο. Απαιτούνται για αυτό το σκοπό: (α) στατιστικές μέθοδοι που να εξασφαλίζουν γεωγραφική αντιπροσωπευτικότητα δηλαδή αντιπροσωπευτική επιλογή δείγματος (μικρού ποσοστού) του συνολικού αριθμού των κατοικιών και των λοιπών κτιρίων, στα οποία να μετρηθεί με κατάλληλη τεχνική η συγκέντρωση του Ραδονίου και (β) τεχνικές και πρωτόκολλα μετρήσεων της συγκέντρωσης του Ραδονίου που να πληροφορούν για την επικρατούσα συγκέντρωση Ραδονίου στο επιλεγθέν οικιστικό δείγμα κατά τη διάρκεια του ημερολογιακού έτους. Ο συνδυασμός των στατιστικών μεθόδων (α) με τις τεχνικές και τα πρωτόκολλα μετρήσεων (β) ονομάζονται ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (radon surveys). Οι επισκοπήσεις διακρίνονται σε ΕΘΝΙΚΕΣ (national radon surveys) και ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ (regional radon surveys). Οι εθνικές επισκοπήσεις αφορούν στη συνολική μελέτη της επικρατούσας συγκέντρωσης Ραδονίου σε αντιπροσωπευτικό δείγμα εσωτερικών χώρων από το σύνολο μιας χώρας, ενώ οι περιφερειακές επισκοπήσεις αφορούν στη μελέτη της επικρατούσας συγκέντρωσης Ραδονίου σε αντιπροσωπευτικό δείγμα εσωτερικών χώρων μιας περιφέρειας ή γενικότερα ενός μικρότερου τμήματος από μία χώρα. Με τη βοήθεια των επισκοπήσεων προκύπτουν χαρτογραφήσεις που παρουσιάζουν τις γεωγραφικές θέσεις με υψηλές ή χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους του οικιστικού / κτιριακού κεφαλαίου. Παράδειγμα χώρας στην οποία έχει πραγματοποιηθεί επιτυχής εθνική επισκόπηση Ραδονίου είναι η Ιταλία (δες π.χ. Bohicchio, 1996). Στην Ελλάδα, έχουν γίνει μόνο περιφερειακές επισκοπήσεις Ραδονίου (δες π.χ. Nikolopoulos D., 2003).

1.10. Σκοπιμότητα επισκοπήσεων Ραδονίου

Δεν διακρίνεται σκοπιμότητα πραγματοποίησης επισκοπήσεων Ραδονίου σε περιοχές όπου η συγκέντρωση ^{226}Ra (Bqkg^{-1}) στο έδαφος είναι χαμηλότερη από κάποιο όριο, διότι προφανώς όπου δεν υπάρχει πολύ ^{226}Ra στο έδαφος, δεν θα υπάρχει Ραδόνιο στο εδαφικό αέριο και ως εκ τούτου δεν θα εισέρχεται Ραδόνιο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων από τις διεπιφάνειες κτιρίου - εδάφους. Το όριο αυτό μπορεί να ορίζεται σχετικά αυθαίρετα. Για την περίπτωση της Ελλάδας σημειώνεται ότι το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ (ΕΠΤ – ΕΜΠ), έχει πραγματοποιήσει έρευνα σχετικά με τη συγκέντρωση του ^{226}Ra στα επιφανειακά εδάφη όλης της χώρας. Από την έρευνα αυτή προέκυψε λεπτομερής χαρτογράφηση της συγκέντρωσης ^{226}Ra στα ελληνικά επιφανειακά εδάφη, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1.4 (βλ. και Anagnostakis, 1996). Με βάση το Διάγραμμα 1.4 και τη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. UNSCEAR 1982; 1986), προκύπτει αβίαστα το συμπέρασμα ότι η Ελλάδα είναι μία από τις γεωγραφικές περιοχές του πλανήτη, στις οποίες η κατά μέσο όρο συγκέντρωση ^{226}Ra στα επιφανειακά εδάφη είναι εξαιρετικά χαμηλή και ίση με $25 \pm 19 \text{ Bqkg}^{-1}$.

Στην περίπτωση που η συγκέντρωση ^{226}Ra στα επιφανειακά εδάφη είναι μεγαλύτερη από το αυθαίρετο σχετικό όριο, δεν εννοείται άμεσα ότι υπάρχει σκοπιμότητα πραγματοποίησης επισκόπησης Ραδονίου για το οικιστικό κεφάλαιο που βρίσκεται στην περιοχή που παρατηρείται η αυξημένη αυτή συγκέντρωση. Αυτό συμβαίνει διότι, να μεν το Ραδόνιο μπορεί να παράγεται μέσα στο έδαφος λόγω της διάσπασης του ^{226}Ra , αλλά δεν είναι βέβαιο, ότι αυτό το Ραδόνιο, θα απελευθερωθεί προς τους πόρους του εδάφους και στη συνέχεια προς το εδαφικό αέριο (βλ. και Διάγραμμα 1.5) και προς τον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου διά της θεμελίωσης και γενικά διά της διεπιφάνειας κτιρίου – εδάφους (βλ. και Διάγραμμα 1.6). Η περιγραφόμενη απελευθέρωση του Ραδονίου, εξαρτάται πάρα πολύ από το είδος της κρυσταλλικής δομής του εδάφους, η οποία είναι δυνατόν να μην επιτρέπει στους πυρήνες του Ραδονίου να διαφύγουν προς τους πόρους του εδάφους. Τέτοιες κρυσταλλικές δομές είναι κυρίως αυτές που περιέχουν πυρίτιο (ισοδύναμα γυαλί) από τον κρύσταλλο του οποίου το Ραδόνιο δεν μπορεί να διαφύγει. Παρόλα αυτά οι πειραματικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να επιτρέψουν να αναγνωρίζονται τα εδάφη, τα οποία ενώ έχουν Ράδιο και παράγουν Ραδόνιο, δεν το απελευθερώνουν προς το εδαφικό αέριο, είναι πολύπλοκες και πολύ ακριβές. Αυτό επομένως οδηγεί έμμεσα στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση που η συγκέντρωση ^{226}Ra στα επιφανειακά εδάφη είναι

μεγαλύτερη από το αυθαίρετο σχετικό όριο, υπάρχει σκοπιμότητα πραγματοποίησης επισκόπησης Ραδονίου για το οικιστικό κεφάλαιο δεδομένου ότι αυτή στοιχίζει πολύ λιγότερο από το ενδιάμεσο βήμα, της διαπίστωσης δηλαδή της απελευθέρωσης του Ραδονίου προς το εδαφικό αέριο

1.11. Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

Δεν είναι στους σκοπούς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας να παρουσιαστούν οι στατιστικές μέθοδοι που ως μία συνιστώσα των επισκοπήσεων οδηγούν στην αντιπροσωπευτική επιλογή δείγματος του συνολικού αριθμού των κατοικιών και των λοιπών κτιρίων. Αντίθετα θα μας απασχολήσει μία από τις τεχνικές μετρήσεων της συγκέντρωσης του Ραδονίου που είναι δυνατόν να πληροφορεί για την επικρατούσα συγκέντρωση Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα των εσωτερικών χώρων. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι οι τεχνικές μέτρησης κατηγοριοποιούνται:

Σε ΠΑΘΗΤΙΚΕΣ – ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΕΣ (passive - integrating)
και ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ (active).

Παθητικές – ολοκληρωτικές (ή απλά "παθητικές") ονομάζονται οι τεχνικές οι οποίες δεν απαιτούν για να λειτουργήσουν ηλεκτρική ενέργεια ή άλλες μορφές ενέργειας και ανθρώπινη επιτήρηση. Οι παθητικές τεχνικές έχουν γενικά μικρό κόστος και χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο υποκατηγορίες:

Τις ΒΡΑΧΥ-ΜΕΣΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ (short-midterm) και τις ΜΕΣΟ-
ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ (mid-long term).

Οι βραχυ-μεσοπρόθεσμες παθητικές τεχνικές είναι εκείνες κατά τις οποίες ένας μάλλον απλός μηχανισμός εκτίθενται στον ατμοσφαιρικό αέρα εσωτερικού χώρου για χρονικό διάστημα μίας ημέρας έως και μίας το πολύ εβδομάδας. Μετά την έκθεση ο μηχανισμός αυτός μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο τρόπο και από τη μέτρηση να προκύψει συμπέρασμα για την κατά μέσο όρο συγκέντρωση Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα του εσωτερικού χώρου.

Οι μέσο-μακροπρόθεσμες παθητικές τεχνικές είναι εκείνες κατά τις οποίες ένας μάλλον απλός μηχανισμός εκτίθενται στον ατμοσφαιρικό αέρα εσωτερικού χώρου για χρονικό διάστημα της τάξεως του μήνα έως και ένα το πολύ έτος. Μετά την έκθεση ο μηχανισμός αυτός μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο τρόπο και από τη μέτρηση να

προκύψει συμπέρασμα για την κατά μέσο όρο συγκέντρωση Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα του εσωτερικού χώρου.

Οι παθητικές τεχνικές χωρίζονται επίσης και σε άλλες δύο υποκατηγορίες:

Τις υψηλής αβεβαιότητας και της χαμηλής αβεβαιότητας.

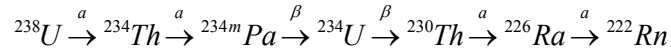
Υψηλής αβεβαιότητας θεωρούνται οι παθητικές τεχνικές των οποίων το πιθανό σφάλμα μέτρησης ξεπερνά το 20%.

Μία βραχυ-μεσοπρόθεσμη παθητική τεχνική, μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, βέλτιστο χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου περίπου 48 h, αλλά σχετικά υψηλή αβεβαιότητα (~ 20%), είναι η τεχνική των δοχείων με ενεργό άνθρακα.

Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας:

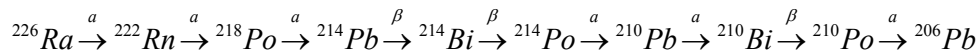
1. Θα παρουσιασθεί η αρχή της μεθόδου
2. Θα γίνει ανασκόπηση της σημαντικότερης σχετικής βιβλιογραφίας που αφορά στη βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους
3. Θα διερευνηθεί η επάρκεια εξοπλισμού και δυνατοτήτων του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ για την οργάνωση αντιστοίχων πειραμάτων βαθμονόμησης.
4. Θα προταθεί πρωτόκολλο πειραμάτων βαθμονόμησης με βάση τον διαθέσιμο εξοπλισμό και τις αντίστοιχες δυνατότητες.
5. Θα διεξαχθούν πειράματα βαθμονόμησης σύμφωνα με το προτεινόμενο πρωτόκολλο. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα αξιολογηθούν και θα γίνουν αν χρειάζεται προτάσεις για βελτίωση.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



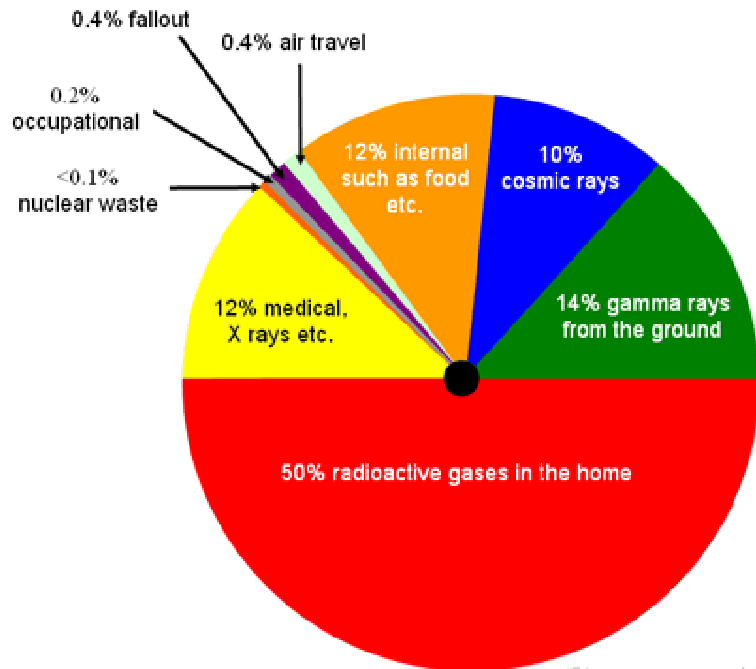
Διάγραμμα 1.1

Ραδιενεργός σειρά του ²³⁸U: Παραγωγή Ραδονίου



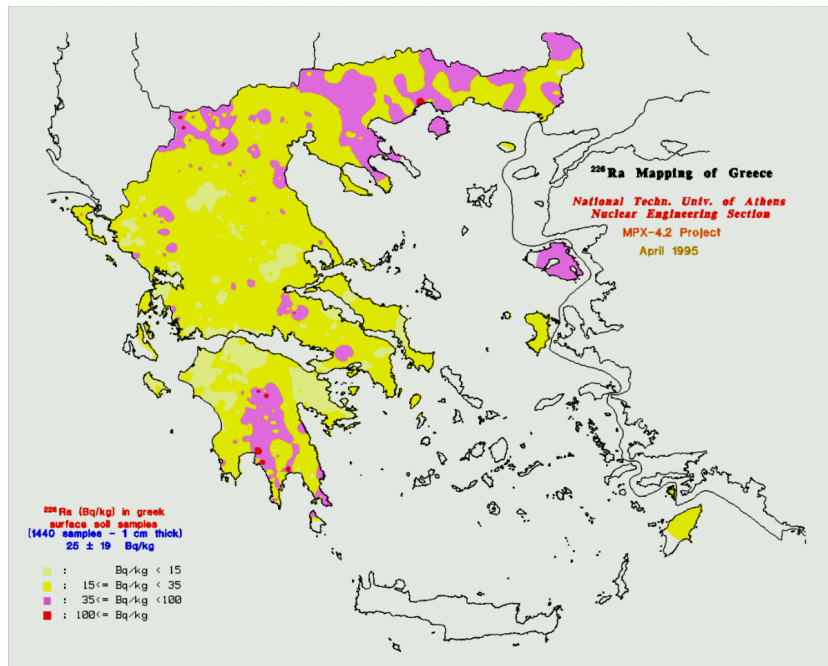
Διάγραμμα 1.2

Ραδιενεργός σειρά του ²³⁸U: Παραγωγή Ραδονίου και θυγατρικών



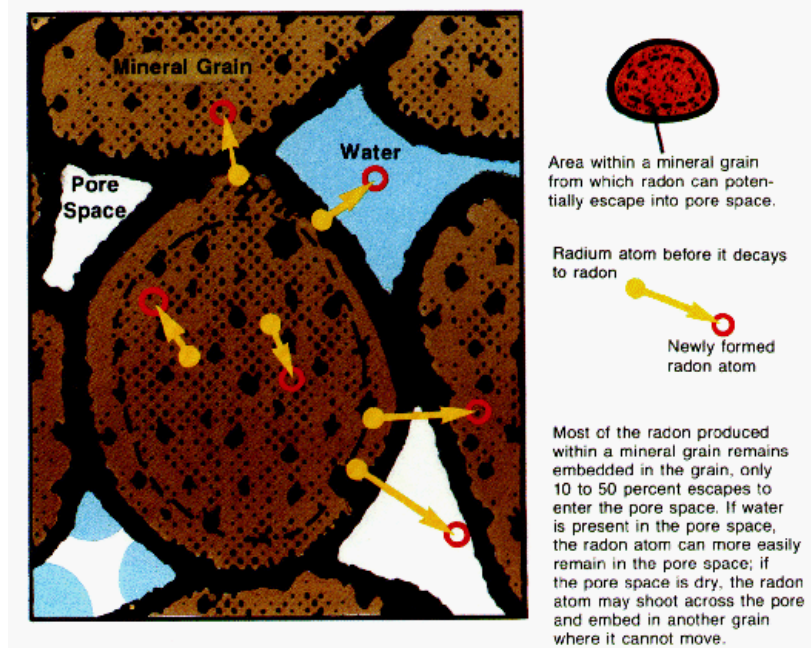
Διάγραμμα 1.3

Αιτίες της κατά μέσο όρο ετήσιας δόσης στον άνθρωπο από τη ραδιενέργεια και το ποσοστό που τους αναλογεί στο σύνολο των 2 mSv



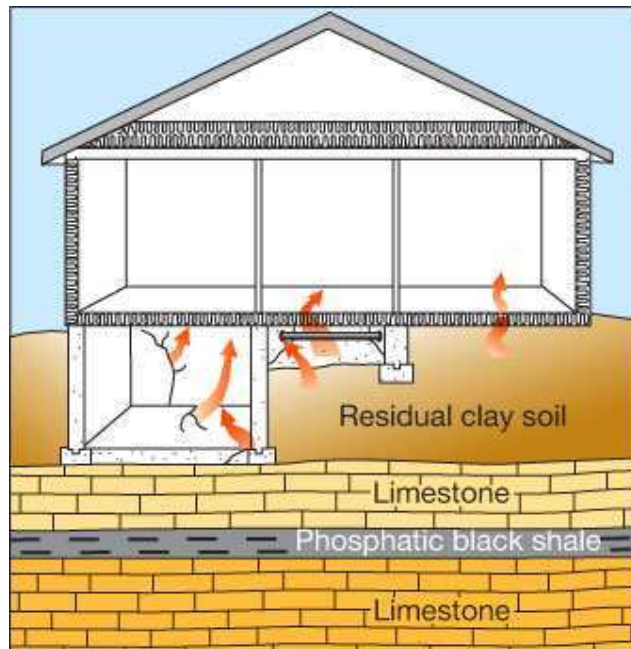
Διάγραμμα 1.4

Χαρτογράφηση της συγκέντρωσης ^{226}Ra στα ελληνικά επιφανειακά εδάφη



Διάγραμμα 1.5

Απελευθέρωση Ραδονίου προς τους πόρους του εδάφους και στη συνέχεια προς το εδαφικό αέριο



Διάγραμμα 1.6

**Οδευση του Ραδονίου από το εδαφικό αέριο προς τον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου
διά της θεμελίωσης και γενικά διά της διεπιφάνειας κτιρίου – εδάφους**

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

i	Ισότοπο	Χρόνος Ημιζωής
1	^{238}U	4.47×10^9 years
2	^{234}Th	24.1 days
3	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.17 min
4	^{234}U	2.45×10^5 years
5	^{230}Th	7.54×10^4 years
6	^{226}Ra	1600 years
7	^{222}Rn	3.8 days

Πίνακας 1.1

Ιδιότητες των ισότοπων του Διαγράμματος 1.1

i	Ισότοπο	Χρόνος Ημιζωής	Ενέργεια εκπεμπομένων α (MeV)
7	^{226}Ra	1600 years	
8	^{222}Rn	3.8 days	5.5
9	^{218}Po	3.05 min	6.0
10	^{214}Pb	26.8 min	
11	^{214}Bi	19.9 min	
12	^{214}Po	1.64×10^{-4} sec	7.7
13	^{210}Pb	22.3 years	
14	^{210}Bi	5.013 days	
15	^{210}Po	138.4 days	5.3
16	^{206}Pb	σταθερός	

Πίνακας 1.2

Ιδιότητες των ισότοπων του Διαγράμματος 1.2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

2.1 Εισαγωγή

Πολλοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει πειράματα προκειμένου να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά προσρόφησης και κατακράτησης Ραδονίου σε μεταλλικά δοχεία που περιέχουν ενεργό άνθρακα (στα αγγλικά: activated carbon ή activated charcoal), ώστε αυτά να χρησιμοποιούνται ως παθητικές – ολοκληρωτικές συσκευές για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Τα δοχεία αυτά είναι προφανώς απλά και φθηνά, εντελώς παθητικά και δεν χρειάζονται συντήρηση. Ένας από τους πρώτους τέτοιους ερευνητές τυχαίνει να είναι και ο Ανδρέας Γεωργίου, Ελληνοκύπριος, ο οποίος ως μόνιμος υπάλληλος του Environmental Measurements Laboratory, του U.S. Department of Energy (EML-USDOE), δημοσίευσε από τις πρώτες επιστημονικές εργασίες πάνω στο θέμα (βλ. π.χ. George, 1984). Ο George (1984) πραγματοποίησε τα πειράματά του σε τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας εσωτερικών χώρων. Με τα πειράματα αυτά διαπιστώθηκε ότι 150 – 200 g ενεργού άνθρακα μέσα σε μεταλλικά δοχεία, είναι αρκετά για να μετρήσουν τη συγκέντρωση Ραδονίου σε έναν εσωτερικό χώρο με βολικό και εύκολο τρόπο. Τα δοχεία τοποθετούνται στον εσωτερικό χώρο που ενδιαφέρει και αφήνονται εκεί (αλλιώς "εκτίθενται") για περίπου 72 h. Η συγκέντρωση του Ραδονίου στον εξεταζόμενο χώρο διαπιστώνεται από το πλήθος των θυγατρικών του που υπάρχουν στο εκτεθέν δοχείο μετά το τέλος της έκθεσης. Η εκτίμηση του πλήθους αυτού γίνεται με τη βοήθεια βαθμονομημένου ανιχνευτή φωτονίων. Η μέθοδος όπως την επεξεργάστηκε πειραματικά ο George (1984) παρουσιάζει ελάχιστο όριο ανίχνευσης Ραδονίου περί τα 10 Bqm^{-3} ($\sim 0.2 \text{ pCiL}^{-1}$). Τα πειράματα έδειξαν επίσης ότι για σταθερή σχετική υγρασία, το πλήθος των θυγατρικών στα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα είναι κατευθείαν ανάλογο με την μέση συγκέντρωση του Ραδονίου στο χώρο που αυτά εκτέθηκαν. Τα αποτελέσματα που δίνει η μέθοδος φαίνεται ότι γενικά είναι επαναλήψιμα με αβεβαιότητα εύρους το πολύ $\pm 20\%$.

2.2 Σκοπιμότητα χρήσης δοχείων με ενεργό άνθρακα

Το διάστημα 1965 – 1980, αναπτύχθηκαν αρκετές μέθοδοι για την μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Παρόλαυτά, οι περισσότερες σχεδιάσθηκαν και υλοποιήθηκαν έχοντας κατά νου συγκεκριμένες εφαρμογές, με συγκεκριμένα επίπεδα συγκεντρώσεων Ραδονίου, απαιτήσεις ακρίβειας και περιβάλλον δειγματοληψίας. Οι πιο ακριβείς και ταυτόχρονα οι πιο γενικευμένες μέθοδοι διαπιστώθηκε ότι ήταν οι ενεργητικές, όπως π.χ. οι ανοιχτοί θάλαμοι ιονισμού. Οι ενεργητικές μέθοδοι δεν έχουν αποκλειστικά πεδία εφαρμογής και δίνουν τη συγκέντρωση του Ραδονίου σχεδόν σε πραγματικό χρόνο δηλ. συνήθως ανά 10 min και σε άλλες –λίγες- περιπτώσεις ανά 3 min. Από την άλλη, οι ενεργητικές μέθοδοι απαιτούν ακριβό εξοπλισμό, πηγές ενέργειας, διαρκή ανθρώπινη επιτήρηση, τακτική συντήρηση και κατά συνέπεια έχουν υψηλότατο κόστος. Το κόστος αυτό κάνει απαγορευτική την εφαρμογή τους σε επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων και γενικά σε έρευνες μεγάλης κλίμακας.

Σε πολλές περιπτώσεις της πράξης προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος από το Ραδόνιο που προκύπτει για τους διαμένοντες σε εσωτερικούς χώρους δεν χρειάζεται παρά ο προσδιορισμός της μέσης συγκέντρωσής του για διαστήματα ημερών, εβδομάδων ή μηνών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν υπάρχουν παθητικές - ολοκληρωτικές μέθοδοι, οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των πολύπλοκων και χρηματοβόρων ενεργητικών μεθόδων. Τέτοιες μέθοδοι είναι:

- (α) "της πλαστικής σακούλας"
- (β) "της θερμοφωταύγειας"
- (γ) "των ανιχνευτών ιχνών" και τέλος
- (δ) "των δοχείων με ενεργό άνθρακα"

Η μέθοδος (α) όπως παρουσιάστηκε από την Sill (1969) χρησιμοποιεί πλαστικές σακούλες φτιαγμένες από πολυεστερικά φύλλα, τα λεγόμενα Mylar (είναι σαν τις σακούλες – μπαλόνια που πληρώνονται με ελαφρύτερα του αέρα αέρια, για τη διασκέδαση των παιδιών). Οι σακούλες αυτές κατασκευασμένες ώστε να έχουν χωρητικότητα 40 L τοποθετούνται στον εσωτερικό ή άλλο χώρο στον οποίο χρειάζεται να εξετασθεί η συγκέντρωση του Ραδονίου. Μία αντλία αέρα ενυδρείου, ευτελούς αξίας,

πολύ μικρής παροχής, περίπου 10 mL/min γεμίζει αργά τη σακούλα με αέρα του χώρου και επομένως και με το Ραδόνιο του χώρου. Η πλήρωση της σακούλας επιτυγχάνεται μέσα σε διάστημα περίπου 48 ωρών. Η σακούλα οδηγείται στη συνέχεια κοντά σε ανιχνευτή Ιωδιούχου Νατρίου (NaI), με τη βοήθεια του οποίου εκτιμάται το πλήθος των θυγατρικών του Ραδονίου τα οποία έχουν εγκλωβισθεί σε αυτή. Το πλήθος αυτό είναι ανάλογο με τη μέση 48ωρη συγκέντρωση του Ραδονίου που επικρατούσε στο χώρο όπου είχε τοποθετηθεί η σακούλα. Η μέθοδος (α) κρίνεται πολύπλοκη και έχει μάλλον υψηλό κατώτατο όριο ανίχνευσης και υψηλή αβεβαιότητα. Επιπλέον δεν είναι εντελώς παθητική, καθώς ηλεκτρομηχανικά μέρη εμπλέκονται στην δειγματοληψία. Οι πολυεστερικές σακούλες της μεθόδου δεν υπάρχουν στο εμπόριο, μπορούν όμως να κατασκευασθούν εύκολα. Επίσης μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν αφού αδειάσουν από τον αέρα της δειγματοληψίας.

Σύμφωνα με τη μέθοδο (β), ειδικοί κρύσταλλοι συνήθως δύο ειδών, οι οποίοι χημικά περιγράφονται από τους τύπους LiF:Mg,Ti και $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ αντίστοιχα, όταν εκτεθούν για μεγάλο διάστημα 1 έως 6 μηνών (ή σε άλλες περιπτώσεις έως 12 μήνες) σε ατμόσφαιρα με συγκέντρωση Ραδονίου, αποθηκεύουν στην κρυσταλλική τους δομή την ενέργεια που δέχονται από τα $-\alpha$ και τα $-\beta$ σωματίδια από τις διασπάσεις των θυγατρικών του Ραδονίου και τα σχετικά εκπεμπόμενα φωτόνια. Μετά την έκθεση οι κρύσταλλοι θερμαίνονται με ελεγχόμενο ρυθμό και εξαιτίας της θέρμανσης αποβάλλουν την αποθηκευμένη ενέργεια υπό τη μορφή φωτός. Η ποσότητα του εκπεμπόμενου φωτός είναι ανάλογη με τη μέση συγκέντρωση του Ραδονίου που επικρατούσε στο χώρο όπου είχαν τοποθετηθεί οι κρύσταλλοι. Η μέθοδος (β) παρότι παθητική απαιτεί για την "ανάγνωση" των κρυστάλλων πολύπλοκες συσκευές υψηλού κόστους. Έχει μάλλον υψηλό κατώτατο όριο ανίχνευσης, διότι προφανώς οι κρύσταλλοι αυτοί αποθηκεύουν ενέργεια και από την κοσμική ακτινοβολία του περιβάλλοντος, η οποία εισάγει σημαντικό θόρυβο. Οι κρύσταλλοι μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν αφού "ανοπτηθούν" (δηλ. αναγεννηθούν) σε υψηλή θερμοκρασία.

Η χρήση της μεθόδου (γ) βασίζεται στην αλληλεπίδραση των σωματιδίων $-\alpha$ με τα πολυμερή υλικά. Η αρχή λειτουργίας της είναι απλή και μπορεί να διατυπώνεται με την ακόλουθη σειρά. Το Ραδόνιο και δύο από τα θυγατρικά του, το ^{218}Po και το ^{214}Po διασπώνται εκπέμποντας $-\alpha$ σωματίδια. Τα εκπεμπόμενα $-\alpha$ σωματίδια στον αέρα έχουν ικανή ενέργεια ώστε σε αποστάσεις που απέχουν έως το πολύ 4 εκατοστά από το σημείο

εκπομπής τους να μπορούν να προκαλούν "ίχνη" (στα αγγλικά: tracks, δηλ. αόρατες στο γυμνό μάτι τοπικές "χαραγματιές") σε μαλακά κρυσταλλικά υλικά, όπως για παράδειγμα στα πολυμερή. Αν τα πολυμερή αυτά βρεθούν κάτω από το μικροσκόπιο τα προκληθέντα ίχνη μπορούν να μετρηθούν. Όσο πιο πολλά είναι τότε τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα Ραδονίου, από την οποία προσβλήθηκαν τα πολυμερή κατά τη διάρκεια του χρόνου που εκτέθηκαν. Τα κατάλληλα πολυμερή είναι το makrofoil (το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα CD/DVD) και κυρίως το CR-39 (το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι "πλαστικοί" φακοί οράσεως). Η μορφή η οποία δίνεται σε αυτά τα πολυμερή όταν χρησιμοποιούνται για το υπόψιν σκοπό είναι αυτή του πλαστικού φύλλου μικρού πάχους (έως 2 mm), το οποίο κόβεται σε τεμάχια (τα "πλακίδια") τυποποιημένων διαστάσεων με μήκος x πλάτος (1 έως 4 cm) x (1 έως 4) cm. Η μέθοδος (γ) είναι πλήρως παθητική απαιτεί για την "ανάγνωση" των πολυμερών απλά μικροσκόπια, αλλά φυσικά τα χρησιμοποιηθέντα πολυμερή τεμάχια δεν μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν. Αντιπροσωπευτική για τη μέθοδο αυτή θεωρείται η εργασία του Alter (1981). Το κατώτατο όριο ανίχνευσης της μεθόδου είναι πάρα πολύ ικανοποιητικό και συνήθως στην περιοχή 5 – 10 Bqm⁻³ με την προϋπόθεση ο χρόνος έκθεσης να είναι αρκετά μεγάλος (της τάξεως των μηνών).

Τέλος, η μέθοδος (δ), όπως παρουσιάζεται από τον George (1984), βασίζεται στην ιδιότητα του ενεργού άνθρακα να προσροφά (στα αγγλικά: to adsorb) αέρια και ατμούς της ατμόσφαιρας, συμπεριλαμβανομένου του Ραδονίου. Σημειώνεται εδώ ότι ο ενεργός άνθρακας είναι καθαρός άνθρακας σε μορφή κόκκων, ο κάθε ένας από τους οποίους παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλο μικροπορώδες με αποτέλεσμα ο λόγος της επιφανείας του προς τον όγκο του να είναι δυσανάλογα μεγάλος (παρουσιάζει δηλαδή σε μικροκλίμακα τη μορφή σφουγγαριού). Λόγω αυτού του μικροπορώδους ο ενεργός άνθρακας έχει εξαιρετικές προσροφητικές ιδιότητες. Το Ραδόνιο που προσροφάται στους κόκκους του ενεργού άνθρακα διασπάται, όπως είναι γνωστό σε αρκετά θυγατρικά ραδιενεργά ισότοπα, τα σπουδαιότερα των οποίων είναι (βλ. π.χ. Αγγελόπουλος, 1983): το Πολώνιο – 218 (²¹⁸Po), ο Μόλυβδος – 214 (²¹⁴Pb), το Βισμούθιο-214 (²¹⁴Bi) και ο Μόλυβδος-210 (²¹⁰Pb). Η συγκέντρωση του Ραδονίου σε έναν εσωτερικό χώρο είναι δυνατόν να εκτιμηθεί αν ανοιχτά δοχεία με ενεργό άνθρακα τοποθετηθούν σε αυτόν για μικρό χρονικό διάστημα της τάξεως μερικών ημερών. Τα δοχεία αφού αφαιρεθούν από το χώρο, κλείνονται στεγανά, για να μην αποβληθεί το

προσροφηθέν Ραδόνιο. Μετά από χρόνο αναμονής περίπου 3 ωρών το προσροφηθέν στον ενεργό άνθρακα των δοχείων Ραδόνιο, έρχεται σε ραδιενεργό ισορροπία με τα θυγατρικά Πολώνιο – 218 (^{218}Po), Μόλυβδος – 214 (^{214}Pb) και Βισμούθιο-214 (^{214}Bi). Τα θυγατρικά Μόλυβδος – 214 (^{214}Pb) και Βισμούθιο-214 (^{214}Bi), έχουν την ιδιότητα να εκπέμπουν φωτόνια. Συγκεκριμένα ο Μόλυβδος-214 εκπέμπει κυριότερα φωτόνια στις ενέργειες 295 keV και 352 keV, ενώ το Βισμούθιο-214 εκπέμπει κυριότερα φωτόνια ενέργειας 609 keV. Το πλήθος των εκπεμπόμενων φωτονίων, το οποίο μπορεί κατ'αρχήν να μετράται με ανιχνευτές NaI, είναι κατευθείαν ανάλογο με τη μέση τιμή της συγκέντρωσης του Ραδονίου στο χώρο είχαν τοποθετηθεί τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα.

Η μέθοδος (δ) συγκρινόμενη με τις λοιπές πιο πάνω παθητικές μεθόδους παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ως εξής:

Υπέρ:

- (1) Φθηνές πρώτες ύλες,
- (2) Εξαιρετική απλότητα συγκρότησης του συστήματος "δοχείο και ενεργός άνθρακας",
- (3) Μηδενικός χρόνος συγκρότησης του συστήματος "δοχείο και ενεργός άνθρακας",
- (4) Μικρός χρόνος έκθεσης (της τάξεως ημερών) ακόμα και για την διαπίστωση συγκεντρώσεων Ραδονίου κοντά στο κατώτερο όριο ανίχνευσης (περί τα 10 Bqm^{-3})
- (5) Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των δοχείων με τον ενεργό άνθρακα μέσω διαδικασίας αναγέννησής τους
- (6) Τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα δεν χρειάζονται συντήρηση
- (7) Το κατώτατο όριο ανίχνευσης είναι συγκρίσιμο με εκείνο της μεθόδου (γ)

Κατά:

- (1) Χαμηλή αλλά παρόλαυτά ικανοποιητική επαναληψιμότητα με εύρος $\pm 20\%$.
- (2) Αν η σχετική υγρασία του εσωτερικού χώρου είναι υψηλότερη από τη συνήθως επικρατούσα 40 – 50% για την ανθρώπινη άνεση, τότε οι προσροφητικές ικανότητες Ραδονίου για τον ενεργό άνθρακα μειώνονται.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και παρόλα τα κάποια (μικρά) μειονεκτήματα, υπάρχει επομένως σαφής σκοπιμότητα για τη χρήση των δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη διαπίστωση συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα εσωτερικών χώρων, κυρίως αν πρόκειται για έρευνες που εκτείνονται σε πολλούς και διαφορετικούς χώρους, διαρκούν πολύ, έχουν σχετικά μειωμένες απαιτήσεις ακρίβειας και τέλος αποσκοπούν κυρίως στην εκτίμηση της μέσης επικρατούσας συγκέντρωσης του Ραδονίου.

2.3 Αναδρομή στα πρώτα πειράματα βαθμονόμησης

Οι προσροφητικές ιδιότητες του ενεργού άνθρακα είχαν διερευνηθεί ήδη στο EML-USDOE από το 1976 (Countess, 1976), για τη μέτρηση του ρυθμού εκροής Ραδονίου από επιφάνειες κατασκευασμένες με οικοδομικά υλικά, με τρόπο του οποίου η περιγραφή δεν εντάσσεται στο περιεχόμενο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Ως δοχείο με ενεργό άνθρακα χρησιμοποιήθηκε τότε, το κυλινδρικό μεταλλικό στρατιωτικό φίλτρο M11, χρήσιμο για τις μάσκες προστασίας έναντι του βιοχημικού πολέμου του στρατού των Η.Π.Α (βλ. Διάγραμμα 2.1). Το M11 αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου. Προκειμένου το M11 να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους αφαιρείται το κάλυμμα που εμποδίζει την απευθείας επαφή του ενεργού άνθρακα με τον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα και τοποθετείται πώμα στην πλευρά που έχει το σπείρωμα σύνδεσης με την αντιασφυξιογόνο μάσκα. Το δοχείο M11 περιέχει 150 g συμπιεσμένου ενεργού άνθρακα με διάμετρο κόκκων 30 x 12 mesh (δηλαδή με διάμετρο κόκκων μεταξύ περίπου 0.5 και 1.7 mm). Το στρώμα ενεργού άνθρακα στο δοχείο M11 είναι κυλινδρικό με διατομή 87 cm² και όγκο 270 cm³. Το άκρο από όπου το κάλυμμα του φίλτρου έχει αφαιρεθεί παραμένει ανοικτό τόσο κατά την έκθεση όσο και κατά την μέτρηση του ενεργού άνθρακα. Για τη μέτρηση της ποσότητας των θυγατρικών του Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα χρησιμοποιείται ανιχνευτής NaI. Πριν από κάθε έκθεση το δοχείο M11 χρειάζεται να θερμαίνεται (να αναγεννάται όπως λέγεται) στους 120° C για αρκετές ώρες (8 – 12) προκειμένου να αποβάλλει τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο από προηγούμενες εκθέσεις ή από το χώρο φύλαξής του. Στα διαστήματα που μεσολαβούν από την θέρμανση του δοχείου μέχρι την έκθεσή του και από το τέλος της έκθεσής του μέχρι την μέτρησή του, το άνοιγμα του φίλτρου στεγανοποιείται αεροστεγώς με κατάλληλο λεπτό μεταλλικό κάλυμμα.

Ο George (1984) βαθμονόμησε τα δοχεία με ενεργό άνθρακα M11 με την ακόλουθη βασική τεχνική:

Χρησιμοποίησε για την έκθεση των δοχείων σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις Ραδονίου, συγκεκριμένες θερμοκρασίες και συγκεκριμένες σχετικές υγρασίες, ένα θάλαμο Ραδονίου όγκου 20 m³. Για τον έλεγχο της τιμής της συγκέντρωσης του Ραδονίου μέσα στο θάλαμο χρησιμοποίησε ενεργητικές τεχνικές. Οι θερμοκρασίες έκθεσης ήταν στην περιοχή 18 – 27° C και οι σχετικές υγρασίες έκθεσης ήταν στην περιοχή 15 – 100%. Για κάθε πείραμα βαθμονόμησης υπήρξε μέριμνα ώστε η συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο να είναι περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια της έκθεσης. Μετά την έκθεση, τα δοχεία παρέμειναν σε αναμονή επί τρίωρο στεγανά κλεισμένα, μέχρι να επέλθει ισορροπία του προσροφηθέντος Ραδονίου με τα θυγατρικά του. Για τη μέτρηση των δοχείων μετά την έκθεση και την αναμονή χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικός ανιχνευτής NaI(Tl) διαστάσεων 8 x 8 cm (ισοδύναμα 3 x 3"). Η μέτρηση των δοχείων διαρκούσε 10 min. Προέκυψε ένας εμπειρικός συντελεστής βαθμονόμησης *CF* που υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$CF = \frac{N}{E \cdot T_s \cdot Rn \cdot DF} \quad (2.1)$$

όπου:

N ο καθαρός ρυθμός μετρούμενων φωτονίων στον ανιχνευτή σε CPM

E ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή για τη γεωμετρία των δοχείων M11 σε CPMpCi⁻¹

T_s ο χρόνος έκθεσης σε min

Rn η συγκέντρωση του Ραδονίου κατά την έκθεση σε pCiL⁻¹

DF συντελεστής διόρθωσης ίσος με το κλάσμα του Ραδονίου που έχει διασπασθεί μετρώντας το χρόνο από τη μέση του χρονικού διαστήματος έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης

Με βάση τα παραπάνω ο εμπειρικός συντελεστής βαθμονόμησης προέκυψε σε Lmin⁻¹.

Μετά από αρκετά πειράματα σε διάφορες σχετικές υγρασίες μέσα στο θάλαμο Ραδονίου ο George (1984) κατέληξε σε συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το συντελεστή βαθμονόμησης, όπως αυτά συνοψίζονται στο Διάγραμμα 2.2.

2.4 Συμπεράσματα από τις πρώτες βαθμονομήσεις

Σύμφωνα με τα πειράματα βαθμονόμησης του George (1984) μπορούν να διατυπώνονται τα ακόλουθα:

- Ο συντελεστής βαθμονόμησης CF μειώνεται σημαντικά αν υπάρχει υψηλή υγρασία
- Ο συντελεστής βαθμονόμησης CF μειώνεται σημαντικά αν η έκθεση διαρκεί πολλές ώρες.
- Για χρονικό διάστημα έκθεσης 72 ωρών σε περιβαλλοντικές συνθήκες Εργαστηρίου, δηλαδή σε θερμοκρασία 23° C και υγρασία 50%, ο συντελεστής βαθμονόμησης CF υπολογίζεται σε $0.042 \pm 0.003 \text{ Lmin}^{-1}$.
- Τα πειράματα που έγιναν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος από 18 έως 27° C δεν δείχνουν εμφανή επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή βαθμονόμησης.
- Το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης για έκθεση 72 h, όταν τα δοχεία μετρώνται μετά από αναμονή 3 ωρών είναι 0.2 pCiL^{-1} .
- Το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης για έκθεση 72 h, όταν τα δοχεία μετρώνται μετά από αναμονή 72 ωρών αυξάνεται ελαφρά στα 0.3 pCiL^{-1} .
- Η επίδραση του συντελεστή διόρθωσης DF στον συντελεστή βαθμονόμησης CF εξαρτάται πάρα πολύ από τον αν έχει επιτευχθεί σταθερή συγκέντρωση Ραδονίου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων βαθμονόμησης.

2.5 Παράγοντες που επιδρούν

2.5.1 Επίδραση σχετικής υγρασίας

Από τα πειράματα βαθμονόμησης του George (1984) προέκυψαν και διαγράμματα όπως το Διάγραμμα 2.3. Το Διάγραμμα αυτό δείχνει καθαρά –όπως έμμεσα φαίνεται και από το Διάγραμμα 2.2, ότι για σταθερό χρόνο έκθεσης η προσροφούμενη υγρασία (δηλ. το προσροφούμενο νερό) έχει πολύ σημαντική αρνητική επίδραση στο συντελεστή βαθμονόμησης CF . Διαγράμματα όπως το 2.3 μπορεί κανείς να πάρει πολλά για διάφορες συνθήκες.

2.5.2 Επίδραση απελευθέρωσης Ραδονίου

Πειράματα του George (1984) που έγιναν σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση Ραδονίου 35 pCiL^{-1} ($\sim 1300 \text{ Bq m}^{-3}$), στην οποία τα δοχεία εκτέθηκαν για 72 h, έδειξαν ότι αν μετά την έκθεση τα δοχεία αφεθούν ανοιχτά για 36 h σε περιβάλλον με χαμηλή συγκέντρωση Ραδονίου $0.2 - 0.3 \text{ pCiL}^{-1}$ ($\sim 8 - 12 \text{ Bq m}^{-3}$), θα απελευθερώσουν το 50% του Ραδονίου που προσέλαβαν κατά την έκθεση. Είναι προφανές ότι για να αποφευχθεί αυτή η απελευθέρωση (στα αγγλικά: desorption), τα δοχεία πρέπει να κλείνουν στεγανά μετά την έκθεσή τους.

2.5.3 Επίδραση κύμανσης στη συγκέντρωση Ραδονίου

Αφού τα δοχεία, όχι μόνο προσροφούν αλλά και απελευθερώνουν Ραδόνιο, ο George (1984) φυσικά συμπεράνε ότι η μέθοδος του ενεργού άνθρακα δεν είναι τέλεια από ολοκληρωτική άποψη. Έτσι, αν για το χρονικό διάστημα 0 έως π.χ. t_1 της έκθεσης υπάρχει έστω συγκέντρωση Ραδονίου $x \text{ Bq m}^{-3}$, η οποία για το χρονικό διάστημα t_1 έως π.χ. t_2 ακολουθείται από συγκέντρωση $y < x$ είναι φανερό ότι κατά το χρονικό διάστημα $t_1 - t_2$ ο ενεργός άνθρακας είναι δυνατόν να απελευθερώνει Ραδόνιο. Προκειμένου να μελετηθεί ποσοτικά αυτό το συμπέρασμα ο George (1984) προχώρησε στα εξής πειράματα:

(α) Δοχεία M11 με ενεργό άνθρακα εκτέθηκαν σε συγκέντρωση Ραδονίου $x = 26 \text{ pCiL}^{-1}$ ($\sim 950 \text{ Bq m}^{-3}$) για $t_1 = 9 \text{ h}$, και σε συνέχεια σε συγκέντρωση Ραδονίου $y = 0.6 \text{ pCiL}^{-1}$ ($\sim 20 \text{ Bq m}^{-3}$) για $t_2 - t_1 = 63 \text{ h}$.

(β) Δοχεία M11 με ενεργό άνθρακα εκτέθηκαν σε συγκέντρωση Ραδονίου $x = 0.6 \text{ pCiL}^{-1}$ ($\sim 20 \text{ Bq m}^{-3}$) για $t_1 = 9 \text{ h}$, και σε συνέχεια σε συγκέντρωση Ραδονίου $y = 26 \text{ pCiL}^{-1}$ ($\sim 950 \text{ Bq m}^{-3}$) για $t_2 - t_1 = 63 \text{ h}$.

Το αποτέλεσμα του πειράματος (α) ήταν ότι όταν μετρήθηκαν τα δοχεία υποεκτιμήθηκε η μέση συγκέντρωση του Ραδονίου μετά την έκθεση για το χρονικό $0 - t_2$ κατά ένα συντελεστή 0.5.

Το αποτέλεσμα του πειράματος (β) ήταν ότι όταν μετρήθηκαν τα δοχεία υπερεκτιμήθηκε η μέση συγκέντρωση του Ραδονίου μετά την έκθεση για το χρονικό $0 - t_2$ κατά ένα συντελεστή 2.5.

Βέβαια οι συγκεντρώσεις του Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους παρουσιάζουν πολύ μικρότερη μεταβλητότητα από αυτή των πειραμάτων (α) και (β), και κατά συνέπεια τα εισαγόμενα από αυτήν σφάλματα, είναι τάξεις μεγέθους μικρότερα και μάλλον δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων με τη μέθοδο του ενεργού άνθρακα.

Προκειμένου να αποκτηθεί βεβαιότητα σχετικά με το πιο πάνω συμπέρασμα ο George (1984), προχώρησε σε πείραμα με τεχνητή μεταβλητή συγκέντρωση και σταθερή υγρασία, που έγινε στον διαθέσιμο θάλαμο Ραδονίου των 20 m³. Η συγκέντρωση κατά τη διάρκεια του πειράματος μεταβλήθηκε με έναν συντελεστή 10, στο διάστημα από 5 έως 55 pCiL⁻¹ (~185 – 2035 Bq m⁻³) και μετρήθηκε τόσο με ενεργητικές τεχνικές όσο και με τα δοχεία M11. Το πείραμα απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.4. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του Ραδονίου που υπολογίστηκε από τις ενεργητικές τεχνικές δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνη που μετρήθηκε με τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα.

Στο ερώτημα αν τα ίδια ισχύουν και σε ένα πραγματικό περιβάλλον κατοικίας, ο George (1984) προχώρησε σε πείραμα πραγματικής μέτρησης, το οποίο απεικονίζεται με τη βοήθεια του Διαγράμματος 2.5. Και εκεί η συγκέντρωση κατά τη διάρκεια του πειράματος μετρήθηκε τόσο με ενεργητικές τεχνικές όσο και με τα δοχεία M11. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του Ραδονίου που υπολογίστηκε από τις ενεργητικές τεχνικές δεν διαφέρει σημαντικά από εκείνη που μετρήθηκε με τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα.

2.5.4 Επίδραση στεγανότητας δοχείων

Προκειμένου να διαπιστωθεί τέλος αν τα δοχεία M11, όπως χρησιμοποιούνται, είναι αρκετά στεγανά, και δεν απελευθερώνουν Ραδόνιο κατά τη διάρκεια της αναμονής για την ισορροπία ο George (1984) οργάνωσε πειράματα κατά το οποία αυτά εκτέθηκαν σε συγκεντρώσεις Ραδονίου επί περίπου 60 h σε διάφορες συνθήκες υγρασίας. Μετά το τέλος της έκθεσης τα δοχεία έκλεισαν στεγανά και άρχισαν διαδοχικές μετρήσεις με τον ανιχνευτή NaI(Tl), οι οποίες σε διάστημα 7 ημερών έδειξαν ότι το εγκλωβισμένο στα δοχεία Ραδόνιο απομειωνόταν κατά το νόμο διασπάσεώς του με απόκλιση της τάξεως του ± 5%. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν επομένως ότι τα δοχεία είναι αρκούντως στεγανά.

2.6 Πρώτες πρακτικές μετρήσεις

Ο George (1984) ήταν ο πρώτος που διέκρινε τη δυνατότητα που έχουν τα δοχεία με ενεργό άνθρακα, να χρησιμοποιηθούν ως παθητικές ολοκληρωτικές συσκευές για τη

μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου κυρίως σε επισκοπήσεις Ραδονίου που αφορούν κατοικίες.

2.6.1 Μετρήσεις στην Eastern Pennsylvania

Οι πρώτες πρακτικές μετρήσεις έγιναν σε κατοικίες στην Eastern Pennsylvania. Μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις Ραδονίου στα κελάρια 12 κτιρίων χρησιμοποιώντας δύο δοχεία M11 σε κάθε ένα από αυτά. Τα κελάρια αυτά είχαν επίσης μετρηθεί με την τεχνική των ιχνών από τον Alter (1981). Ο Alter (1981) εξέθεσε βέβαια τα πολυμερή πλακίδια για δύο μήνες, ενώ ο George, εξέθεσε τα ζευγάρια των δοχείων για 65 μολίς ώρες. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται στον Πίνακα 2.1. Δεν υπήρξε ζευγάρι ανιχνευτών που να δείξει διαφορά στη μέτρηση της συγκέντρωσης στην ίδια θέση μεγαλύτερη από 10%. Επιπλέον οι μετρήσεις που έγιναν με τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα δεν διαφέρουν γενικά από τις μετρήσεις που έγιναν με τα πολυμερή. Φυσικά επειδή οι μετρήσεις πολυμερών και ενεργού άνθρακα δεν ήταν ταυτόχρονες οι παρατηρούμενες διαφορές μπορεί να οφείλονται σε πραγματικά διαφορετικές συνθήκες συγκέντρωσης Ραδονίου.

2.6.2 Μετρήσεις στο Maryland

Το 1982 ο George (1984) μέτρησε με τον ίδιο τρόπο 35 μονοκατοικίες στο Maryland. Η αποστολή των δοχείων από το EML-USDOE έγινε με το ταχυδρομείο σε οικίες εθελοντών με τους οποίους είχε υπάρξει προσυνεννόηση. Η συλλογή των δοχείων από το EML-USDOE έγινε επίσης με το ταχυδρομείο. Σε κάθε οικία μετρήθηκαν δύο θέσεις: το κελάρι και το ισόγειο. Σε κάθε θέση τοποθετήθηκαν δύο δοχεία. Η έκθεση διήρκεσε 60 - 70 h. Το χαμηλό κατώτατο όριο ανίχνευσης επέτρεψε την μέτρηση των δοχείων στο EML-USDOE, ακόμα και αν αυτά είχαν φθάσει πίσω 10 ημέρες μετά την έκθεση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στα κελάρια ήταν 10 pCiL^{-1} (370 Bqm^{-3}) και στα ισόγεια 4 pCiL^{-1} ($\sim 150 \text{ Bqm}^{-3}$).

2.7 Παρατηρήσεις και σχόλια

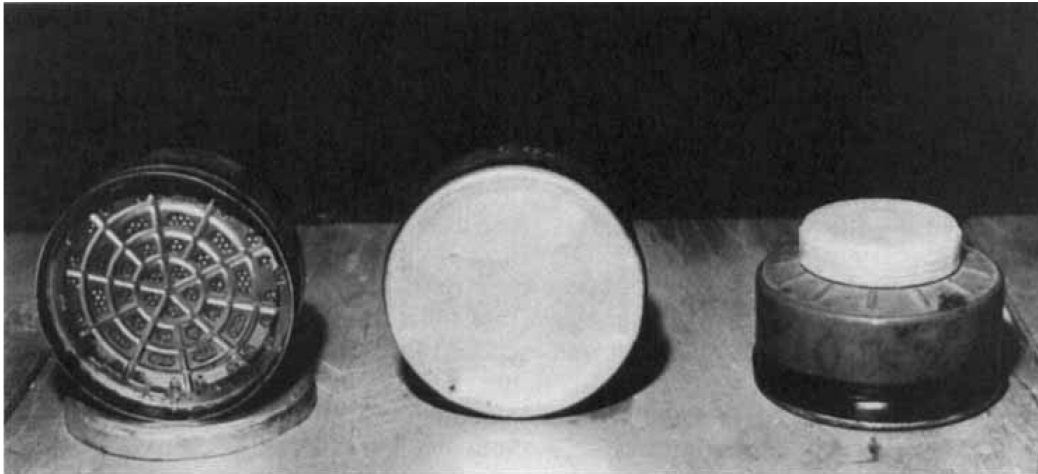
Τα μεταλλικά δοχεία M11, ως στρατιωτικό υλικό, δεν είναι άμεσα διαθέσιμα για αγορά στα διάφορα Εργαστήρια στις Η.Π.Α. και τον κόσμο την χρονική στιγμή που χρειάζεται και στις ποσότητες που χρειάζεται. Ο George (1984) περιγράφει στην εργασία του, μία εναλλακτική σχετική σκέψη και πειράματα για τη βαθμονόμηση άλλων τέτοιων δοχείων με ενεργό άνθρακα.

Από την προηγούμενη ανάλυση και την εργασία του George (1984) δεν τεκμηριώνεται ποια είναι η επαναληψιμότητα της μεθόδου με τα δοχεία ενεργού άνθρακα. Η αναφερόμενη αβεβαιότητα του $\pm 20\%$ παρότι χαμηλή, κρίνεται ικανοποιητική διότι είναι μέσα στην μεταβλητότητα που παρουσιάζουν οι πραγματικές συγκεντρώσεις Ραδονίου μέσα στις κατοικίες.

Επίσης δεν τεκμηριώνεται με επιχειρήματα ή αλλιώς ποιο είναι το κατώτερο όριο ανίχνευσης της μεθόδου. Διατυπώνεται απλώς ότι βρίσκεται στην περιοχή των 0.2 pCiL^{-1} ($\sim 10 \text{ Bqm}^{-3}$).

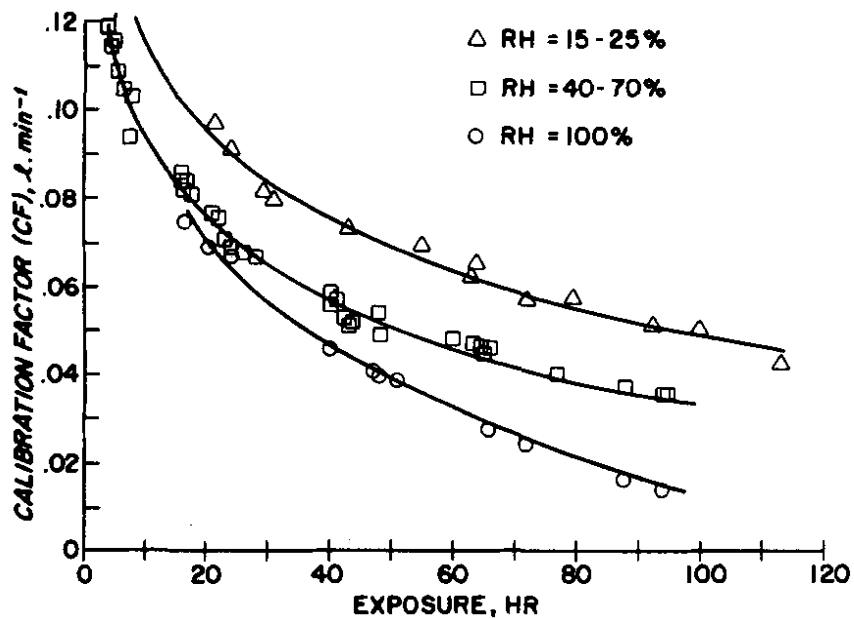
Η τεχνική παθητικών ολοκληρωτικών μετρήσεων συγκεντρώσεων Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους με τη χρήση ενεργού άνθρακα έχει παρουσιασθεί επίσης εκτενώς και από τον Cohen (1983; 1986) και τον Prichard (1985). Παρόλαυτά, ο τρόπος που επεξεργάστηκε ερευνητικά το θέμα ο George (1984) οδήγησε σε προτυποποίηση της μεθόδου, η οποία θα εξετασθεί αναλυτικά στο επόμενο 3^ο Κεφάλαιο.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



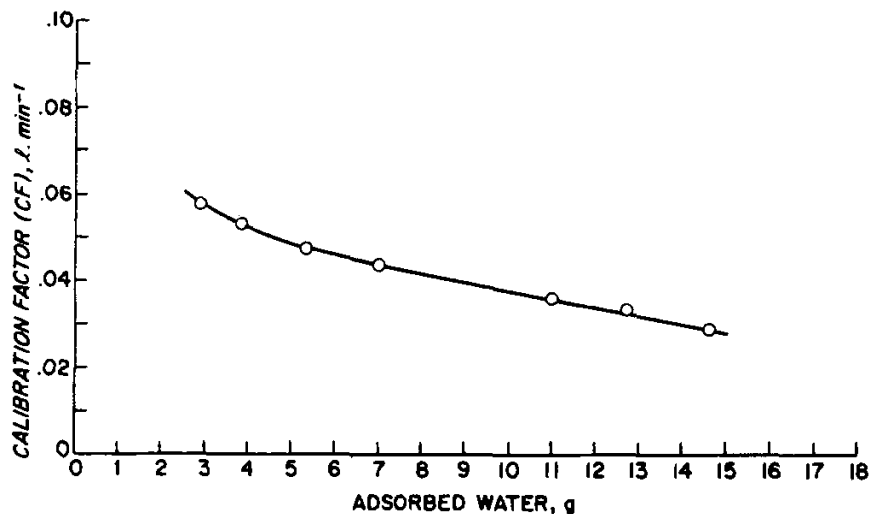
Διάγραμμα 2.1

Το πρώτο πειραματικό μεταλλικό δοχείο με ενεργό άνθρακα:
Φίλτρο βιοχημικού πολέμου τύπου M11, για αντιασφυξιογόνες μάσκες του στρατού
των Η.Π.Α. (Β' Παγκόσμιος Πόλεμος) (George, 1984)



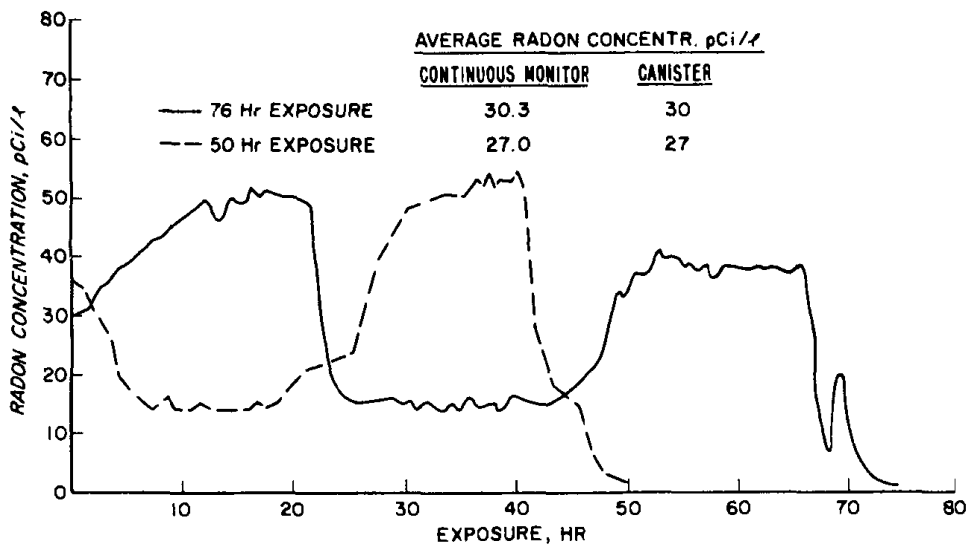
Διάγραμμα 2.2

Μεταβολή του συντελεστή βαθμονόμησης CF (σχέση 2.1) ως συνάρτηση του χρόνου
έκθεσης και της σχετικής υγρασίας (George, 1984)



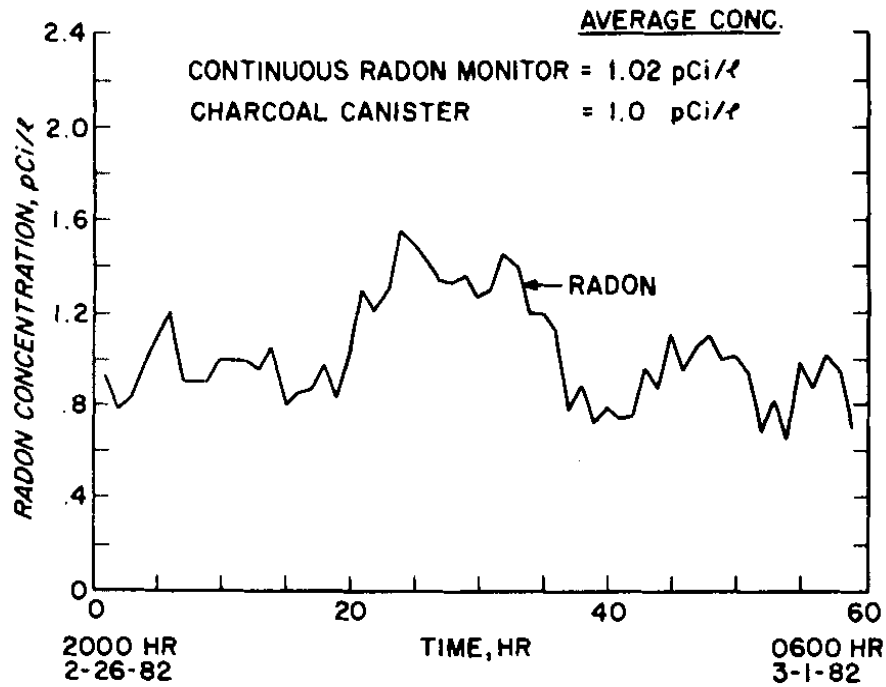
Διάγραμμα 2.3

Μεταβολή του συντελεστή βαθμονόμησης CF (σχέση 2.1) με το προσροφούμενο νερό στον ενεργό άνθρακα. Ο χρόνος έκθεσης των δοχείων ήταν σταθερός και ίσος με 72 h (George, 1984)



Διάγραμμα 2.4

Έκθεση (exposure) των δοχείων M11 (canister) σε μεταβλητή συγκέντρωση Ραδονίου και σταθερή υγρασία. Σύγκριση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης (average radon concentration) όπως εκτιμάται από τις ενεργητικές τεχνικές (continuous monitor) με την μέση τιμή της συγκέντρωσης όπως υπολογίζεται από τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα (George, 1984)



Διάγραμμα 2.5

Εκθεση (exposure) των δοχείων M11 (charcoal canister) σε μεταβλητή συγκέντρωση Ραδονίου πραγματικής κατοικίας. Σύγκριση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης (average conc.) όπως εκτιμάται από τις ενεργητικές τεχνικές (continuous radon monitor) με την μέση τιμή της συγκέντρωσης όπως υπολογίζεται από τα δοχεία με τον ενεργό άνθρακα (George, 1984).

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 2⁰⁰ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Track Etch, Bare Type*	Carbon Canister ⁺
20	15
28	22
24	21
37	28
8	3
25	15
4	5
16	12
11	10
8	12
12	8
46	41
Average 19.9	Average 16.0

*Integration period = 44 days (October - November 1980).

+Integration period = 65 hours (March 6-9, 1981).

Πίνακας 2.1

Μετρήσεις συγκεντρώσεων Ραδονίου σε κελάρια κατοικιών στην Eastern Pennsylvania – μέση συγκέντρωση σε pCiL⁻¹ (George, 1984).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΗΝ EPA-US

3.1 Εισαγωγή

Οι ιδιότητες του ενεργού άνθρακα, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο, δεν επιτρέπουν την ομοιόμορφη ολοκλήρωση για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου σε ένα χώρο στην χρονική έκταση της περιόδου έκθεσης. Η προφανής αιτία είναι ότι ο ενεργός άνθρακας εκτός από προσρόφιση παρουσιάζει και απελευθέρωση Ραδονίου. Διορθώσεις επίσης πρέπει να γίνονται και λόγω της ραδιενεργού διασπάσεως του προσροφηθέντος στον ενεργό άνθρακα Ραδονίου. Όπως όμως έδειξε ο George (1984), παρόλα τα προβλήματα, μπορεί να γίνει βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα προκειμένου να μετράται με αυτά η συγκέντρωση του Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους. Μάλιστα ο χρόνος έκθεσης των δοχείων αρκεί να είναι μόλις 48 h. Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν οι πρότυπες διαδικασίες που χρησιμοποιεί η υπηρεσία Environmental Protection Agency (Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος) των Η.Π.Α (EPA-US) για την συγκρότηση και τη βαθμονόμηση της μεθόδου στο Εργαστήριο Eastern Environmental Radiation Facility (EERF-EPA), σύμφωνα με τις κύριες κατευθυντήριες γραμμές που χάραξε ο George (1984). Η σχετική έκθεση δημοσιεύθηκε το 1987 (βλ. Gray, 1987).

3.2 Υλικά και εξοπλισμός

3.2.1 Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα

Σύμφωνα με τον Gray (1987) στην EPA-US χρησιμοποιείται μεταλλικό δοχείο και ενεργός άνθρακας ως εξής, σύμφωνα και με το Διάγραμμα 3.1:

- Κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο (metal can) με κάλυμμα (lid), χωρητικότητας 8 ουγκιών (ounces) ή ισοδύναμα στο σύστημα μονάδων SI περίπου 237 mL, με διάμετρο 4" (~101 mm) και ύψος 1&1/8" (~28.6 mm), που παρουσιάζει διατομή περίπου 80 cm².
- 70 ± 1 g ενεργού άνθρακα με διαστάσεις κόκκου 16 x 6 mesh (δηλαδή με διάμετρο κόκκων μεταξύ περίπου 1.2 και 3.4 mm). Ο ενεργός άνθρακας πρέπει να έχει γενικά

χαμηλή περιεχόμενη ραδιενέργεια και γενικά να μην περιέχει ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 0.1 pCi kg^{-1} (37 Bq kg^{-1}). Εξαιρείται από τον περιορισμό αυτό το φυσικό ισότοπο Κάλιο-40 (^{40}K), κυρίως διότι δεν υπάρχει εύκολος τρόπος να απαλλαχθεί κανείς από αυτό. Μία όψη του μεταλλικού δοχείου με τον ενεργό άνθρακα διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.2

- Κυκλικό μεταλλικό πλέγμα (σίτα), από ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel screen) που τοποθετείται πάνω από τον ενεργό άνθρακα, προκειμένου να μην επιτρέπει την έξοδο του από το δοχείο σε περίπτωση ατυχήματος (ανατροπή του δοχείου). Το μεταλλικό πλέγμα έχει οπές που επιτρέπουν τουλάχιστον σε 30-50% της διατομής των 80 cm^2 του ενεργού άνθρακα που βρίσκεται κάτω από το μεταλλικό πλέγμα να έρχεται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος.
- Ανοξείδωτο ελατηριακό δακτύλιο συγκρατήσεως του μεταλλικού πλέγματος (internal expanding stainless steel retainer ring). Ένα σκαρίφημα του μεταλλικού δοχείου μετά την τοποθέτηση του μεταλλικού πλέγματος και του δακτυλίου συγκρατήσεως διακρίνεται στο Διάγραμμα 3.3.
- Προστατευτικό μαλακό υλικό πλήρωσης – συμπλήρωσης (pad), το οποίο τοποθετείται μεταξύ του καλύμματος και του μεταλλικού πλέγματος, ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της γεωμετρίας του ενεργού άνθρακα κατά τις δυνατές μετακινήσεις του δοχείου.
- Αυτοκόλλητη ελαστική μονωτική ταινία βινυλίου (στα αγγλικά: strip of pliant vinyl tape, σαν αυτή που χρησιμοποιούν οι τεχνίτες ηλεκτρολόγοι), μήκους 13" (~320 mm), η οποία τοποθετείται περιφερειακά στην ένωση του καλύμματος με το δοχείο, προκειμένου να εξασφαλίζεται η στεγάνωσή του όταν χρειάζεται.

Πραγματικές φωτογραφίες του περιγραφόμενου μεταλλικού δοχείου παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 3.4, 3.5 και 3.6. Πρόκειται για εντελώς αντίστοιχο τέτοιο δοχείο που χρησιμοποιείται από καπνοβιομηχανίες για τη λιανική πώληση καπνού πίπας.

Άλλες πραγματικές φωτογραφίες του περιγραφόμενου μεταλλικού δοχείου παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.7.

3.2.2 Μετρητικά συστήματα

Σύμφωνα με τον Gray (1987) στην EPA-US για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών του Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα μετά την έκθεση χρησιμοποιούνται τέσσερα (4) μετρητικά συστήματα με την ακόλουθη συγκρότηση:

- Κυλινδρικός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου διαστάσεων 3 x 3" με κατάλληλο φωτοπολλαπλασιαστή
- Θωράκιση
- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης
- Προενισχυτής – ενισχυτής
- Μονοκαναλικός αναλυτής και καταμετρητής
- Χρονόμετρο
- Εκτυπωτής

Η θωράκιση είναι κιβωτιόσχημη και εξυπηρετεί και τα τέσσερα μετρητικά συστήματα. Τα εξωτερικά τοιχώματα της θωράκισης είναι κατασκευασμένα από μολύβι πάχους 8" (~202 mm). Εσωτερικά η θωράκιση χωρίζεται σταυροειδώς σε τέσσερα ισομεγέθη τεταρτημόρια με τη βοήθεια τοιχωμάτων από μολύβι πάχους 4" (~101 mm). Σε κάθε ένα από τα τεταρτημόρια αυτά τοποθετείται ένας κυλινδρικός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου. Επομένως, σύμφωνα με την περιγραφόμενη διάταξη, οι ανιχνευτές χωρίζονται μεταξύ τους με τοιχώματα μολύβδου πάχους 4" και από το περιβάλλον με τοιχώματα μολύβδου πάχους 8". Το Διάγραμμα 3.8 δίνει μία μέτριας ποιότητας φωτογραφική απεικόνιση των τεσσάρων ανιχνευτών στο εσωτερικό της θωράκισής τους. Το Διάγραμμα 3.9 παρουσιάζει φωτογραφία δύο τέτοιων θωρακίσεων καθώς και τα ηλεκτρονικά μέρη των μετρητικών συστημάτων. Σημειώνεται ότι κατάλληλα διαμορφωμένοι οδηγοί κατασκευασμένοι από ξύλο, χρησιμοποιούνται ώστε τα μεταλλικά δοχεία με τον ενεργό άνθρακα να τοποθετούνται πάντα στην ίδια γεωμετρική θέση σχετικά με τον κάθε ανιχνευτή, ώστε να εξασφαλίζεται ότι κάθε μέτρηση, αλλά και οι βαθμονομήσεις γίνονται με τις ίδιες γεωμετρικές παραμέτρους.

Σε ό,τι αφορά στα πυρηνικά ηλεκτρονικά μπορεί να σημειωθεί ότι ο χρησιμοποιούμενος μονοκαναλικός αναλυτής είναι έτσι ρυθμισμένος / βαθμονομημένος, ώστε να καταγράφονται στον καταμετρητή μόνο φωτόνια ενεργειών μεταξύ 270 και 720 keV. Η μέτρηση που γίνεται στα δοχεία, είναι τύπου "ολική -γ" και δεν λαμβάνεται κάποιου

είδους φάσμα. Παρόλαυτά, για λόγους διασφάλισης της ποιότητας μία φορά την εβδομάδα λαμβάνεται φάσμα φωτονίων από κατάλληλη πηγή βαθμονόμησης, ώστε να διαπιστώνεται αν τυχόν υπάρχει μεταβολή της θέσης στο φάσμα των φωτοκορυφών των θυγατρικών του Ραδονίου που ενδιαφέρουν. Αν πράγματι υπάρχει τέτοια μεταβολή και είναι σημαντική, λαμβάνονται κατάλληλα διορθωτικά μέτρα.

3.2.3 Θάλαμοι Ραδονίου

Το EERF-EPA διαθέτει δύο θαλάμους Ραδονίου κατάλληλους για την έκθεση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα (αλλά και άλλων παθητικών και ενεργητικών συσκευών) προκειμένου να βαθμονομηθούν. Ο όγκος των θαλάμων δεν σημειώνεται, φαίνεται όμως ότι αυτοί είναι αρκετά μεγάλοι, ώστε να επιτρέπουν την είσοδο – έξοδο ανθρώπων με κατάλληλο μηχανισμό θυρών χωρίς να αλλοιώνονται η συγκέντρωση Ραδονίου και γενικά οι περιβαλλοντικές συνθήκες στο εσωτερικό τους. Οι θάλαμοι αυτοί έχουν τον ακόλουθο εξοπλισμό και δυνατότητες (Gray, 1987):

- διατίθενται κατάλληλες πηγές Ραδίου-226 (^{226}Ra), που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν στους θαλάμους Ραδόνιο, με το οποίο επιτυγχάνονται επιθυμητές συγκεντρώσεις στον περικλειόμενο εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα στην περιοχή από 10^1 έως και 10^3 pCiL^{-1} (370 έως και 37000 Bq m^{-3}). Η συγκέντρωση του Ραδονίου στους θαλάμους μετράται συνεχώς με ενεργητικές τεχνικές. Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων εκτυπώνονται ανά ώρα.
- υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και συνεχούς μέτρησης των περιβαλλοντικών συνθηκών των θαλάμων και κυρίως της σχετικής υγρασίας στα επίπεδα από 10 έως και 90%, και της θερμοκρασίας στα επίπεδα από 0° έως και 40° C. Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων εκτυπώνονται ανά ώρα.
- υπάρχει δυνατότητα παραγωγής, ελέγχου και συνεχούς μέτρησης του πλήθους των "πυρήνων συμπύκνωσης"¹ στον εσωτερικό αέρα των θαλάμων στην περιοχή 10^3 έως και 10^6 mL^{-1} . Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων εκτυπώνονται ανά ώρα.
- υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και συνεχούς μέτρησης της συγκέντρωσης των θυγατρικών του Ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των θαλάμων στην περιοχή 0.01 έως

¹ όπου ως "πυρήνες συμπύκνωσης" ορίζονται τα πολύ μικρά εκείνα σωματίδια (π.χ. σκόνης) πάνω στα οποία συμπυκνώνονται οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των νεφών.

και 5 WL (Working Level) ή σε τιμές συγκέντρωσης ~75 Bqm-3 έως και 37000 Bqm-3. Ο τρόπος που μετράται ή υπολογίζεται αυτή η συγκέντρωση δεν εντάσσεται στο περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων εκτυπώνονται ανά ώρα.

3.2.4 Μεταλλικά δοχεία για βαθμονόμηση και μέτρηση υποστρώματος

Η απόδοση των μετρητικών συστημάτων ελέγχεται σε ημερήσια βάση με τη μέτρηση μεταλλικών δοχείων για βαθμονόμηση και μεταλλικών δοχείων υποστρώματος.

Το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης έχει κατασκευασθεί στο EERF-EPA ως εξής:

- 70 g ενεργού άνθρακα μέσα σε τυποποιημένο μεταλλικό δοχείο, όπως αυτά που περιγράφηκαν στα προηγούμενα πιοπάνω (χωρίς το μεταλλικό πλέγμα και το δακτύλιο συγκράτησης), διαποτίσθηκαν με υγρό διάλυμα ^{226}Ra που περιείχε 20.5 nCi (740 Bq).
- στη συνέχεια το μεταλλικό δοχείο θερμάνθηκε ήπια ώστε να εξατμισθεί όλο το υγρό από τον ενεργό άνθρακα.
- ακολούθως το μεταλλικό δοχείο στεγανοποιήθηκε με δύο τρόπους: (α) λεπτός γαλβανισμένος μεταλλικός δίσκος διαμέτρου 4" τοποθετήθηκε πάνω από τον ενεργό άνθρακα, στη θέση που τοποθετείται το μεταλλικό πλέγμα (βλ. και Διάγραμμα 3.1) και συγκολλήθηκε περιφερειακά με μαλακή μεταλλική κόλληση, και (β) το δοχείο έκλεισε επιπλέον με το κάλυμά του, κατά τα ήδη περιγραφέντα στις προηγούμενες σχετικές παραγράφους. Ταινία βινυλίου τοποθετήθηκε περιφερειακά γύρω από τη διαχωριστική γραμμή του μεταλλικού δοχείου και του καλύμματος.
- μετά από αυτή τη διαδικασία το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης αφέθηκε σε ασφαλές μέρος επί 30 ημέρες, ώστε να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του περιεχόμενου Ραδίου, του Ραδονίου και των θυγατρικών του.

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει καθαρή αναφορά σχετικά με το πως είναι κατασκευασμένο το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος (Gray, 1987). Εμμέσως μπορεί να συναχθεί, ότι πρόκειται για στεγανοποιημένο μεταλλικό δοχείο που περιέχει ακριβώς 70 g ενεργού άνθρακα (όπως εξάλλου και το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης), ο οποίος όμως δεν έχει εκτεθεί σε οποιαδήποτε συγκέντρωση Ραδονίου, ή αν ακόμα έχει εκτεθεί, το έχει πλήρως αποβάλλει μέσα από διαδικασίες αναγέννησης με θέρμανση.

3.2.5 Απόδοση μετρητικών συστημάτων

Η διαδικασία προσδιορισμού της απόδοσης των διαθέσιμων ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου μέσα στην θωράκισή τους, γίνεται σε καθημερινή βάση και έχει ως εξής:

- μετράται το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης για 10 min. Καταγράφεται το αποτέλεσμα σε αλληλεπιδράσεις φωτονίων (καταγραφόμενα γεγονότα) ανά λεπτό (CPM_{CAL}).
- μετράται το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος για 10 min. Καταγράφεται το αποτέλεσμα σε αλληλεπιδράσεις φωτονίων (καταγραφόμενα γεγονότα) ανά λεπτό (CPM_{BKG}).
- γίνεται η αφαίρεση $CPM_{CAL} - CPM_{BKG}$. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης δίνει τις "καθαρές" αλληλεπιδράσεις φωτονίων (καταγραφόμενα γεγονότα) ανά λεπτό που οφείλονται στην υπάρχουσα ραδιενέργεια του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης (CPM_{NET}).
- διαιρείται η ποσότητα CPM_{NET} με την ραδιενέργεια του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης ($= 20 \text{ nCi} = 20000 \text{ pCi}$) και έτσι προκύπτει ο βαθμός απόδοσης (E) των ανιχνευτών σε CPM/pCi .

3.2.6 Ζύγιση

Ψηφιακοί ζυγοί χρησιμοποιούνται για την ζύγιση κάθε μεταλλικού δοχείου με ενεργό άνθρακα, πριν την έκθεση και μετά από αυτή. Η χρησιμοποιούμενη ακρίβεια ζύγισης είναι 0.1 g. Παρατηρείται γενικά αύξηση του βάρους μετά την έκθεση, η οποία αποδίδεται στην προσρόφηση υδρατμών εξαιτίας της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας, με συνέπειες που έχουν ήδη παρουσιασθεί στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο με βάση την πειραματική εργασία του George (1984).

3.3 Βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα

3.3.1 Γενικά

Όπως διαπίστωσε και ο George (1984), δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην ικανότητα προσρόφησης Ραδονίου από τον ενεργό άνθρακα.

(α) η χρονική διάρκεια της έκθεσης, και

(β) η ποσότητα των προσροφηθέντων υδρατμών

Και οι δύο αυτοί παράγοντες έχουν βασικά σχέση με την σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας της έκθεσης.

Η διαδικασία βαθμονόμησης μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα σχεδιάστηκε επομένως από την EPA-US, με τρόπο ώστε να ληφθούν υπόψιν και οι δύο αυτοί παράγοντες. Η διαδικασία βαθμονόμησης αποτελείται από τα ακόλουθα έξι (6) βήματα:

(1) Προετοιμασία μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, (2) Προετοιμασία θαλάμου Ραδονίου, (3) Ακολουθίες έκθεσης, (4) Μέτρηση, (5) Υπολογισμός του συντελεστή βαθμονόμησης και (6) Χάραξη καμπύλων βαθμονόμησης.

Τα βήματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

3.3.2 Προετοιμασία μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα

Διακρίνονται σε αυτό το στάδιο τρία βασικά βήματα:

- Πλήρωση και γενικά συγκρότηση των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, ο οποίος δεν έχει εκτεθεί σε Ραδόνιο, ή αν ακόμα έχει εκτεθεί, το έχει πλήρως αποβάλλει μέσα από διαδικασίες αναγέννησης με θέρμανση
- Δειγματοληπτικός έλεγχος για τη διαπίστωση της περιεχόμενης ραδιενέργειας στον διαθέσιμο ενεργό άνθρακα, προκειμένου να διασφαλισθεί ότι το υλικό αυτό δεν είναι επιμολυσμένο με ραδιενεργά ισότοπα και μάλιστα με τέτοια που να εκπέμπουν φωτόνια στην περιοχή ενεργειών 270 έως και 720 keV.
- Ζύγιση και ταυτοποίηση (αρίθμηση) των μεταλλικών δοχείων με τον ενεργό άνθρακα. Σε περίπτωση πολλών δοχείων εφαρμόζονται διαδικασίες μηχανογράφησης.

3.3.3 Προετοιμασία θαλάμου Ραδονίου

Τα μεταλλικά δοχεία με τον ενεργό άνθρακα βαθμονομούνται σε 3 περιοχές σχετικής υγρασίας, την "χαμηλή", την "μέση" και την "υψηλή", για χρονικές περιόδους έκθεσης από μία έως 6 ημέρες. Η "χαμηλή" σχετική υγρασία αντιστοιχεί περίπου σε 20% RH, η "μέση" σχετική υγρασία αντιστοιχεί σε περίπου 50% RH και η "υψηλή" σχετική υγρασία αντιστοιχεί σε περίπου 80% RH. Η συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο διατηρείται σταθερή κατά το δυνατόν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

3.3.4 Ακολουθίες έκθεσης

Όταν έχουν σταθεροποιηθεί οι επιθυμητές συνθήκες στο θάλαμο Ραδονίου (θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση Ραδονίου), 30 μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα αφού ζυγισθούν, τοποθετούνται σε αυτόν και εκτίθενται κατά τον ακόλουθο τρόπο: 5 επί μία ημέρα, 5 επί δύο ημέρες, 5 επί τρεις ημέρες κοκ, και τέλος 5 επί έξι ημέρες. Τα μεταλλικά δοχεία ανοίγονται μέσα στον θάλαμο κατά τη στιγμή της τοποθέτησης και φυσικά σημειώνεται ο ακριβής χρόνος έναρξης της έκθεσης. Αυτή η ακολουθία έκθεσης επαναλαμβάνεται τρεις φορές συνολικά, μία για κάθε προδιαγεγραμμένη υγρασία.

3.3.5 Μέτρηση

Σε μία ακολουθία έκθεσης, όπως σημειώθηκε, στο τέλος κάθε 24 ώρου πρέπει πέντε από τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα να αφαιρεθούν από το θάλαμο Ραδονίου. Τα καλύμματα των μεταλλικών δοχείων τοποθετούνται στη θέση τους, όσο τα δοχεία είναι ακόμα στο θάλαμο. Στη συνέχεια τα δοχεία βγαίνουν από το θάλαμο και στεγανώνονται επιπλέον και με ταινία βινυλίου και φυσικά σημειώνεται ο ακριβής χρόνος λήξης της έκθεσης. Στη συνέχεια μεσολαβεί το γνωστό διάστημα αναμονής των 3 ωρών, ώστε το Ραδόνιο που έχει προσροφηθεί στον ενεργό άνθρακα των δοχείων να έρθει σε ισορροπία με τα θυγατρικά του. Μετά από το διάστημα αυτό κάθε μεταλλικό δοχείο μετράται σε έναν από τους ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για ακριβώς 10 min. Καταγράφεται το αποτέλεσμα σε αλληλεπιδράσεις φωτονίων (καταγραφόμενα γεγονότα) ανά λεπτό (CPM). Γίνεται η αφαίρεση CPM - CPM_{BKG}. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης δίνει τις "καθαρές" αλληλεπιδράσεις φωτονίων ανά λεπτό που οφείλονται στην υπάρχουσα ραδιενέργεια του μεταλλικού δοχείου (N). Μετά τη μέτρηση τα μεταλλικά δοχεία ζυγίζονται.

3.3.6 Υπολογισμός συντελεστή βαθμονόμησης

Όπως ακριβώς έχει σημειώσει ο George (1984), ο συντελεστής βαθμονόμησης πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση (2.1):

$$CF = \frac{N}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot Rn} \quad (3.1)$$

όπου:

N ο καθαρός ρυθμός μετρούμενων φωτονίων στον ανιχνευτή σε CPM

E ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή για τη γεωμετρία των δοχείων σε CPM pCi⁻¹

T_s ο χρόνος έκθεσης σε min

Rn η μέση συγκέντρωση του Ραδονίου κατά την έκθεση σε pCi L⁻¹

DF συντελεστής διόρθωσης ίσος με το κλάσμα του Ραδονίου που έχει διασπασθεί μετρώντας το χρόνο t σε min, από τη μέση του χρονικού διαστήματος έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης

Με βάση τα παραπάνω ο συντελεστής βαθμονόμησης (CF) προκύπτει σε Lmin⁻¹.

Σχετικά, με τον συντελεστή DF μπορεί να σημειωθεί ότι δίνεται από τη σχέση:

$$DF = e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

όπου:

λ η σταθερή διασπάσεως του Ραδονίου σε min⁻¹

Εφόσον είναι γνωστό ότι ο χρόνος ημιζωής του Ραδονίου είναι ίσος με:

$$T_{1/2} = 5501 \text{ min}$$

τότε υπολογίζεται ότι η σταθερή διασπάσεως του Ραδονίου είναι ίση με:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{5501} = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$$

3.3.7 Χάραξη καμπύλων βαθμονόμησης για 2 ήμερη έκθεση

Οι συντελεστές βαθμονόμησης που υπολογίζονται όπως λαμβάνονται από τη σχέση (3.1) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία Πινάκων και Διαγραμμάτων ως εξής:

Ο Πίνακας 3.1, δίνει τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης για διάφορες σχετικές υγρασίες, σε σχέση με τη μάζα των υδρατμών σε g, που προσροφούνται στον ενεργό άνθρακα των μεταλλικών δοχείων (water gain) για 2 ήμερη έκθεση (48 h), ο οποίος είναι και ο χρόνος έκθεσης που έχει επιλέξει η EPA-US για πραγματικές μετρήσεις συγκεντρώσεων Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Τα δεδομένα από τον Πίνακα 3.1 χρησιμοποιούνται για την χάραξη του Διαγράμματος 3.10.

Ο Πίνακας 3.1, οδηγεί στον απλό κανόνα για τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα που χρησιμοποιεί το EERF-EPA και γενικότερα η υπηρεσία EPA-US:

Για 2 ήμερη έκθεση:

Αν η προσροφηθείσα μάζα υδρατμών είναι < 1.0 g, τότε η σχετική υγρασία της έκθεσης είναι $\sim 20\%$ RH.

Αν η προσροφηθείσα μάζα υδρατμών είναι > 1.0 g και < 4.0 g, τότε η σχετική υγρασία της έκθεσης είναι $\sim 50\%$ RH.

Αν η προσροφηθείσα μάζα υδρατμών είναι > 4.0 g, τότε η σχετική υγρασία της έκθεσης είναι $\sim 80\%$ RH.

3.3.8 Χάραξη καμπύλων βαθμονόμησης για έκθεση τυχαίας διάρκειας

Οι συντελεστές βαθμονόμησης που υπολογίζονται όπως λαμβάνονται από τη σχέση (3.1) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία Πινάκων και Διαγραμμάτων ως εξής:

Ο Πίνακας 3.2, δίνει τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης για διάφορες σχετικές υγρασίες, σε σχέση με τη διάρκεια της έκθεσης. Τα δεδομένα από τον Πίνακα 3.2 χρησιμοποιούνται για την χάραξη του Διαγράμματος 3.11. Οι συντελεστές αυτοί βαθμονόμησης ονομάζονται πλέον συντελεστές αναγωγής (adjustment factors), διότι χρησιμοποιούνται με τρόπο που θα αναφερθεί για την αναγωγή των μετρήσεων συγκέντρωσης Ραδονίου με μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα και έκθεση τυχαίας διάρκειας σε μετρήσεις συγκέντρωσης Ραδονίου με την ίδια μέθοδο για έκθεση 2 ήμερης διάρκειας. Η αναγωγή είναι αναγκαία προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα

όχι ως προς την προσρόφηση του Ραδονίου, αλλά ως προς την προσρόφηση των υδρατμών από τον ενεργό άνθρακα στο μεταλλικό δοχείο

κατά την τυποποίηση αυτής της μεθόδου, όπως παρουσιάζεται από τον Gray (1987). Συγκρίνοντας τις τιμές που παρατίθενται στον Πίνακα 3.2 με εκείνες που παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 βλέπει κανείς ότι οι συντελεστές βαθμονόμησης των 48 h (Πίνακας 3.1) είναι προφανώς ίσος με τους συντελεστές προσαρμογής των 48 h (Πίνακας 3.2).

3.4 Μέτρηση και υπολογισμός συγκέντρωσης Ραδονίου

Εστω μεταλλικό δοχείο με ενεργό άνθρακα, το οποίο εκτέθηκε σε άγνωστη μέση συγκέντρωση Ραδονίου Rn , επί χρόνο T_s . Προκειμένου για τον υπολογισμό της άγνωστης μέσης συγκέντρωσης Ραδονίου πρέπει να πραγματοποιηθούν τα ακόλουθα βήματα:

- (1) Να μετρηθεί το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης (CPM_{CAL} , παράγραφος 3.2.5)
- (2) Να μετρηθεί το μεταλλικό δοχείο υποστρώματος (CPM_{BKG} , παράγραφος 3.2.5)
- (3) Να υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης (E) του Ιωδιούχου Νατρίου (παράγραφος 3.2.5)
- (4) Να μετρηθεί το μεταλλικό δοχείο στο Ιωδιούχο Νάτριο (CPM, παράγραφος 3.3.5)
- (5) Να υπολογισθεί η ποσότητα $N = CPM - CPM_{BKG}$ (παράγραφος 3.3.5)
- (6) Να ζυγισθεί το μεταλλικό δοχείο μετά την έκθεση. Από το βάρος που βρέθηκε αφαιρείται το βάρος του δοχείου πριν την έκθεση και έτσι υπολογίζεται η μάζα των προσροφηθέντων υδρατμών κατά τη χρονική περίοδο της έκθεσης.
- (7) Να βρεθεί ο "προσωρινός" συντελεστής βαθμονόμησης (CF') από το Διάγραμμα 3.10, με τη χρήση της καμπύλης και τοποθετώντας στον άξονα των τετμημένων το αποτέλεσμα του βήματος (6).
- (8) Να εφαρμοσθεί ο κανόνας της παραγράφου 3.3.7, ώστε να υπολογισθεί η "ονομαστική" υγρασία κατά το χρονικό διάστημα της έκθεσης
- (9) Να βρεθεί ο συντελεστής αναγωγής (AF) του "προσωρινού" συντελεστή βαθμονόμησης στον "οριστικό" συντελεστή βαθμονόμησης (CF) από το Διάγραμμα 3.11, με τη χρήση της καμπύλης "ονομαστικής" υγρασίας, όπως αυτή εκτιμήθηκε στο βήμα (8) και τοποθετώντας στον άξονα των τετμημένων το χρόνο έκθεσης (T_s).
- (10) Να βρεθεί ο συντελεστής αναγωγής (AF) από το Διάγραμμα 3.11, με τη χρήση της καμπύλης "ονομαστικής" υγρασίας, όπως αυτή εκτιμήθηκε στο βήμα (8) και τοποθετώντας στον άξονα των τετμημένων το χρόνο έκθεσης 48 h
- (11) Να υπολογισθεί ο "οριστικός" συντελεστής βαθμονόμησης (CF) με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$CF = CF' \times \frac{AF \text{ απο το αποτελεσμα του βηματος (9)}}{AF \text{ απο το αποτελεσμα του βηματος (10)}} \quad (3.3)$$

Από τη σχέση (3.3) και τα πιο πάνω βήματα γίνεται απόλυτα σαφές ότι αν ο χρόνος έκθεσης είναι 48 h, τότε:

$$CF = CF'$$

(12) Να υπολογισθεί ο συντελεστής διόρθωσης (DF), και τέλος

(13) Να υπολογισθεί η ζητούμενη μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Rn), με την εφαρμογή της σχέσης:

$$Rn = \frac{N}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot CF} \quad (3.4)$$

3.5 Σφάλμα μέτρησης και κατώτατο όριο ανίχνευσης

3.5.1 Σφάλμα μέτρησης

Το σφάλμα μέτρησης του μεταλλικού δοχείου με ενεργό άνθρακα συστήνεται (Gray, 1987) να υπολογίζεται (σε %) για συντελεστή κάλυψης $k = 2$ (δηλαδή ως "πιθανό" σφάλμα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 68%) από τη σχέση:

$$e = 2 \times \frac{\sqrt{CPM \times \text{χρονος μετρησης (min)} + CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης (min)}}}{CPM \times \text{χρονος μετρησης (min)} - CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης (min)}} \times 100 \quad (3.5)$$

Προφανώς υπάρχουν και άλλα σφάλματα, π.χ. ζύγισης κλπ στα οποία ο Gray (1987) δεν αναφέρεται.

3.5.2 Κατώτατο όριο ανίχνευσης

Το κατώτατο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου (LLD, Lower Limit of Detection σε pCiL^{-1}) για συντελεστή κάλυψης $k = 3$ (δηλαδή σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99.87%) μπορεί να υπολογίζεται αν στην σχέση (3.4), αντικατασταθεί η ποσότητα (N) με την ποσότητα (MDA, Minimum Detectable Activity σε CPM), όπου:

$$MDA = 3 \times \frac{\sqrt{CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης υποστρωματος (min)}}}{\text{χρονος μετρησης υποστρωματος (min)}} \quad (3.6)$$

οπότε:

$$LLD = \frac{MDA}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot CF} \quad (3.7)$$

Η σχέση (3.6) προκύπτει σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται σε μία από τις πρώτες σχετικές εργασίες για την ποσότητα (MDA), δηλαδή αυτήν του Althusser (1963).

3.6 Διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας

Ολη η παρουσιαζόμενη τυποποίηση της υπηρεσίας EPA-US, βασίζεται προφανώς στην καλή λειτουργία των θαλάμων Ραδονίου του Εργαστηρίου EERF-EPA, χωρίς τους οποίους δεν μπορούν να υπάρχουν εκθέσεις μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα σε βαθμονομημένες συγκεντρώσεις Ραδονίου και άλλες συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες κυρίως σχετικής υγρασίας και δευτερευόντως θερμοκρασίας.

Η καλή λειτουργία των θαλάμων Ραδονίου διασφαλίζεται με διάφορες διαδικασίες. Όπως σημειώθηκε ήδη, η συγκέντρωση του Ραδονίου και οι λοιπές περιβαλλοντικές συνθήκες παρακολουθούνται συνεχώς με χρήση ενεργητικών τεχνικών κατά τη διάρκεια της έκθεσης των μεταλλικών δοχείων με τον ενεργό άνθρακα. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν κατάλληλα βαθμονομημένα σχετικά όργανα μέσα στους θαλάμους. Επιπλέον γίνονται τακτικές δειγματοληψίες του αέρα των θαλάμων προκειμένου να υπάρχει και εναλλακτική μέθοδος υπολογισμών της συγκέντρωσης του Ραδονίου και των θυγατρικών του από όργανα που βρίσκονται εκτός των θαλάμων αυτών καθαυτών.

Διασυγκρίσεις καλής λειτουργίας με άλλους θαλάμους στις Η.Π.Α., ή στον λοιπό κόσμο, στις οποίες το EERF-EPA συμμετέχει με κάθε διαθέσιμη ευκαιρία, εξασφαλίζουν την ποιότητα όλων αυτών των διαδικασιών συνεχούς παρακολούθησης με χρήση ενεργητικών τεχνικών της συγκέντρωσης του Ραδονίου και των λοιπών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Επιπλέον το EERF-EPA στέλνει για βαθμονόμηση μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα σε θαλάμους Ραδονίου ανεξάρτητων Εργαστηρίων για εκθέσεις σε άγνωστες συνθήκες, προκειμένου να επαληθεύει τακτικά τους συντελεστές βαθμονόμησης.

Όσο αφορά στα μετρητικά συστήματα Ιωδιούχου Νατρίου που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δοχείων, σημειώθηκε ήδη, ότι γίνεται καθημερινός έλεγχος του βαθμού απόδοσης (E) με πρότυπο μεταλλικό δοχείο με ^{226}Ra που παρουσιάσθηκε στην παράγραφο 3.2.4. Ο βαθμός απόδοσης δεν πρέπει να βρίσκεται πέρα από:

$$\pm 2 \times (\text{τυπική απόκλιση μέσης τιμής βαθμού απόδοσης όλων των προηγούμενων μετρήσεων}).$$

Αν αυτό δεν συμβαίνει τα μετρητικά συστήματα δεν ξαναχρησιμοποιούνται μέχρι να βρεθεί η αιτία που προκαλεί τη δυσλειτουργία.

Επίσης γίνεται καθημερινός έλεγχος του ύψους του υποστρώματος (CPM_{BKG}) με πρότυπο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.4. Και το υπόστρωμα δεν πρέπει να βρίσκεται πέρα από:

$$\pm 2x \text{ (τυπική απόκλιση μέσης τιμής υποστρώματος όλων των προηγούμενων μετρήσεων).}$$

Αν αυτό δεν συμβαίνει τα μετρητικά συστήματα δεν ξαναχρησιμοποιούνται μέχρι να βρεθεί και εδώ η αιτία που προκαλεί τη δυσλειτουργία.

3.7 Παρατηρήσεις - σχόλια

Η βασικότερη παρατήρηση που μπορεί κανείς να κάνει για την τυποποίηση που παρουσιάστηκε, στις προηγούμενες ενότητες, είναι ότι δεν δίνονται στοιχεία σχετικά με τα επίπεδα συγκέντρωσης Ραδονίου, στα οποία εκτίθενται τα μεταλλικά δοχεία με τον ενεργό άνθρακα. Επιπλέον αναφέρονται μόνο τα σφάλματα μέτρησης των μεταλλικών δοχείων στους ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου. Παρόλαυτά, συνολικά μπορούν να αναφερθούν και άλλα υπάρχοντα, αλλά ίσως όχι λιγότερο σημαντικά σφάλματα, όπως π.χ.:

α) Σφάλμα δημιουργίας βαθμονομημένης συγκέντρωσης Ραδονίου, στους θαλάμους Ραδονίου.

β) Σφάλμα στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης από το πρότυπο μεταλλικό δοχείο με ^{226}Ra .

γ) Σφάλμα στην μέτρηση του υποστρώματος από το πρότυπο μεταλλικό δοχείο υποστρώματος

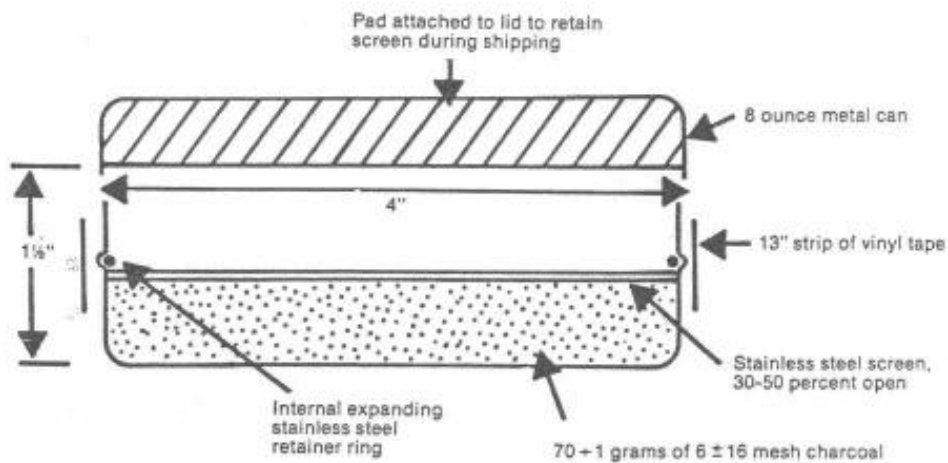
δ) Σφάλματα ζύγισης

ε) Σφάλμα μέτρησης της υγρασίας

στ) Σφάλμα εκτίμησης του συντελεστή διόρθωσης (DF), ο οποίος δεν μπορεί να εξαρτάται μόνο από το χρόνο t , αλλά προφανώς και από τις διαρροές προσροφηθέντος Ραδονίου από ένα εκτεθέν μεταλλικό δοχείο κατά τη διάρκεια της 3 ωρης αναμονής για ισορροπία.

Στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο θα εξετασθούν οι δυνατότητες που υπάρχουν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, προκειμένου να γίνουν σχετικές δοκιμές για τη βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, στα πλαίσια ήδη διαθέσιμων υλικών και εξοπλισμού.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



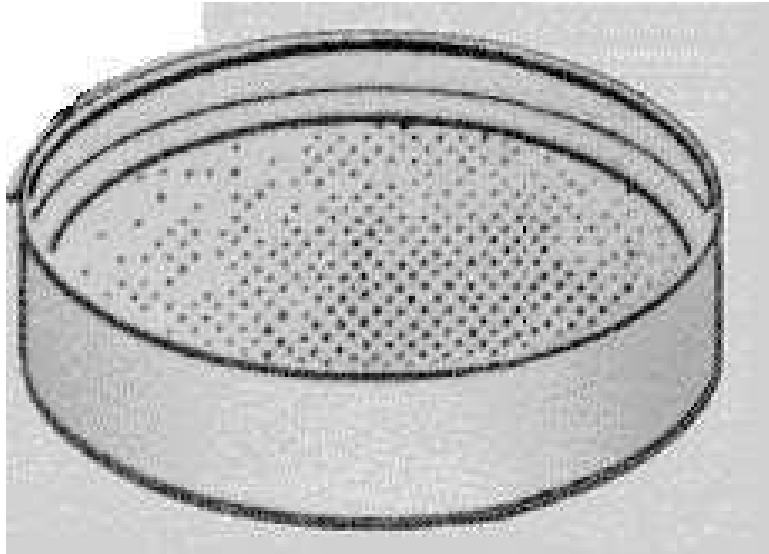
Διάγραμμα 3.1

Μεταλλικό δοχείο με ενεργό άνθρακα σύμφωνα με την τυποποίηση της EPA-US (Gray, 1987)



Διάγραμμα 3.2

Όψη του κυλινδρικού μεταλλικού δοχείου με τον ενεργό άνθρακα



Διάγραμμα 3.3

Σκαρίφημα του κυλινδρικού μεταλλικού δοχείου με τον ενεργό άνθρακα και το μεταλλικό πλέγμα



Διάγραμμα 3.4

Μεταλλικό δοχείο με διαστάσεις και σχήμα σύμφωνα με την τυποποίηση της EPA-US



Διάγραμμα 3.5

Μεταλλικό δοχείο με διαστάσεις και σχήμα σύμφωνα με την τυποποίηση της EPA-US



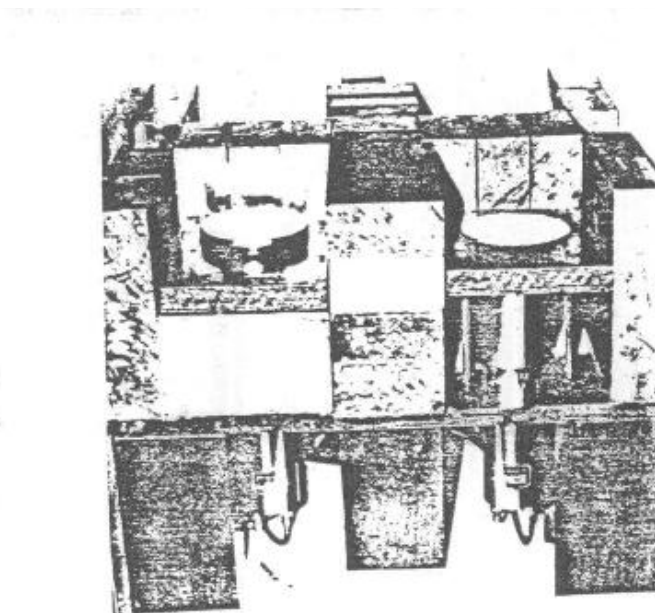
Διάγραμμα 3.6

Μεταλλικό δοχείο με διαστάσεις και σχήμα σύμφωνα με την τυποποίηση της EPA-US, στεγανοποιημένο με αυτοκόλλητη λουρίδα από ταινία βινυλίου.



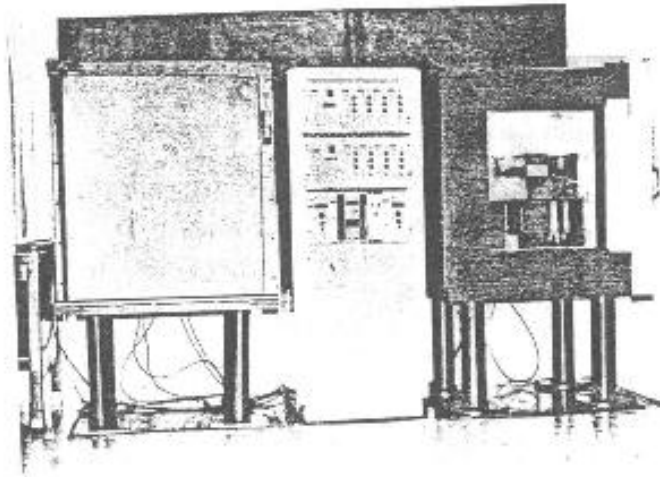
Διάγραμμα 3.7

Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα με διαστάσεις σχήμα και συγκρότηση σύμφωνα με την τυποποίηση της EPA-US, κατασκευασμένα από ανεξάρτητο κατασκευαστή.



Διάγραμμα 3.8

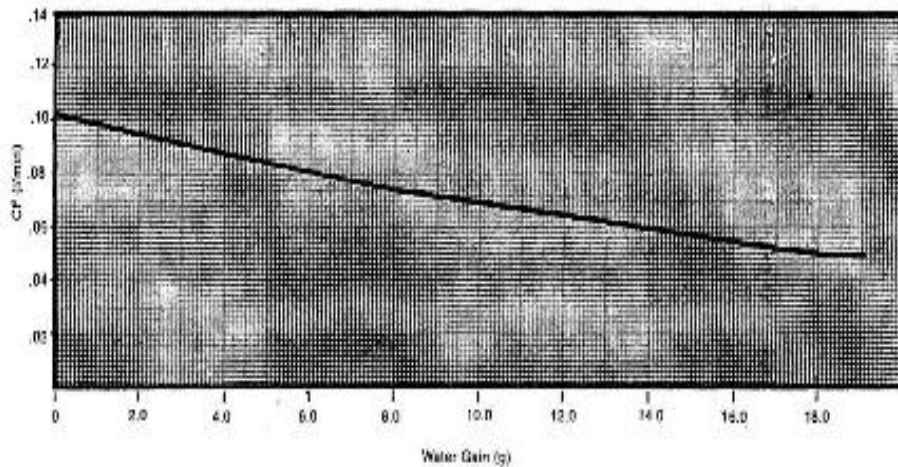
Τέσσερις (4) κυλινδρικοί ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου διαστάσεων 3 x 3" έκαστος, μέσα στη θωράκισή τους (Gray, 1987)



Διάγραμμα 3.9

**Δύο θωρακίσεις για ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου και πυρηνικά ηλεκτρονικά
(Gray, 1987)**

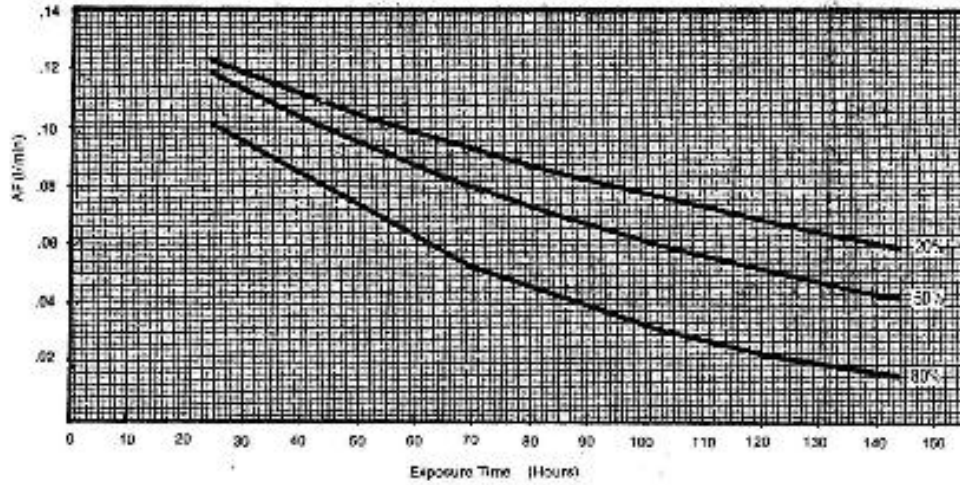
**WATER GAIN VERSUS CALIBRATION FACTORS (CF)
FOR A TWO DAY EXPOSURE**



Διάγραμμα 3.10

**Τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης για μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα σε
συνάρτηση με την μάζα των προσροφηθέντων υδρατμών για 2 ήμερη έκθεση
(Gray, 1987)**

EXPOSURE TIME VERSUS ADJUSTMENT FACTORS (AF)
FOR LOW, MEDIUM, AND HIGH HUMIDITY



Διάγραμμα 3.11

Τιμές των συντελεστών αναγωγής σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης για "χαμηλή", "μέση" και "υψηλή" σχετική υγρασία (Gray, 1987)

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Water Gain Versus Calibration
Factors For a 2 Day Exposure

Percent Humidity	Water Gain (g)	CF (liter/min)
20	0.0	0.105
20	0.0	0.101
20	0.0	0.105
20	0.0	0.110
20	0.0	0.107
50	1.7	0.098
50	1.8	0.094
50	1.9	0.097
50	1.8	0.102
50	1.8	0.096
80	7.7	0.077
80	7.5	0.082
80	7.7	0.076
80	7.9	0.076
80	7.9	0.078

Πίνακας 3.1

Συντελεστής βαθμονόμησης (CF – Lmin⁻¹) μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα σε συνάρτηση με τη μάζα (g) των προσροφηθέντων υδρατμών για 2 ήμερη έκθεση σε διάφορες σχετικές υγρασίες (Gray, 1987).

Exposure Time Versus Adjustment Factors
for Low, Medium, and High Humidity

Time of Exposure (Hours)	Adjustment Factors (liter/min)		
	20 Percent	50 Percent	80 Percent
24	0.137	0.132	0.116
24	0.143	0.137	0.125
24	0.141	0.132	0.118
24	0.135	0.125	0.117
24	0.138	0.127	0.118
48	0.137	0.096	0.077
48	0.110	0.102	0.082
48	0.106	0.097	0.076
48	0.101	0.094	0.076
72	0.106	0.098	0.078
72	0.087	0.075	0.048
72	0.091	0.079	0.051
72	0.088	0.075	0.051
72	0.083	0.073	0.046
72	0.085	0.075	0.049
96	0.074	0.058	0.035
96	0.080	0.062	0.034
96	0.075	0.059	0.032
96	0.074	0.057	0.033
96	0.075	0.060	0.034
120	0.070	0.061	0.023
120	0.073	0.064	0.025
120	0.071	0.061	0.024
120	0.069	0.060	0.023
120	0.071	0.062	0.023
144	0.064	0.045	0.018
144	0.068	0.047	0.019
144	0.064	0.047	0.016
144	0.062	0.044	0.018

Πίνακας 3.2

Συντελεστής αναγωγής της βαθμονόμησης (AF – Lmin⁻¹) σε συνάρτηση με τον χρόνο έκθεσης για διάφορες σχετικές υγρασίες (Gray, 1987).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ

ΑΝΘΡΑΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

ΣΤΟ ΕΠΤ-ΕΜΠ

4.1 Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) διαθέτει πολλαπλές δυνατότητες υλικών και εξοπλισμού προκειμένου για την οργάνωση της βαθμονόμησης μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου. Οποσδήποτε αυτές οι δυνατότητες δεν είναι ταυτόσημες με εκείνες της υπηρεσίας EPA-US, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο 3^ο Κεφάλαιο. Παρόλαυτά, σημειώνεται ότι με κανέναν τρόπο δεν λείπουν τα απολύτως απαραίτητα, δηλαδή διατίθενται ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου διαφόρων τύπων, κατάλληλες θωρακίσεις των ανιχνευτών, θάλαμοι Ραδονίου και τέλος πηγές ²²⁶Ra για τη δημιουργία συγκεντρώσεων Ραδονίου στους θαλάμους. Στη συνέχεια θα παρουσιασθεί η σύνθεση των παραπάνω, όπως οργανώθηκε για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

4.2 Υλικά και εξοπλισμός

4.2.1 Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα

Είναι προφανές ότι δεν υπήρχε δυνατότητα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, να χρησιμοποιήσει χωρίς κόστος τα μεταλλικά δοχεία που χρησιμοποιούνται και από την EPA-US. Επιπλέον δεν υπήρχε δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος ενεργός άνθρακας, όπως αυτός παρασκευάζεται στις Η.Π.Α. και διατίθενται στην EPA-US. Για να καλυφθούν οι σχετικές ανάγκες για κατάλληλα μεταλλικά δοχεία και ενεργό άνθρακα, έγιναν οι ακόλουθες ενέργειες:

α) για τα μεταλλικά δοχεία:

Ο George (1984) προτείνει μεταλλικά δοχεία ακριβώς σαν αυτά της EPA-US (βλ. και σχετικά Διαγράμματα του 3^{ου} Κεφαλαίου), τα οποία όμως έχουν μεγαλύτερο ύψος (5 cm) και γεμίζονται πλήρως με 200 g περίπου ενεργό άνθρακα μέχρι το ύψος των 4.5 cm. Στα δοχεία αυτά χρησιμοποιούνται "μεταλλικά πλέγματα", "δακτύλιοι συγκράτησης", "αυτοκόλλητες ταινίες βινυλίου", αλλά όχι "προστατευτικό μαλακό υλικό πλήρωσης -

συμπλήρωσης" (βλ. και παράγραφο 3.2.1). Προκαταρκτικά πειράματα βαθμονόμησης σε θάλαμο Ραδονίου 20 m³, έδειξαν ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης που προκύπτει είναι έως 1.6 φορές καλύτερος από τον συντελεστή βαθμονόμησης του μεταλλικού δοχείου M11. Για τα πειράματα βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε ενεργός άνθρακας στη μορφή "τριμμένης καρύδας", τύπου ΚΕ με διαστάσεις κόκκου 18 x 16 mesh (δηλαδή με διάμετρο κόκκων μεταξύ περίπου 1.0 και 1.2 mm) του κατασκευαστή Barneby Cheney. Ο τύπος των μεταλλικών δοχείων που διερεύνησε για χρήση ο George (1984), έτυχε να ταυτίζεται ακριβώς με ικανό αριθμό δοχείων (περίπου 10) που εντοπίστηκαν εντελώς τυχαία για τα αναγκαία πειράματα που έπρεπε να γίνουν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Τα μεταλλικά αυτά δοχεία δεν είναι άλλα από αυτά που χρησιμοποιούνται από ορισμένες καπνοβιομηχανίες για τη λιανική πώληση καπνού πίπας. Κενά, τέτοια δοχεία μας διέθεσε ευγενικά ο Γεωργιάδης (2006). Για λόγους οικονομίας χρόνου αλλά και χρημάτων επιλέχθηκε να μην κατασκευασθούν για τα δοχεία αυτά "μεταλλικά πλέγματα", "δακτύλιοι συγκράτησης", και "προστατευτικό μαλακό υλικό πλήρωσης - συμπλήρωσης" (βλ. και παράγραφο 3.2.1). Η πλήρωση των δοχείων αυτών με ενεργό άνθρακα, γίνεται "μέχρι επάνω". Το Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζει ένα σκαρίφημα του πλήρους δοχείου. Η φωτογραφία του Διαγράμματος 4.2 παρουσιάζει το μεταλλικό δοχείο με το κάλυμμά του. Η φωτογραφία του Διαγράμματος 4.3, παρουσιάζει τα μέρη του μεταλλικού δοχείου ως "δοχείο" και "κάλυμμα". Διακρίνεται στην εσωτερική γωνία του καλύμματος λεπτό υπόλευκο ελαστικό παρέμβυσμα που στεγανοποιεί κατά το δυνατόν το δοχείο, μετά το βίδωμα του καλύμματος. Η φωτογραφία του Διαγράμματος 4.4, παρουσιάζει το μεταλλικό δοχείο γεμάτο με ενεργό άνθρακα "μέχρι επάνω".

β) για τον ενεργό άνθρακα:

Κατ'αρχήν παρατηρείται από τα όσα γράφονται από τον George (1984) και τον Gray (1987), ότι γενικά δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές διαστάσεων κόκκου ή τύπων ενεργού άνθρακα. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του όποιου τύπου ενεργού άνθρακα χρησιμοποιείται είναι θέμα εύρεσης του αντίστοιχου συντελεστή βαθμονόμησης (CF), με τρόπο παρόμοιο με αυτό που περιγράφεται στο 3^ο Κεφάλαιο. Στην ευρωπαϊκή αγορά διατίθενται χημικά καθαρός ενεργός άνθρακας σε διάφορες τυποποιημένες διαστάσεις κόκκων, κυρίως από την γερμανική εταιρεία Merck (βλ. και <http://www2.merck-chemicals.com/fcatalog/Marketing/splashpage.jsp>), η οποία

αντιπροσωπεύεται στην Ελλάδα. Η προμήθεια χημικά καθαρού ενεργού άνθρακα, η οποία συνεπάγεται επένδυση χρόνου αλλά και χρημάτων, δεν φαίνεται να είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τους σκοπούς της Διπλωματικής Εργασίας. Ο λόγος είναι ότι το προσροφούμενο Ραδόνιο, ως ευγενές αέριο, δεν πρόκειται να αντιδράσει με οποιοδήποτε "ξένο" συστατικό του ενεργού άνθρακα. Με τα παραπάνω ως δεδομένα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί "χύμα" ενεργός άνθρακας σαν εκείνον που χρησιμοποιείται π.χ. για τα φίλτρα καθαρισμού των ενυδρείων και υπάρχει άμεσα διαθέσιμος στην αγορά, σε χαμηλό κόστος από κεντρικούς προμηθευτές χονδρικής χημικών υλικών [βλ. και Καλογερόπουλος (2006) και Ρουμπουλάκης (2006)]. Η αγορά του "χύμα" ενεργού άνθρακα έγινε τελικά από τον προμηθευτή ΚΑΛΟΓΕΡΟΠΟΥΛΟΣ ΧΗΜΙΚΑ Α.Ε. (βλ. και <http://www.kalogeropoulos-chemicals.gr/greek/index.htm>). Τιμολόγιο του προμηθευτή αυτού για ενεργό άνθρακα παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.5. Το Διάγραμμα 4.6 παρουσιάζει εικόνα του υπόψιν ενεργού άνθρακα, πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί προκειμένου να υπάρχει μία κατ'αρχήν πληροφορία για τις διαστάσεις και τη μορφή του κόκκου του. Παρατηρείται ότι η μορφή του κόκκου, προσομοιάζει στο σχήμα την μεσαίου μεγέθους ζαχαροπλαστική "τρούφα" σοκολάτας.

4.2.2 Μετρητικά συστήματα

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ, σε ό,τι αφορά τη μέτρηση φωτονιακών πυρηνικών ακτινοβολιών διαθέτει πληθώρα ανιχνευτών. Συγκεκριμένα αναφέρονται:

α) για εργαστηριακές φασματοσκοπικές μετρήσεις υψηλής διακριτικής ικανότητας διατίθενται τουλάχιστον πέντε ανιχνευτές ημιαγωγών (Ge) διαφόρων τύπων με κατάλληλες θωρακίσεις και με τα αντίστοιχα πυρηνικά ηλεκτρονικά, η περιγραφή των οποίων ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Ένας από αυτούς τους ανιχνευτές είναι κατάλληλα φορητός, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται για φασματοσκοπικές μετρήσεις και εκτός Εργαστηρίου.

β) για εργαστηριακές φασματοσκοπικές μετρήσεις χαμηλότερης διακριτικής ικανότητας διατίθενται τουλάχιστον ένας κυλινδρικός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου διαστάσεων 3 x 3", με κατάλληλη θωράκιση και με τα αντίστοιχα πυρηνικά ηλεκτρονικά και υπολογιστή. Φωτογραφία της υπόψιν διατάξεως, διακρίνεται στο Διάγραμμα 4.7. Ο ανιχνευτής στο εσωτερικό της θωράκισής του από μόλυβδο διακρίνεται στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.8. Το πάχος της θωράκισής είναι περίπου 2".

γ) για εργαστηριακές μετρήσεις χωρίς φασματοσκοπική δυνατότητα διατίθενται κυρίως δύο φορητοί κυλινδρικοί ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου διαστάσεων 2 x 2" (περίπου 5 x 5 cm). Πρόκειται για τους ακόλουθους:

- τύπος 489-120 με σειριακό αριθμό 18, της εταιρείας κατασκευής VICTOREEN [φωτογραφία Διαγράμματος 4.9), βλ. και Elimpex Medizintechnik (2006), και Cardinal Health (2006)], συνδεδεμένος με μονάδα καταγραφής γεγονότων τύπου 190-SI με σειριακό αριθμό 226, επίσης της εταιρείας κατασκευής VICTOREEN [φωτογραφία Διαγράμματος 4.10, βλ. και Victoreen Inc. (1996)] – βλ. και <http://www.elimpex.com/companies/victoreen/indexv.htm>, και
- τύπος SG-2R/CODE: 75861 με σειριακό αριθμό 0061, της εταιρείας κατασκευής CANBERRA – EURISYS (φωτογραφία Διαγράμματος 4.11), συνδεδεμένος με μονάδα καταγραφής γεγονότων τύπου RADIAGEM 2000/CODE: 76687 με σειριακό αριθμό 0160, επίσης της εταιρείας κατασκευής CANBERRA – EURISYS (φωτογραφία Διαγράμματος 4.12) – βλ και <http://www.canberra.com>.

Οι ανιχνευτές (α) παρότι διαθέσιμοι και κατάλληλοι για τις μετρήσεις που αφορούν στα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα, λόγω του υψηλού κόστους κτήσης / χρήσης και των σχετικά πολύπλοκων και οπωσδήποτε πολύ ακριβών πυρηνικών ηλεκτρονικών τους, δεν επιλέχθηκαν προς χρήση στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, δεδομένου μάλιστα ότι όπως φαίνεται διατίθενται και άλλες τεχνικές λύσεις.

Οι ανιχνευτές (β) που είναι επίσης κατάλληλοι για τις υπόψιν μετρήσεις –και οι οποίοι μάλιστα προσομοιάζουν προς τους ανιχνευτές που χρησιμοποιεί η υπηρεσία EPA – US, δεν επιλέχθηκαν προς χρήση στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, διότι όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες των σχετικών Διαγραμμάτων 4.7 και 4.8, είναι ήδη δεσμευμένοι σε συγκρότηση που εξυπηρετεί άλλους σκοπούς. Διακρίνεται μάλιστα καθαρά, ότι η θωράκισή τους δεν επιτρέπει να τοποθετηθούν πάνω στους ανιχνευτές προς μέτρηση τα μεταλλικά δοχεία που έχουν ήδη επιλεγεί, διότι η γεωμετρία της δεν επιτρέπει την πλήρη κάλυψή τους από όλες τις όψεις. Σχετικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει και τις φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.13.

Οι ανιχνευτές (γ) παρόλο που δεν έχουν φασματοσκοπικές δυνατότητες και παρόλο που ενδεχόμενα παρουσιάζουν μικρότερο βαθμό απόδοσης λόγω μικρότερων διαστάσεων (2 x 2") από τους ανιχνευτές (β) ή τους αντίστοιχους ανιχνευτές της υπηρεσίας EPA-US (3

x 3"), συγκεντρώνουν ορισμένα πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να αγνοηθούν, ως εξής:

- είναι φορητοί
 - δεν κοστίζουν πολλά χρήματα
 - δεν είναι δεσμευμένοι σε άλλου είδους διαδικασίες στο Εργαστήριο, και τέλος
 - μπορούν να προσαρμοσθούν εύκολα σε διαθέσιμες ελεύθερες θωρακίσεις
- Λαμβάνοντας υπόψιν, τα παραπάνω πλεονεκτήματα κρίθηκε ότι οι ανιχνευτές (γ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατ'αρχήν για τις μετρήσεις μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα.

Σε ό,τι αφορά στα πυρηνικά ηλεκτρονικά των ανιχνευτών μπορεί να σημειωθεί ότι καταγράφονται στους αντίστοιχους καταμετρητές φωτόνια όλων των ενεργειών σε μία περιοχή που γενικά στις ενέργειες > 60 eV. Στην περιοχή των ενεργειών αυτών συμπεριλαμβάνονται και τα φωτόνια του ισοτόπου ^{40}K , στα 1461 keV. Έτσι η μέτρηση που γίνεται με αυτούς τους ανιχνευτές, είναι τύπου "ολική γ " και δεν λαμβάνεται κάποιου είδους φάσμα. Δυστυχώς δεν υπάρχει τρόπος ρύθμισης του ενεργειακού διαστήματος ανίχνευσης σε επιθυμητά όρια πράγμα που σημαίνει ότι η μέτρηση των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, όπως αυτά έχουν επιλεγεί και περιγραφθεί πιο πάνω, με αυτούς τους ανιχνευτές περιλαμβάνει οπωσδήποτε και τα φωτόνια από το ^{40}K .

Για τους επιλεγθέντες ανιχνευτές (γ) και προκειμένου για τη μείωση του υποστρώματος απαιτήθηκε να διαμορφωθεί κατάλληλη θωράκιση. Οι διαθέσιμες ελεύθερες ανιχνευτών θωρακίσεις στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ήταν δύο τύπων:

- (1) Δύο ημι-σταθερές βαρείς μολύβδινες κυλινδρικές θωρακίσεις σαν εκείνη των ανιχνευτών (β), (βλ. και τα Διαγράμματα 4.7, 4.8 και 4.13), όπως φαίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.14. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κάποια από αυτές τις θωρακίσεις για τις μετρήσεις των μεταλλικών δοχείων με τον ενεργό άνθρακα, με τους ανιχνευτές (γ) απαιτείται μηχανουργική διαμόρφωσή τους ώστε να χωρέσουν τα μεταλλικά δοχεία που έχουν ήδη επιλεγεί. Το προφανές βάρος των θωρακίσεων αυτών εμποδίζει τόσο την μετακίνησή τους (απαιτείται για αυτήν μικρό χειροκίνητο "κλάρκ") προς οποιοδήποτε μηχανουργείο, αλλά και την ίδια την

κατεργασία τους. Επιπλέον το βάρος αυτό αναιρεί την φορητότητα των ανιχνευτών (γ). Έτσι η διαμόρφωση και χρήση αυτών των θωρακίσεων δεν προκρίθηκε στα πλαίσια της παρούσης έρευνας.

- (2) Μία μολύβδινη θωράκιση τύπου λυόμενου κυλινδρικού πύργου αποτελούμενη από φορητούς μολύβδινους δακτυλίους, οι οποίοι τοποθετούμενοι "ο ένας πάνω στον άλλο", μπορούν να απομονώσουν έναν από τους ανιχνευτές (γ) και το όποιο δείγμα προς μέτρηση από το γειτονικό περιβάλλον. Η θωράκιση αυτή χωρίς να είναι πολύ ελαφρύτερη και πολύ πιο αδύνατη (μικρότερου δηλ. πάχους) από τις θωρακίσεις τύπου (1), διατηρεί τη φορητότητά της, διότι ο πύργος μπορεί να διαλύεται στο Εργαστήριο και να επανασυγκροτείται στον τόπο μέτρησης και αντίθετα. Επιπλέον μηχανουργικές διαμορφώσεις και τροποποιήσεις ώστε η θωράκιση να δέχεται τα μεταλλικά δοχεία που έχουν επιλεγεί στο εσωτερικό της, δεν χρειάζονται να γίνουν στο σύνολο του υλικού της αλλά μόνο σε ορισμένους από τους επιμέρους δακτυλίους. Επομένως η διαμόρφωση και χρήση της θωράκισης αυτής προκρίθηκε στα πλαίσια της παρούσης έρευνας.

4.2.3 Διαμόρφωση θωράκισης

Η θωράκιση (2) τύπου λυόμενου κυλινδρικού πύργου αποτελούμενη από φορητούς μολύβδινους δακτυλίους, όπως βρέθηκε διαθέσιμη και προκρίθηκε για χρήση στα πλαίσια της παρούσης έρευνας, δεν διέθετε κατάλληλο πυθμένα. Κατασκευάστηκε σε μηχανουργείο ατσάλινος πυθμένας σε δύο τεμάχια. Το τεμάχιο "βάση πυθμένα" βάρους 8.8 kg, (βλ. και σκαρίφημα του Διαγράμματος 4.15 και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.16), και το τεμάχιο "άνω πυθμένας" βάρους 8.8 kg (βλ. και σκαρίφημα του Διαγράμματος 4.17 και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.18). Το τεμάχιο "άνω πυθμένας" τοποθετείται κατά τη συγκρότηση της θωράκισης, πάνω στο τεμάχιο "βάση πυθμένα" με τη βοήθεια ήδη χαραγμένης οδηγού υποδοχής ("πατούρα"). Στην ανώτερη επιφάνεια του "άνω πυθμένα", κατασκευάστηκαν υποδοχές μικρού βάθους, προκειμένου, η θωράκιση να υποδέχεται σταθερά, τόσο τα μεταλλικά δοχεία που έχουν επιλεγεί, άλλα μεταλλικά δοχεία, ίδιας διαμέτρου και μικρότερου ύψους αλλά και το δοχείο που στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ονομάζεται "γεωμετρία 2" είναι από πλαστικό και έχει ύψος ~70 mm, διάμετρο ~70 mm και όγκο 280 cm³ (βλ. αντίστοιχα τις φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 4.19, 4.20 και 4.21). Όταν το οποιοδήποτε δοχείο είναι στη θέση του στον "άνω πυθμένα" γύρω του τοποθετείται ο φορητός δακτύλιος "Α" βάρους 4.4 kg, με

τη βοήθεια ήδη χαραγμένης οδηγού υποδοχής ("πατούρας"), όπως φαίνεται στις φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 4.22, 4.23 και 4.24. Ο φορητός δακτύλιος "Α", είναι ένας από τους διαθέσιμους μολύβδινους φορητούς δακτυλίους της θωράκισης, ο οποίος τροποποιήθηκε στο μηχανουργείο, ώστε η εσωτερική του διάμετρος να χωρά τα μεταλλικά δοχεία που έχουν επιλεγεί. Σκαρίφημα και φωτογραφία του φορητού δακτυλίου "Α" διακρίνονται στα Διαγράμματα 4.25 και 4.26. Όταν το οποιοδήποτε δοχείο είναι στη θέση του στον "άνω πυθμένα", πάνω από τον δακτύλιο "Α" τοποθετείται ο φορητός δακτύλιος "Β" βάρους 3.6 kg, με τη βοήθεια ήδη χαραγμένης οδηγού υποδοχής ("πατούρα"), όπως φαίνεται στις φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 4.27, 4.28 και 4.29. Ο φορητός δακτύλιος "Β", είναι ένας από τους διαθέσιμους μολύβδινους φορητούς δακτυλίους της θωράκισης, ο οποίος τροποποιήθηκε στο μηχανουργείο, ώστε η εσωτερική του διάμετρος να χωρά τα μεταλλικά δοχεία που έχουν επιλεγεί. Σκαρίφημα και φωτογραφία του φορητού δακτυλίου "Β" διακρίνονται στα Διαγράμματα 4.30 και 4.31. Πάνω από τον δακτύλιο "Β" τοποθετούνται "ο ένας πάνω στον άλλο" τέσσερις (4) φορητοί δακτύλιοι "C" τυπικού βάρους περί τα 5.0 kg, με τη βοήθεια ήδη χαραγμένων οδηγών υποδοχής ("πατούρες"), όπως φαίνεται στην φωτογραφία του Διαγράμματος 4.32. Ο φορητός δακτύλιος "C", είναι ένας από τους διαθέσιμους μολύβδινους φορητούς δακτυλίους της θωράκισης. Σκαρίφημα και φωτογραφία του φορητού δακτυλίου "C" διακρίνονται στα Διαγράμματα 4.33 και 4.34. Πάνω από τους δακτυλίους "C" τοποθετείται μολύβδινο κάλυμμα βάρους 3.6 kg, με τη βοήθεια ήδη χαραγμένης οδηγού υποδοχής ("πατούρα"). Το κάλυμμα διαθέτει άνοιγμα που επιτρέπει την είσοδο των ανιχνευτών (γ) όπως φαίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.35. Σκαρίφημα και φωτογραφίες του καλύμματος διακρίνονται στα Διαγράμματα 4.36 και 4.37. Ο φορητός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου της κατασκευάστριας εταιρείας VICTOREEN, διακρίνεται ως σύνολο στην φωτογραφία του Διαγράμματος 4.38 και τοποθετημένος στην θέση του επί του δείγματος εντός της θωράκισης στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.39. Ο φορητός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου της κατασκευάστριας εταιρείας CANBERRA - EURISYS, διακρίνεται ως σύνολο στην φωτογραφία του Διαγράμματος 4.40 και τοποθετημένος στην θέση του επί του δείγματος εντός της θωράκισης στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.41. Το συνολικό βάρος της λυόμενης θωράκισης ανέρχεται σε 49.5 kg.

4.2.4 Θάλαμοι Ραδονίου

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει δύο θαλάμους Ραδονίου κατάλληλους για την έκθεση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα (αλλά και άλλων παθητικών και ενεργητικών συσκευών) προκειμένου να βαθμονομηθούν. Τα γενικά χαρακτηριστικά των θαλάμων έχουν ως εξής:

- ΘΑΛΑΜΟΣ "Α": Ογκος 1.9 m^3 , Ύψος 1.56 m, Πλάτος 1.00 m, Βάθος 1.19 m, από φύλλα ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 2 και 3 mm, αεροστεγής (βλ. και όψη στο Διάγραμμα 4.42)
- ΘΑΛΑΜΟΣ "Β": Ογκος 8.5 m^3 Ύψος 1.95 m, Πλάτος 1.75 m, Βάθος 2.50 m, από φύλλα ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 2 και 3 mm, αεροστεγής (βλ. και όψη στο Διάγραμμα 4.43)

Ο όγκος των θαλάμων δεν είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να έχουν εγκατασταθεί κατάλληλοι μηχανισμοί θυρών που να επιτρέπουν την είσοδο – έξοδο ανθρώπων χωρίς να αλλοιώνονται η συγκέντρωση Ραδονίου και γενικά οι περιβαλλοντικές συνθήκες στο εσωτερικό τους. Οι θάλαμοι αυτοί έχουν τον ακόλουθο εξοπλισμό και δυνατότητες [βλ. και Κατσανεβάκης (1995), επίσης και Παπαδάκος (2001)]:

- διατίθενται κατάλληλες πηγές Ραδίου-226 (^{226}Ra), που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν στους θαλάμους Ραδόνιο, με το οποίο επιτυγχάνονται επιθυμητές συγκεντρώσεις στον περικλειόμενο εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα:

στον θάλαμο "Α" στην περιοχή από 250 έως και 150000 Bqm^{-3}

στον θάλαμο "Β" στην περιοχή από 60 έως και 31000 Bqm^{-3} .

Η συγκέντρωση του Ραδονίου στους θαλάμους μετράται συνεχώς με ενεργητικές τεχνικές. Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων καταχωρούνται αν χρειάζεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

- υπάρχει δυνατότητα ελέγχου και συνεχούς μέτρησης των περιβαλλοντικών συνθηκών των θαλάμων και κυρίως της σχετικής υγρασίας στα επίπεδα από 10 έως και 90%, και της θερμοκρασίας στα επίπεδα από 10° έως και 40° C . Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων καταχωρούνται αν χρειάζεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

- υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και συνεχούς μέτρησης της συγκέντρωσης των θυγατρικών του Ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των θαλάμων έτσι ώστε να επιτυγχάνονται τιμές του λεγόμενου συντελεστή ισορροπίας (equilibrium factor) στην περιοχή από 0.2 (ισοδύναμα: πολύ χαμηλή συγκέντρωση θυγατρικών σε σχέση με την επικρατούσα συγκέντρωση του Ραδονίου) έως και 0.8 (ισοδύναμα: συγκέντρωση θυγατρικών σχεδόν ίση με την επικρατούσα συγκέντρωση του Ραδονίου) Ο τρόπος που μετράται ή υπολογίζεται αυτός ο συντελεστής δεν εντάσσεται στο περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων καταχωρούνται αν χρειάζεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

4.2.5 Ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου

Οι περισσότεροι θάλαμοι Ραδονίου στα διάφορα Πανεπιστημιακά ή άλλα Εργαστήρια ανά τον κόσμο έχουν τις εξής κύριες ιδιότητες:

- Είναι κατά κανόνα μεγάλου όγκου, έχουν δηλαδή τις διαστάσεις μικρού δωματίου.
- Δεν είναι αεροστεγείς και παρουσιάζουν μεγάλες συναλλαγές ατμόσφαιρας με το περιβάλλον, οι οποίες μετρώνται με το μέγεθος "ρυθμός ανανέωσης του αέρα" (σε h^{-1}).
- Επιτρέπουν την είσοδο και την έξοδο του προσωπικού σε αυτούς μέσω καταλλήλων μηχανισμών διπλών θυρών (air locks).

Το πρακτικό αποτέλεσμα αυτών των ιδιοτήτων είναι ότι μία συγκέντρωση Ραδονίου στους θαλάμους αυτούς, εκτός από την αναπόφευκτη ραδιενεργό απομείωση, μειώνεται και λόγω των διαρροών και της ανθρώπινης (εργαστηριακής) δραστηριότητας (είσοδος – έξοδος). Προκειμένου λοιπόν η συγκέντρωση Ραδονίου σε ένα τέτοιο θάλαμο να διατηρείται κατά μέσο όρο σταθερή, απαιτούνται κατά διαστήματα μεταγίσεις Ραδονίου σε αυτόν από κατάλληλα διαμορφωμένους μηχανισμούς με πηγές Ραδίου-226. Παράδειγμα τέτοιας καταστάσεως με διαρροές και ακολουθίες μεταγίσεων είναι ο θάλαμος, στον οποίο έκανε τα αρχικά του πειράματα με τον ενεργό άνθρακα, ο George (1984). Παρατηρείται π.χ. στο Διάγραμμα 2.4 ότι για χρόνο $T_s = 76$ h, η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο εκείνον ήταν 30 pCiL^{-1} ($\sim 1100 \text{ Bq m}^{-3}$) ενώ διαπιστώνεται μία ομαλή κύμανση από 15 έως 50 pCiL^{-1} (δηλ. περίπου από 500 έως 1900 Bq m^{-3}). Επίσης στο ίδιο Διάγραμμα για χρόνο $T_s = 50$ h, η μέση συγκέντρωση

Ραδονίου στο θάλαμο εκείνον ήταν 27 pCiL^{-1} ($\sim 1000 \text{ Bq m}^{-3}$) ενώ διαπιστώνεται μία ομαλή κύμανση από 15 έως 55 pCiL^{-1} (δηλ. περίπου από 500 έως 2000 Bq m^{-3}).

Από την άλλη πλευρά οι θάλαμοι Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ, έχουν τις εξής κύριες ιδιότητες:

- Έχουν σχετικά μικρό όγκο.
- Είναι αεροστεγείς.
- Δεν επιτρέπουν την είσοδο και την έξοδο του προσωπικού σε αυτούς.

Το πρακτικό αποτέλεσμα αυτών των ιδιοτήτων είναι ότι μία συγκέντρωση Ραδονίου στους θαλάμους αυτούς, εκτός από την αναπόφευκτη ραδιενεργό απομείωση, δεν μειώνεται λόγω διαρροών ή άλλων δραστηριοτήτων. Δεν απαιτούνται επομένως κατά διαστήματα μεταγγίσεις Ραδονίου προκειμένου η συγκέντρωση Ραδονίου σε ένα τέτοιο θάλαμο να διατηρείται κατά μέσο όρο σταθερή, για χρονικά διαστήματα T_s από 0 έως π.χ. 100 h. Για να γίνει κατανοητό το γιατί, θα εξετασθεί το σενάριο όπου $T_s =$ ένας χρόνος ημιζωής Ραδονίου, δηλ. περίπου 92 h. Στη διάρκεια ενός χρόνου ημιζωής Ραδονίου, είναι φανερό (σχέση 4.3), ότι η συγκέντρωση του Ραδονίου σε έναν αεροστεγή θάλαμο, θα μειωθεί κατά 50%. Η μείωση θα γίνει εξαιρετικά ομαλά (εκθετική καμπύλη μικρής αρνητικής κλίσης), χωρίς να υπάρχει κανενός είδους μεγάλη διακύμανση λόγω διαρροών προς το περιβάλλον, ή λόγω άλλων αιτιών. Επιπλέον η μείωση από 100% στο 50% είναι ως μεταβολή τιμής συγκέντρωσης σαφώς μικρότερη από τις μεταβολές τιμών συγκέντρωσης, που παρατηρούνται π.χ. στο θάλαμο που λειτουργεί κατά το Διάγραμμα 2.4 και οι οποίες φθάνουν στο 400%, και είναι μάλιστα περιοδικά επαναλαμβανόμενες.

Υπό αυτό το πρίσμα και πέρα από το μειονέκτημα ότι δεν επιτρέπεται η είσοδος - έξοδος εργαστηριακού προσωπικού, η λειτουργία των θαλάμων Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ, φαίνεται να είναι απλούστερη από μετρολογική άποψη σε ό,τι αφορά τη ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου στο εσωτερικό τους απαλλαγμένη από τυχαία σφάλματα, διότι υπάρχει μία σαφής παθητικότητα στη ρύθμιση. Η μόνη τεχνική λεπτομέρεια που πρέπει να ρυθμίζεται στους θαλάμους αυτούς είναι η ρύθμιση της αρχικής συγκέντρωσης Ραδονίου.

4.2.6 Πηγές Ραδονίου

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει, όπως ήδη σημειώθηκε, κατάλληλες πηγές Ραδίου-226 (^{226}Ra), που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν στους θαλάμους Ραδόνιο, με το οποίο επιτυγχάνονται επιθυμητές συγκεντρώσεις στον περικλειόμενο εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Οι πηγές αυτές είναι δύο (2) και προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές ως εξής:

- πρότυπη πιστοποιημένη πηγή "1": Τύπος RF200, του κατασκευαστή οίκου Czech Metrology Institute, της Τσεχίας, ονομαστικής ραδιενέργειας Ραδίου – 226 274.3 kBq.
- πρότυπη πιστοποιημένη πηγή "2": Τύπος 2000-100, σειράς 200A, του κατασκευαστή οίκου Pylon Electronics Inc., του Καναδά, ονομαστικής ραδιενέργειας Ραδίου-226 102.8 kBq.

Τόσο η πηγή "1" όσο και η πηγή "2" έχουν τη ιδιότητα ότι πρακτικά το 100% του Ραδονίου που παράγεται απελευθερώνεται προς την ελεύθερη ατμόσφαιρα από το κρυσταλλικό στερεό που περιέχει το Ράδιο – 226. Η ιδιότητα αυτή (με μονάδες ποσοστού) έχει επικρατήσει να ονομάζεται στα αγγλικά "emanation power" και μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 100%.

Στο Διάγραμμα 4.44 παρουσιάζεται το σχετικό πιστοποιητικό για την ραδιενέργεια της πηγής "1". Στο Διάγραμμα 4.45 παρουσιάζεται το σχετικό πιστοποιητικό για τη ραδιενέργεια της πηγής "2".

Προκειμένου οι πηγές "1" και "2" να συνεργάζονται λειτουργικά, με τρόπο που θα περιγραφεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο, με τους θαλάμους Ραδονίου "Α" και "Β", πρέπει να τοποθετούνται σε κυλινδρικά δοχεία μικρού όγκου,

$$V_{\text{δοχείου}} \ll V_{\text{θαλάμου}}$$

τα οποία να μπορούν να επικοινωνούν με τους θαλάμους αυτούς με τη βοήθεια σωληνώσεων κατάλληλης διαμέτρου (8 – 20 mm). Η πηγή "1" είναι τοποθετημένη σε τέτοιο δοχείο (στο εξής: δοχείο "1") εκ κατασκευής. Μηχανολογικό σχέδιο του δοχείου "1" παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.46. Φωτογραφική απεικόνιση του δοχείου "1", όπως είναι αυτό τοποθετημένο πλησίον των θαλάμων Ραδονίου "Α" και "Β" στο ΕΠΤ-ΕΜΠ παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.47. Η πηγή "2", φυλλάδιο προδιαγραφών της

οποίας διακρίνεται στο Διάγραμμα 4.48, δεν διαθέτει τέτοιο δοχείο (στο εξής: δοχείο "2") εκ κατασκευής. Έτσι, όταν παρουσιάσθηκε η σχετική ανάγκη (δεκαετία του '90), πραγματοποιήθηκε η σχετική κατασκευή, η οποία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.49. Διαπραγματεύση σχετικά με την υπόψιν κατασκευή γίνεται στον Κατσανεβάκης (1995).

Επιπλέον, προκειμένου οι πηγές "1" και "2" να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βαθμονομημένων ποσοτήτων Ραδονίου, πρέπει να περάσουν από την διαδικασία μηδενισμού. Με τον όρο μηδενισμός εννοείται η πλήρης απομάκρυνση όποιας ποσότητας Ραδονίου υπάρχει στα αντίστοιχα κυλινδρικά δοχεία "1" και "2". Ο τρόπος που γίνεται ο μηδενισμός είναι στην ουσία πλήρης εξαερισμός (degassing) του δοχείου "1" ή του δοχείου "2" με την παροχή ρεύματος καθαρού ατμοσφαιρικού αέρα με μέθοδο που θα περιγραφθεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο. Τη χρονική στιγμή ακριβώς που θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί ο μηδενισμός, αρχίζει η λεγόμενη παραγωγή Ραδονίου. Η χρονική στιγμή αυτή θεωρείται ότι είναι η χρονική στιγμή "0".

Εστω τώρα πηγή, με τεχνικά χαρακτηριστικά όπως των πηγών "1" και "2" (δηλ. με emanation power 100%), η οποία αμέσως μετά τον μηδενισμό βρίσκεται στην χρονική στιγμή "0". Από το χρονικό σημείο αυτό και μετά, αρχίζει στο δοχείο της πηγής να παράγεται Ραδόνιο, η ραδιενέργεια του οποίου είναι συνάρτηση του χρόνου T (min), ως εξής:

$$A(t) = A_o(1 - e^{-\lambda T}) \quad (4.1)$$

όπου;

A είναι η ραδιενέργεια του παραγόμενου Ραδονίου σε Bq

A_o είναι η ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδίου-226 της πηγής, και

λ είναι η σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου σε min^{-1} ($\lambda = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)

Η μέγιστη ραδιενέργεια Ραδονίου, η οποία μπορεί να παραχθεί από την πηγή είναι:

$$A_{max} = A_o$$

Ο χρόνος που χρειάζεται για την παραγωγή της μέγιστης ραδιενέργειας Ραδονίου υπολογίζεται από την αντίστοιχη επίλυση της σχέσης 4.1 σε $T \approx 21$ ημέρες.

4.2.7 Μετάγχιση Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου

Γίνεται κατανοητό, ότι παρακολουθώντας τον χρόνο T , είναι δυνατόν να μεταγγίσουμε από το δοχείο της πηγής σε έναν –κατά τα άλλα αεροστεγή και απομονωμένο από το λοιπό περιβάλλον- θάλαμο Ραδονίου όγκου V (m^3), όσο Ραδόνιο έχει σχηματισθεί στο δοχείο της πηγής στο διάστημα από τη χρονική στιγμή "0" έως τη χρονική στιγμή " T ". Η μετάγχιση αυτή γίνεται με τη βοήθεια σωληνώσεων και αντλιών αερίου, με τρόπο που θα περιγραφεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο. Αν θεωρηθεί ότι με τη μέθοδο που ακολουθείται η μετάγχιση είναι πλήρης, τότε μέσα στο θάλαμο Ραδονίου θα δημιουργηθεί συγκέντρωση Ραδονίου Rn_o (Bqm^{-3}) ίση με:

$$Rn_o = A(T)/V \quad (4.2)$$

Ετσι αν ορισθεί μία νέα αρχή των χρόνων που να ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγχισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής σε θάλαμο Ραδονίου, τότε η συγκέντρωση του Ραδονίου στον θάλαμο Rn' (Bqm^{-3}) μεταβάλλεται με την πάροδο χρόνου t με βάση τον απλό εκθετικό νόμο ραδιενεργού απομείωσης:

$$Rn' = Rn_o e^{-\lambda t} \quad (4.3)$$

Εστω τώρα ότι ο συνολικός χρόνος που παρήρθε από τη λήξη της μετάγχισης έως το άνοιγμα του θαλάμου στο ελεύθερο περιβάλλον ή την με άλλο τρόπο αλλοίωση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε αυτόν (π.χ. με βίαιο εξαερισμό) είναι T_s (min). Τότε η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο το χρονικό διάστημα T_s υπολογίζεται προφανώς από την εξίσωση:

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} t Rn_o e^{-\lambda t} dt}{T_s} \quad (4.4)$$

4.2.8 Επιλογή πηγής και θαλάμου

Στην επιλογή του συνδυασμού πηγής και θαλάμου που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια πειραμάτων βαθμονόμησης μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, γίνεται αντιληπτό από τα προηγούμενα, ότι σημαντικό ρόλο παίζουν:

- η συγκέντρωση Ραδονίου στην οποία πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση, και
- ο απαιτούμενος για τη βαθμονόμηση χρόνος

Σε ό,τι αφορά τη συγκέντρωση Ραδονίου, ούτε ο George (1984) ούτε ο Gray (1987) δίνουν κάποια συγκεκριμένα στοιχεία. Παρόλαυτά, με βάση το Διάγραμμα 2.4 όπως αυτό προέκυψε από μία σειρά πειραμάτων του George (1984), συνάγεται ότι μία σχετικά κατάλληλη τάξη μεγέθους αυτής της συγκέντρωσης πρέπει να έχει την τιμή 10^0 kBqm^{-3} . Είναι φανερό, ότι δεδομένου του όγκου των θαλάμων "Α" και "Β", που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ και της ραδιενέργειας των πηγών "1" και "2" καθώς και των ισχυρόντων σχέσεων 4.1, 4.2 και 4.3, η επίτευξη συγκεντρώσεων αυτής της τάξης μεγέθους είναι δυνατή με οποιοδήποτε συνδυασμό θαλάμου – πηγής.

Σε ό,τι αφορά τον απαιτούμενο για τη βαθμονόμηση χρόνο, σημειώνεται, ότι αυτός αποτελείται από τις ακόλουθες συνιστώσες:

- (i) Χρόνος για την αναγέννηση του ενεργού άνθρακα
- (ii) Χρόνος για τη διαδικασία μηδενισμού
- (iii) Χρόνος για την παραγωγή Ραδονίου μέσα στο δοχείο της πηγής
- (iv) Χρόνος για την μετάγχιση του Ραδονίου από το δοχείο στον όποιο θάλαμο
- (v) Χρόνος έκθεσης των μεταλλικών δοχείων με τον ενεργό άνθρακα
- (vi) Χρόνος αναμονής προκειμένου να δημιουργηθούν τα αναγκαία για τη μέτρηση θυγατρικά
- (vii) Χρόνος μέτρησης

Σχετικά με τη συνιστώσα χρόνου (ii) και σύμφωνα με τις προτάσεις του George (1984), απαιτούνται 10 – 12 h ήπιας θέρμανσης του ενεργού άνθρακα στους 120°C , προκειμένου να απαλλαγεί από τυχόν προσροφηθείσα υγρασία ή τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο. Ο χρόνος αυτός πρέπει να θεωρείται ανελαστικός.

Σχετικά με τη συνιστώσα χρόνου (iii) και σύμφωνα με τις τυποποιημένες διαδικασίες που ακολουθούνται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ (Παπαδάκος, 2001), ο χρόνος αυτός πρέπει να θεωρείται ανελαστικός και τουλάχιστον ίσος με 50 min.

Σχετικά με τη συνιστώσα χρόνου (iv) και όπως φαίνεται στη σειρά των σχέσεων 4.1 και 4.2, ο χρόνος αυτός είναι μεταβλητός και εξαρτάται από την τάξη μεγέθους της συγκέντρωσης Ραδονίου που πρέπει να δημιουργηθεί στους θαλάμους. Εστω λοιπόν ότι είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί στον θάλαμο "Α" (όγκου $V = 1.9 \text{ m}^3$), αρχική συγκέντρωση Ραδονίου $Rn_o = 4 \text{ kBqm}^{-3}$, συγκέντρωση δηλαδή που είναι της τάξης

μεγέθους 10^0 kBq m^{-3} . Αυτό σύμφωνα με τη σχέση 4.2, απαιτεί την εισαγωγή στον θάλαμο ραδιενέργειας Ραδονίου ίσης με 7.6 kBq ($= 4 \times 1.9$). Αν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αυτής της ποσότητας η επονομαζόμενη πηγή "1", τότε σύμφωνα με τη σχέση 4.1 για την παραγωγή αυτή απαιτείται χρόνος περίπου ίσος με 210 min .

Η συνιστώσα χρόνου (iv), μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ίση με "0".

Για τη συνιστώσα χρόνου (v) μπορεί να σημειωθεί ότι, παρακολουθώντας την οργάνωση των πειραμάτων βαθμονόμησης του George (1984) αλλά και εκείνων του Gray (1987), η διάρκεια της έκθεσης των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα σε συγκεντρώσεις Ραδονίου διαρκεί από 24 έως και 72 h .

Για τη συνιστώσα χρόνου (vi), όλοι δέχονται, υπακούοντας στους νόμους που υπαγορεύουν τη ραδιενεργό ισορροπία Ραδονίου – θυγατρικών, ότι απαιτούνται ανελαστικά, τουλάχιστον 3 h .

Τέλος για τη συνιστώσα χρόνου (vii), μπορούν να σημειωθούν τα εξής, σύμφωνα με το εύλογο σενάριο ότι εκτίθενται και μετρώνται συνακολούθως πέντε (5) μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα. Αν για τη μέτρηση κάθε μεταλλικού δοχείου σε έναν από τους δύο φορητούς ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου απαιτούνται 1000 sec , τότε για τη μέτρηση όλων των δοχείων και από τους δύο αυτούς ανιχνευτές, εντός και εκτός λυόμενης θωράκισης απαιτούνται 20000 s ($= 1000 \times 5 \times 2 \times 2$) ή 5.5 h . Ο χρόνος αυτός μπορεί να μειωθεί αν μερικές από τις μετρήσεις των δοχείων γίνονται παράλληλα σε διαφορετικούς ανιχνευτές. Υπολογίζεται όμως ότι η μέγιστη μείωση δεν πρέπει να ξεπερνάει το $1/3$ ($\sim 7000 \text{ s}$), διότι εφόσον η διαδικασία δεν είναι αυτοματοποιημένη, απαιτούνται και διαλείμματα για τον χειριστή. Επομένως η μέτρηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα κατά αυτό το σενάριο απαιτεί επίσης μια μάλλον ανελαστική συνιστώσα χρόνου περίπου 4 h .

Από την ανάλυση των πιο πάνω χρονικών συνιστωσών προκύπτει, ότι απαιτείται γενικά καλή διαχείριση χρόνου για την πραγματοποίηση πειραμάτων βαθμονόμησης μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα. Η επιτυχημένη διαχείριση του χρόνου αυτού στα πλαίσια του περιορισμένου χρονικού διαστήματος που διατίθεται για μια Διπλωματικής Εργασία, επιτρέπει την πραγματοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων πειραμάτων βαθμονόμησης. Επειδή τώρα οι διαδικασίες που ακολουθούνται είναι

σειριακές η μόνη πραγματική οικονομία χρόνου που μπορεί να επιτευχθεί στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας προς όφελος της διαχείρισης του χρόνου, είναι:

η γρήγορη ανάπτυξη της επιθυμητής ραδιενέργειας Ραδονίου $A(T)$, σχέση 4.1, και η διάλυση της ραδιενέργειας A σε όσο το δυνατόν μικρότερο όγκο V , σχέση 4.2, προκειμένου για την δημιουργία επιθυμητών συγκεντρώσεων Ραδονίου, με όσο το δυνατόν μικρότερη ραδιενέργεια Ραδονίου.

Προφανώς ο συνδυασμός εξοπλισμού που εξασφαλίζει τις προηγούμενες δύο προϋποθέσεις, είναι ο:

πηγή "1" + θάλαμος "A"

και αυτός επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

4.2.9 Μεταλλικά δοχεία για βαθμονόμηση και μέτρηση υποστρώματος

Το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης έχει κατασκευασθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ ως εξής:

- μεταλλικό δοχείο σαν αυτό που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί, πληρώθηκε "μέχρι επάνω" με 286.5 g από το δείγμα ιπτάμενης τέφρας από τον Ατμοηλεκτρικό Σταθμό Μεγαλόπολεως με κωδικό αριθμό MS271. Σύμφωνα με αναλύσεις που έχουν γίνει στους ανιχνευτές Γερμανίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε δοχεία βαθμονομημένης "γεωμετρίας 2"¹, έχει διαπιστωθεί ότι η υπόψιν τέφρα περιέχει 988.5 Bqkg⁻¹ (βλ. και Πίνακα 4.1), με πιθανό σφάλμα 6%². Κατά συνέπεια το μεταλλικό δοχείο με αυτήν την τέφρα περιέχει 284.2 Bq.
- ακολούθως το μεταλλικό δοχείο στεγανοποιήθηκε με δύο τρόπους: (α) το κάλυμμα του δοχείου βιδώθηκε και κολλήθηκε με κόλλα PERMATEX τύπου 1B (βλ. και http://www.permatex.com/products/automotive/automotive_gasketing/gasket_sealant/auto_Permatex_Form-A-Gasket_No_1_Sealant.htm) και (β) ταινία βινυλίου τοποθετήθηκε περιφερειακά γύρω από τη διαχωριστική γραμμή του μεταλλικού δοχείου και του καλύμματος (βλ. και την φωτογραφία του Διαγράμματος 4.50)

¹ Αναφέρθηκαν πιο πάνω στην παράγραφο 4.2.3

² βλ. και Αναγνωστάκης (2007)

- μετά από αυτή τη διαδικασία το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης αφέθηκε σε ασφαλές μέρος επί 30 ημέρες, ώστε να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του περιεχόμενου Ραδίου, του Ραδονίου και των θυγατρικών του.
- τέλος το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης μετρήθηκε με τα διαθέσιμα δύο φορητά Ιωδιούχα Νάτρια εντός και εκτός λυόμενης θωράκισης. Η μέτρηση έγινε σε συγκεκριμένο σημείο του δωματίου, όπου υπάρχουν οι θάλαμοι Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Οι φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 4.51 και 4.52 παρουσιάζουν τους δύο αυτούς ανιχνευτές όπως μετρούν εκτός θωράκισης.

Σε ό,τι αφορά τα μεταλλικά δοχεία υποστρώματος, πρόκειται για μία σειρά από τέσσερα από τα επιλεχθέντα μεταλλικά δοχεία, τα οποία γέμισαν "μέχρι επάνω" με ενεργό άνθρακα, ο οποίος προηγουμένως είχε απαλλαγεί (αναγεννηθεί) από τυχόν προσροφηθείσα υγρασία ή τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο με κατάλληλη θέρμανση, σύμφωνα με τις οδηγίες του George (1984), στους 120° C για 10 – 12 h. Τα δοχεία κλείνουν με τα καλύμματά τους χωρίς να τοποθετηθεί ταινία βινυλίου. Τα δοχεία αυτά δεδομένου ότι δεν έχουν εκτεθεί σε Ραδόνιο, μπορούν να θεωρηθούν ότι αντιπροσωπεύουν δείγμα για τη μέτρηση του υποστρώματος. Κάθε ένα από τα δοχεία αυτά μετράται με τον ανιχνευτή VICTOREEN και με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS, όπως ακριβώς μετράται και το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης, εντός και εκτός λυόμενης θωράκισης με πρωτόκολλο που θα παρουσιασθεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο.

4.2.10 Αναγέννηση

Τα μεταλλικά δοχεία με τον ενεργό άνθρακα, πριν από κάθε έκθεση, τοποθετούνται ανοιχτά (δηλ. χωρίς το κάλυμμά τους) σε εργαστηριακό φούρνο του κατασκευαστή οίκου Hellenic LABWARE KA 120P, που διατίθεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπου και θερμαίνονται επί 10 –12 h, ώστε όπως έχει σημειωθεί, να απαλλαγούν από τυχόν προσροφηθείσα υγρασία, είτε από τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο, είτε αυτά προέρχονται από το περιβάλλον, είτε από προηγούμενη έκθεση σε θάλαμο Ραδονίου. Το Διάγραμμα 4.53 παρουσιάζει σχετική φωτογραφία.

4.2.11 Ζύγιση

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθεται αναλογικός ζυγός ακρίβειας 0.1 g του κατασκευαστή οίκου Mettler, τύπου P-1200, και χρησιμοποιείται για την ζύγιση κάθε μεταλλικού δοχείου με

ενεργό άνθρακα, μετά την αναγέννηση και πριν την έκθεση. Το Διάγραμμα 4.54 παρουσιάζει σχετική φωτογραφία.

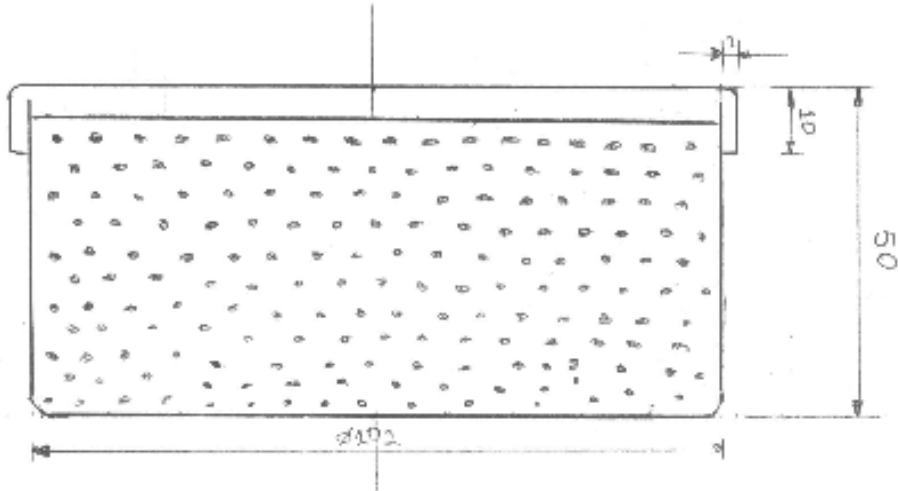
4.3 Συμπεράσματα

Ο εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, φαίνεται ότι επαρκεί με πληρότητα για την οργάνωση πειραμάτων βαθμονόμησης δοχείων με ενεργό άνθρακα. Από τη διαθέσιμη ποικιλία έγιναν οι κατάλληλες επιλογές εργαστηριακών συσκευών και υλικών, ώστε να γίνει δυνατό να πραγματοποιηθούν πειράματα βαθμονόμησης, τα οποία θα περιγραφούν με πληρότητα στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο. Συνάγεται, ότι τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τις επιλογές αυτές είναι:

- η χρησιμοποίηση συσκευών και διατάξεων όσο το δυνατόν μικρότερης αγοραίας αξίας, προκειμένου να βελτιστοποιείται ο λόγος απόδοση προς κόστος.
- η χρησιμοποίηση συσκευών και διατάξεων που δεν είναι δεσμευμένες με μόνιμο τρόπο σε άλλες μετρητικές διαδικασίες, ώστε να μην διαταράσσεται η καθημερινή "ρουτίνα" του Εργαστηρίου.
- η όσο το δυνατόν απλούστερη οργάνωση των πειραμάτων
- η οικονομία χρόνου, και τέλος, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό από όσο όλα τα προηγούμενα
- η ΦΟΡΗΤΟΤΗΤΑ της προκύπτουσας μετρητικής μεθόδου για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου με μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα.

Η φορητότητα της μεθόδου εξασφαλίζεται από δύο συνιστώσες της βαθμονόμησης: (α) τη φορητότητα των χρησιμοποιούμενων ανιχνευτών και (β) τη φορητότητα της λυόμενης θωράκισης. Έτσι σε αντίθεση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται από την υπηρεσία EPA-US, όπου όπως γίνεται κατανοητό (Gray, 1987), τα μεταλλικά δοχεία με τον ενεργό άνθρακα αποστέλλονται προς έκθεση σε κατοικίες και συλλέγονται προς μέτρηση στα Εργαστήρια της EPA-US, στην εδώ περίπτωση είναι δυνατόν, μικρή εργαστηριακή ομάδα αποτελούμενη από ένα – δύο άτομα να μεταβαίνει στην ομάδα κατοικιών προς μέτρηση συγκεντρώσεως Ραδονίου και επιτόπου μετά από μικρή παραμονή για την έκθεση των δοχείων (48 – 72 h) να προβαίνει στις σχετικές μετρήσεις χωρίς να εμπλέκονται εργαστηριακοί χώροι και σταθερές εγκαταστάσεις.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 4.1

Σκαρίφημα επιλεχθέντος μεταλλικού δοχείου πλήρες με ενεργό άνθρακα (κουκίδες)



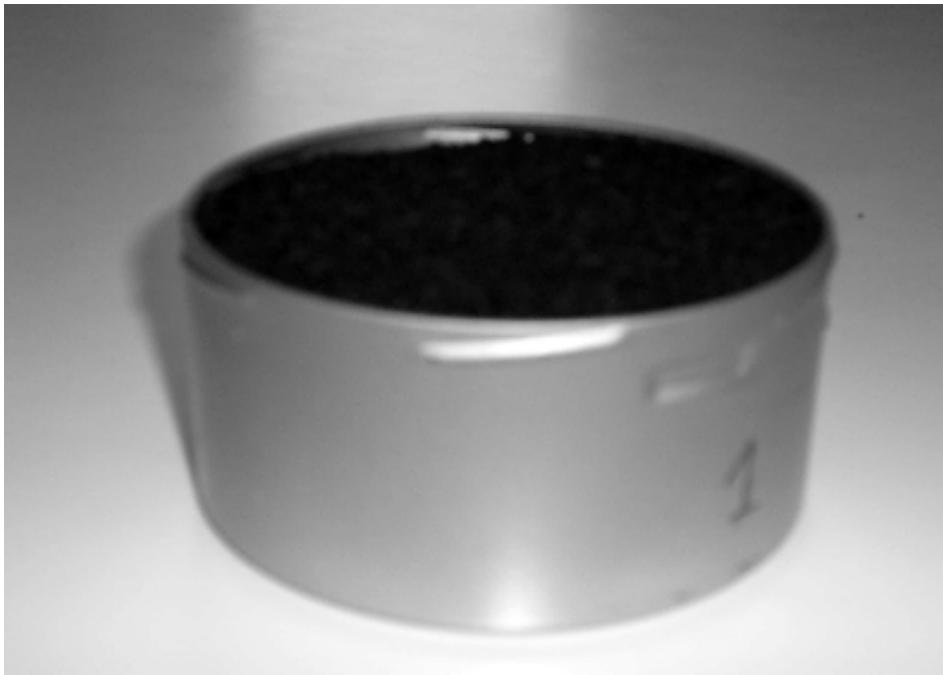
Διάγραμμα 4.2

Το μεταλλικό δοχείο με το κάλυμά του



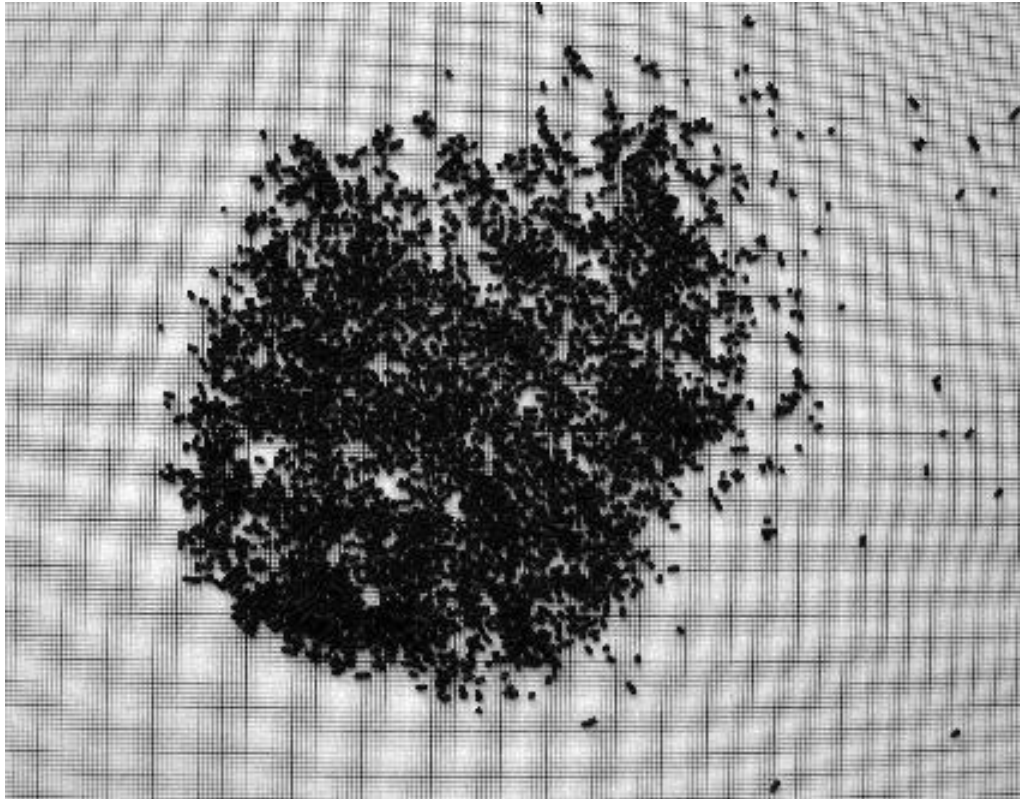
Διάγραμμα 4.3

Ανοιχτό κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο και μεταλλικό κάλυμμα



Διάγραμμα 4.4

Μεταλλικό δοχείο γεμάτο με ενεργό άνθρακα "μέχρι επάνω"



Διάγραμμα 4.6

"Χύμα" ενεργός άνθρακας πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί: εκτίμηση διαστάσεων και μορφής κόκκου.



Διάγραμμα 4.7

Συγκροτημένος ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου (β) –παράγραφος 3.2.2



Διάγραμμα 4.8

Ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου (β) και θωράκιση 2" –παράγραφος 3.2.2



Διάγραμμα 4.9

Φορητός ανιχνευτής Victoreen 489-120



Διάγραμμα 4.10
Καταγραφικό / καταμετρητής Victoreen 190-SI



Διάγραμμα 4.11
Φορητός ανιχνευτής Canberra – Eurisys SG-2R



Διάγραμμα 4.12
Καταγραφικό / καταμετρητής Canberra-Eurisys Radiagem 2000

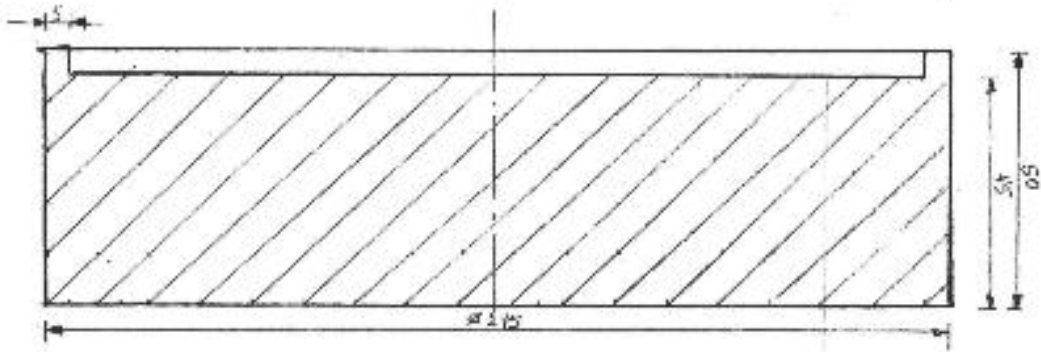


Διάγραμμα 4.13
Θωράκιση του ανιχνευτή Ιωδιούχου Νατρίου (β)



Διάγραμμα 4.14

Δύο ημι-σταθερές βαρείς μολύβδινες κυλινδρικές θωρακίσεις

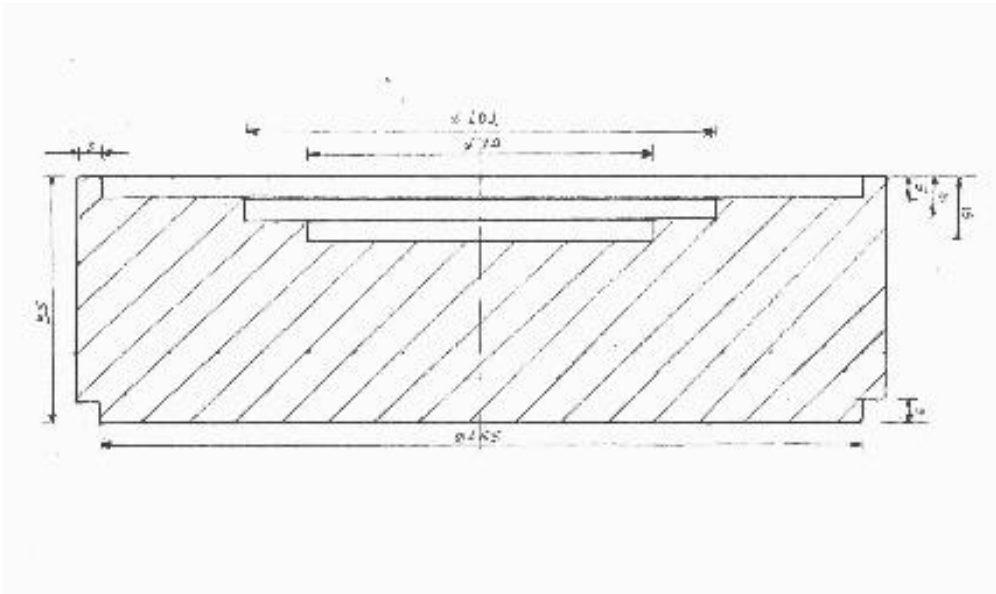


Διάγραμμα 4.15

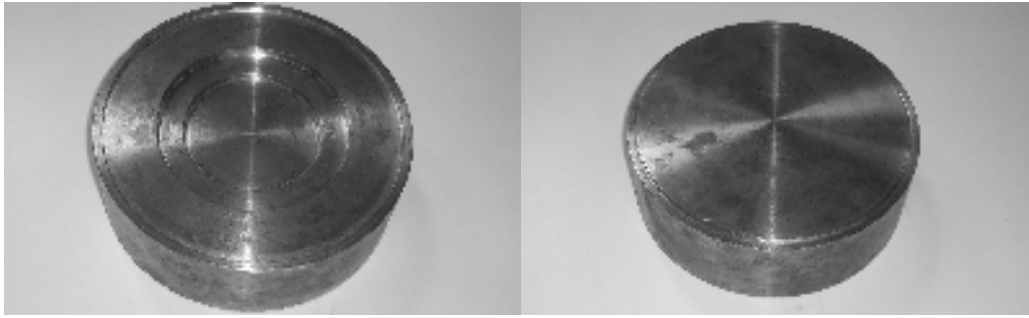
Το τεμάχιο "βάση πυθμένα": σκαρίφημα



Διάγραμμα 4.16
Το τεμάχιο θωράκισης "βάση πυθμένα": φωτογραφία



Διάγραμμα 4.17
Το τεμάχιο θωράκισης "άνω πυθμένας": σκαρίφημα



Διάγραμμα 4.18

Το τεμάχιο θωράκισης "άνω πυθμένας": φωτογραφία, αριστερά: κάτοψη, δεξιά: άνοψη



Διάγραμμα 4.19

Τοποθέτηση μεταλλικού δοχείου που έχει επιλεγεί στον "άνω πυθμένα"



Διάγραμμα 4.20

Τοποθέτηση άλλου μεταλλικού δοχείου ίδιας διαμέτρου μικρότερου ύψους στον "άνω πυθμένα"



Διάγραμμα 4.21

Τοποθέτηση πλαστικού δοχείου "γεωμετρίας 2" στον "άνω πυθμένα"



Διάγραμμα 4.22

**Τοποθέτηση μεταλλικού δοχείου που έχει επιλεγεί στον "άνω πυθμένα"
+ δακτύλιος "Α"**



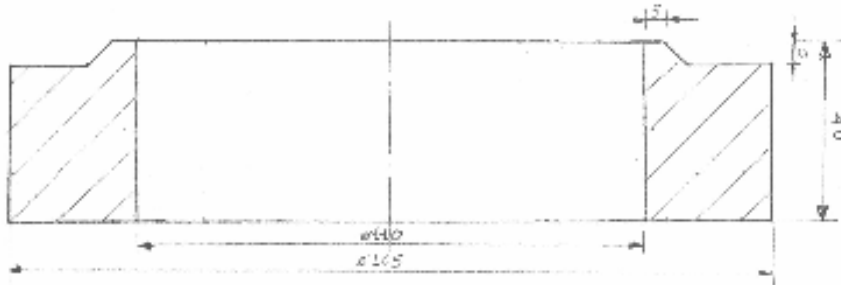
Διάγραμμα 4.23

**Τοποθέτηση άλλου μεταλλικού δοχείου ίδιας διαμέτρου μικρότερου ύψους στον
"άνω πυθμένα" + δακτύλιος "Α"**



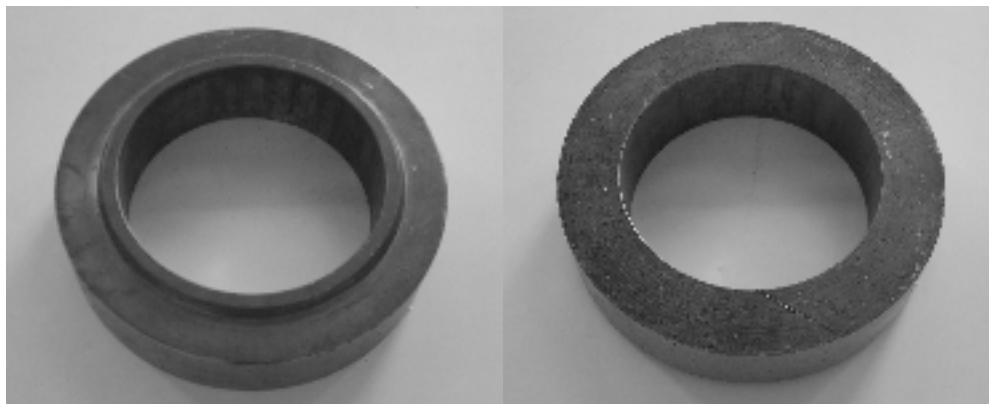
Διάγραμμα 4.24

**Τοποθέτηση πλαστικού δοχείου "γεωμετρίας 2" στον "άνω πυθμένα"
+ δακτύλιος "Α"**



Διάγραμμα 4.25

Το τεμάχιο θωράκισης δακτύλιος "Α": σκαρίφημα



Διάγραμμα 4.26

Το τεμάχιο θωράκισης "δακτύλιος Α": φωτογραφία, αριστερά: κάτοψη, δεξιά: άνοψη



Διάγραμμα 4.27

Τοποθέτηση μεταλλικού δοχείου που έχει επιλεγεί στον "άνω πυθμένα" + δακτύλιος "Α" + δακτύλιος "Β"



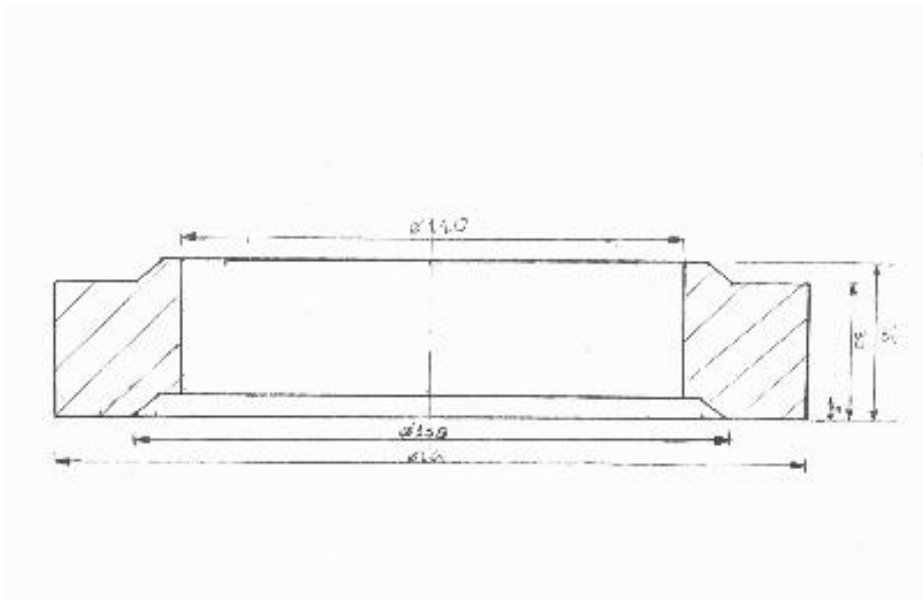
Διάγραμμα 4.28

Τοποθέτηση άλλου μεταλλικού δοχείου ίδιας διαμέτρου μικρότερου ύψους στον "άνω πυθμένα" + δακτύλιος "Α" + δακτύλιος "Β"



Διάγραμμα 4.29

Τοποθέτηση πλαστικού δοχείου "γεωμετρίας 2" στον "άνω πυθμένα" + δακτύλιος "Α" + δακτύλιος "Β"



Διάγραμμα 4.30
Το τεμάχιο θωράκισης δακτύλιος "B": σκαρίφημα



Διάγραμμα 4.31
Το τεμάχιο θωράκισης "δακτύλιος B": φωτογραφία, αριστερά: κάτοψη, δεξιά: άνοψη



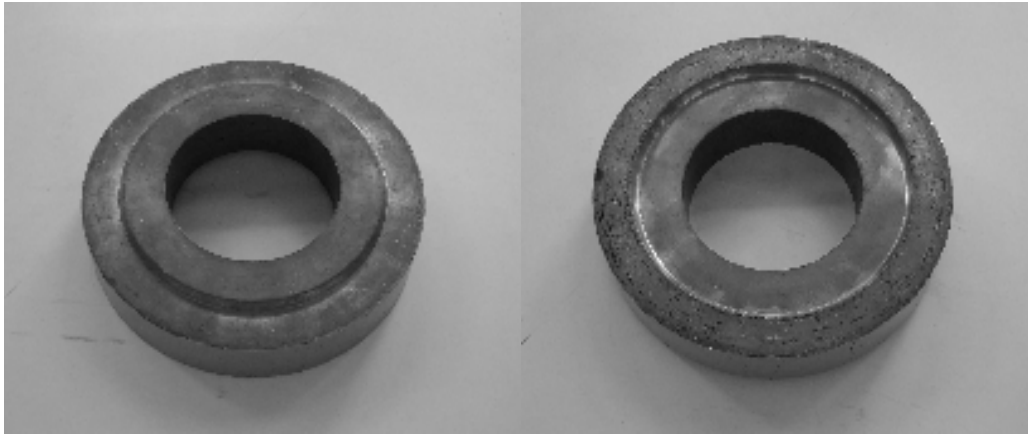
Διάγραμμα 4.32

Σχεδόν πλήρως συγκροτημένη θωράκιση: "πυθμένας" + "άνω πυθμένας" + "δακτύλιος Α" + "δακτύλιος Β" + 4 x "δακτύλιος C"



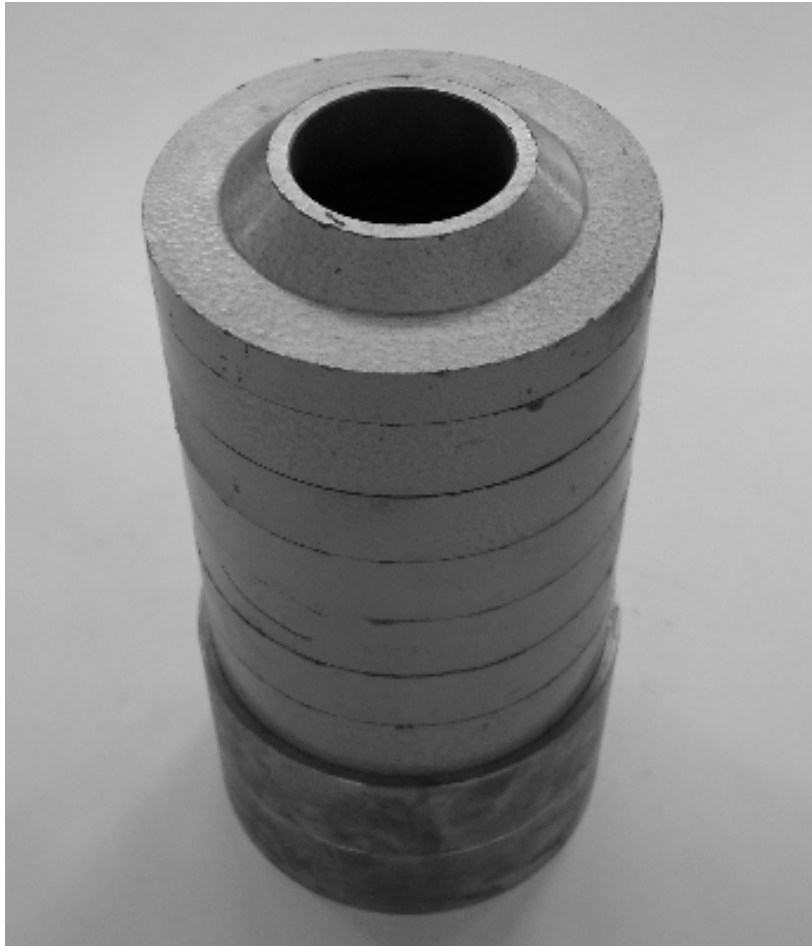
Διάγραμμα 4.33

Το τεμάχιο θωράκισης δακτύλιος "C": σκαρίφημα



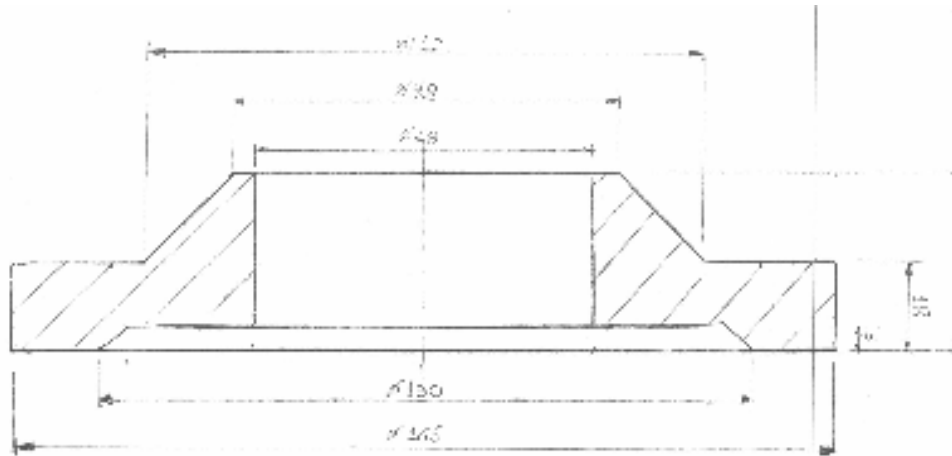
Διάγραμμα 4.34

Το τεμάχιο θωράκισης "δακτύλιος C": φωτογραφία, αριστερά: κάτωψη, δεξιά: άνοψη



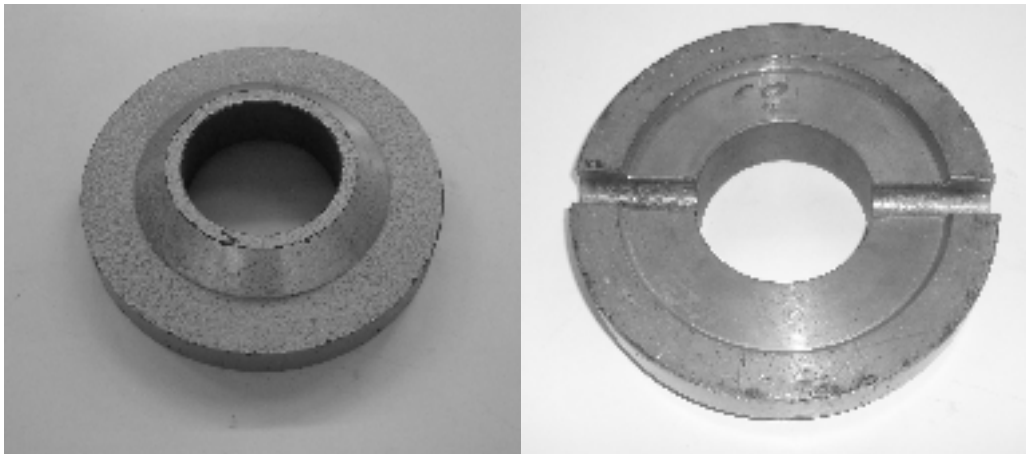
Διάγραμμα 4.35

Πλήρως συγκροτημένη θωράκιση: "πυθμένας" + "άνω πυθμένας" + "δακτύλιος A" + "δακτύλιος B" + 4 x "δακτύλιος C" + μολύβδινο κάλυμμα



Διάγραμμα 4.36

Το μολύβδινο κάλυμμα της θωράκισης: σκαρίφημα



Διάγραμμα 4.37

Το μολύβδινο κάλυμμα της θωράκισης: φωτογραφία, αριστερά: κάτοψη, δεξιά: άνοψη



Διάγραμμα 4.38

Φορητός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου VICTOREEN



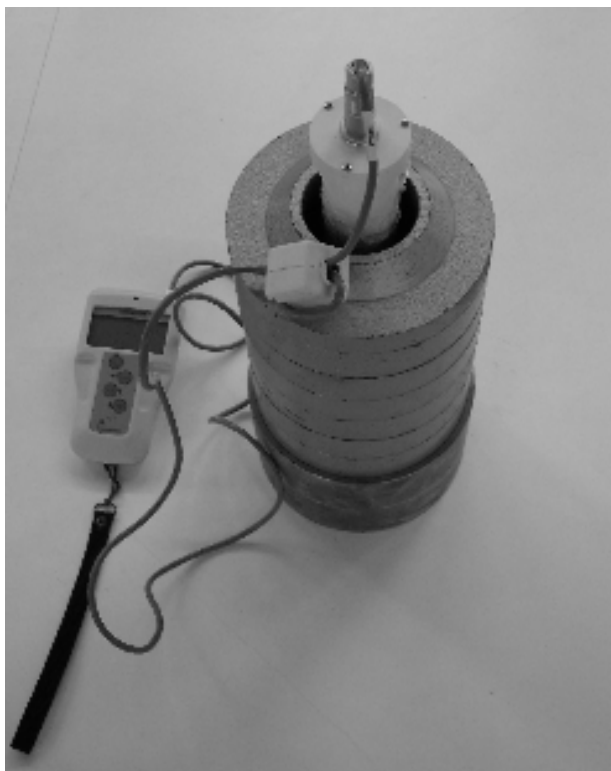
Διάγραμμα 4.39

Φορητός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου VICTOREEN, μέσα στη θωράκιση



Διάγραμμα 4.40

Φορητός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου CANBERRA – EURISYS



Διάγραμμα 4.41

**Φορητός ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου CANBERRA - EURISYS, μέσα στη
θωράκιση**



Διάγραμμα 4.42
Θάλαμος Ραδονίου "Α"



Διάγραμμα 4.43
Θάλαμος Ραδονίου "B"



CERTIFICATE

Certificate No.: 931 - OT - 1049/98 Type: RF 200 Prod. No.: 521-01
Radionuclide: ^{226}Ra Half life: 584300 days
Activity: 274,3 kBq Mass of ^{226}Ra : 7,499 μg Emanating power: $0,997 \pm 0,001$
Radon output: 0,5737 Bq/s Half life of ^{222}Rn : 3,824 days
Radioactive impurities: -
Inner volume between valves: 272 ml Inner volume of the filter head: 20 ml
Reference date: 1.3.1998
Combined standard uncertainty of the activity: 1,5 %

Description:

Solid phase flow through source of ^{226}Ra with emanating power $\geq 0,995$ % closed in the stainless steel cylindrical case provided with two ball valves and two aerosol filters connected to output aperture of the valves. Radon source as polymer foil is placed in the centre of the tube.

Measuring method:

Comparison with IIR standards.

Note:

The source works reliably in temperature range 0 - 40 centigrades and relative humidity 0 - 100 % (non condensing)

Date of the certificate issue: 5.3.1998

Certificate validity: 3 years

Customer: National Technical University of Athens
Mech. Eng. Dep., - Nuclear Eng. Section
Athens
GRIKCB



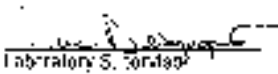
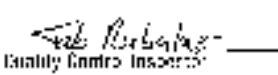
Pavel Dryak
RNDr. Pavel Dryak, QSc.
director

Phone: 4202-67008497 Fax: 4202-67008456

Διάγραμμα 4.44 Πιστοποιητικό πηγής Ραδονίου "1"

CERTIFICATE OF CALIBRATION
RADIUM-226

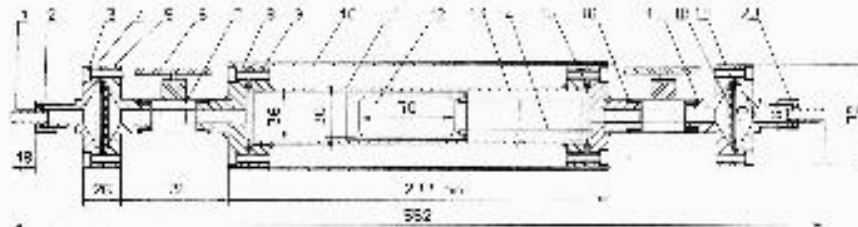
ΑΝΤΙ - ΣΕΛ Ο.Ε.
ΑΝΩΤΑΤΟ ΣΕΛΙΔΙΟ
ΕΚΔΙΔΑΚΤΕΥ - ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΚΥΠΤΩΝ
ΜΑΝΑΓΕΡΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ
ΤΕΛΕΦΩΝΟ 2767282

MODEL NO.:	RH-2000A	SERIAL NO.	159
ACTIVE MATERIAL	Radium-226	FORM	disc source
HALF-LIFE	1600 yr	HOUSING	aluminum
DATE OF CALIBRATION	February 3, 1993		
<input type="checkbox"/> SOURCE ACTIVITY	_____ Bq ± 1%		
<input checked="" type="checkbox"/> SOURCE ACTIVITY	102.0	Bq ± 1%	
<input type="checkbox"/> ACTIVITY DIFFUSION	_____ Bq/cm ² ± 1%		
<input type="checkbox"/> DISPENSED ACTIVITY	_____ Bq ± 1%		
METRIC OF CALIBRATION			
<input checked="" type="checkbox"/> Source calibrated by Alpha Spectation methods on a Model FM 103A Hazen Bus Monitor against NIST Standards. FM 103A SN 118-012			
<input checked="" type="checkbox"/> Source calibrated by Alpha Spectation methods on a Model AD 5 Radon Gas Monitor against NIST Standards. AD 5 SN 235			
<input type="checkbox"/> Source assayed by Gamma Spectrometry on a NaI(Tl) detector in conjunction with a Multi Channel Analyzer against NIST Standards. MCA SN			
ESTIMATED ERROR			
Error = $\sqrt{e_1^2 + e_2^2}$, Error of Reference Standard			
Where e_1 = Precision of Source Count			
e_2 = Precision of Standard Count			
 Laboratory S. Sorlat		Date: September 15, 1993	
 Quality Control Inspector		Date: September 15, 1993	

PILOX ELECTRONIC DEVELOPMENT company, Ltd.
1470 Kennedy Rd. Willowdale, Ontario Canada M2E 7L3

Διάγραμμα 4.45
Πιστοποιητικό πηγής Ραδονίου "2"

2722a Flow Through Source Model 10

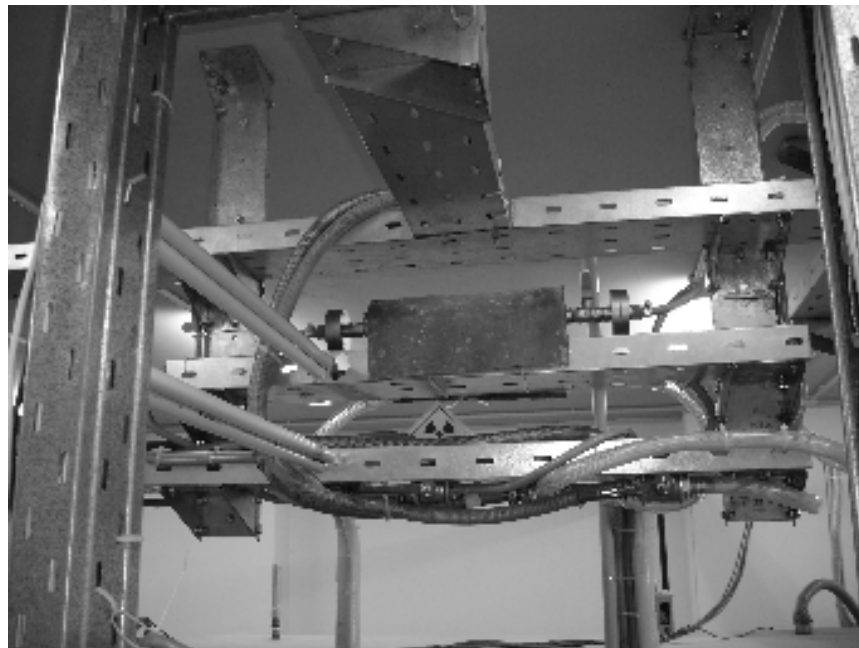


Αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή	
1	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
2	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
3	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
4	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
5	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
6	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
7	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
8	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
9	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
10	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
11	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
12	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
13	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
14	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
15	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
16	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
17	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
18	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
19	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
20	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή
21	αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή

Αριθμ. / Αριθμ. / Ονομα / Περιγραφή

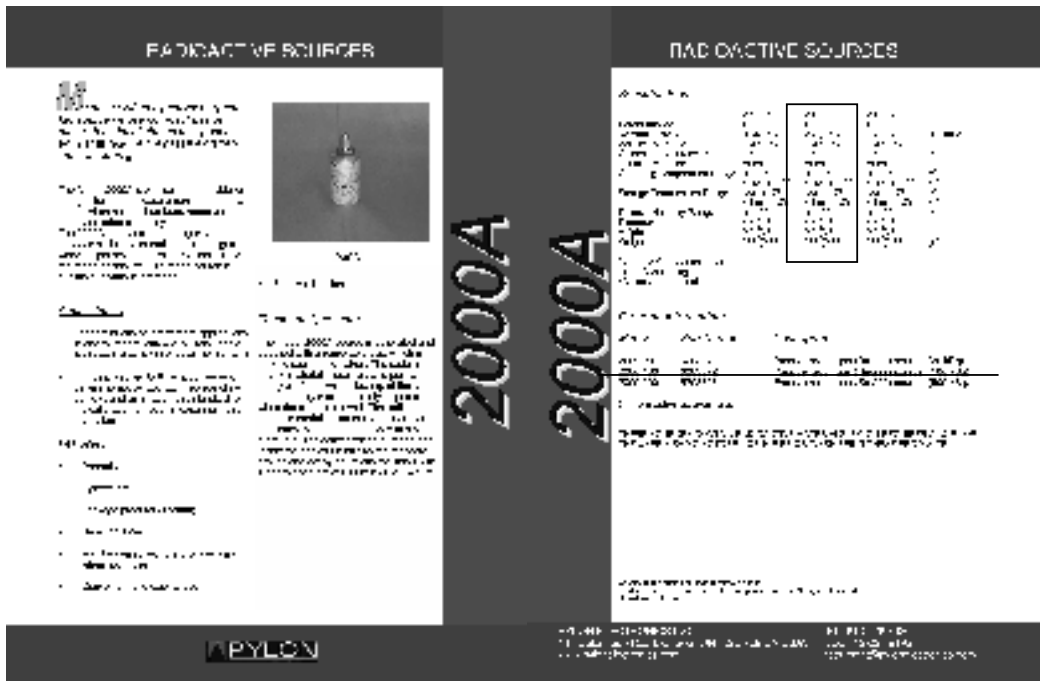
Διάγραμμα 4.46

Πηγή "1" – Δοχείο "1": Μηχανολογικό σχέδιο



Διάγραμμα 4.47

Πηγή "1" – Δοχείο "1": Φωτογραφία



Διάγραμμα 4.48

Πηγή "2": Φυλλάδιο προδιαγραφών
<http://www.pyloelectronics.com/pylonpdfs/DS122R1.pdf>

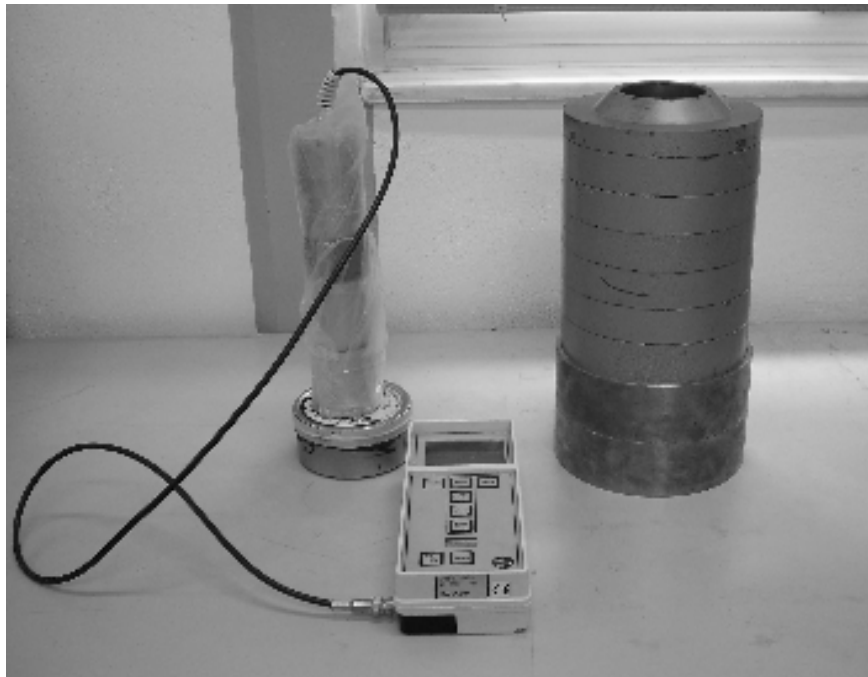


Διάγραμμα 4.49

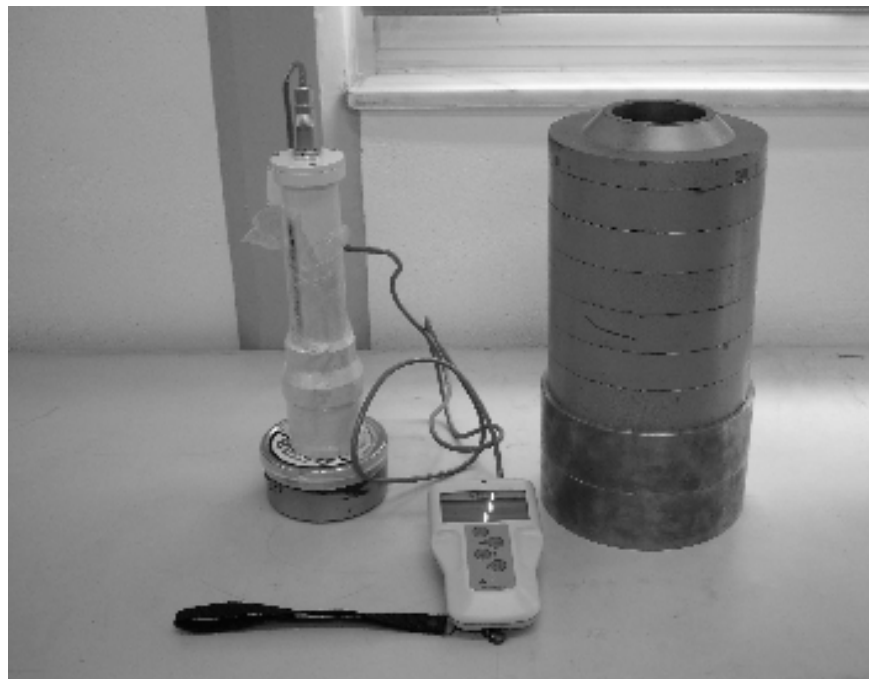
Πηγή "2" – Δοχείο "2": Φωτογραφία



Διάγραμμα 4.50
Μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης



Διάγραμμα 4.51
Μέτρηση εκτός θωράκισης με τον ανιχνευτή VICTOREEN



Διάγραμμα 4.52

Μέτρηση εκτός θωράκισης με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS



Διάγραμμα 4.54

Εργαστηριακός φούρνος Hellenic LABWARE KA 120P



Διάγραμμα 4.54
Ζυγός ακριβείας Mettler P-1200

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

NATURAL RADIONUCLIDES ANALYSIS REPORT						
of sample MS271B						
Remarks :						
Isotope	Energy (keV)	Activity	Bq/kg	pCi/gr		
Pb-210	46.52					
Pb-214A	295.22	966.13	+- .46 %	26.112		
Pb-214B	351.99	987.77	+- .14 %	26.696		
Pb-214	(W.Mean) :	985.79	+- .14 %	26.643		
Bi-214A	609.32	881.12	+- .51 %	23.814		
Bi-214B	1120.28	947.95	+- .83 %	25.620		
Bi-214C	1764.51	1102.81	+- .35 %	29.806		
Bi-214	(W.Mean) :	1000.43	+- .28 %	27.039		
Ra-226	(W.Mean) :	988.5	+- .12 %	26.717		
Ra-226	186.25					
Th-234	63.29					
U-238 E	185.99	1215.39	+- .85 %	32.848		
U-238 C	185.99	992.75	+- .85 %	26.831		
U-235	185.72					
U-238 L						
Ac-228A	338.40	58.17	+- 7.77 %	1.572		
Ac-228B	911.07	53.19	+- 5.74 %	1.438		
Ra-228	(W.Mean) :	54.75	+- 4.62 %	1.480		
Pb-212B	238.63	57.99	+- 3.13 %	1.567		
Tl-208A	583.14	47.96	+- 2.40 %	1.296		
Th-228	(W.Mean) :	50.84	+- 1.91 %	1.374		
Th-232	(W.Mean) :	51.3	+- 1.77 %	1.388		
K-40	1460.75	485.53	+- .95 %	13.122		

Πίνακας 4.1

Ανάλυση συγκέντρωσης Ραδίου-226 και άλλων φυσικώς ραδιενεργών ισοτόπων στην ιπτάμενη τέφρα MS271.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΧΕΙΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Το πρωτόκολλο των πειραμάτων βαθμονόμησης (οι κανόνες δηλαδή της πειραματικής διαδικασίας) θα παρουσιασθεί κατά τη σειρά των απαιτούμενων βημάτων. Παρεκβάσεις, θα γίνουν στη ροή του κειμένου ώστε να παρουσιασθούν αναγκαίες και σημαντικές λεπτομέρειες. Κάποιες από αυτές τις λεπτομέρειες έχουν παρουσιασθεί με μη συστηματικό όμως τρόπο στο προηγούμενο 4^ο Κεφάλαιο.

5.2 Διαδικασία πειράματος βαθμονόμησης

5.2.1 Ποιοτικός έλεγχος ενεργού άνθρακα

Ο χρησιμοποιούμενος ενεργός άνθρακας πρέπει να προέρχεται από τον ίδιο προμηθευτή και να έχει αγορασθεί την ίδια ημέρα, ώστε να εξασφαλίζεται ότι γενικά προέρχεται από την ίδια παραγωγική διαδικασία. Ο ενεργός άνθρακας δεν πρέπει να έχει εκτεθεί σε Ραδόνιο, ή υγρασία ή αν ακόμα έχει εκτεθεί, να τα έχει πλήρως αποβάλλει μέσα από διαδικασίες αναγέννησης με θέρμανση. Δείγμα από τον χρησιμοποιούμενο ενεργό άνθρακα έχει αναλυθεί στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, προκειμένου να διαπιστωθούν οι συγκεντρώσεις φυσικώς ραδιενεργών ισοτόπων που υπάρχουν σε αυτόν. Έτσι διασφαλίζεται ότι το υλικό αυτό δεν είναι επιμολυσμένο με ραδιενεργά ισότοπα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 προκύπτει ότι ο χρησιμοποιούμενος ενεργός άνθρακας στα εξετασθέντα ισότοπα (στα οποία συμπεριλαμβάνεται το ⁴⁰K), παρουσιάζει συγκεντρώσεις σαφώς χαμηλότερες από το όριο των 37 Bqkg⁻¹, που ορίζεται στην τυποποίηση της EPA-US, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2.1.

5.2.2 Μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα – αναγέννηση – ζύγιση

Πληρώνεται με ενεργό άνθρακα και γενικά συγκροτείται ικανός αριθμός αριθμημένων μεταλλικών δοχείων (~10) με τον τρόπο που έχει παρουσιασθεί ήδη στο 4^ο Κεφάλαιο. Τα δοχεία αυτά, πριν από οτιδήποτε άλλο τοποθετούνται ανοιχτά στον κατάλληλο εργαστηριακό φούρνο που παρουσιάστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο (βλ. και φωτογραφία Διαγράμματος 4.53) και θερμαίνονται στους 120^ο C για 10 – 12 h, προκειμένου να "αναγεννηθούν", να αποβάλλουν δηλαδή τυχόν προσροφηθείσα

υγρασία ή τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο. Η θέρμανση γίνεται σε ουσιαστικά "νεκρό" εργαστηριακά χρόνο, διότι ξεκινάει βραδινές ώρες με το κλείσιμο του κτιρίου και ολοκληρώνεται το πρωί με το άνοιγμα (είναι μία διαδικασία που όπως λέγεται διαρκεί "overnight"). Προσοχή χρειάζεται ώστε να μην εγκλεισθούν στο φούρνο τα καλύμματα των δοχείων διότι η θέρμανση καταστρέφει τα ελαστικά παρεμβύσματα που διαθέτουν τα καλύμματα με αποτέλεσμα η στοιχειώδης στεγανότητα των δοχείων να αλλοιώνεται. Μετά τη λήξη της θέρμανσης τα δοχεία σκεπάζονται με τα καλύμματά τους. Επιπλέον προσοχή χρειάζεται ώστε το κάθε ένα από τα δοχεία να καλυφθεί με το δικό του κάλυμμα. Τα καλυμμένα δοχεία ζυγίζονται στον αναλογικό ζυγό ακριβείας (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.54). Το καθαρό βάρος του περιεχομένου ενεργού άνθρακα των δοχείων μπορεί να υπολογίζεται αν αφαιρεθεί το απόβαρο. Κατά σύμβαση ως απόβαρο λαμβάνεται η τιμή 79.2 g, η οποία έχει προκύψει από τη ζύγιση ενός από τα κενά δοχεία (αυτού με τον αριθμό "1").

5.2.3 Μηδενισμός πηγής "1"

Προκειμένου, να αφαιρεθεί από το δοχείο της πηγής "1" όσο Ραδόνιο τυχόν υπάρχει, ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία εξαερισμού, με τη βοήθεια του θαλάμου "B":

1. κλείνουν όλοι οι διακόπτες του ηλεκτρικού – ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.1)
2. κλείνουν ΟΛΕΣ οι βαλβίδες που βρίσκονται τοποθετημένες στο σώμα του θαλάμου
3. κλείνει η αεροστεγής θύρα του θαλάμου. Το ελαστικό παρέμβυσμα στεγάνωσης της θύρας διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 5.2.
4. στρέφονται ΟΛΕΣ οι λαβές των σφαιρικών βαλβίδων που ανήκουν στον λεγόμενο "κοινό κλάδο" του κυκλώματος αερίων των θαλάμων "Α" και "Β" (Παπαδάκος, 2001) "προς το παράθυρο" (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.3)
5. ανοίγουν πλήρως η σφαιρική βαλβίδα ΣΒ21 και η ρυθμιστική βαλβίδα ΡΒ1 (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.4)
6. ανοίγει πλήρως η σφαιρική βαλβίδα ΣΒ17 ώστε ο θάλαμος να επικοινωνήσει με το μανόμετρο Μ7, το οποίο παρέχει ένδειξη τυχόν υπερπίεσης (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.5)

7. ανοίγουν πλήρως οι σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ29 και ΣΒ31 (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.6)
8. εκκινεί η ακτινική αεραντλία μεγάλης παροχής μέσω διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ηλεκτρικού – ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.7). Ο παρεχόμενος αέρας ακολουθεί τη διαδρομή ΣΒ21 > είσοδος στον θάλαμο "B" > έξοδος από τον θάλαμο "B" > ΣΒ29 > ΣΒ31 > σωλήνωση προς το εξωτερικό περιβάλλον του Εργαστηρίου. Δεδομένου ότι η αεραντλία που χρησιμοποιείται είναι μεγάλης παροχής, τυχόν περιττός αέρας, που δεν μπορεί να διέλθει από το θάλαμο "B"¹, απελευθερώνεται στο περιβάλλον του Εργαστηρίου μέσω της ρυθμιστικής βαλβίδας ΡΒ1. Η ρύθμιση που γίνεται στην ΡΒ1 είναι τέτοια ώστε η υπερπίεση που επικρατεί στο θάλαμο κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αεραντλίας να μην υπερβαίνει το 1 mbar. Η υπερπίεση αυτή παρακολουθείται, όπως ήδη σημειώθηκε, από το μανόμετρο Μ7.
9. ανοίγει ο γενικός διακόπτης Η53 του ηλεκτρικού – ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου (βλ. και Διάγραμμα 5.1)
10. ανοίγουν οι διακόπτες Η47, Η48, Η49, Η50 και Η51 που τροφοδοτούν με ηλεκτρισμό 4 ανεμιστήρες πλευράς 12 cm στο εσωτερικό του θαλάμου "B". Οι διακόπτες διακρίνονται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 5.1 και οι ανεμιστήρες διακρίνονται στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 5.8. Η ταχύτητα των ανεμιστήρων ρυθμίζεται στη θέση "150" (δηλ."μέτρια") στο ποτενσιόμετρο Π5 στον ηλεκτρικό – ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου (Διάγραμμα 5.1). Με τη χρήση των ανεμιστήρων εξασφαλίζεται ότι ο αέρας που εισέρχεται στον θάλαμο "B" από την αεραντλία αναμιγνύεται πολύ καλά με τον υπόλοιπο αέρα του θαλάμου, με αποτέλεσμα τυχόν υπάρχοντες αέριοι ρύποι να οδηγούνται στην έξοδο.
11. ανοίγουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου "B" ΣΒ28 και ΣΒ34 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 5.9)
12. ανοίγουν οι σφαιρικές βαλβίδες του δοχείου της πηγής "1" CRS1 και CRS2 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 5.10)
13. ανοίγει ο διακόπτης Η38 που τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό μικρή παλινδρομική αεραντλία μέσα στο θάλαμο "B". Η αεραντλία αυτή που διακρίνεται στη

φωτογραφία του Διαγράμματος 5.11, αντλεί αέρα μέσα από τον θάλαμο και μέσω της σφαιρικής βαλβίδας ΣΒ28 και της σφαιρικής βαλβίδας CRS1, τον οδηγεί μέσα από το δοχείο της πηγής "1" και στη συνέχεια διά των σφαιρικών βαλβίδων CRS2 και ΣΒ34, τον επιστρέφει στον θάλαμο. Με τη διαδικασία αυτή το Ραδόνιο που υπάρχει εγκλωβισμένο στο δοχείο της πηγής "1" παρασύρεται στο θάλαμο.

14. η λειτουργία του κυκλώματος των βημάτων 11 - 13 συνεχίζεται επί περίπου 50 min. Ο χρόνος έναρξης του βήματος 13 σημειώνεται σε ημερολόγιο του θαλάμου "B" και της πηγής "1".
15. μετά τη συμπλήρωση 50 min, κλείνει ο διακόπτης H38, κλείνουν κατά το δυνατόν σύντομα αλλά με αυτή την σειρά οι σφαιρικές βαλβίδες του δοχείου της πηγής "1" CRS1 και CRS2 και τέλος κλείνουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου "B" ΣΒ28 και ΣΒ34. Ο χρόνος λήξης του βήματος 15 σημειώνεται σε ημερολόγιο του θαλάμου "B" και της πηγής "1". Ο χρόνος λήξης του βήματος 15 είναι η χρονική στιγμή "0", όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.2.6.

Η τεχνική αρχή της λειτουργίας των κυκλωμάτων που περιγράφηκε στα προηγούμενα διακρίνεται στο μονογραμμικό σκαρίφημα του Διαγράμματος 5.12.

5.2.4 Εξαερισμός θαλάμου "B"

Με τη χρήση των βημάτων 1 – 15 της προηγούμενης παραγράφου εξασφαλίζεται ο πλήρης εξαερισμός της πηγής "1", ώστε η παραγωγή Ραδονίου σε αυτήν να ξεκινήσει από το 0. Η πιο πάνω όμως διαδικασία μηδενισμού, οδηγεί, όπως γίνεται κατανοητό σε ένα θάλαμο "B", ο οποίος γενικά περιέχει τουλάχιστον ένα μέρος από το Ραδόνιο που υπήρχε στο εσωτερικό της πηγής "1", ενώ το υπόλοιπο έχει ωθηθεί με βίαιο τρόπο στην εκτός εργαστηρίου ατμόσφαιρα. Χρειάζεται επομένως να εξακολουθήσει η λειτουργία του συστήματος της αεραντλίας όπως γενικά έχει διαμορφωθεί μέχρι το βήμα 11 της προηγούμενης παραγράφου, ώστε και αυτή η συγκέντρωση Ραδονίου που έχει απομείνει να οδηγηθεί εκτός του θαλάμου. Για το σκοπό αυτό η λειτουργία του συστήματος της αεραντλίας συνεχίζεται επί 60 min επιπλέον. Μετά τα 60 min ο θάλαμος "B" μπορεί να επανέλθει στην προ του βήματος 1 κατάσταση, όποια και αν ήταν αυτή. Ο χρόνος λήξης του εξαερισμού σημειώνεται σε ημερολόγιο του θαλάμου "B".

¹ αν διέλθει θα δημιουργήσει υπερπίεση στο εσωτερικό, με αποτέλεσμα τη μηχανική καταπόνηση του θαλάμου.

5.2.5 Παραγωγή Ραδονίου από την πηγή "1"

Η πηγή "1" αμέσως μετά τον μηδενισμό βρίσκεται στην χρονική στιγμή "0". Από το χρονικό σημείο αυτό και μετά, αρχίζει στο δοχείο της πηγής να παράγεται Ραδόνιο, η ραδιενέργεια του οποίου είναι συνάρτηση του χρόνου T (min), σύμφωνα και με τα όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 4.2.6 (βλ. και τη σχέση 4.1):

$$A(t) = 274300(1 - e^{-\lambda T}) \quad (5.1)$$

όπου:

A είναι η ραδιενέργεια του παραγόμενου Ραδονίου σε Bq

λ είναι η σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου σε min^{-1} ($\lambda = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)

5.2.6 Μετάγχιση Ραδονίου από την πηγή "1" στον θάλαμο "Α"

Όπως σημειώθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, παρακολουθώντας τον χρόνο T , είναι δυνατόν να μεταγγίσουμε από το δοχείο της πηγής "1" στον –κατά τα άλλα αεροστεγή και απομονωμένο από το λοιπό περιβάλλον- θάλαμο Ραδονίου "Α" όγκου $V = 1.9 \text{ m}^3$, όσο Ραδόνιο έχει σχηματισθεί στο δοχείο της πηγής "1" στο διάστημα από τη χρονική στιγμή "0" έως τη χρονική στιγμή "T". Η μετάγχιση αυτή γίνεται με τη βοήθεια σωληνώσεων και αντλιών αερίου ως εξής:

1. τοποθετούνται στον θάλαμο "Α", οι συσκευές που έχει προγραμματισθεί να εκτεθούν σε συγκέντρωση Ραδονίου, η οποία θα δημιουργηθεί από την μετάγχιση στο θάλαμο του ήδη παραχθέντος Ραδονίου στο δοχείο της πηγής "1". Στην εδώ περίπτωση τοποθετούνται στο θάλαμο ανοιχτά μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.13)
2. κλείνουν όλοι οι διακόπτες του ηλεκτρικού – ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.14)
3. κλείνουν ΟΛΕΣ οι βαλβίδες που βρίσκονται τοποθετημένες στο σώμα του θαλάμου
4. κλείνει η αεροστεγής θύρα του θαλάμου
5. στρέφονται ΟΛΕΣ οι λαβές των σφαιρικών βαλβίδων που ανήκουν στον λεγόμενο "κοινό κλάδο" του κυκλώματος αερίων των θαλάμων "Α" και "Β" (Παπαδάκος, 2001) "προς την πόρτα" (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.15)

6. ανοίγει ο γενικός διακόπτης H4 του ηλεκτρικού – ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου (βλ. και Διάγραμμα 5.14)
7. ανοίγει ο διακόπτης H20 που τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό 1 ανεμιστήρα πλευράς 12 cm στο εσωτερικό του θαλάμου "Α". Ο διακόπτης διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 5.14 και ο ανεμιστήρας διακρίνεται στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 5.16. Η ταχύτητα των ανεμιστήρων ρυθμίζεται στη θέση "150" (δηλ."μέτρια") στο ποτενσιόμετρο Π2 στον ηλεκτρικό – ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου (Διάγραμμα 5.14). Με τη χρήση του ανεμιστήρα εξασφαλίζεται ότι ο αέρας που υπάρχει στο θάλαμο "Α" αναδεύεται με επάρκεια, με αποτέλεσμα να είναι καλώς αναμεμιγμένος και τυχόν υπάρχον Ραδόνιο και σωματίδια να έχουν παντού την ίδια συγκέντρωση.
8. ανοίγουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου "Α" ΣΒ3 και ΣΒ4 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 5.17)
9. ανοίγουν οι σφαιρικές βαλβίδες του δοχείου της πηγής "1" CRS1 και CRS2 (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 5.10)
10. ανοίγει ο διακόπτης H18 που τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό μικρή παλινδρομική αεραντλία μέσα στο θάλαμο "Α". Η αεραντλία αυτή που διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 5.18, αντλεί αέρα μέσα από τον θάλαμο και μέσω της σφαιρικής βαλβίδας ΣΒ3 και της σφαιρικής βαλβίδας CRS1, τον οδηγεί μέσα από το δοχείο της πηγής "1" και στη συνέχεια διά των σφαιρικών βαλβίδων CRS2 και ΣΒ4, τον επιστρέφει στον θάλαμο. Με τη διαδικασία αυτή το Ραδόνιο που υπάρχει εγκλωβισμένο στο δοχείο της πηγής "1" μεταγγίζεται στο θάλαμο.
11. η λειτουργία του κυκλώματος των βημάτων 8 - 10 συνεχίζεται επί 10 min. Ο χρόνος έναρξης του βήματος 10 σημειώνεται σε ημερολόγιο του θαλάμου "Α" και της πηγής "1".
12. μετά τη συμπλήρωση 10 min, κλείνει ο διακόπτης H18, κλείνουν κατά το δυνατόν σύντομα αλλά με αυτή την σειρά οι σφαιρικές βαλβίδες του δοχείου της πηγής "1" CRS1 και CRS2 και τέλος κλείνουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου "Β" ΣΒ3 και ΣΒ4. Ο χρόνος λήξης του βήματος 12 σημειώνεται σε ημερολόγιο του θαλάμου "Α" και της πηγής "1". Ο χρόνος λήξης του βήματος 12 είναι η χρονική στιγμή *T*, όπως ορίσθηκε στην παράγραφο 4.2.7.

Αν θεωρηθεί ότι με τη μέθοδο που ακολουθείται η μετάγγιση είναι πλήρης, τότε μέσα στο θάλαμο Ραδονίου "Α" θα δημιουργηθεί συγκέντρωση Ραδονίου Rn_o ($Bq\ m^{-3}$) ίση με (βλ. και σχέση 4.2):

$$Rn_o = A(T)/1.9 \quad (5.2)$$

Η συγκέντρωση Ραδονίου που δημιουργείται θεωρείται βαθμονομημένη καθώς προέρχεται από την πρότυπη και πιστοποιημένη πηγή Ραδονίου "1". Η τεχνική αρχή της λειτουργίας των κυκλωμάτων που περιγράφηκε στα προηγούμενα διακρίνεται στο μονογραμμικό σκαρίφημα του Διαγράμματος 5.19.

5.2.7 Εκθεση σε συγκέντρωση Ραδονίου

Όπως σημειώθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο αν ορισθεί μία νέα αρχή των χρόνων που να ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγγισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής σε θάλαμο Ραδονίου, τότε η συγκέντρωση του Ραδονίου στον θάλαμο Rn' ($Bq\ m^{-3}$) μεταβάλλεται με την πάροδο χρόνου t με βάση τον απλό εκθετικό νόμο ραδιενεργού απομείωσης:

$$Rn' = Rn_o e^{-\lambda t} \quad (5.3)$$

Εστω τώρα ότι ο συνολικός χρόνος που παρήρθε από τη λήξη της μετάγγισης έως το άνοιγμα του θαλάμου στο ελεύθερο περιβάλλον ή την με άλλο τρόπο αλλοίωση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε αυτόν (π.χ. με βίαιο εξαερισμό) είναι T_s (min). Τότε η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο το χρονικό διάστημα T_s υπολογίζεται προφανώς από την εξίσωση:

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} t Rn_o e^{-\lambda t} dt}{T_s} \quad (5.4)$$

Η σχέση 5.4 ισχύει, όταν και μόνο όταν ο θάλαμος "Α" δεν έχει διαρροές προς το εξωτερικό περιβάλλον, είναι δηλαδή αεροστεγής και ραδονιοστεγής. Πολλαπλά πειράματα που έχουν γίνει στο παρελθόν με την πηγή "1" και τον υπόψιν θάλαμο εφαρμόζοντας τις διαδικασίες των προηγούμενων παραγράφων έχουν αποδείξει την ακρίβεια των σχέσεων 5.3 και 5.4. Για τα πειράματα αυτά παρακολουθήθηκε η μεταβολή της συγκέντρωσης του Ραδονίου στο θάλαμο με ενεργητικές τεχνικές (θάλαμος ιονισμού Alphaguard P2000), με τη βοήθεια των οποίων διαπιστώθηκε ότι η σταθερά διασπάσεως λ στη σχέση 5.3 είναι στατιστικά ίση με τη σταθερά

διασπάσεως του Ραδονίου. Σημειώνεται ότι δεδομένων των παλαιότερων πειραμάτων δεν πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας τέτοια επαλήθευση. Είναι φανερό ότι ο χρόνος T_s στα πειράματα που εξετάζονται στην εδώ Διπλωματική Εργασία είναι ο χρόνος έκθεσης των μεταλλικών δοχείων με τον ενεργό άνθρακα σε βαθμονομημένη μέση συγκέντρωση Ραδονίου R' ($Bq\ m^{-3}$), όπως αυτός ορίζεται τόσο στο 2^ο, όσο και στο 3^ο Κεφάλαιο (George, 1984 και Gray 1987 αντίστοιχα).

Για την έκθεση, όπως οργανώνεται στα πλαίσια του παρόντος πρωτοκόλλου, δεν γίνεται καμία ρύθμιση της υγρασίας ή και της θερμοκρασίας του θαλάμου "Α". Δεδομένου όμως ότι η θύρα του θαλάμου, όταν ασφαρίζεται, εγκλωβίζει σε αυτόν ατμοσφαιρικό αέρα του Εργαστηρίου, είναι δυνατόν να θεωρείται με ασφάλεια, ότι η υγρασία στον θάλαμο είναι στα επίπεδα 35 – 65% και η θερμοκρασία στα επίπεδα 23 – 27^ο C, δηλ. από την άποψη των συνθηκών υγρασίας, στα επίπεδα συνθηκών των πειραμάτων του George (1984) ή στα επίπεδα των συνθηκών "μεσαίας" υγρασίας των πειραμάτων του Gray (1987).

5.2.8 Μέτρηση εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων

5.2.8.1 Γενικά

Διακρίνονται και πρέπει σαφώς να διερευνηθούν για την αποτελεσματικότητά τους τέσσερα (4) είδη μετρήσεων:

- (α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης
- (β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης
- (γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης
- (δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Η αναγκαιότητα για αυτή την ποικιλία μετρήσεων προκύπτει από την επιδιωκόμενη φορητότητα της μεθόδου. Πρέπει δηλαδή να διερευνηθεί εκτός του ποιος ανιχνευτής είναι ο πλέον κατάλληλος για τις μετρήσεις αυτές και το αν οι μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε συμπέρασμα, σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται θωράκιση. Το σενάριο αυτό δεν είναι μακριά από την πραγματικότητα αν μία ερευνητική ομάδα χρειάζεται να μετακινείται χωρίς να μεταφέρει υπερβολικό βάρος οργάνων. Υπενθυμίζεται ότι ακόμα και η λυόμενη θωράκιση 9 τεμαχίων που εξετάστηκε στο 4^ο

Κεφάλαιο έχει συνολικό βάρος 49.5 kg, με το ελαφρύτερο τμήμα να ζυγίζει 3.6 kg και το βαρύτερο 8.8 kg.

Τα μεταλλικά δοχεία προς μέτρηση με κάποιον από τους πιο πάνω τρόπους, στο τέλος του χρόνου έκθεσης T_s , εξέρχονται από το θάλαμο και καλύπτονται με τα αντίστοιχα καλύμμάτα τους. Δεν χρησιμοποιείται ταινία βινυλίου για επιπλέον στεγάνωση. Η έξοδος των δοχείων γίνεται με απλό άνοιγμα της θύρας του θαλάμου. Ο χειριστής που κάνει αυτή την εργασία (δηλ. έξοδος και κάλυψη) οφείλει να φορά ελαστικά γάντια προκειμένου να μην μεταφερθούν στα χέρια του (και δια μέσου αυτών, όπου αλλού στο σώμα του) τυχόν θυγατρικά του Ραδονίου που είναι δυνατόν να βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια των δοχείων. Η χρονική στιγμή της έναρξης μετρήσεων προκύπτει φυσιολογικά, αν στο τέλος του χρόνου έκθεσης T_s προστεθούν οι απαραίτητες τρεις ώρες για την ωρίμανση των θυγατρικών.

Παρόλαυτά η συγκεκριμένη χρονική στιγμή δεν είναι η πλέον βολική για τα πειράματα που οργανώθηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Ο λόγος είναι απλός και αναλύεται ως εξής:

Σε μία κανονική πειραματική ημέρα, περί τις 10.00 μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία μηδενισμού της πηγής, περί τις 11.00 μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής Ραδονίου, και περί τις 12.00 ή 13.00 ή ακόμα αργότερα, ανάλογα με τα επίπεδα βαθμονομημένης συγκέντρωσης Ραδονίου που είναι επιθυμητό να δημιουργηθούν, μπορεί να ξεκινήσει η έκθεση των μεταλλικών δοχείων με τον ενεργό άνθρακα. Δεδομένου ότι ο χρόνος έκθεσης των δοχείων τυπικά προσδιορίζεται σε πολλαπλάσιο των 24 h, γίνεται αντιληπτό ότι η λήξη της έκθεσης θα γίνει ένα επόμενο πολλαπλάσιο του 24ώρου μετά, δηλαδή έστω στις 13.00 μιας επόμενης πειραματικής ημέρας. Επομένως περί τις 16.00 εκείνης της επόμενης πειραματικής μέρας μπορεί να ξεκινήσει η μέτρηση, η οποία κατά χονδρικούς εύλογους υπολογισμούς που έγιναν στη παράγραφο 4.2.8, θα διαρκέσει για πέντε (5) μεταλλικά δοχεία, τουλάχιστον τέσσερις ώρες φθάνοντας στις 22.00, ώρα που το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας είναι γενικά κλειστό. Επομένως η μέτρηση κατά κανόνα μπορεί να ξεκινήσει όχι το απόγευμα της πειραματικής ημέρας τέλους της έκθεσης των δοχείων αλλά το επόμενο πρωινό, δηλαδή σε περίπου 18 h μετά το τέλος της έκθεσης.

5.2.8.2 Μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN

Ο ανιχνευτής VICTOREEN διαθέτει διακόπτες μεμβράνης για τις ακόλουθες λειτουργίες :

- ON/OFF: διακόπτης που ανοίγει και κλείνει τη συσκευή
- MODE: διακόπτης που αλλάζει τις μονάδες μέτρησης μεταξύ των counts/min, και Sv/h,
- LOG: διακόπτης που αποθηκεύει τα δεδομένα σε ηλεκτρονική μορφή αν διατίθεται κατάλληλη μονάδα επικοινωνίας με DATA LOGGER
- RATE/INTEG: διακόπτης που αλλάζει τη μέτρηση από ρυθμό κρούσεων σε συνολικό αριθμό κρούσεων (ολοκληρωτική μέτρηση) και αντιστρόφως
- RESP TIME: διακόπτης που αλλάζει το χρόνο απόκρισης του συστήματος ή ακόμα μηδενίζει το χρόνο της συνολικής μέτρησης σε περίπτωση ολοκληρωτικών μετρήσεων

Μία μέτρηση μεταλλικού δοχείου με αυτόν τον ανιχνευτή στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας γίνεται / ορίζεται ως εξής:

Ο ανιχνευτής τοποθετείται πάνω από το μεταλλικό δοχείο σε επαφή με το κάλυμμα. Με το διακόπτη ON/OFF διακόπτη ξεκινάει η συσκευή. Η οθόνη μας δείχνει μετρήσεις ρυθμού σε mSv/h. Με το διακόπτη MODE η μονάδα μέτρησης αλλάζει σε counts/min (CPM). Με το διακόπτη RATE/INTEG από μετρήσεις ρυθμού η συσκευή μεταπίπτει σε ολοκληρωτική μέτρηση. Πατώντας το διακόπτη RESP TIME επί 3 sec μηδενίζεται ο χρόνος της ολοκληρωτικής μέτρησης. Κατά σύμβαση για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ως μέτρηση δοχείου καταγράφεται το αποτέλεσμα που φαίνεται στην οθόνη μετά από 1000 s.

5.2.8.3 Μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS

Ο ανιχνευτής CANBERRA - EURISYS διαθέτει διακόπτες μεμβράνης για τις ακόλουθες λειτουργίες :

- Διακόπτη που ανοίγει και κλείνει τη συσκευή. Με το άνοιγμα η συσκευή ξεκινάει να μετρά ρυθμό κρούσεων σε counts/s (CPS).
- Διακόπτη που αποθηκεύει τα δεδομένα σε ηλεκτρονική μορφή αν διατίθεται κατάλληλη μονάδα επικοινωνίας με DATA LOGGER
- Διακόπτη που φωτίζει την οθόνη. Αν αυτός ο διακόπτης πατηθεί μαζί με τον διακόπτη που ανοίγει και κλείνει την συσκευή, είναι δυνατόν να ληφθεί μέσος

όρος του ρυθμού κρούσεων για το διάστημα μεταξύ του ανοίγματος της συσκευής και της χρονικής στιγμής της ενεργοποίησης του συνδυασμού των διακοπών αυτών ή για το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργοποιήσεων του συνδυασμού. Σημειώνεται όμως ότι αυτή η λειτουργία συνδυασμού είναι μάλλον ελαττωματική στην υπόψιν διάταξη, διότι οδηγεί σε κλείσιμο της συσκευής.

Μία μέτρηση μεταλλικού δοχείου με αυτόν τον ανιχνευτή στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας γίνεται / ορίζεται ως εξής:

Ο ανιχνευτής τοποθετείται πάνω από το μεταλλικό δοχείο σε επαφή με το κάλυμμα. Με το διακόπτη ON/OFF διακόπτη ξεκινάει η συσκευή. Η οθόνη μας δείχνει μετρήσεις ρυθμού σε CPS. Κατά σύμβαση για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ως μέτρηση δοχείου καταγράφεται ο μέσος όρος 10 μετρήσεων ρυθμού, που απέχουν μεταξύ τους 20 s.

5.2.8.4 Σφάλματα μετρήσεων

Σύμφωνα με τον Λεωνίδου (1990), στην παράγραφο 2.4 "Εφαρμογές της στατιστικής ανάλυσεως σε μετρήσεις πυρηνικών ακτινοβολιών", ορίζονται –μεταξύ άλλων- και τα εξής σφάλματα:

Σφάλμα μοναδικής μέτρησης:

Στην περίπτωση κατά την οποία πραγματοποιούμε μία μόνο μέτρηση π.χ. του αριθμού n , των απαριθμούμενων φωτονίων με ανιχνευτική διάταξη μέσα σε ορισμένο χρονικό διάστημα, το τυπικό σφάλμα ε υπολογίζεται ως:

$$\varepsilon = \sqrt{n} \quad (5.5)$$

και το πιθανό σφάλμα e υπολογίζεται ως:

$$e = 2\sqrt{n} \quad (5.6)$$

Σφάλμα αποτελέσματος ρυθμού κρούσεων από πολλές ισόχρονες μετρήσεις:

Αν πραγματοποιηθούν N μετρήσεις του αριθμού κρούσεων n_i ($i = 1, 2, \dots, N$) που δίνει ραδιενεργή πηγή σε ίσα χρονικά διαστήματα, τότε ως τυπικό σφάλμα ε ορίζεται η τυπική απόκλιση του δείγματος N μετρήσεων ως:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{n} - n_i)^2}{N-1}} \quad (5.7)$$

και το πιθανό σφάλμα e υπολογίζεται ως:

$$e = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{n} - n_i)^2}{N-1}} \quad (5.8)$$

Σφάλμα αποτελέσματος ρυθμού κρούσεων από μετρήσεις που περιέχουν σημαντικό υπόστρωμα:

Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να εφαρμόζεται η σχέση πιθανού σφάλματος που προτείνεται στον Gray (1987) και παρουσιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο ως εξίσωση 3.5:

$$e = 2 \times \frac{\sqrt{CPM \times \text{χρονος μετρησης (min)} + CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης (min)}}{CPM \times \text{χρονος μετρησης (min)} - CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης (min)}} \times 100 \quad (5.9)$$

5.2.9 Υπόστρωμα

5.2.9.1 Γενικά

Ορίζονται 4 υποστρώματα:

- (α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης
- (β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης
- (γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης
- (δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Για την εκτίμηση του υποστρώματος μετρώνται τα τέσσερα (4) μεταλλικά δοχεία που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.9.

5.2.9.2 Υπόστρωμα με τον ανιχνευτή VICTOREEN

Εντός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από δύο μετρήσεις σε κάθε δοχείο ως

$$4775 \pm 2 \text{ x ε κρούσεις στα 1000 s}$$

όπου ϵ η τυπική απόκλιση του δείγματος των οκτώ μετρήσεων

$$\text{ή } 4775 \pm 240 (5.0\%) \text{ κρούσεις στα 1000 s}$$

$$\text{ή } 286 \pm 14.4 \text{ CPM}$$

Εκτός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από δύο μετρήσεις σε κάθε δοχείο ως

$$57325 \pm 2 \times \varepsilon \text{ κρούσεις στα } 1000 \text{ s}$$

όπου ε η τυπική απόκλιση του δείγματος των οκτώ μετρήσεων

$$\text{ή } 57325 \pm 834 (1.4\%) \text{ κρούσεις στα } 1000 \text{ s}$$

$$\text{ή } 3440 \pm 50 \text{ CPM}$$

5.2.9.3 Υπόστρωμα με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS

Εντός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από δύο μετρήσεις σε κάθε δοχείο ως:

$$3.14 \pm 2 \times \varepsilon \text{ CPS}$$

όπου ε η τυπική απόκλιση του δείγματος των οκτώ μετρήσεων

$$\text{ή } 3.14 \pm 0.30 (9.4\%) \text{ CPS}$$

$$\text{ή } 188 \pm 18 \text{ CPM}$$

Εκτός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από δύο μετρήσεις σε κάθε δοχείο ως

$$64.75 \pm 2 \times \varepsilon \text{ CPS}$$

όπου ε η τυπική απόκλιση του δείγματος των οκτώ μετρήσεων

$$\text{ή } 64.75 \pm 3.82 (5.8\%) \text{ CPS}$$

$$\text{ή } 3885 \pm 230 \text{ CPM}$$

5.3 Απόδοση ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου

5.3.1 Γενικά

Ορίζονται 4 βαθμοί απόδοσης:

(α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

(β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

(γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης μετράται το μεταλλικό δοχείο για βαθμονόμηση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2.9. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται σε CPM (Bqkg⁻¹)⁻¹ από την σχέση:

$$E = \frac{CPM - CPM_{BKG}}{988.5 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (5.10)$$

5.3.2 Μέτρηση μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης με τον ανιχνευτή VICTOREEN

Εντός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από μία μέτρηση ως:

35000 ± e κρούσεις στα 1000 s

όπου e το πιθανό σφάλμα σύμφωνα με την σχέση 5.9 για χρόνο μέτρησης
16.7 min (1000 s)

ή 35000 ± 1.3% κρούσεις στα 1000 s

ή 2100 ± 27.3 CPM

Εκτός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από μία μέτρηση ως:

85000 ± e κρούσεις στα 1000 s

όπου e το πιθανό σφάλμα σύμφωνα με την σχέση 5.9 για χρόνο μέτρησης
16.7 min (1000 s)

ή 85000 ± 2.7% κρούσεις στα 1000 s

ή 5100 ± 138 CPM

5.3.3 Μέτρηση μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS

Εντός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από οκτώ μετρήσεις του δοχείου βαθμονόμησης:

41.1 ± e CPS

όπου e το πιθανό σφάλμα σύμφωνα με την σχέση 5.9 για χρόνο μέτρησης
 $16.7 \text{ min } (1000 \text{ s})^2$

ή $41.1 \pm 1.1\% \text{ CPS}$

ή $2466 \pm 27 \text{ CPM}$

Εκτός λυόμενης θωράκισης:

Προκύπτει από δύο μετρήσεις σε κάθε δοχείο ως

$99.9 \pm e \text{ CPS}$

όπου e το πιθανό σφάλμα σύμφωνα με την σχέση 5.9 για χρόνο μέτρησης
 $16.7 \text{ min } (1000 \text{ s})^2$

ή $99.9 \pm 2.3\% \text{ CPS}$

ή $5994 \pm 138 \text{ CPM}$

5.3.4 Σύνοψη βαθμών απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσεως 5.10. Το πιθανό (%) σφάλμα του βαθμού απόδοσης υπολογίζεται ως συνδυασμός e_c πολλών σφαλμάτων με τη βοήθεια της σχέσης:

$$e_c = \sqrt{\sum_1^v e_i^2} \quad (5.11)$$

στην οποία εδώ διακρίνονται $v = 4$ πιθανά σφάλματα:

- το (%) πιθανό σφάλμα του υποστρώματος,
- το (%) πιθανό σφάλμα της μέτρησης του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης, και
- το (%) πιθανό σφάλμα της συγκέντρωσης Ραδίου-226, στην τέφρα που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκρότηση του δοχείου βαθμονόμησης (βλ. και παράγραφο 4.2.9 στο 4^ο Κεφάλαιο)

² πρόκειται για κατ' αρχήν προσέγγιση του σφάλματος διότι ο ανιχνευτής CANBERRA – EURISYS μετρά σε CPS

² πρόκειται για υπολογισμό με προσεγγιστική εφαρμογή της σχέσης 5.9 για τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS που αφορά στο πιθανό σφάλμα e για χρόνο 16.67 min, καθώς όπως είναι γνωστό ο ανιχνευτής αυτός μετρά σε CPS

- το (%) πιθανό σφάλμα που εισάγεται στο βαθμό απόδοσης, από το γεγονός ότι η τέφρα που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκρότηση του δοχείου βαθμονόμησης (βλ. και παράγραφο 4.2.9 στο 4^ο Κεφάλαιο), περιέχει και άλλα ισότοπα εκτός από το ²²⁶Ra. Το σφάλμα μπορεί να αγνοείται, δεδομένου ότι τα ισότοπα που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις πέρα από το ²²⁶Ra είναι το ²³⁸U, και το ⁴⁰K. Τα φωτόνια που εκπέμπονται από τα δύο αυτά ισότοπα (~1000 και 1461 keV αντίστοιχα), δεν φαίνεται να εντάσσονται στις περιοχές ενεργειών όπου οι χρησιμοποιούμενοι ανιχνευτές έχουν τη βέλτιστη απόδοση.

Αν εφαρμοσθούν λοιπόν οι σχέσεις 5.10 και 5.11 στα πιο πάνω αποτελέσματα, προκύπτουν οι πιο κάτω τιμές για τον βαθμό απόδοσης E :

(α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

$$E = 1.83 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm \sqrt{(5\%)^2 + (1.3\%)^2 + (6\%)^2} = 1.83 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm 7.92\%$$

(β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

$$E = 1.68 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm \sqrt{(1.4\%)^2 + (2.7\%)^2 + (6\%)^2} = 1.68 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm 6.73\%$$

(γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

$$E = 2.30 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm \sqrt{(9.4\%)^2 + (1.1\%)^2 + (6\%)^2} = 2.30 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm 11.22\%$$

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

$$E = 2.13 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm \sqrt{(5.8\%)^2 + (2.3\%)^2 + (6\%)^2} = 2.13 \text{ CPM (Bq kg}^{-1}\text{)}^{-1} \pm 8.66\%$$

5.4 Εκτίμηση αβεβαιότητας πρωτοκόλλου βαθμονόμησης

5.4.1 Γενικά

Ο George (1984) σημειώνει ότι η συνολική αβεβαιότητα της μεθόδου των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση της συγκέντρωσης Ραδονίου στον αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος, μπορεί να φθάνει και μέχρι το 20%. Με τη σειρά της πειραματικής διαδικασίας βαθμονόμησης μπορούν να διακρίνονται τα ακόλουθα κυριότερα σφάλματα:

1. Αναγέννησης

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται σε πιθανή κακή λειτουργία της διατάξεως του φούρνου.

2. Ζύγισης

Πρόκειται για συστηματικό σφάλμα. Οφείλεται στην ακρίβεια του χρησιμοποιούμενου ζυγού, η οποία είναι 0.1 g και αφορά στα:

- μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα
- μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση του υποστρώματος, και στο
- μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης

Έτσι το εισαγόμενο σφάλμα από τη ζύγιση είναι:

- για τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα ενδεικτικού βάρους 220 g: 0.04%
- για τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση του υποστρώματος ενδεικτικού βάρους 220 g: 0.04%
- για το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης ενδεικτικού βάρους 330 g: 0.03%

3. Πηγής βαθμονόμησης και παραγωγής Ραδονίου

Πρόκειται για συστηματικό σφάλμα. Οφείλεται στην ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης πηγής Ραδονίου, η οποία κατά κανόνα αποτελεί δευτερεύον πρότυπο κατευθείαν ιχνηλάσιμο (traceable) προς πρωτεύον πρότυπο διεθνώς αναγνωρισμένων ινστιτούτων μετρολογίας, όπως το National Institute of Standards and Technology των ΗΠΑ (NIST-US). Το πιθανό σφάλμα της πηγής "1" εκτιμάται σε 3%, με βάση το τυπικό σφάλμα που αναφέρεται στο σχετικό πιστοποιητικό (βλ. και Διάγραμμα 4.44)

4. Όγκου θαλάμου Ραδονίου

Πρόκειται για συστηματικό σφάλμα. Οφείλεται στις κατασκευαστικές ανακρίβειες διαστάσεων του θαλάμου, στον εργαστηριακό εξοπλισμό που τοποθετείται στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα την μείωση του όγκου (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 5.13), στις σωληνώσεις που συνδέουν τον θάλαμο με το δοχείο της πηγής (βλ. π.χ. και Διάγραμμα 5.16) και στον όγκο του δοχείου της πηγής (βλ. π.χ. και Διάγραμμα 4.47). Για τον θάλαμο "Α" υπολογίζεται σε περίπου 5%.

5. Χρόνου παραγωγής Ραδονίου

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται στο χρόνο αντίδρασης του χειριστή, για την σύντομη διεκπεραίωση του χειρισμού των διατάξεων τερματισμού της διαδικασίας μηδενισμού και έναρξης – λήξης της διαδικασίας μετάγγισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής στον θάλαμο. Το σφάλμα αυτού του είδους μπορεί να εκτιμηθεί από την ασφαλή πλευρά περί τα 2 min. Αυτό σημαίνει ότι αν ο χρόνος T είναι π.χ. 1 h, το σφάλμα που εισάγεται στην παραγωγή του Ραδονίου από την πηγή "1" σύμφωνα με τη σχέση 5.1, φθάνει το ύψος του 3%.

6. Χρόνου έκθεσης

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται στο χρόνο αντίδρασης του χειριστή, για την σύντομη διεκπεραίωση του χειρισμού των διατάξεων τερματισμού της διαδικασίας λήξης της μετάγγισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής στον θάλαμο και τη σύντομη διεκπεραίωση του ανοίγματος του θαλάμου και της κάλυψης των μεταλλικών δοχείων με τα καλύμματά τους μετά την έκθεση. Το σφάλμα αυτού του είδους μπορεί να εκτιμηθεί από την ασφαλή πλευρά περί τα 2 min. Αυτό σημαίνει ότι αν ο χρόνος T_s είναι π.χ. 24 h, το σφάλμα που εισάγεται στη ραδιενεργό απομείωση της συγκέντρωσης του Ραδονίου από την πηγή "1" σύμφωνα με τη σχέση 5.3, φθάνει το ύψος του 0.03%. Το σφάλμα αυτό αλλάζει το άνω όριο του αντίστοιχου ολοκληρώματος για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου R_n κατά τη διάρκεια της έκθεσης σύμφωνα με τη σχέση 5.4. Γίνεται αντιληπτό ότι η επίδρασή του στο αντίστοιχο ολοκλήρωμα είναι αμελητέα.

7. Διαρροών Ραδονίου από το θάλαμο

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Όπως σημειώθηκε στην παράγραφο 5.2.7 οφείλεται στις διαρροές Ραδονίου από το θάλαμο προς το εξωτερικό περιβάλλον, δηλαδή στο ότι ο θάλαμος δεν είναι αεροστεγής και ραδονιοστεγής. Πολλαπλά πειράματα που έχουν γίνει στο παρελθόν με την πηγή "1" και τον υπόψιν θάλαμο εφαρμόζοντας τις διαδικασίες μηδενισμού, παραγωγής και μετάγγισης που περιγράφηκαν έχουν δείξει ότι το σφάλμα αυτό μπορεί να αγνοηθεί.

8. Χρόνου ωρίμανσης

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται στις πιθανές απώλειες Ραδονίου από τα μεταλλικά δοχεία με τον ενεργό άνθρακα από τη στιγμή της εξόδου τους από τον θάλαμο και της άμεσης κάλυψής τους με τα καλύμματά τους μέχρι τη στιγμή της

μέτρησής τους. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με το πρωτόκολλο πειραμάτων βαθμονόμησης που παρουσιάστηκε, δεν χρησιμοποιείται ταινία βινυλίου για επιπλέον στεγάνωση κατά αυτό το χρονικό διάστημα. Το σφάλμα αυτό μπορεί να αντιμετωπίζεται με δύο βασικά τρόπους: (α) Μέτρηση των εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων στην ίδια περίπου χρονική στιγμή. Στην εδώ περίπτωση η χρονική αυτή στιγμή προσδιορίζεται σε περίπου 18 h μετά το τέλος της έκθεσης. Η μέτρηση επαναλαμβάνεται σε 42 h (= 18 + 24) και κατά περίπτωση σε 66 h (= 18 + 48) μετά το τέλος της έκθεσης (β) Εκτίμηση, με τη βοήθεια πειραμάτων που θα παρουσιασθούν στη συνέχεια, του ρυθμού καταστροφής του Ραδονίου μέσα στα κλειστά μεταλλικά δοχεία (= ρυθμός ραδιενεργού απομείωσης + ρυθμός διαρροής προς το περιβάλλον). Ο George (1984) διαπιστώνει στα δικά του πειράματα ότι η απόκλιση του ρυθμού αυτού από τη σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου είναι στην περιοχή $\pm 5\%$.

9. Μέτρησης

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται κυρίως σε δύο συνιστώσες: (α) Στο σφάλμα υπολογισμού της μετρητικής απόδοσης των ανιχνευτών και (β) Στο σφάλμα της ίδιας μέτρησης των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα. Για το σφάλμα (α) μπορεί κανείς να πει ότι στην χειρότερη περίπτωση δεν ξεπερνάει το 11% σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.4. Για το σφάλμα (β) εύλογα μπορεί να υποτεθεί και αργότερα στο 6^ο Κεφάλαιο, όπου γίνεται η παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων, να επαληθευθεί ότι και αυτό βρίσκεται στην ίδια περιοχή μεγέθους

5.4.2 Εκτίμηση διαρροών Ραδονίου από τα μεταλλικά δοχεία

Για την εκτίμηση του ρυθμού καταστροφής του Ραδονίου μέσα στα κλειστά μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα (= ρυθμός ραδιενεργού απομείωσης + ρυθμός διαρροής προς το περιβάλλον) από τη στιγμή της εξόδου τους από τον θάλαμο και της άμεσης κάλυψής τους με τα καλύμματά τους μέχρι τη στιγμή της μέτρησής τους, οργανώθηκαν τα ακόλουθα πειράματα:

Εκτέθηκαν σε μέση συγκέντρωση Ραδονίου περίπου 1 kBq m^{-3} , επί 24 h οκτώ μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα. Τα τέσσερα από αυτά, αμέσως μετά το τέλος της έκθεσής τους καλύφθηκαν με καλύμματα, στα οποία υπήρχε ελαστικό παρέμβυσμα. Τα άλλα τέσσερα, καλύφθηκαν με καλύμματα, στα οποία είχε αφαιρεθεί το πλαστικό παρέμβυσμα.

Κάθε ένα δοχείο από κάθε τετράδα μετρήθηκε επανειλημμένα ανά 24 περίπου ώρες με τέσσερις τρόπους, ως εξής:

(α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

(β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

(γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Τα αποτελέσματα αναπαρίστανται γραφικά στα Διαγράμματα 5.20 έως και 5.51. Κάθε ένα από τα Διαγράμματα αυτά παρουσιάζει τόσο τη γραφική παράσταση που αντιπροσωπεύει το ρυθμό καταστροφής του Ραδονίου που οφείλεται αποκλειστικά στην ραδιενεργό του απομείωση ($\lambda = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$), όσο και την καμπύλη αναδρομής που προκύπτει από τα συλλεχθέντα πειραματικά αποτελέσματα, με βάση την οποία εκτιμάται ο ρυθμός καταστροφής του Ραδονίου που οφείλεται και στη ραδιενεργό απομείωση και σε τυχόν διαρροές (λ_{exp}). Στα Διαγράμματα όπου χρόνος "0" είναι η χρονική στιγμή εξόδου των δοχείων από τον θάλαμο Ραδονίου. Το σφάλμα υπολογισμού της ποσότητας λ_{exp} με τη διαδικασία προσαρμογής (fitting) είναι αμελητέο, διότι προκύπτει από ικανό πλήθος πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία προσαρμόζονται ικανοποιητικά σε συνάρτηση της μορφής 5.3.

Από τα Διαγράμματα 5.20 έως και 5.51 προκύπτει, από τέσσερις μετρήσεις σε κάθε περίπτωση, ότι (σε 10^{-4} min^{-1}):

(α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

για μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 1.42 \pm 0.04$ (3%)

ή 13% μεγαλύτερο από το λ

για μεταλλικά δοχεία χωρίς παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 1.01 \pm 0.01$ (1%)

ή 20% μικρότερο από το λ

(β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

για μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 1.64 \pm 0.22$ (13%)

ή 30% μεγαλύτερο από το λ

για μεταλλικά δοχεία χωρίς παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 0.76 \pm 0.02$ (3%)

ή 40% μικρότερο από το λ

(γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

για μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 1.53 \pm 0.05$ (3%)

ή 21% μεγαλύτερο από το λ

για μεταλλικά δοχεία χωρίς παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 1.10 \pm 0.04$ (4%)

ή 12% μικρότερο από το λ

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

για μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 2.16 \pm 0.68$ (32%)

ή 71% μεγαλύτερο από το λ

για μεταλλικά δοχεία χωρίς παρέμβυσμα $\lambda_{exp} = 1.12 \pm 0.24$ (22%)

ή 11% μικρότερο από το λ

Συνακόλουθα διατυπώνονται οι πρώτες διαπιστώσεις:

1. Τα δοχεία με παρέμβυσμα εμφανίζονται να διαρρέουν Ραδόνιο, διότι γενικά για αυτά ισχύει:

$$\lambda_{exp} > \lambda$$

2. Τα δοχεία χωρίς παρέμβυσμα εμφανίζονται να προσλαμβάνουν Ραδόνιο, διότι γενικά για αυτά ισχύει:

$$\lambda_{exp} < \lambda$$

3. Η διασπορά των μετρήσεων για το λ_{exp} είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη όταν οι μετρήσεις γίνονται εκτός θωράκισης παρά όταν οι μετρήσεις γίνονται εντός.

Σχετικά με τη διαπίστωση 1:

Φαίνεται ότι είναι κατ'αρχήν παράδοξο ότι μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα χάνουν Ραδόνιο, δεδομένου ότι το παρέμβυσμα είναι ελαστικό και ως εκ τούτου αεροστεγές. Παρόλαυτά, είναι πολύ γνωστό από την βιβλιογραφία ότι τα ελαστικά οργανικά υλικά και γενικά τα πολυμερή έχουν έντονες προσροφητικές ιδιότητες σε ό,τι αφορά το Ραδόνιο. Έτσι, αυτό που φαίνεται ότι συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι: Ραδόνιο αποβαλλόμενο από τον ενεργό άνθρακα προσροφάται στο ελαστικό παρέμβυσμα χωρίς στην ουσία να χάνεται μέσα από το μεταλλικό δοχείο, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της γεωμετρίας μέτρησης και της τεχνητής διαπίστωσης

ότι $\lambda_{exp} > \lambda$. Το φαινόμενο χρειάζεται επιπλέον πειραματική διερεύνηση, η οποία δεν είναι αντικείμενο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

Σχετικά με τη διαπίστωση 2:

Η ερμηνεία που μπορεί κανείς να δώσει στη διαπίστωση 2, είναι ότι στα δοχεία χωρίς παρέμβυσμα, το άνοιγμα μεταξύ του καλύμματος και του δοχείου είναι ικανό να επιτρέπει τη συναλλαγή αερίων μεταξύ του δοχείου και του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα το Ραδόνιο του περιβάλλοντος που προσροφάται στον ενεργό άνθρακα του δοχείου να είναι πολύ περισσότερο από το Ραδόνιο που ενδεχόμενα αποβάλλεται από τον ενεργό άνθρακα του δοχείου. Το φαινόμενο χρειάζεται επιπλέον πειραματική διερεύνηση, η οποία δεν είναι αντικείμενο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

Σχετικά με τη διαπίστωση 3:

Η έκθεση των δοχείων σε μέση συγκέντρωση Ραδονίου της τάξης του 1 kBq m^{-3} επί 24 h, οδηγεί, όπως φαίνεται σε συγκέντρωση των θυγατρικών στον ενεργό άνθρακα που αποδίδει ροή φωτονίων μεγαλύτερη μεν αλλά σχετικά κοντά στο υπόστρωμα που υπάρχει εκτός της λυόμενης θωράκισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα (βλ. και τη σχέση 5.9) να διαπιστώνεται αυτή η μεγαλύτερη διασπορά στην εκτίμηση του λ_{exp} από ότι στην αντίστοιχη εκτίμηση του ίδιου μεγέθους με μετρήσεις εντός της λυόμενης θωράκισης. Το φαινόμενο χρειάζεται επιπλέον πειραματική διερεύνηση, η οποία δεν είναι αντικείμενο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

Ειδικά οι διαπιστώσεις 1 και 2, είναι από πρώτη άποψη αποθαρρυντικές για το πρωτόκολλο βαθμονόμησης καθώς φαίνεται ότι εισάγουν μεγάλο σφάλμα. Παρόλαυτά είναι δυνατόν να ξεπερασθεί το εμπόδιο με τρόπο που έχει ήδη σημειωθεί, δηλαδή με:

Μέτρηση των εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων στην ίδια περίπου χρονική στιγμή. Στην εδώ περίπτωση η χρονική αυτή στιγμή προσδιορίζεται σε περίπου 18 h μετά το τέλος της έκθεσης. Η μέτρηση επαναλαμβάνεται σε 42 h (= 18 + 24) και κατά περίπτωση σε 66 h (= 18 + 48) μετά το τέλος της έκθεσης

Απομένει μόνο να εξετασθεί πόσο σημαντική είναι η επίδραση των διαπιστώσεων 1 και 2 πάνω στη μέση συγκέντρωση των θυγατρικών του Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα του μεταλλικού δοχείου στο διάστημα των 24 h. Δεδομένου ότι στα Διαγράμματα 5.20 έως και 5.51, η μέση αυτή συγκέντρωση των θυγατρικών αντιπροσωπεύεται στην πράξη από τις επιφάνειες κάτω από τη θεωρητική και την

πειραματική καμπύλη εκθετικής απομείωσης του Ραδονίου για το διάστημα 24 έως 48 h από την έξοδο των δοχείων από τον θάλαμο, κατασκευάζεται ο Πίνακας 5.2 στον οποίο συγκρίνονται ($\pm\%$), οι δύο αυτές επιφάνειες. Η σύγκριση αυτή βοηθάει στην εκτίμηση του μεγαλύτερου σφάλματος που μπορεί να εισαχθεί στη βαθμονόμηση από την αβεβαιότητα των διαρροών / εισροών Ραδονίου από και προς τα μεταλλικά δοχεία.

Με βάση τον Πίνακα 5.2 μπορεί να διακρίνει κανείς μία συνέπεια που παρατηρείται στις αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής επιφάνειας για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, ως εξής:

Εντός της θωράκισης η κατά μέσο όρο απόκλιση είναι περίπου 5%. Εκτός της θωράκισης η κατά μέσο όρο απόκλιση είναι περίπου 9%. Παρατηρείται επομένως ότι τα θυγατρικά του μεταλλικού δοχείου όταν μετρώνται εντός της θωράκισης δίνουν αποτελέσματα που δεν διαφέρουν στην διασπορά λόγω διαρροών / εισροών Ραδονίου από τις αντίστοιχες διαπιστώσεις του George (1984). Εκτός της θωράκισης βέβαια τα αποτελέσματα αυτά κυμαίνονται πολύ περισσότερο. Μπορεί να γίνει δεκτό επομένως ότι το πιθανό σφάλμα του χρόνου ωρίμανσης διακρινόμενο σε περιπτώσεις εντός και εκτός θωράκισης μπορεί να είναι περίπου 5 και 9% αντίστοιχα.

5.4.3 Αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας βαθμονόμησης

Για την αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας πρέπει από τις συνιστώσες που παρουσιάστηκαν προηγούμενα να απομονωθούν οι πλέον σημαντικές. Ως τέτοιες επιλέγονται:

- η (3) "πηγής βαθμονόμησης και παραγωγής Ραδονίου": ~ 3%
- η (4) "όγκου θαλάμου Ραδονίου": ~ 5%
- η (5) "χρόνου παραγωγής Ραδονίου": ~ 3%
- η (8) "χρόνου ωρίμανσης": ~ 5% εντός θωράκισης και ~ 9% εκτός θωράκισης
- η (9) "μέτρησης": (9α): ~ 11% και (9β): ~ 11%

Ο συνδυασμός τους σύμφωνα με τη σχέση 5.11 οδηγεί σε μια συνολική εκτίμηση της αβεβαιότητας της βαθμονόμησης για δύο περιπτώσεις:

Εντός θωράκισης σε περίπου 17.5%, και

Εκτός θωράκισης σε περίπου 19%,

τιμές που βρίσκονται στα πλαίσια που αναφέρονται από τον George (1984).

5.5 Ελάχιστος ανιχνεύσιμος ρυθμός κρούσεων

Η ποσότητα (MDA, Minimum Detectable Activity σε CPM), όπως παρουσιάστηκε στην σχέση 3.6 του 3^{ου} Κεφαλαίου, αντιπροσωπεύει τον ελάχιστο ανιχνεύσιμο καθαρό ρυθμό κρούσεων που οφείλεται στα θυγατρικά του Ραδονίου που υπάρχουν στον ενεργό άνθρακα και όχι στο υποστρώμα. Είναι:

$$MDA = 3 \times \frac{\sqrt{CPM_{BKG} \times \text{χρονος μετρησης υποστρωματος (min)}}}{\text{χρονος μετρησης υποστρωματος (min)}} \quad (5.12)$$

Φυσικά και πάλι ορίζονται 4 MDA:

(α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

$$MDA = 13 \text{ CPM ή } 218 \text{ κρούσεις στα } 1000 \text{ s}$$

(β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

$$MDA = 43 \text{ CPM ή } 719 \text{ κρούσεις στα } 1000 \text{ s}$$

(γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

$$MDA = 10 \text{ CPM ή } 0.2 \text{ CPS}^{3!}$$

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

$$MDA = 46 \text{ CPM ή } 0.8 \text{ CPS}^{3!}$$

5.6 Βελτιστοποίηση πρωτοκόλλου βαθμονόμησης

Οι πηγές της αβεβαιότητας του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης, οδηγούν σε προτάσεις βελτιστοποίησης των αντίστοιχων πειραμάτων με στόχο τη μείωση της αβεβαιότητας.

Οι προτάσεις αυτές μπορούν να συνοψισθούν στις ακόλουθες κυριότερες:

³ πρόκειται για υπολογισμό με προσεγγιστική εφαρμογή της σχέσης 5.12 για τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS που αφορά στο μέγεθος MDA για χρόνο 16.67 min, καθώς όπως είναι γνωστό ο ανιχνευτής αυτός μετρά σε CPS

1. Κατασκευή καταλληλότερου μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης

Προκειμένου το μεταλλικό δοχείο βαθμονόμησης, να μην περιέχει –κατά το δυνατόν– ισότοπα εκτός από το ^{226}Ra και τα θυγατρικά του, ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα στον συντελεστή απόδοσης των Ιωδιούχων Νατρίων από οποιαδήποτε τυχόν επιπλέον ισότοπα που παράγουν φωτόνια, προτείνεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ να προχωρήσει σε κατασκευή μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης, σύμφωνα με τον τρόπο που ακολουθήθηκε από την EPA-US και παρουσιάζεται στο 3^ο Κεφάλαιο, στην παράγραφο 3.2.4.

2. Συχνότερος έλεγχος του βαθμού απόδοσης των ανιχνευτών

Η εμπειρία με τους ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου που χρησιμοποιούνται έχει δείξει ότι δεν υπάρχει ουσιαστική κύμανση της απόδοσής τους με το χρόνο. Έτσι, η απόδοση των ανιχνευτών αυτών ελέγχθηκε μόνο μία φορά στο διάστημα Μάιος – Σεπτέμβριος 2007, που ήταν και το διάστημα πειραμάτων βαθμονόμησης στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Πραγματοποιήθηκε όπως σημειώθηκε μέτρηση του μεταλλικού δοχείου βαθμονόμησης και μεταλλικών δοχείων υποστρώματος. Παρόλαυτά είναι προφανές ότι για μία ποιοτικά ασφαλή διαδικασία βαθμονόμησης, η απόδοση των ανιχνευτών αυτών πρέπει να ελέγχεται συχνότερα μέσα σε ένα τέτοιο μεγάλο χρονικό διάστημα.. Επιπλέον, σε περίπτωση παραγωγικής εφαρμογής της μεθόδου μέτρησης της συγκέντρωσης Ραδονίου με χρήση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα ο ποιοτικός έλεγχος της όλης διαδικασίας με πολύ συχνές βαθμονομήσεις θα είναι απαραίτητος, τόσο διότι πρέπει να υπάρχει βεβαιότητα για την ακρίβεια των μεθόδων, όσο και διότι τα μεταλλικά δοχεία θα είναι πολλά, και θα περιέχουν ενεργό άνθρακα που παρόλο που θα είναι μακροσκοπικά ίδιος θα προέρχεται από διαφορετικές παραγγελίες.

3. Συμπύεση του χρόνου ωρίμανσης στον απόλυτα απαραίτητο

Στην παράγραφο 5.4.2 καταγράφηκαν τα προβλήματα αβεβαιότητας που οφείλονται στις διαρροές ή τις εισροές Ραδονίου από τα κλειστά μεταλλικά δοχεία. Ο κυριότερος πρακτικός τρόπος με τον οποίο μπορεί να περιορισθεί αυτή η αβεβαιότητα, είναι ασφαλώς, η μέτρηση του δοχείου να γίνεται περί τις 3 h μετά το τέλος της έκθεσής του και την κάλυψή του με το κάλυμμα. Οι χρόνοι ωρίμανσης τάξεως 18 – 20 h που επιβλήθηκε να χρησιμοποιηθούν – για πρακτικούς λόγους - στα πλαίσια της

παρούσης Διπλωματικής Εργασίας δεν φαίνεται να εξυπηρετούν από την άποψη του ελέγχου αυτής της αβεβαιότητας.

4. Στεγάνωση των δοχείων

Είναι πιθανόν, αλλά χρειάζεται να διερευνηθεί, ότι τα δοχεία θα έχουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά αν από τα καλύμματά τους αφαιρεθεί το ελαστικό παρέμβυσμα και χρησιμοποιηθεί ταινία βινυλίου για τη στεγάνωση των διαρροών ή των εισροών που μπορεί να υπάρχουν στο άνοιγμα μεταξύ καλύμματος και δοχείου. Εξάλλου με αυτήν τη μέθοδο στεγάνωσης εργάστηκε τόσο ο George (1984), και αυτή επίσης προτείνεται από τον Gray (1987).

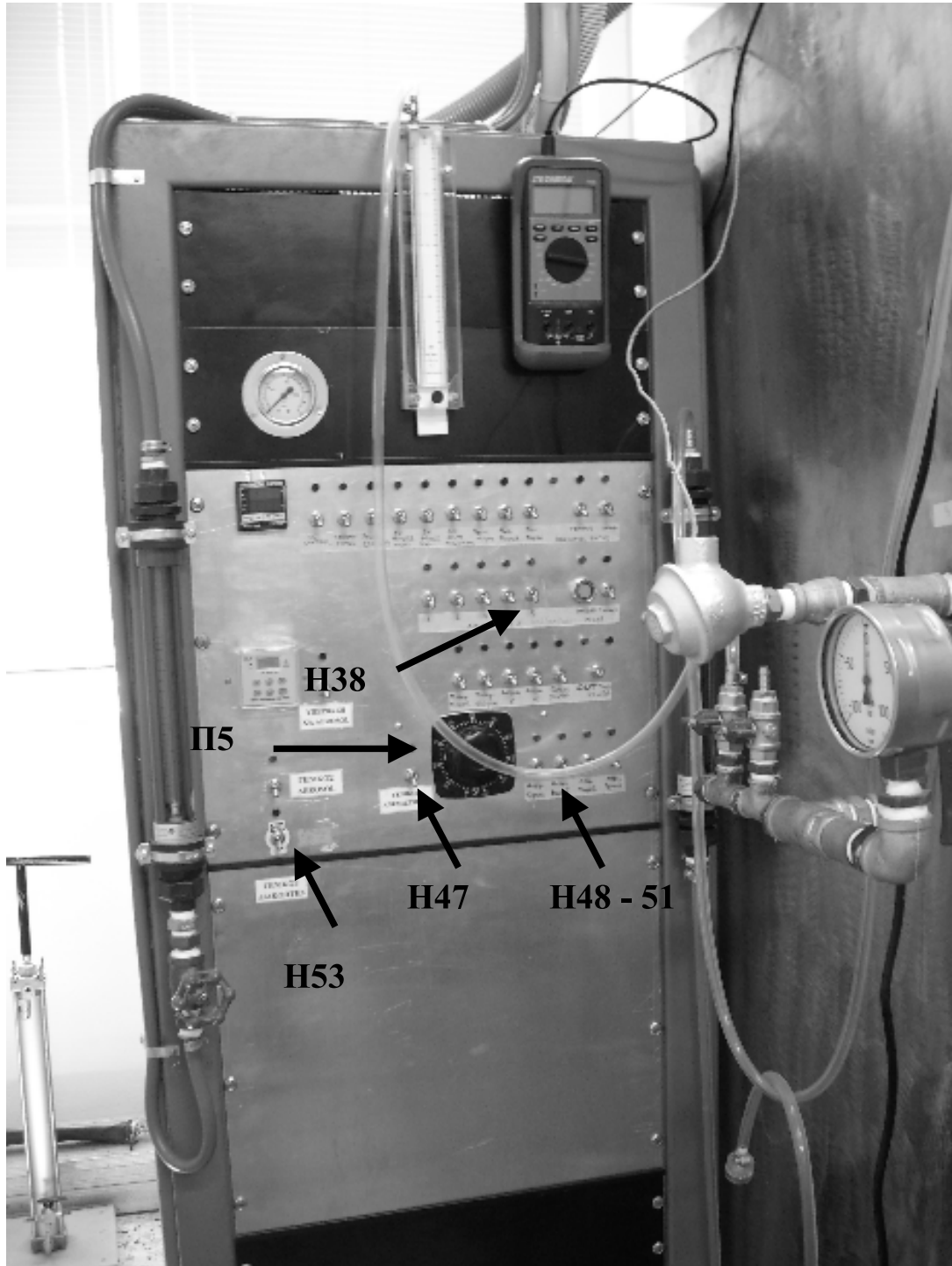
5. Μετρήσεις εντός θωράκισης

Οι μετρήσεις εντός θωράκισης φαίνεται να είναι οι πλέον αξιόπιστες, διότι γίνονται σε περιβάλλον μειωμένου υποστρώματος, με αποτέλεσμα την καλή διάκριση του σήματος από τον θόρυβο, μέσω της σημαντικής ελάττωσης του αντίστοιχου πιθανού σφάλματος, όπως δίνεται από τη σχέση 5.9.

6. Βαθμονόμηση με έκθεση σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις

Αν υπάρχει επιμονή για την διερεύνηση της δυνατότητας βαθμονόμησης με χρήση ανιχνευτών εκτός θωράκισης, ή αν τελικά είναι αναγκαίο να εφαρμόζεται η μέθοδος με μετρήσεις εκτός θωράκισης, καλό είναι η έκθεση για βαθμονόμηση των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα να γίνεται σε σχετικά υψηλές μέσες συγκεντρώσεις Ραδονίου, ώστε κατά το δυνατόν η μέτρηση βαθμονόμησης που θα λαμβάνεται να είναι σημαντικά υψηλότερη από το υπόστρωμα και ο προκύπτον συντελεστής να είναι κατά το δυνατόν απαλλαγμένος από το σφάλμα του υποστρώματος.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 5.1

Θάλαμος "B": Ηλεκτρικός - ηλεκτρονικός πίνακας ελέγχου

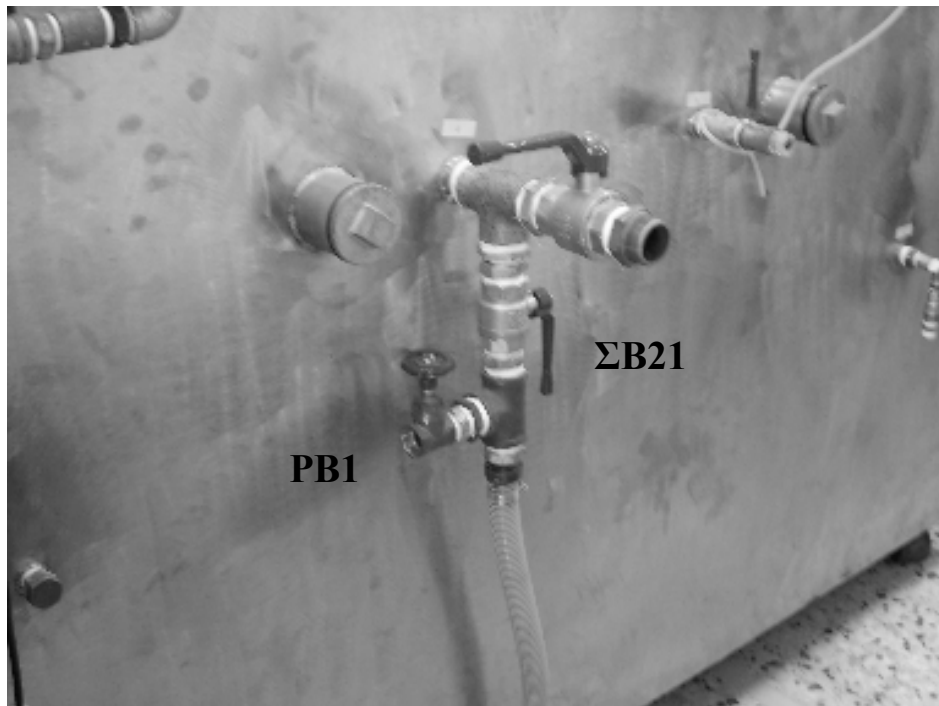


Διάγραμμα 5.2
Ελαστικό παρέμβυσμα στεγάνωσης θύρας θαλάμου "B"



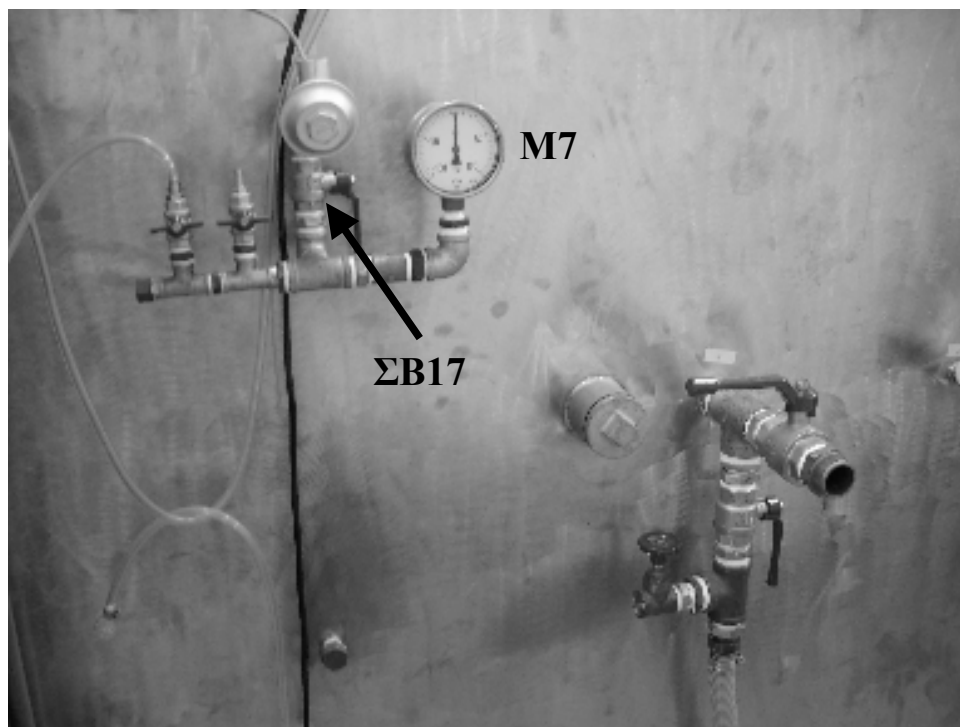
Διάγραμμα 5.3

**"Κοινός κλάδος" του κυκλώματος αερίων των θαλάμων "Α" και "Β":
λαβές στραμμένες "προς το παράθυρο"**



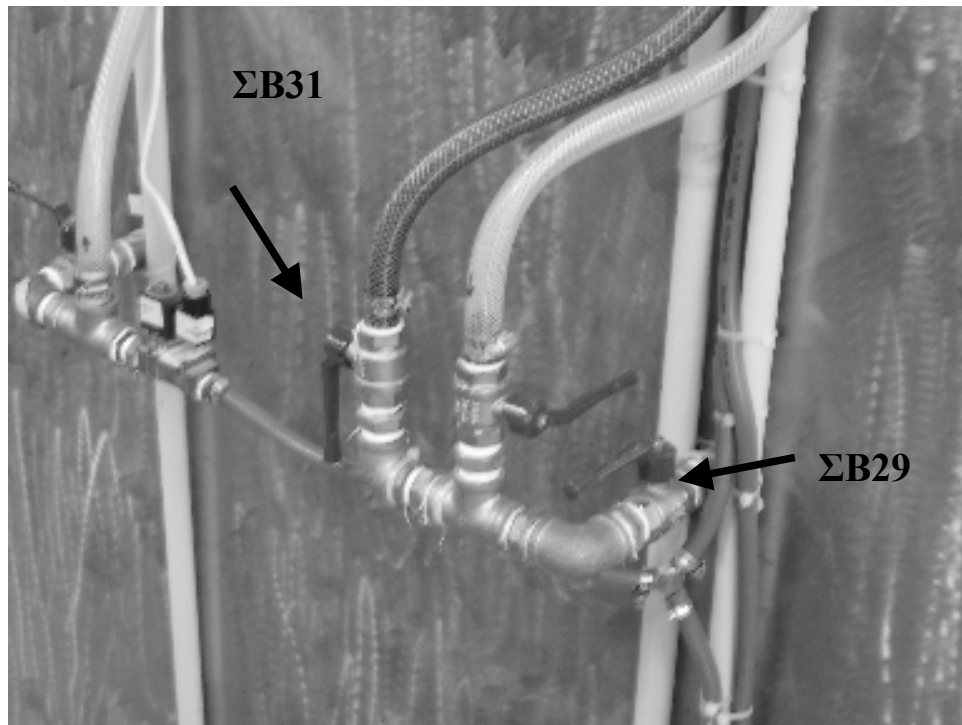
Διάγραμμα 5.4

Θάλαμος "B": Σφαιρική βαλβίδα ΣB21 και ρυθμιστική βαλβίδα PB1



Διάγραμμα 5.5

Θάλαμος "B": Σφαιρική βαλβίδα ΣB17 και μανόμετρο M7



Διάγραμμα 5.6

Θάλαμος "B": Σφαιρικές βαλβίδες ΣB29 και ΣB31

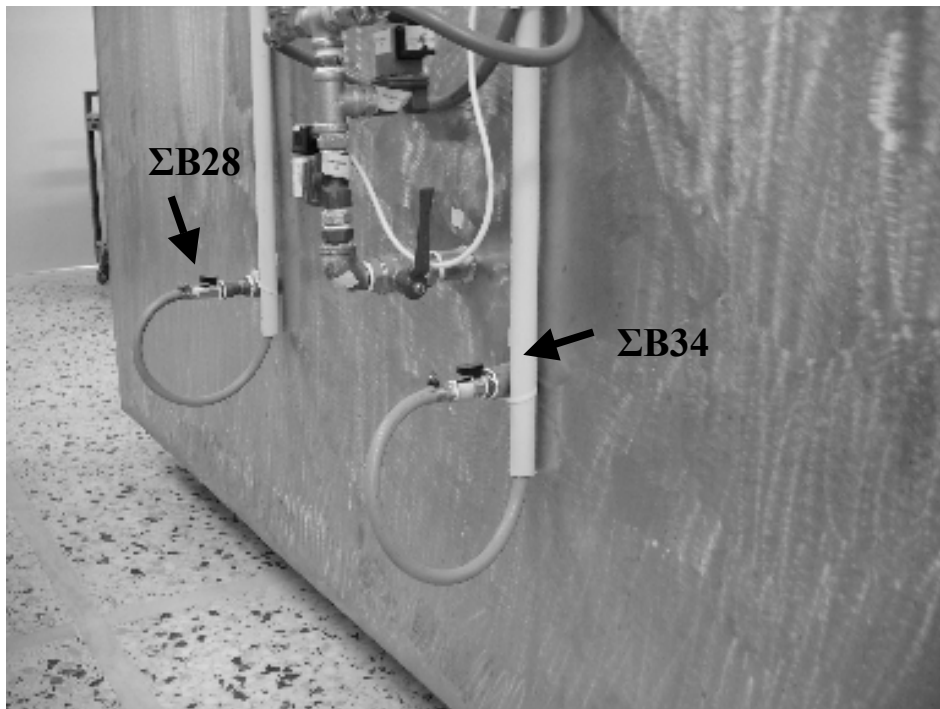


Διάγραμμα 5.7

Θάλαμος "B": Ακτινική αεραντλία



Διάγραμμα 5.8
Θάλαμος "B": Ανεμιστήρες



Διάγραμμα 5.9
Θάλαμος "B": Σφαιρικές βαλβίδες ΣB28 και ΣB34



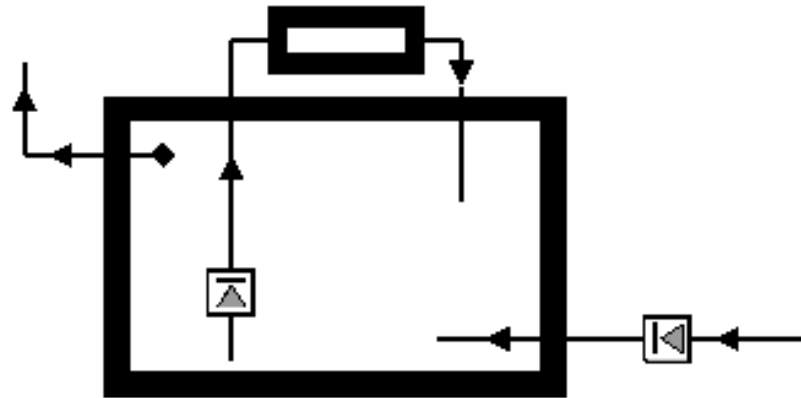
Διάγραμμα 5.10

Δοχείο πηγής "1": Σφαιρικές βαλβίδες CRS1 και CRS2



Διάγραμμα 5.11

Θάλαμος "B": Μικρή εσωτερική αεραντλία



Διάγραμμα 5.12

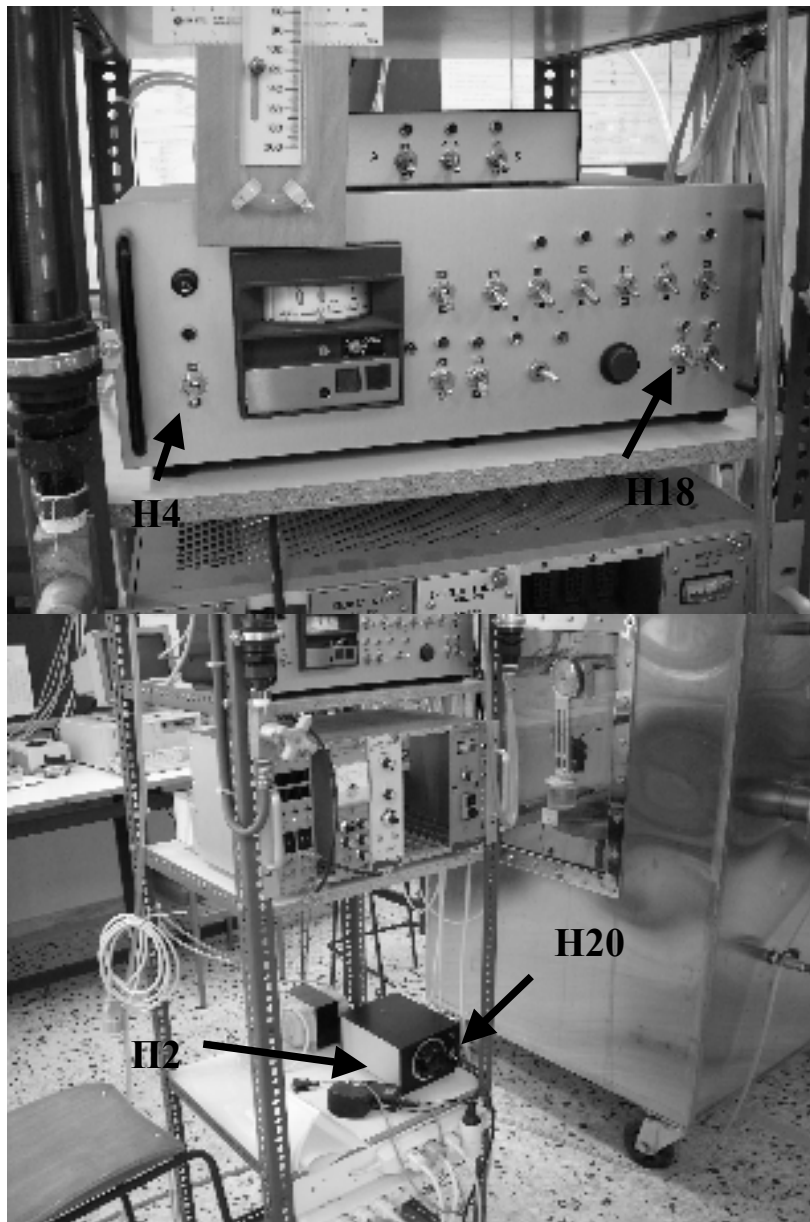
Θάλαμος "B", δοχείο πηγής "1":

Αρχή λειτουργίας κυκλωμάτων σε μονογραμμικό σκαρίφημα



Διάγραμμα 5.13

Θάλαμος "A": Ανοιχτά μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα



Διάγραμμα 5.14

Θάλαμος "Α": Ηλεκτρικός – ηλεκτρονικός πίνακας ελέγχου



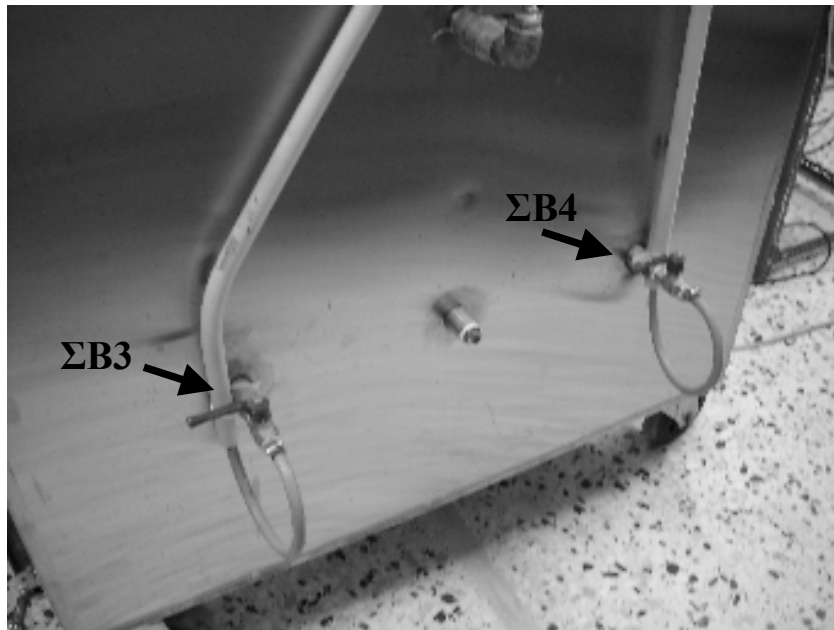
Διάγραμμα 5.15

**"Κοινός κλάδος" του κυκλώματος αερίων των θαλάμων "Α" και "Β":
λαβές στραμμένες "προς την πόρτα"**



Διάγραμμα 5.16

Θάλαμος "Α": Ανεμιστήρας



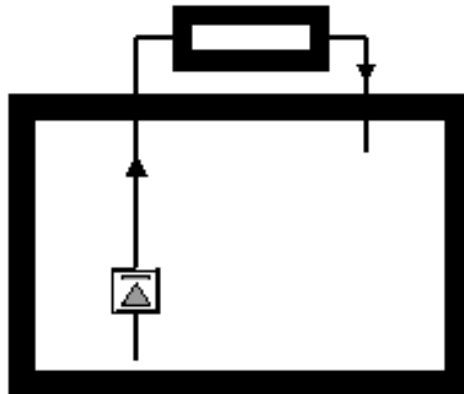
Διάγραμμα 5.17

Θάλαμος "Α": Σφαιρικές βαλβίδες ΣΒ3 και ΣΒ4



Διάγραμμα 5.18

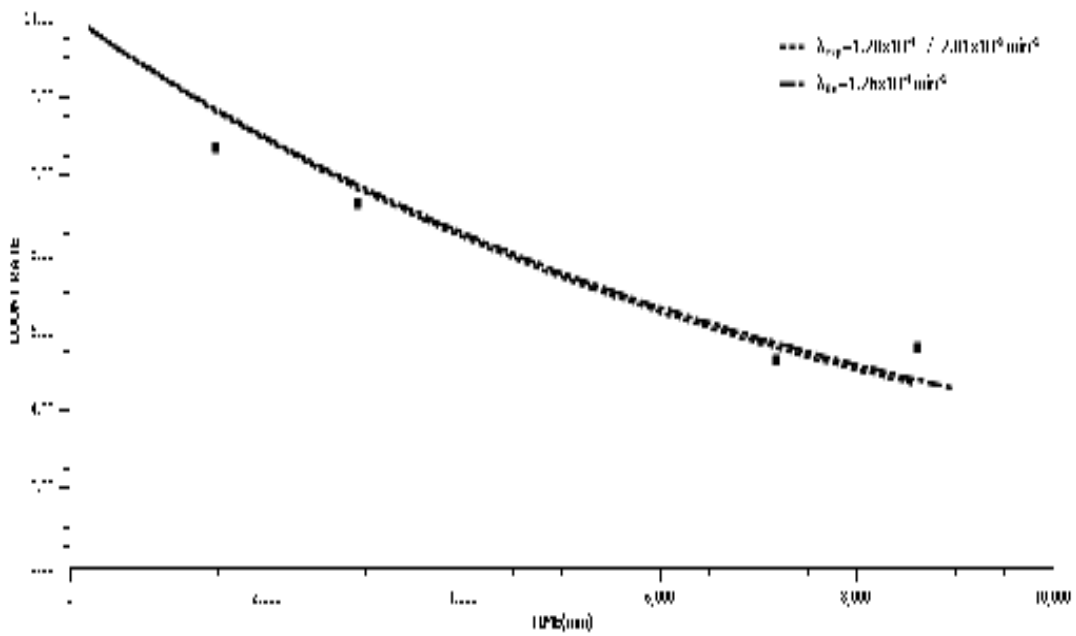
Θάλαμος "Α": Μικρή εσωτερική αεραντλία



Διάγραμμα 5.19

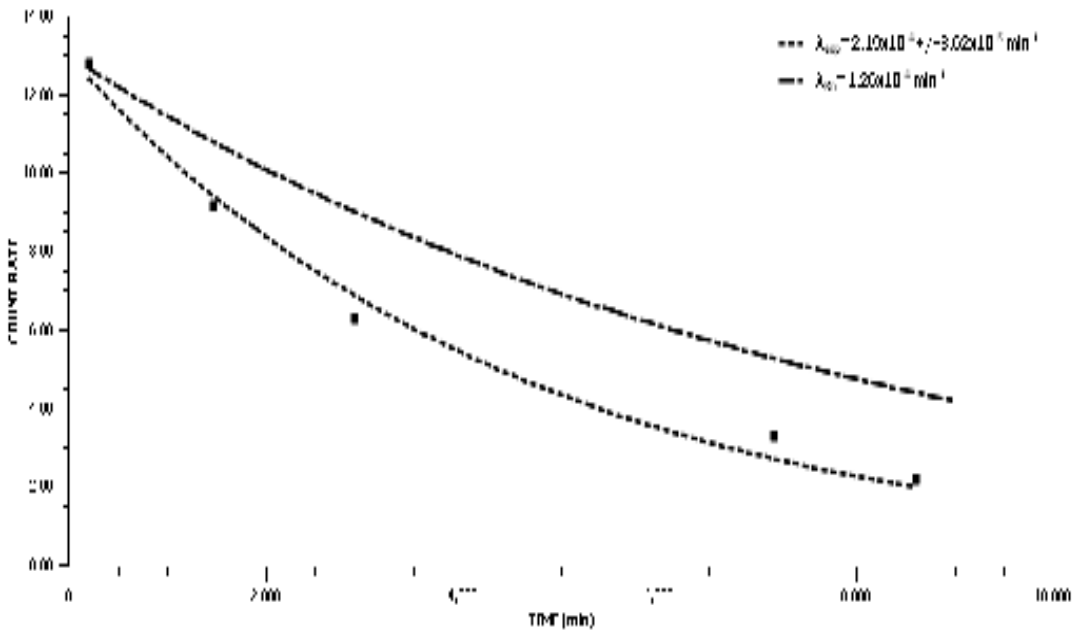
Θάλαμος "A", δοχείο πηγής "1":

Αρχή λειτουργίας κυκλωμάτων σε μονογραμμικό σκαρίφημα



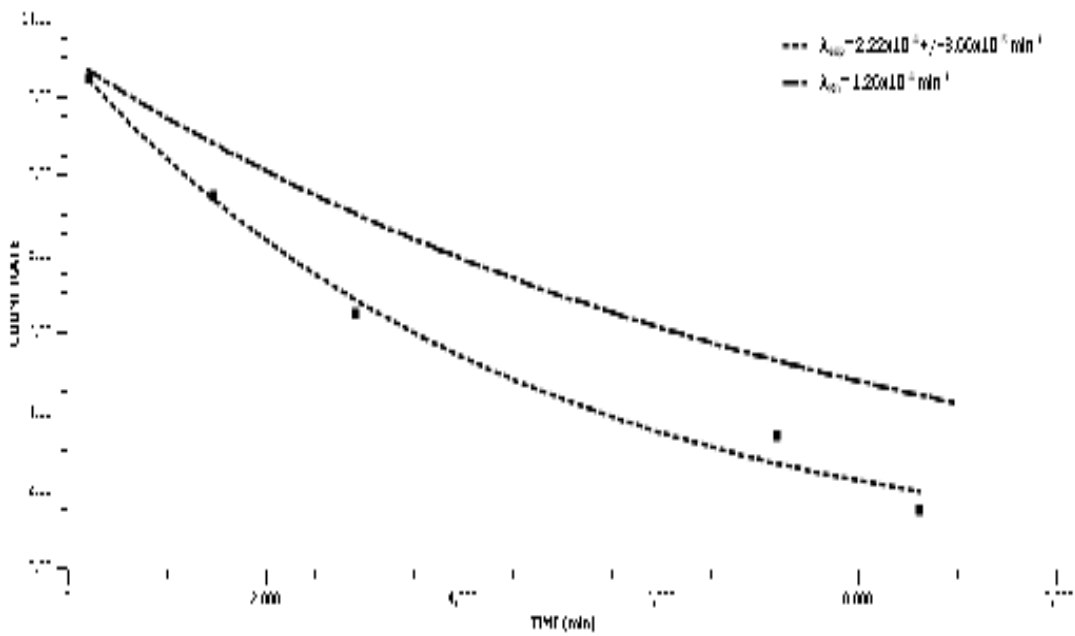
Διάγραμμα 5.20

Δοχείο 2 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



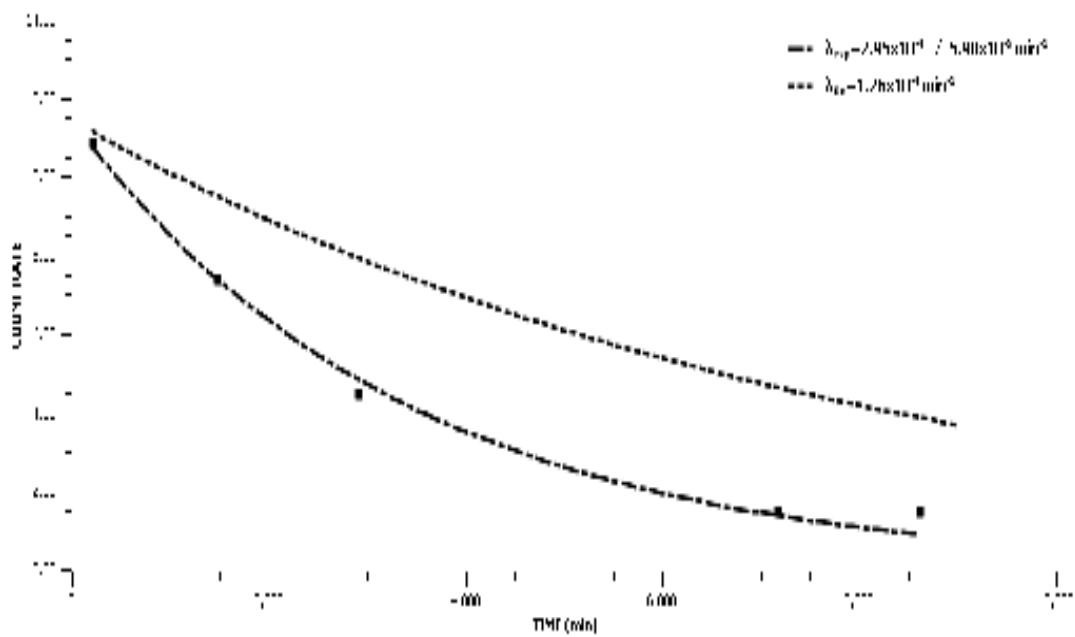
Διάγραμμα 5.21

Δοχείο 3 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



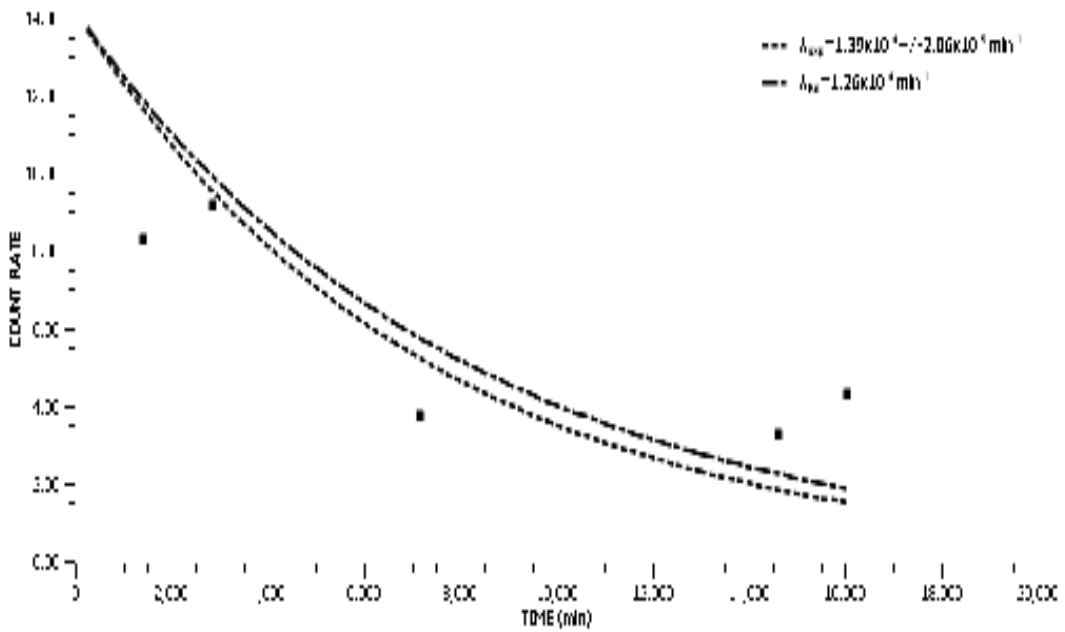
Διάγραμμα 5.22

Δοχείο 4 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



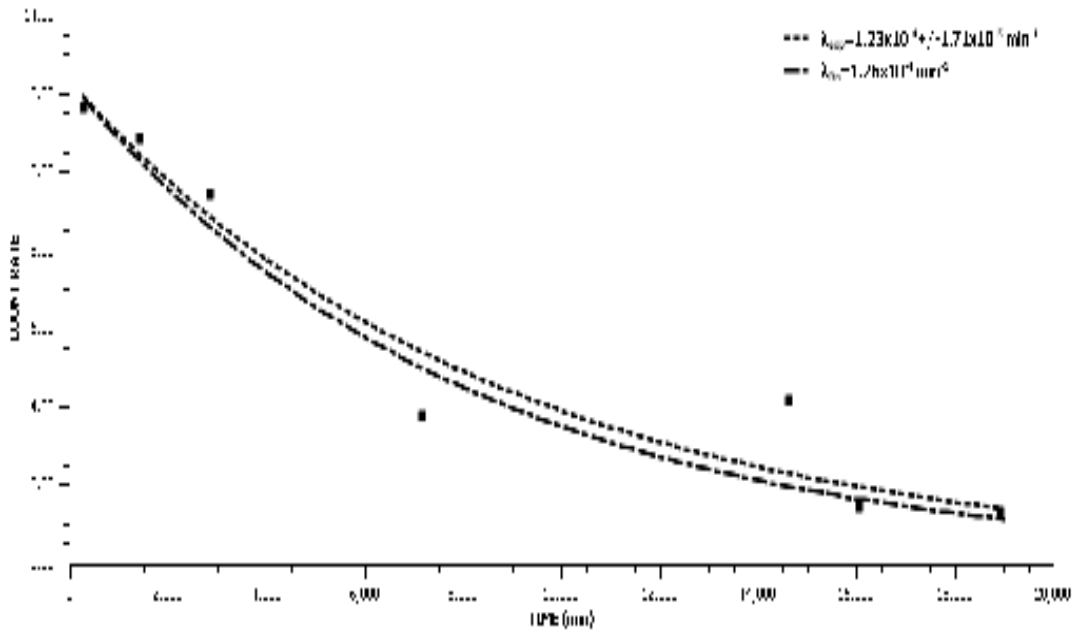
Διάγραμμα 5.23

Δοχείο 6 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



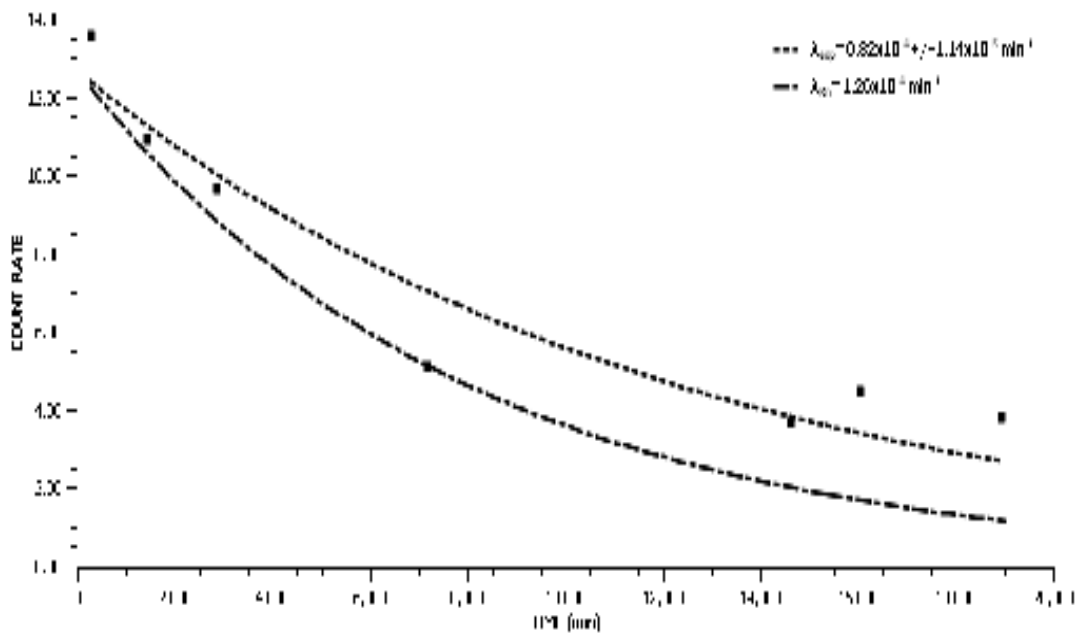
Διάγραμμα 5.24

Δοχείο 5 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



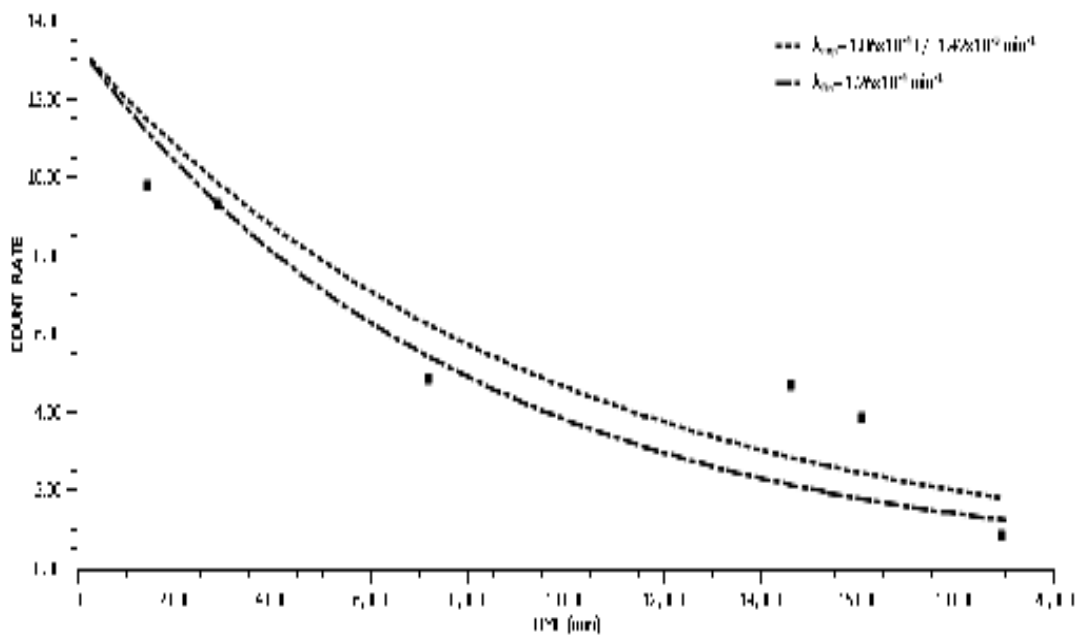
Διάγραμμα 5.25

Δοχείο 7 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



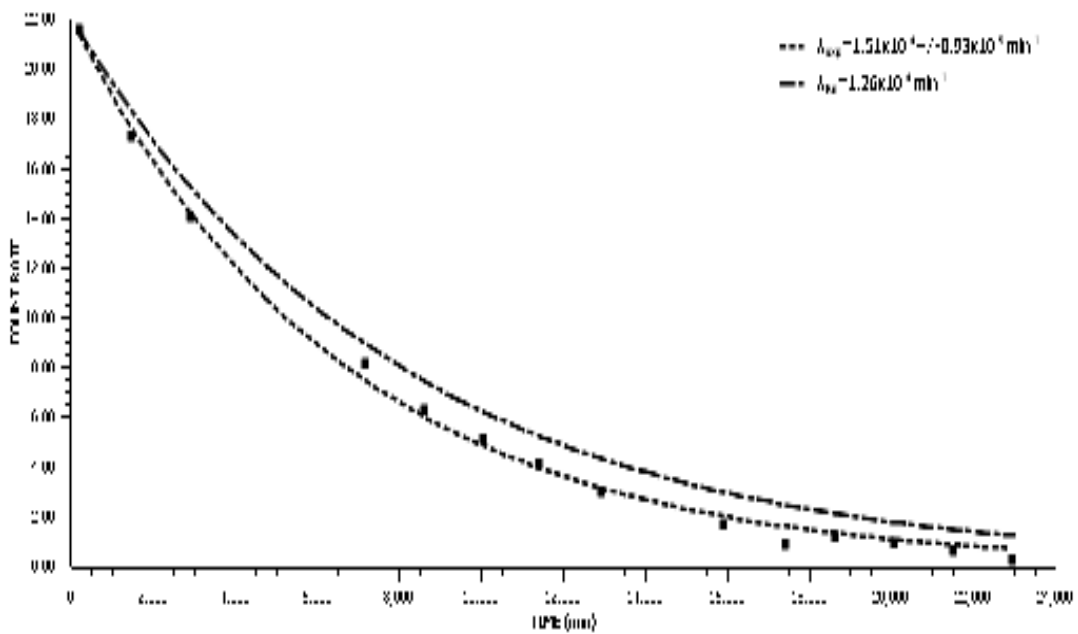
Διάγραμμα 5.26

Δοχείο 8 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



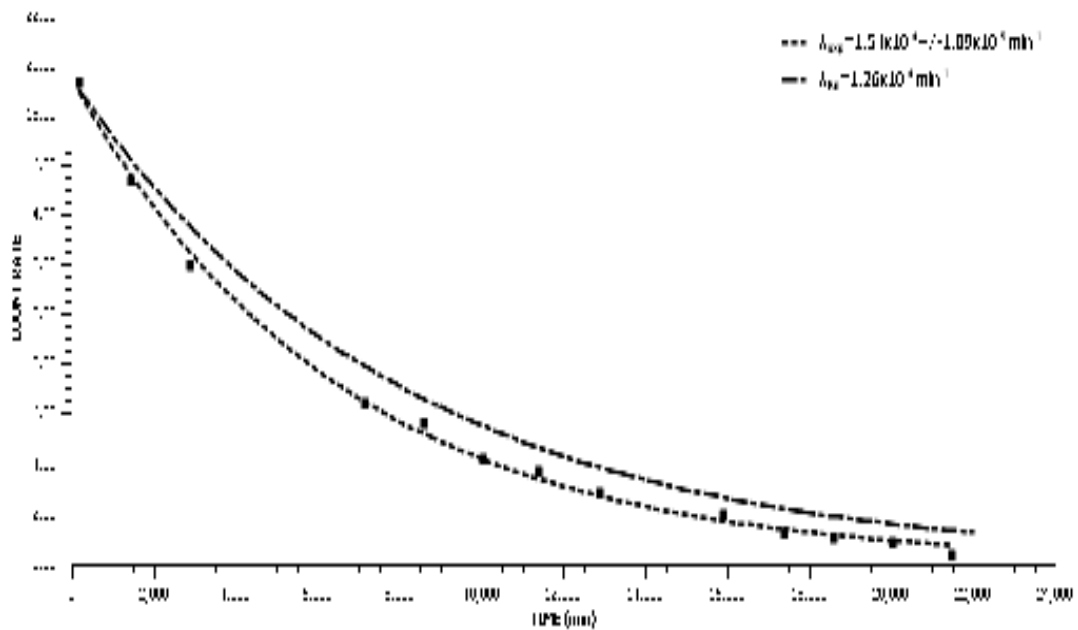
Διάγραμμα 5.27

Δοχείο 9 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός θωράκισης



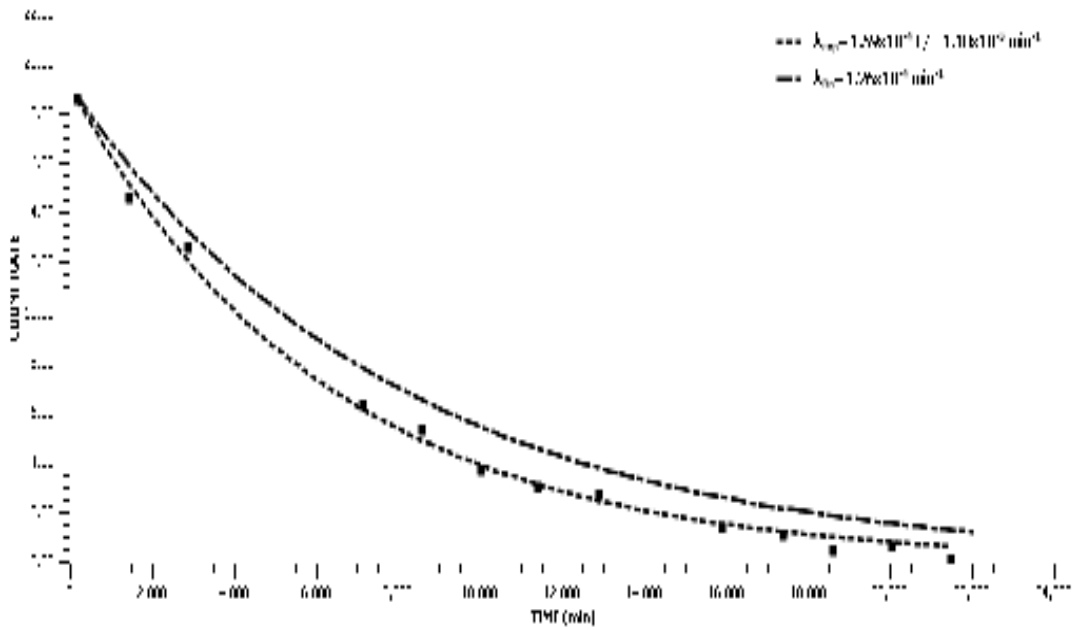
Διάγραμμα 5.28

Δοχείο 2 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



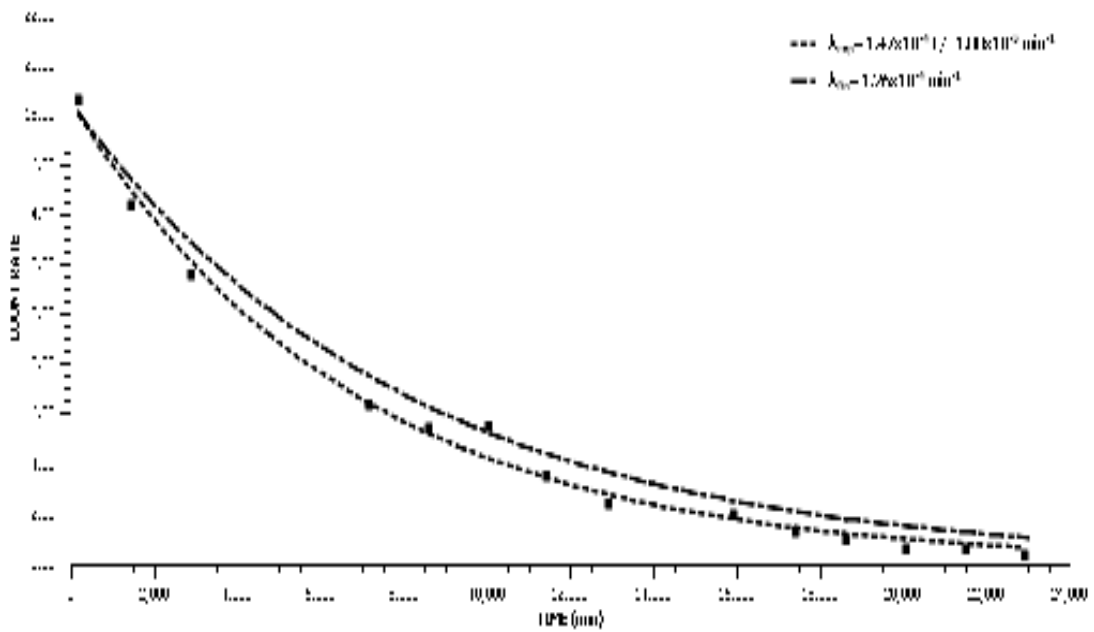
Διάγραμμα 5.29

Δοχείο 3 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



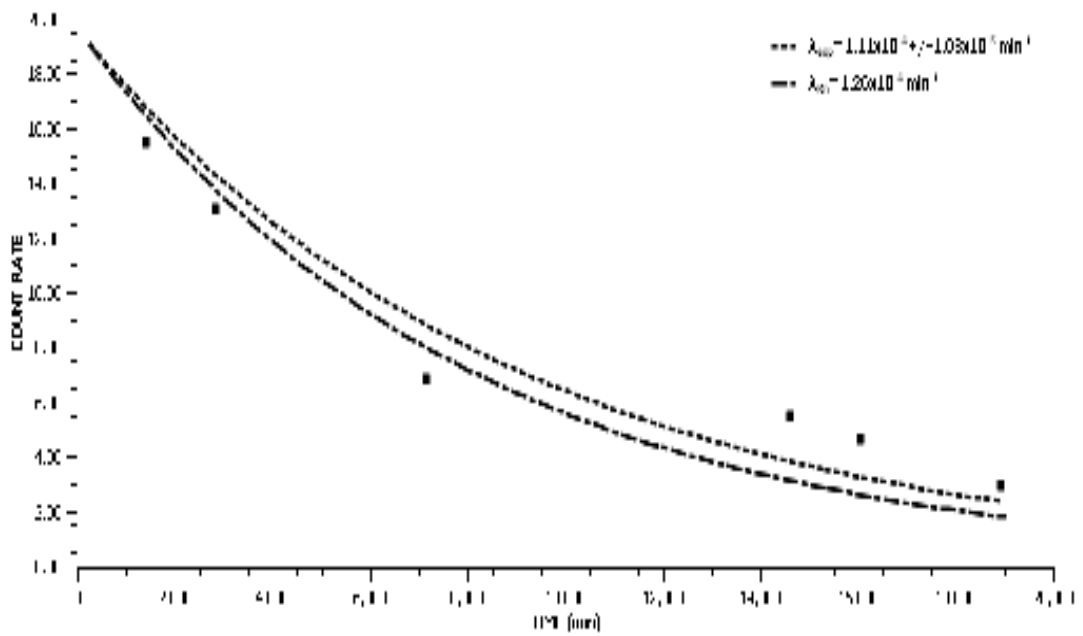
Διάγραμμα 5.30

Δοχείο 4 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



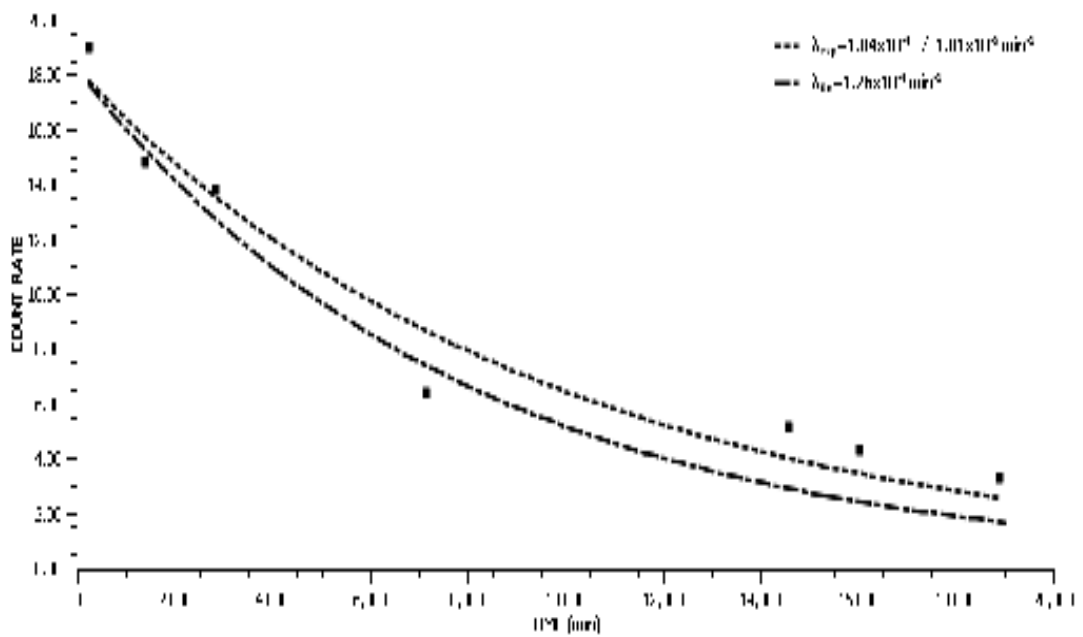
Διάγραμμα 5.31

Δοχείο 6 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



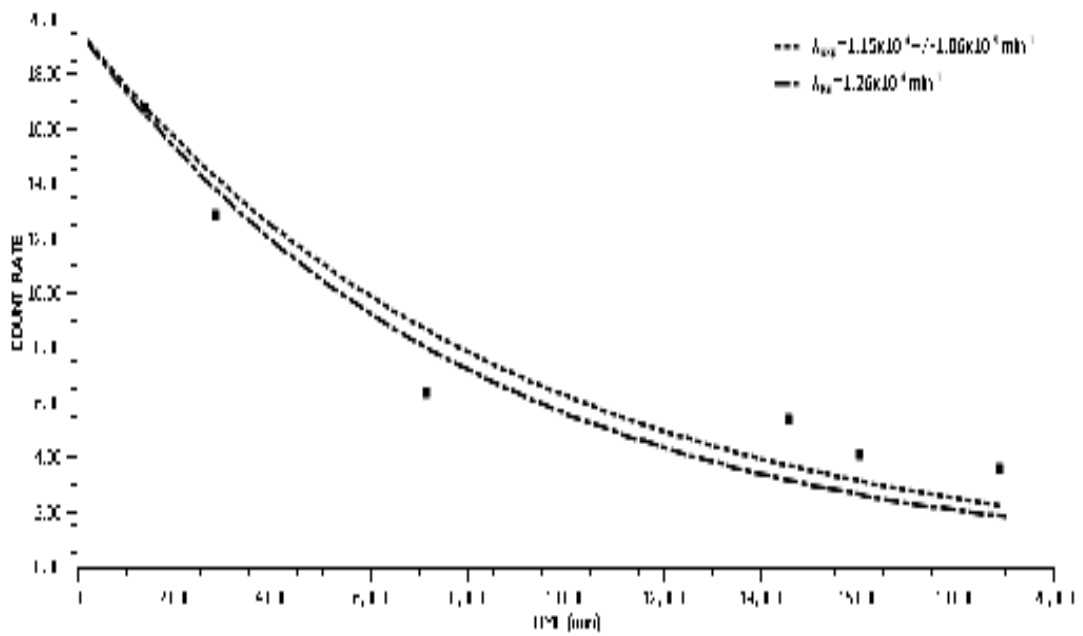
Διάγραμμα 5.32

Δοχείο 5 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



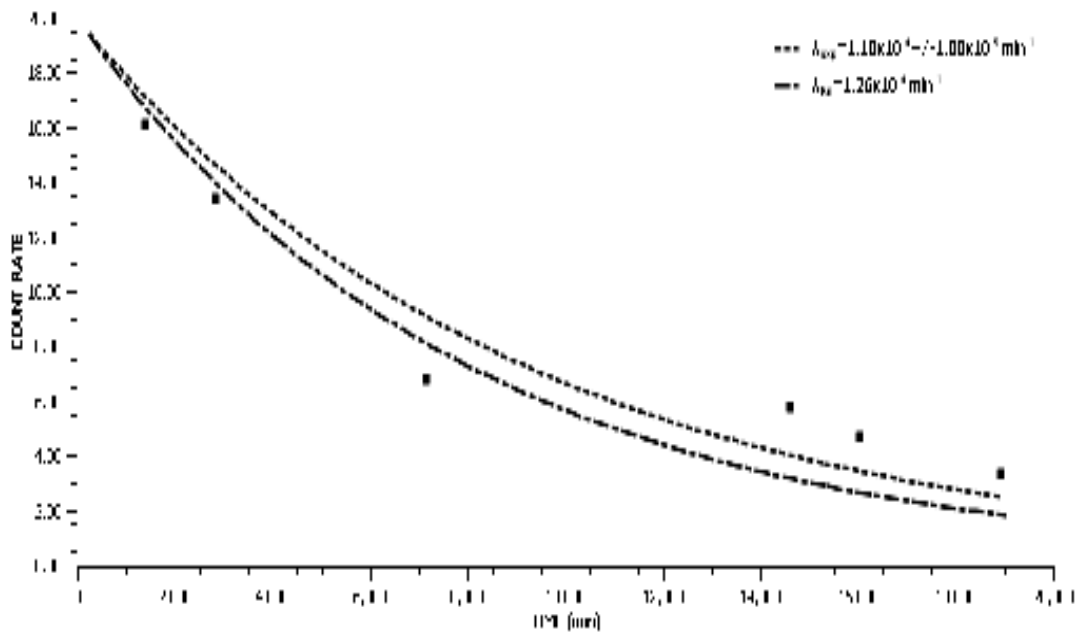
Διάγραμμα 5.33

Δοχείο 7 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



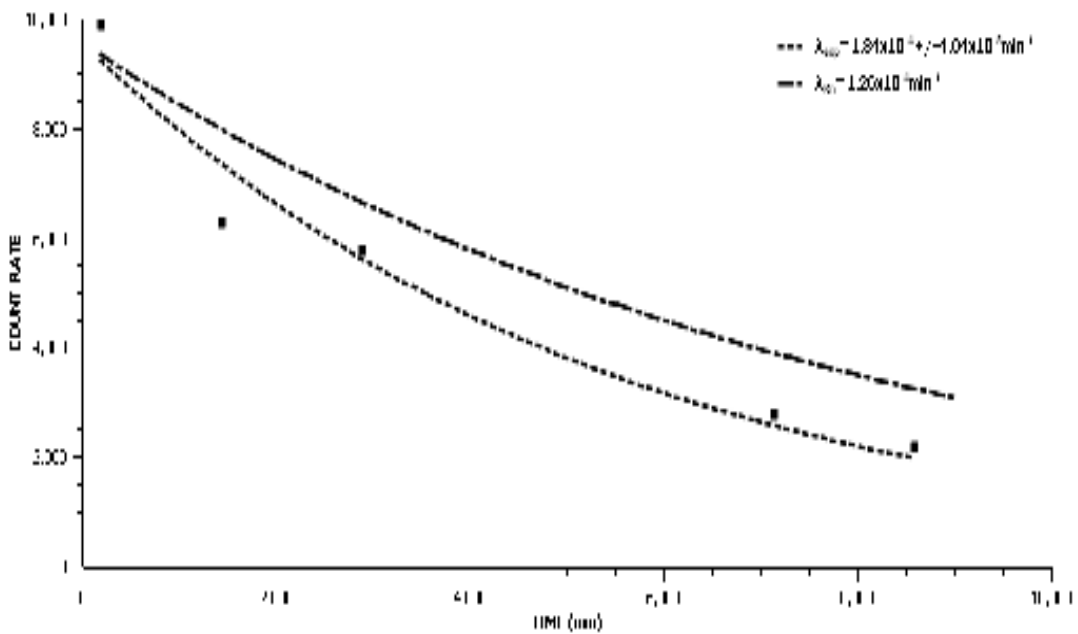
Διάγραμμα 5.34

Δοχείο 8 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



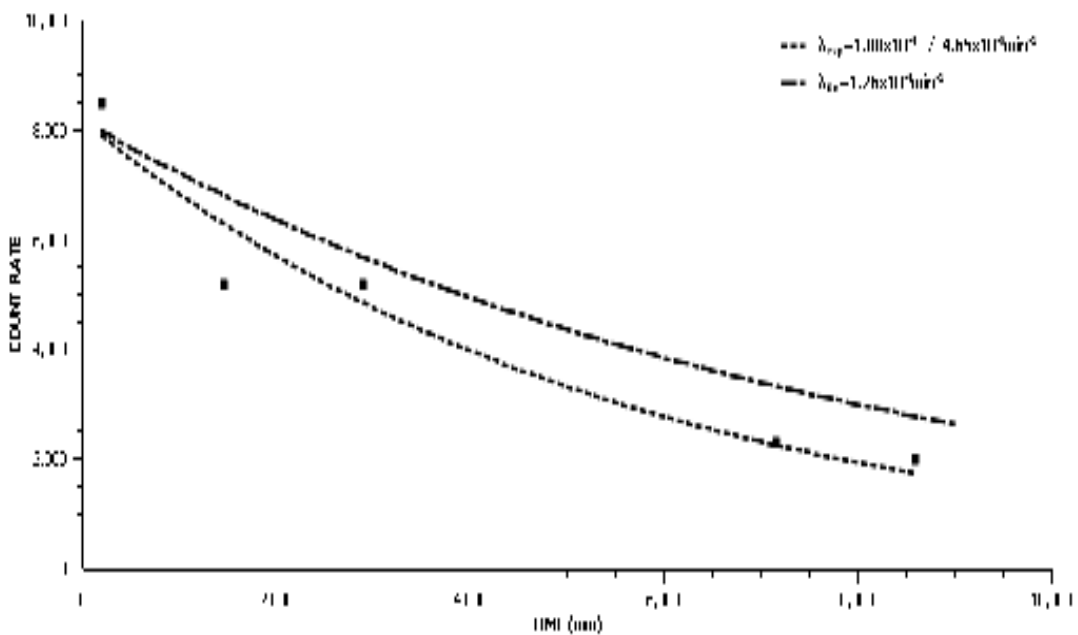
Διάγραμμα 5.35

Δοχείο 9 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός θωράκισης



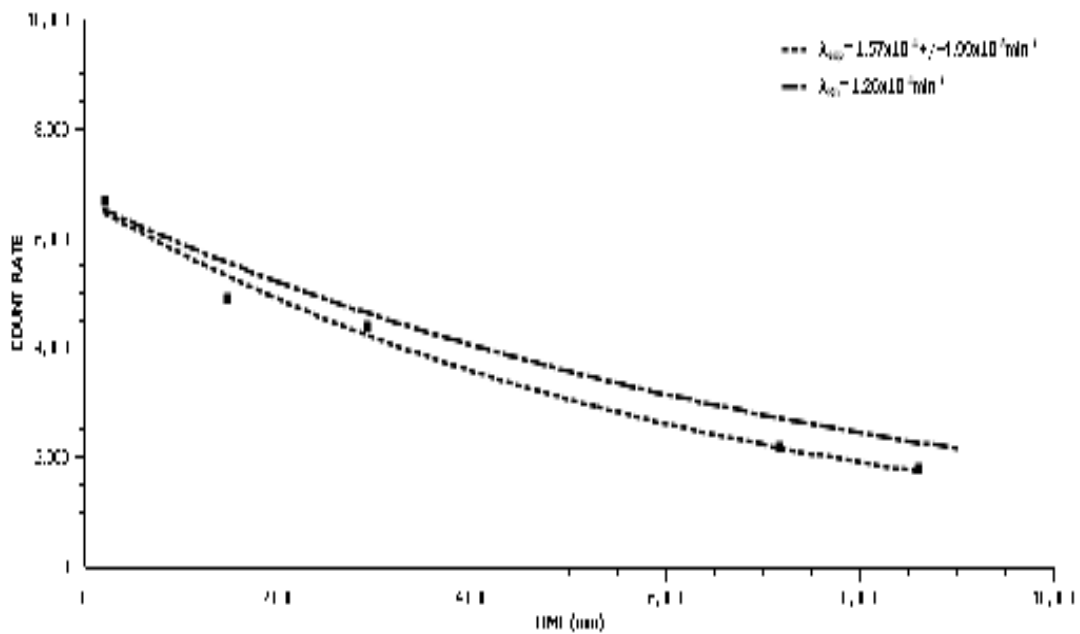
Διάγραμμα 5.36

Δοχείο 2 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



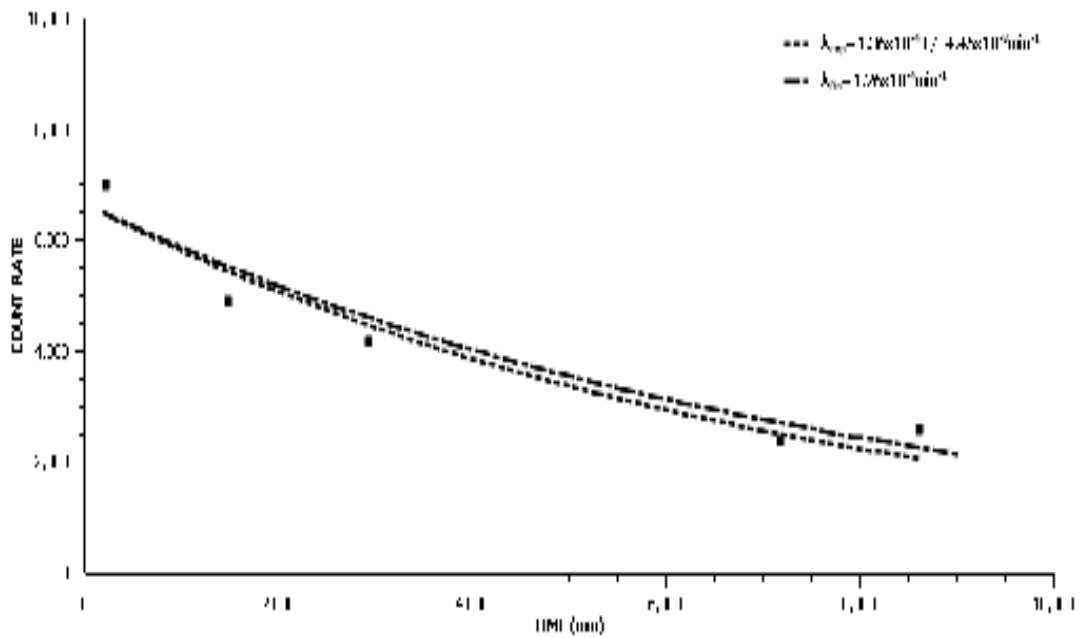
Διάγραμμα 5.37

Δοχείο 3 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



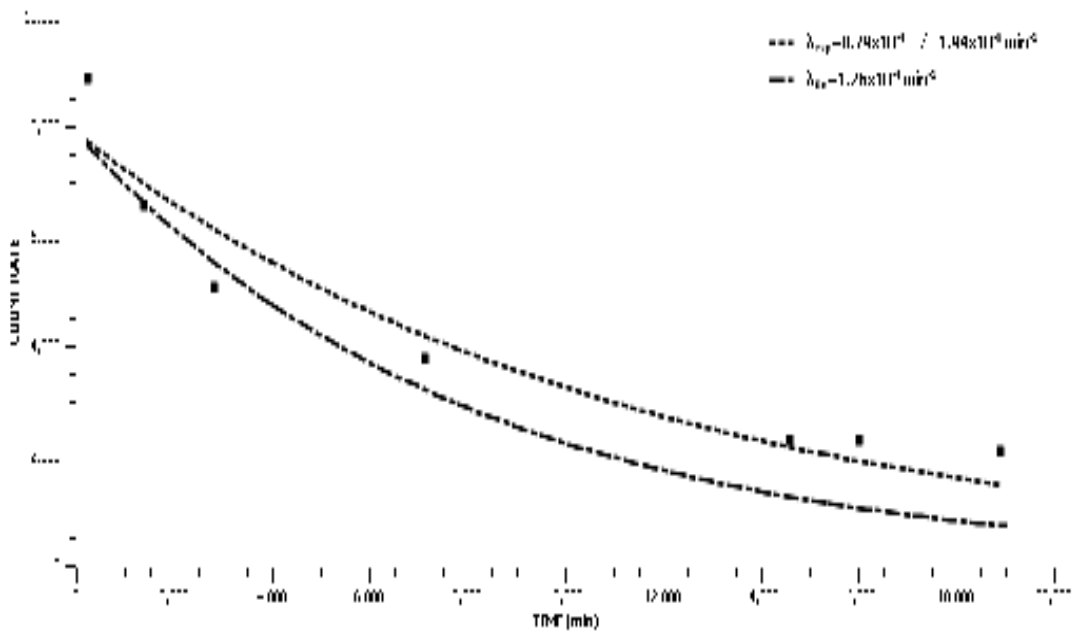
Διάγραμμα 5.38

Δοχείο 4 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



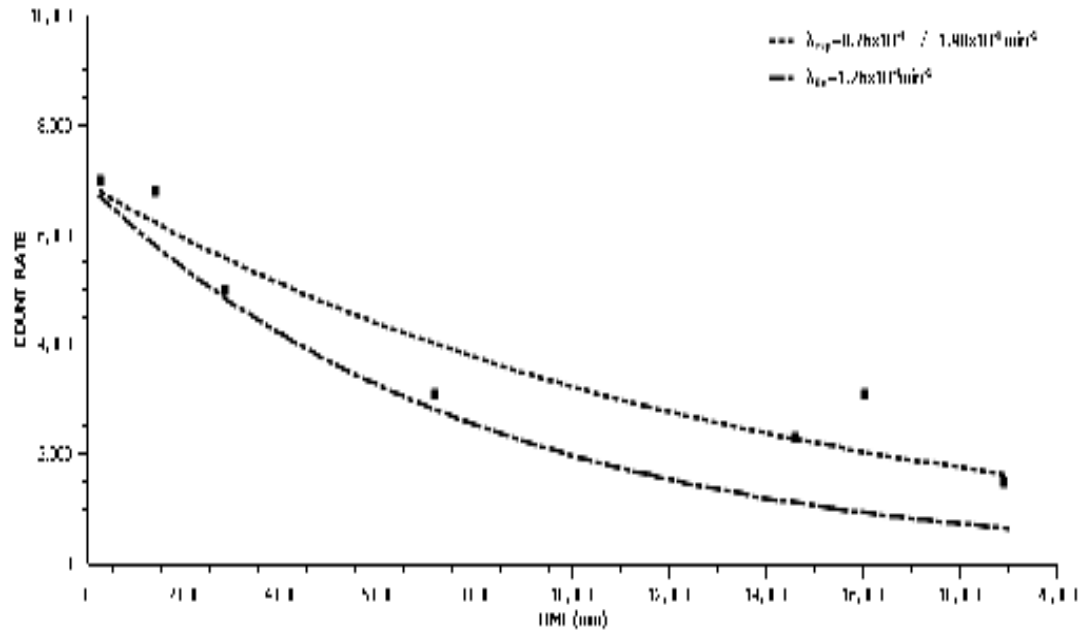
Διάγραμμα 5.39

Δοχείο 6 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



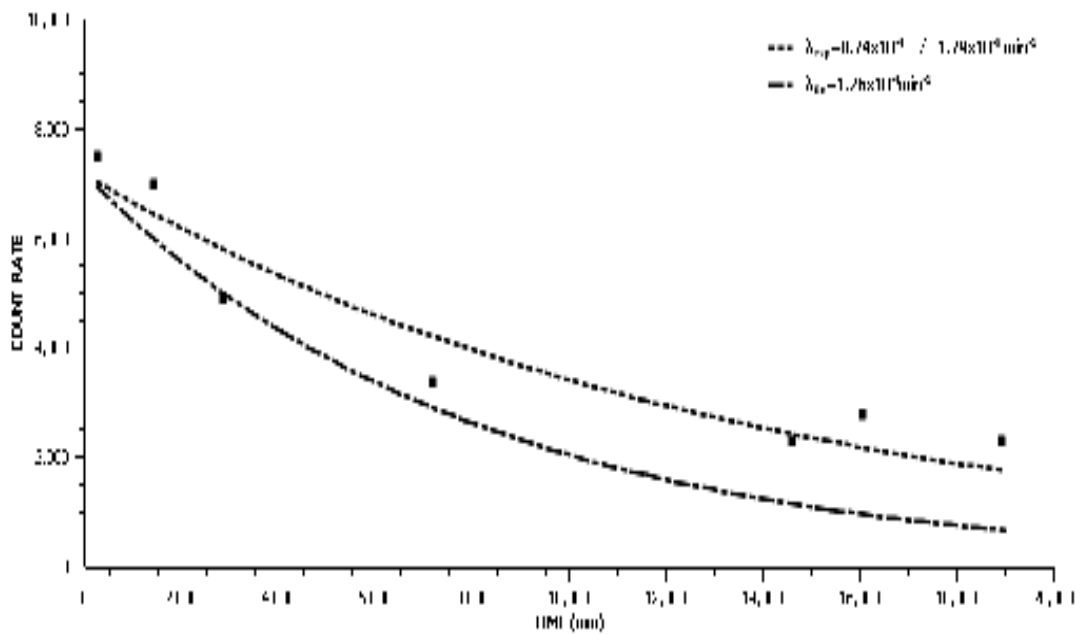
Διάγραμμα 5.40

Δοχείο 5 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



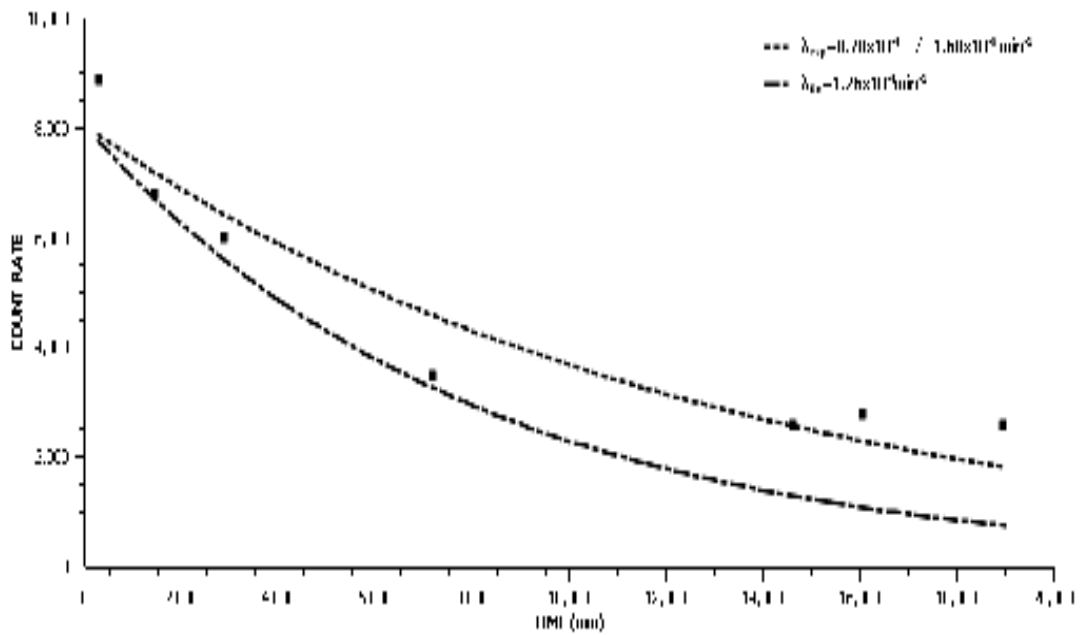
Διάγραμμα 5.41

Δοχείο 7 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



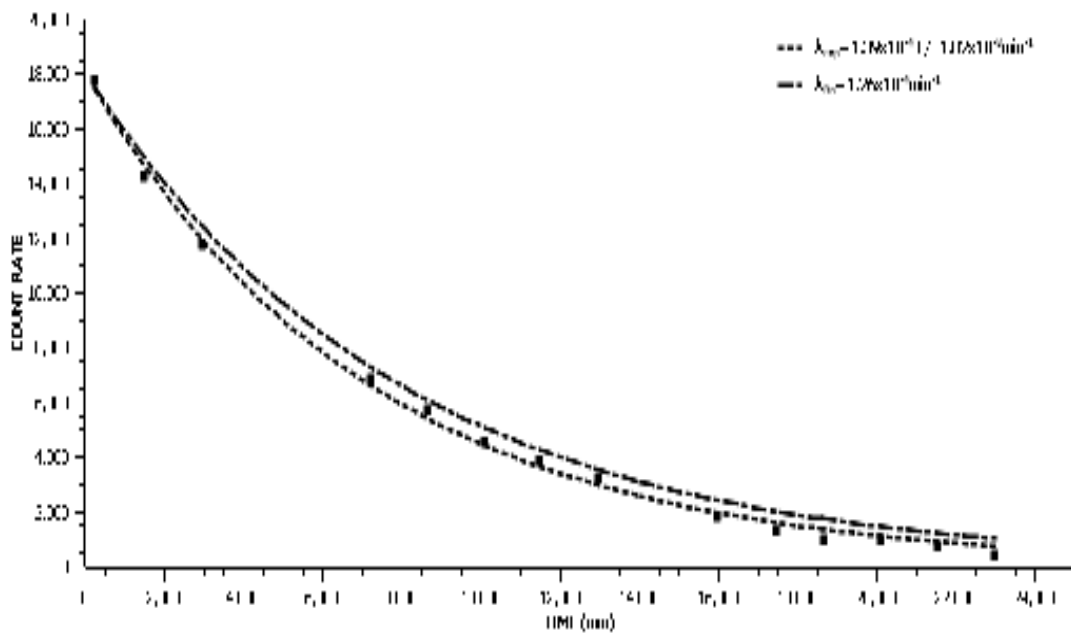
Διάγραμμα 5.42

Δοχείο 8 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



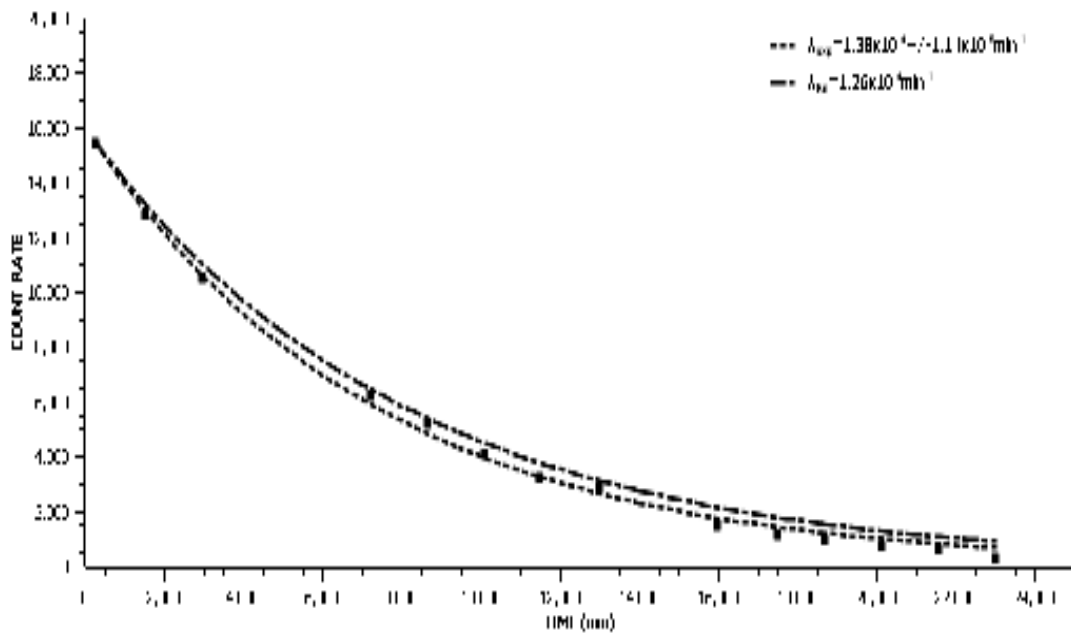
Διάγραμμα 5.43

Δοχείο 9 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός θωράκισης



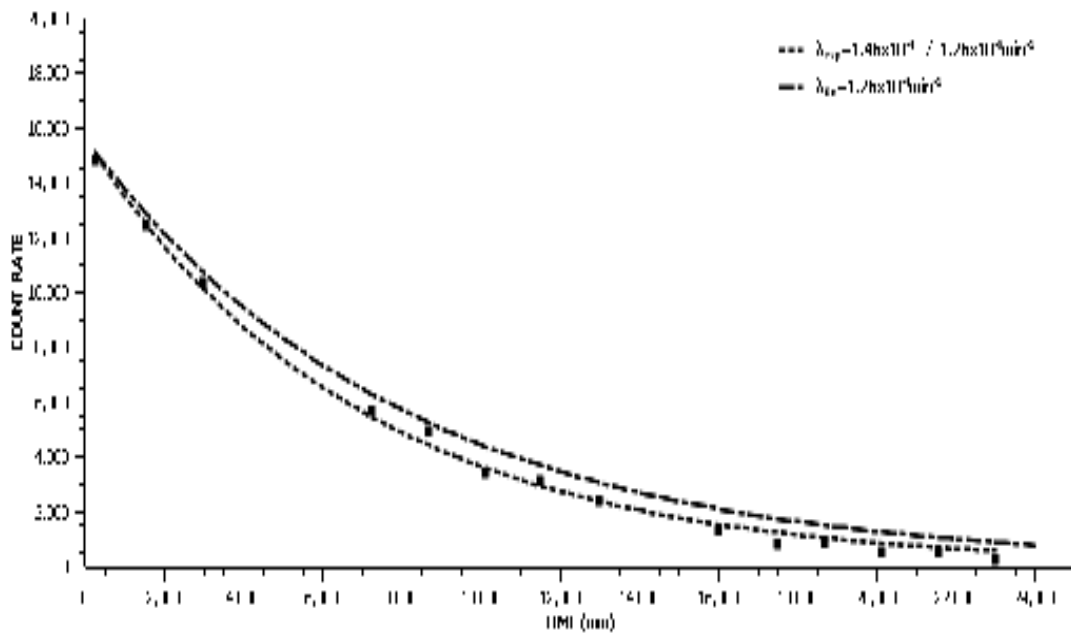
Διάγραμμα 5.44

Δοχείο 2 με παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



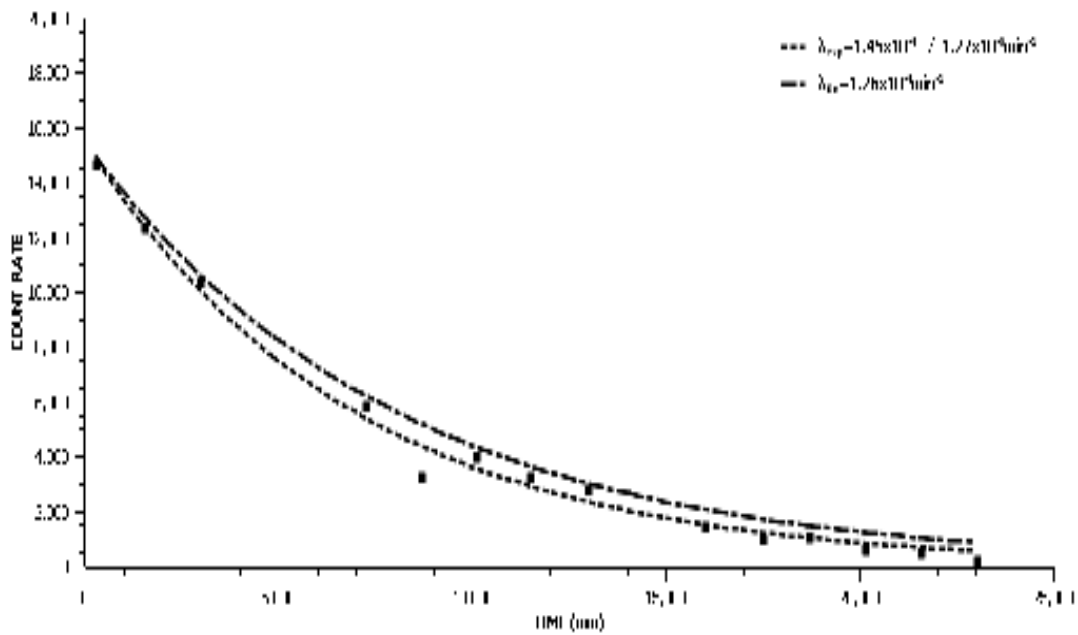
Διάγραμμα 5.45

Δοχείο 3 με παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



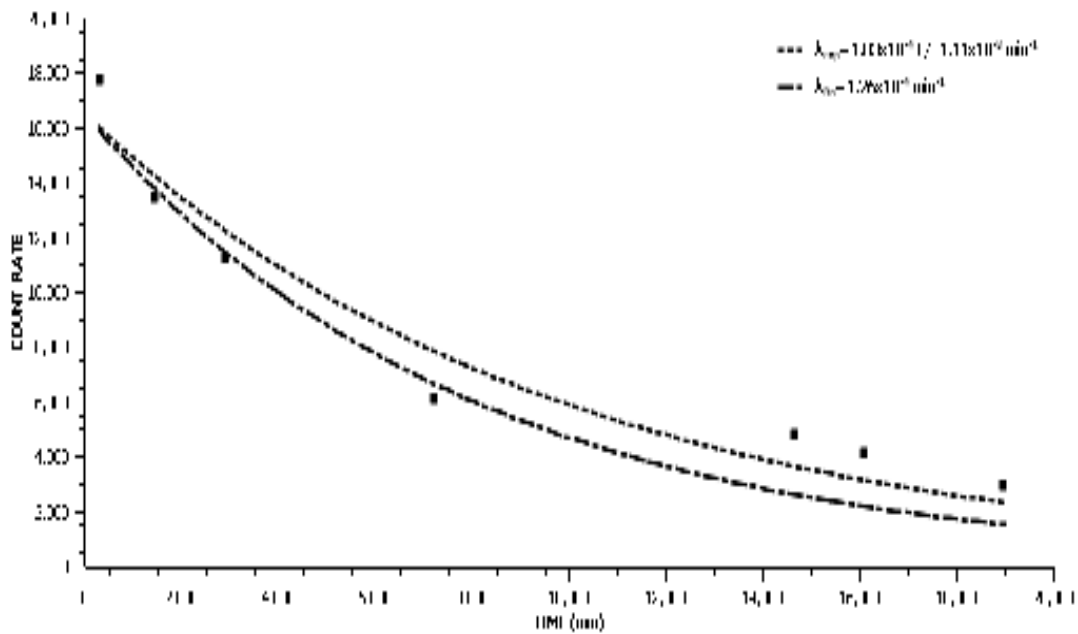
Διάγραμμα 5.46

Δοχείο 4 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



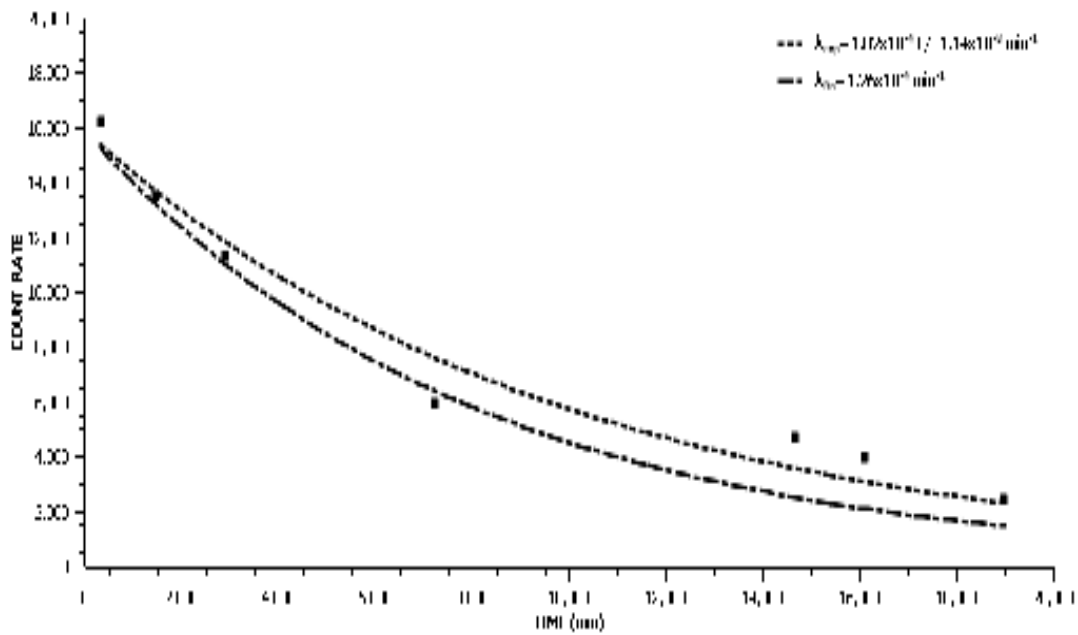
Διάγραμμα 5.47

Δοχείο 6 με παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



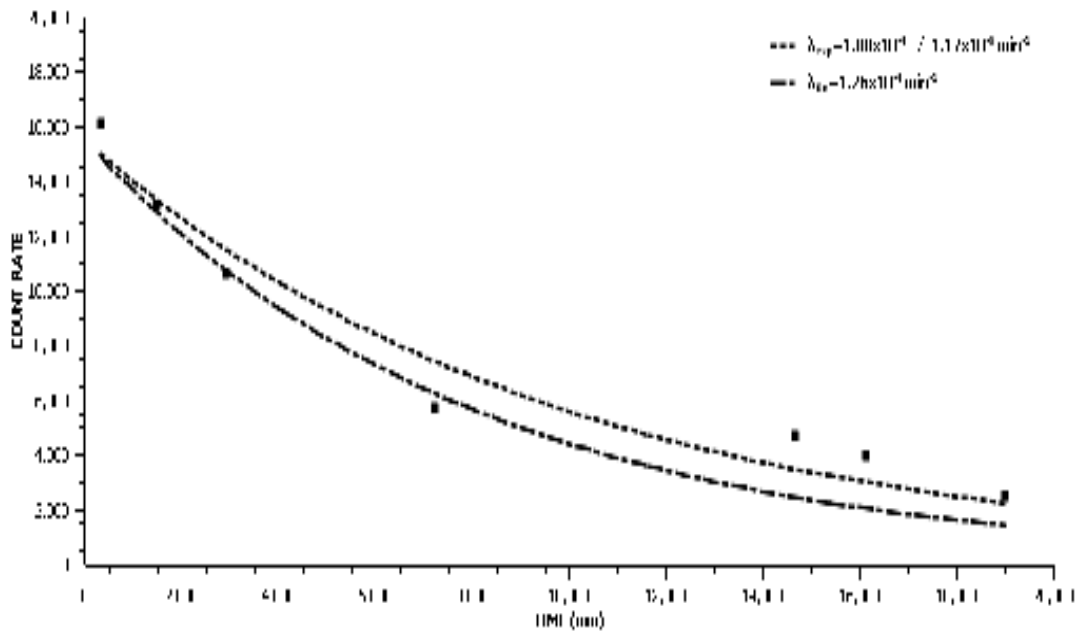
Διάγραμμα 5.48

Δοχείο 5 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



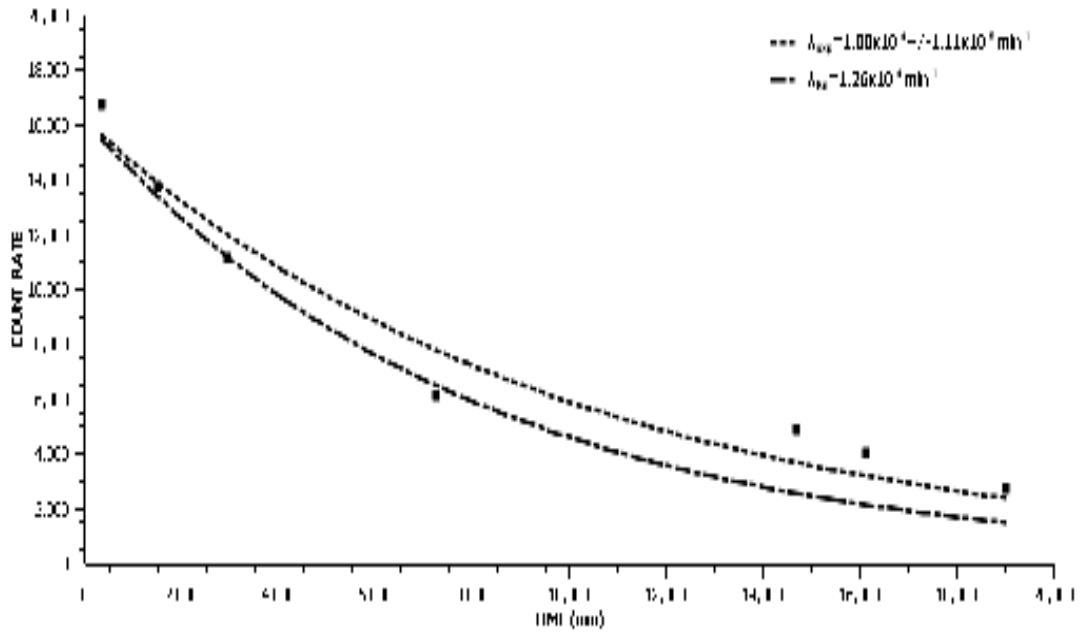
Διάγραμμα 5.49

Δοχείο 7 χωρίς παρέμβαση, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



Διάγραμμα 5.50

Δοχείο 8 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης



Διάγραμμα 5.51

Δοχείο 9 χωρίς παρέμβυσμα, μέτρηση με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός θωράκισης

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

NATURAL RADIONUCLIDES ANALYSIS REPORT						
of sample MS483A						
Remarks :						
Isotope	Energy (keV)	Activity	Bq/kg	pCi/gr		
Pb-210	46.52	5.15 +-	24.63 %	.139		
Pb-214A	295.22	23.28 +-	9.46 %	.629		
Pb-214B	351.99	22.18 +-	5.21 %	.600		
Pb-214	(W.Mean) :	22.42 +-	4.56 %	.606		
Bi-214A	609.32	20.12 +-	5.49 %	.544		
Bi-214B	1120.28	20.89 +-	16.48 %	.565		
Bi-214C	1764.51	24.14 +-	14.04 %	.652		
Bi-214	(W.Mean) :	20.54 +-	4.89 %	.555		
Ra-226	(W.Mean) :	21.5 +-	3.34 %	.580		
Ra-226	186.25					
Th-234	63.29	14.03 +-	17.48 %	.379		
U-238 E	185.99	-6.51 +-	15.13 %	-.176		
U-238 C	185.99					
U-235	185.72					
U-238 L						
Ac-228A	338.40	11.77 +-	23.51 %	.318		
Ac-228B	911.07	12.02 +-	12.70 %	.325		
Ra-228	(W.Mean) :	11.96 +-	11.18 %	.323		
Pb-212B	238.63	9.95 +-	7.80 %	.269		
Tl-208A	583.14	9.22 +-	10.55 %	.249		
Th-228	(W.Mean) :	9.67 +-	6.27 %	.261		
Th-232	(W.Mean) :	10.1 +-	5.49 %	.272		
K-40	1460.75	6.09 +-	20.72 %	.165		

Πίνακας 5.1

Ανάλυση συγκέντρωσης Ραδίου-226 και άλλων φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων στην ιπτάμενη τέφρα MS483A

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	ΔΙΑΦΟΡΑ (%)
<i>2 VICT IN</i>	19246	19805	-3
<i>3 VICT IN</i>	17108	17575	-3
<i>4 VICT IN</i>	16448	17157	-4
<i>6 VICT IN</i>	16287	16976	-4
<i>5 VICT IN</i>	19007	18108	+5
<i>7 VICT IN</i>	18344	17422	+5
<i>8 VICT IN</i>	17899	17008	+5
<i>9 VICT IN</i>	18708	17736	+5
<i>2 VICT OUT</i>	9265	1494	-12
<i>3 VICT OUT</i>	7974	8963	-11
<i>4 VICT OUT</i>	6854	7328	-6
<i>6 VICT OUT</i>	7131	7294	-2
<i>5 VICT OUT</i>	9365	8647	+8
<i>7 VICT OUT</i>	8428	7578	+11
<i>8 VICT OUT</i>	8770	7850	+12
<i>9 VICT OUT</i>	9763	8818	+11
<i>2 CAN IN</i>	22937	24187	-5
<i>3 CAN IN</i>	20104	21321	-6
<i>4 CAN IN</i>	19484	20926	-7
<i>6 CAN IN</i>	19395	20321	-5
<i>5 CAN IN</i>	22209	21551	+3
<i>7 CAN IN</i>	20924	19947	+5
<i>8 CAN IN</i>	22125	21583	+2
<i>9 CAN IN</i>	22664	21891	+4
<i>2 CAN OUT</i>	15348	15443	-1
<i>3 CAN OUT</i>	11672	14246	-18
<i>4 CAN OUT</i>	11640	14268	-18
<i>6 CAN OUT</i>	8761	12554	-30
<i>5 CAN OUT</i>	15120	15564	-3
<i>7 CAN OUT</i>	13809	13488	+2
<i>8 CAN OUT</i>	15272	13895	+10
<i>9 CAN OUT</i>	15294	14664	+4

Πίνακας 5.2

Σύγκριση επιφανειών κάτω από τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη εκθετικής απομείωσης του Ραδονίου για το διάστημα 24 έως 48 h από την έξοδο από τον θάλαμο με βάση τα Διαγράμματα 5.20 έως 5.51.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ:

**v = 2, 3, 4, 6 δοχεία με παρέμβυσμα
v = 5, 7, 8, 9 δοχεία χωρίς παρέμβυσμα
VICT: ανιχνευτής VICTOREEN
CAN: ανιχνευτής CANBERRA – EURISYS
IN: εντός θωράκισης
OUT: εκτός θωράκισης**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

6.1 Εισαγωγή

Τα πειράματα βαθμονόμησης των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, ως μέθοδος μέτρησης της συγκέντρωσης του Ραδονίου που επικρατεί στον ατμοσφαιρικό αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου, πραγματοποιήθηκαν με βάση το σχετικό πρωτόκολλο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο 5^ο Κεφάλαιο. Ο προφανής στόχος των πειραμάτων είναι ο προσδιορισμός δύο μεγεθών: του συντελεστή βαθμονόμησης CF και του κατώτατου ορίου ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου (σε $Bq\ m^{-3}$) LLD . Όπως είναι φανερό από τα όσα έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα Κεφάλαια, με τη χρήση του συντελεστή CF , του χρόνου έκθεσης T_s και ορισμένων άλλων δεδομένων ή εύκολα μετρήσιμων ποσοτήτων είναι δυνατόν να εκτιμάται η κατά μέσο όρο συγκέντρωση του Ραδονίου για το υπόψιν χρόνο έκθεσης σε ένα χώρο. Τα πειράματα σε ό,τι αφορά την έκθεση και την ωρίμανση σχεδιάστηκαν για να καλύψουν τις περισσότερες περιπτώσεις μετρήσεων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα στο κάλυμμα, μεταλλικά δοχεία χωρίς παρέμβυσμα στο κάλυμμα, έγιναν εκθέσεις 24 h και 48 h και κατασκευάστηκαν διάφορες βαθμονομημένες συγκεντρώσεις Ραδονίου στην περιοχή 1 – 3 $kBq\ m^{-3}$. Στο σύνολό τους έγιναν στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5 και είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες του Εργαστηρίου. Για αυτές θεωρείται με ασφάλεια, ότι η υγρασία στον θάλαμο έκθεσης είναι στα επίπεδα 35 – 65% και η θερμοκρασία στα επίπεδα 23 – 27^ο C, δηλ. από την άποψη των συνθηκών υγρασίας, στα επίπεδα συνθηκών των πειραμάτων του George (1984) ή στα επίπεδα των συνθηκών "μεσαίας" υγρασίας των πειραμάτων του Gray (1987). Σε ό,τι αφορά τη μέτρηση των δοχείων, φυσικά διακρίνονται, όπως σημειώθηκε και στο 5^ο Κεφάλαιο οι ακόλουθες τέσσερις μέθοδοι μέτρησης:

- (α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης
- (β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης
- (γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

6.2 Συντελεστής βαθμονόμησης

Σημειώθηκε στο 2^ο και το 3^ο Κεφάλαιο ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση (2.1) και (3.1):

$$CF = \frac{N}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot Rn} \quad (6.1)$$

όπου:

N ο καθαρός ρυθμός μετρούμενων φωτονίων στον ανιχνευτή σε CPM

E ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή για τη γεωμετρία των δοχείων σε CPMpCi⁻¹

T_s ο χρόνος έκθεσης σε min

Rn η συγκέντρωση του Ραδονίου κατά την έκθεση σε pCiL⁻¹

DF συντελεστής διόρθωσης ίσος με το κλάσμα του Ραδονίου που έχει διασπασθεί μετρώντας το χρόνο t σε min, από τη μέση του χρονικού διαστήματος έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης

Με βάση τα παραπάνω ο συντελεστής βαθμονόμησης (CF) προκύπτει σε Lmin⁻¹.

Σχετικά, με τον συντελεστή DF μπορεί να σημειωθεί ότι δίνεται από τη σχέση:

$$DF = e^{-\lambda t} \quad (6.2)$$

όπου:

λ η σταθερή διασπάσεως του Ραδονίου σε min⁻¹

Εφόσον είναι γνωστό ότι ο χρόνος ημιζωής του Ραδονίου είναι ίσος με:

$$T_{1/2} = 5501 \text{ min}$$

τότε υπολογίζεται ότι η σταθερή διασπάσεως του Ραδονίου είναι ίση με:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{5501} = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$$

Παρόλαυτά στο πρωτόκολλο βαθμονόμησης που εφαρμόζεται εδώ, παρατηρούνται οι ακόλουθες κύριες διαφορές:

- Η μονάδα ραδιενέργειας είναι το Bq,

- Η μονάδα όγκου είναι το m^3 , και
- Ο βαθμός απόδοσης δίνεται σε CPM $(Bqkg^{-1})^{-1}$

Κατά συνέπεια η σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή βαθμονόμησης μεταπίπτει στην:

$$CF = 1000 \frac{N/m}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot Rn} \quad (6.3)$$

όπου:

N (= CPM – CPM_{BKG}) ο καθαρός ρυθμός μετρούμενων φωτονίων στον ανιχνευτή σε CPM

m η καθαρή μάζα του ενεργού άνθρακα στο μετρούμενο μεταλλικό δοχείο, όπως αυτή προσδιορίζεται από τη ζύγιση μετά την αναγέννηση σε kg (βλ. και το πρωτόκολλο στο 5^ο Κεφάλαιο)

E ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή για τη γεωμετρία των δοχείων σε CPM $(Bqkg^{-1})^{-1}$

T_s ο χρόνος έκθεσης σε min

Rn η συγκέντρωση του Ραδονίου κατά την έκθεση σε Bqm^{-3}

DF συντελεστής διόρθωσης ίσος με το κλάσμα του Ραδονίου που έχει διασπασθεί μετρώντας το χρόνο t σε min, από τη μέση του χρονικού διαστήματος έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης

Με βάση τα παραπάνω ο συντελεστής βαθμονόμησης (CF) προκύπτει και εδώ σε $Lmin^{-1}$.

Αν είναι γνωστός ο συντελεστής βαθμονόμησης CF , ο συντελεστής διόρθωσης DF , ο χρόνος έκθεσης T_s , ο βαθμός απόδοσης E του ανιχνευτή και η καθαρή μάζα m του ενεργού άνθρακα πριν την έκθεση, μπορεί να υπολογίζεται η μέση συγκέντρωση Ραδονίου Rn (Bqm^{-3}) κατά την έκθεση, με την εφαρμογή της σχέσης:

$$Rn = 1000 \frac{N/m}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot CF} \quad (6.4)$$

6.3 Κατώτερο όριο ανίχνευσης

Όπως έχει σημειωθεί στο 3^ο Κεφάλαιο (παράγραφος 3.5.2) το κατώτατο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου (LLD, Lower Limit of Detection σε Bqm⁻³) για συντελεστή κάλυψης $k = 3$ (δηλαδή σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99.87%) μπορεί να υπολογίζεται αν στην σχέση 6.3, αντικατασταθεί η ποσότητα N με την ποσότητα MDA (Minimum Detectable Activity) σε CPM, όπως αυτή έχει υπολογισθεί στην παράγραφο 5.5 για κάθε χρησιμοποιούμενο ανιχνευτή εντός ή εκτός λυόμενης θωράκισης και επιπλέον η σχέση λυθεί ως προς Rn :

$$LLD = LLD_{Rn} = 1000 \frac{MDA / m}{E \cdot T_s \cdot DF \cdot CF} \quad (6.5)$$

6.4 Πειράματα βαθμονόμησης

6.4.1 Χαρακτηριστικά μετρητικών διατάξεων

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων διά των σχέσεων 6.3 και 6.5 συγκεντρώνονται τα απαραίτητα στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των μετρητικών διατάξεων, τα οποία παρουσιάστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο ως εξής:

Για τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

Υπόστρωμα: 4775 κρούσεις στα 1000 s ή 286 CPM

Βαθμός απόδοσης: 1.83 CPM (Bqkg⁻¹)⁻¹

$MDA = 13 \text{ CPM}$

Για τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

Υπόστρωμα: 57325 κρούσεις στα 1000 s ή 3440 CPM

Βαθμός απόδοσης: 1.68 CPM (Bqkg⁻¹)⁻¹

$MDA = 43 \text{ CPM}$

Για τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

Υπόστρωμα: 188 CPM

Βαθμός απόδοσης: 2.30 CPM (Bqkg⁻¹)⁻¹

$MDA = 10 \text{ CPM}$

Για τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Υπόστρωμα: 3885 CPM

Βαθμός απόδοσης: 2.13 CPM (Bqkg⁻¹)⁻¹

MDA = 46 CPM

6.4.2 Χαρακτηριστικά πειραμάτων

Τα πειράματα έκθεσης μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα διακρίνονται μεταξύ τους από τον χαρακτηριστικό τους αριθμό, που μπορεί να είναι ένας από τους 2, 3, 4, 5, 6. Κάθε ένα από αυτά τα πειράματα έγινε σε αντίστοιχη χαρακτηριστική μέση συγκέντρωση Ραδονίου Rn (Bq m^{-3}), διάρκεσε αντίστοιχο χαρακτηριστικό χρόνο έκθεσης T_s (min) και στο χρόνο αυτό εκτέθηκε ένα πλήθος από μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα. Πιο αναλυτικά:

Σε ό,τι αφορά τη μέση συγκέντρωση του Ραδονίου Rn , σημειώνεται ότι:

- Τα πειράματα 4 και 5 έγιναν σε μέση συγκέντρωση Ραδονίου στη γειτονιά του 1 kBq m^{-3} .
- Τα πειράματα 2 και 6 έγιναν σε μέση συγκέντρωση Ραδονίου στη γειτονιά των 2 kBq m^{-3} .
- Το πείραμα 3 έγινε σε μέση συγκέντρωση Ραδονίου στη γειτονιά των 3 kBq m^{-3} .

Γίνεται κατανοητό, ότι τα πειράματα 4 και 5, πραγματοποιήθηκαν σε μέση συγκέντρωση Ραδονίου περίπου ίση με την συγκέντρωση Ραδονίου στην οποία έκανε τα αντίστοιχα πειράματά του ο George (1984).

Σε ό,τι αφορά το χρόνο έκθεσης T_s , σημειώνεται ότι:

- Τα πειράματα 2, 3 και 4 έγιναν σε χρόνο έκθεσης 24 h (= 1440 min)
- Τα πειράματα 5 και 6 έγιναν σε χρόνο έκθεσης 48 h (= 2880 min)

Γίνεται κατανοητό, ότι όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για χρόνους έκθεσης αντίστοιχους με αυτούς που προτείνονται από τον George (1984) και τον Gray (1987).

Σε ό,τι αφορά το πλήθος των εκτεθέντων μεταλλικών δοχείων, σημειώνεται ότι:

- Τα μεταλλικά δοχεία έχουν χαρακτηριστικούς αριθμούς ως εξής: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 και 9
- Τα μεταλλικά δοχεία 2, 3, 4 και 6 έχουν παρέμβυσμα στα καλύμματά τους
- Τα μεταλλικά δοχεία 5, 7, 8, 9 δεν έχουν παρέμβυσμα στα καλύμματά τους
- Τα μεταλλικά δοχεία με παρέμβυσμα εκτέθηκαν στα πειράματα 4, 5 και 6
- Τα μεταλλικά δοχεία χωρίς παρέμβυσμα εκτέθηκαν στα πειράματα 2, 3, 4 και 6

6.4.3 Χαρακτηριστικά μετρήσεων

Πέρα από την τεχνική των μετρήσεων των δοχείων, όπως αυτή ορίζεται από τον χρησιμοποιούμενο ανιχνευτή (VICTOREEN ή CANBERRA – EURISYS) και από το αν γίνεται εντός ή εκτός της λυόμενης θωράκισης, σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του συντελεστή βαθμονόμησης με τη βοήθεια της σχέσης 5.3, παίζει ο χρόνος t σε min, από τη μέση του χρονικού διαστήματος έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης. Ο χρόνος αυτός είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης DF . Στον χρόνο αυτόν συμπεριλαμβάνεται, όπως είναι φανερό, ο χρόνος ωρίμανσης των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα μετά την έκθεση. Διακρίνονται τρεις περιοχές χρόνου t , η Α, η Β και η Γ, ως εξής:

- η περιοχή χρόνου Α σημαίνει ότι η μέτρηση γίνεται για t περίπου 30 h (= 1800 min)
- η περιοχή χρόνου Β σημαίνει ότι η μέτρηση γίνεται για t περίπου 55 h (= 3300 min), και
- η περιοχή χρόνου Γ σημαίνει ότι η μέτρηση γίνεται για t περίπου 70 h (= 4200 min)

Οι μετρήσεις που αφορούν στα πειράματα βαθμονόμησης 2 και 4 έγιναν στις περιοχές χρόνου t Α και Β. Οι μετρήσεις που αφορούν στα πειράματα βαθμονόμησης 5 και 6 έγιναν στις περιοχές χρόνου t Β και Γ. Οι μετρήσεις που αφορούν στο πείραμα βαθμονόμησης 3 έγιναν στις περιοχές χρόνου t Α, Β και Γ.

6.5 Αποτελέσματα

6.5.1 Κατηγοριοποίηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκεντρώνονται στους Πίνακες 6.1 έως 6.20. Φυσικά υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες αποτελεσμάτων, που προκύπτουν για το συντελεστή CF και την ποσότητα LLD .

(α) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εντός λυόμενης θωράκισης

(β) Με τον ανιχνευτή VICTOREEN εκτός λυόμενης θωράκισης

(γ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εντός λυόμενης θωράκισης

(δ) Με τον ανιχνευτή CANBERRA – EURISYS εκτός λυόμενης θωράκισης

Οι κατηγορίες αυτές μπορούν, όπως γίνεται κατανοητό από τα προηγούμενα, να χωρισθούν σε διάφορες υποκατηγορίες, ανάλογα με το χρόνο έκθεσης T_s , τη χρήση μεταλλικών δοχείων με παρέμβυσμα ή όχι και την περιοχή χρόνου t .

6.5.2 Ανάλογα με το χρόνο έκθεσης για τον ανιχνευτή VICTOREEN

(α) Χρόνος έκθεσης 24 h

εντός θωράκισης $CF = 2.30 (\pm 0.52) Lmin^{-1}$ και $LLD = 22.4 (\pm 5.4) Bqm^{-3}$

εκτός θωράκισης $CF = 1.53 (\pm 0.38) Lmin^{-1}$ και $LLD = 120.5 (\pm 27.8) Bqm^{-3}$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(β) Χρόνος έκθεσης 48 h

εντός θωράκισης $CF = 1.24 (\pm 0.16) Lmin^{-1}$ και $LLD = 21.9 (\pm 3.6) Bqm^{-3}$

εκτός θωράκισης $CF = 0.83 (\pm 0.10) Lmin^{-1}$ και $LLD = 116.9 (\pm 20.8) Bqm^{-3}$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

6.5.3 Ανάλογα με το χρόνο έκθεσης για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS

(α) Χρόνος έκθεσης 24 h

εντός θωράκισης $CF = 2.12 (\pm 0.45) Lmin^{-1}$ και $LLD = 14.7 (\pm 3.4) Bqm^{-3}$

εκτός θωράκισης $CF = 1.50 (\pm 0.32) Lmin^{-1}$ και $LLD = 103.8 (\pm 25.7) Bqm^{-3}$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(β) Χρόνος έκθεσης 48 h

εντός θωράκισης $CF = 1.15 (\pm 0.15) \text{ Lmin}^{-1}$ και $LLD = 14.4 (\pm 2.4) \text{ Bqm}^{-3}$

εκτός θωράκισης $CF = 0.90 (\pm 0.14) \text{ Lmin}^{-1}$ και $LLD = 92.8 (\pm 19.1) \text{ Bqm}^{-3}$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "1"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι –όπως ήταν αναμενόμενο- το κατώτατο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου είναι πολύ χαμηλότερο (περί τα 20 Bqm^{-3}) εντός θωράκισης από ότι εκτός θωράκισης (περί τα 100 Bqm^{-3}). Αυτό οφείλεται φυσικά στο πολύ διαφορετικό υπόστρωμα που υπάρχει εντός θωράκισης από εκείνο που υπάρχει εκτός θωράκισης. Από πρακτική άποψη το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται ότι επιτρέπει να γίνονται μετρήσεις συγκέντρωσης Ραδονίου με τη μέθοδο των μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα, τόσο με τη χρήση θωράκισης, όσο και χωρίς αυτή. Φυσικά όταν δεν χρησιμοποιείται θωράκιση δε είναι δυνατόν να διαπιστώνονται συγκεντρώσεις Ραδονίου στο διάστημα $20 - 100 \text{ Bqm}^{-3}$. Αυτό το γεγονός δεν είναι καθόλου αποθαρρυντικό για την εξεταζόμενη μέθοδο διότι η Ευρωπαϊκή Ένωση στην 90/143/EURATOM σύστασή της θεωρεί ότι ο κίνδυνος από το Ραδόνιο γίνεται σημαντικός όταν η συγκέντρωσή του στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα φθάσει να είναι μεγαλύτερη από 200 Bqm^{-3} . Επομένως ακόμα και χωρίς τη χρήση θωράκισης, είναι δυνατόν να διαπιστώνεται αν η σύσταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης ικανοποιείται ή όχι. Επιπλέον, εφόσον με βάση τη σύσταση αυτή, αλλά και άλλες πολύ παρόμοιες άλλων Διεθνών και Εθνικών / Κρατικών Οργανισμών, η μέθοδος λειτουργεί ικανοποιητικά, εξασφαλίζεται σημαντική φορητότητα του συνόλου του εξοπλισμού (δηλαδή των δοχείων και των ανιχνευτών) προς τον τόπο της μέτρησης, αν δεν μεταφέρεται μαζί και η θωράκιση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "2"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής βαθμονόμησης εντός θωράκισης φαίνεται να είναι αρκετά μεγαλύτερος από εκείνον εκτός θωράκισης (κατά ένα συντελεστή στο διάστημα από 1.3 έως 1.5). Αυτό οφείλεται και εδώ στο πολύ διαφορετικό υπόστρωμα που υπάρχει εντός θωράκισης από εκείνο που υπάρχει εκτός θωράκισης, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της ποσότητας CF .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "3"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η διασπορά των τιμών του συντελεστή βαθμονόμησης CF και του κατώτερου ορίου ανίχνευσης βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις στο διάστημα από 12 έως και 25%, είναι δηλαδή σε καλή συμφωνία με την αβεβαιότητα του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης όπως αυτή εκτιμήθηκε στην παράγραφο 5.4.3 του προηγούμενου 5^{ου} Κεφαλαίου ($\approx 17.5\%$ εντός θωράκισης και $\approx 19\%$ εκτός θωράκισης). Σε επόμενο συμπέρασμα εντοπίζεται ποιο πείραμα βαθμονόμησης δίνει τις ποιοτικότερες πληροφορίες (δηλ. με τη μικρότερη διασπορά) σχετικά με τις τιμές των συντελεστών βαθμονόμησης. Είναι φυσικό ότι αυτό το πείραμα θα δίνει και τις ποιοτικότερες πληροφορίες για το κατώτερο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "4"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι γενικά οι συντελεστές βαθμονόμησης CF που εκτιμώνται, τόσο για έκθεση 24 h όσο και για έκθεση 48 h είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους που παρουσιάζει ο George (1984) (βλ. και Διάγραμμα 2.2). Αυτό οφείλεται στην σαφώς μεγαλύτερη μάζα και στη διαφορετική ποιότητα του ενεργού άνθρακα που υπάρχει στα δοχεία που χρησιμοποιούνται εδώ. Επιπλέον –όπως ήταν αναμενόμενο- διαπιστώνεται 'τι οι συντελεστές βαθμονόμησης CF που εκτιμώνται για έκθεση 24 h είναι σαφώς μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους για έκθεση 48 h, κατά ένα συντελεστή στην περιοχή από 1.65 έως και 1.85. Ο αντίστοιχος συντελεστής που δίνεται για αυτούς τους χρόνους έκθεσης στα πειράματα βαθμονομήσεων του George (1984) και του Gray (1987) βρίσκεται στην περιοχή 1.3 έως και 1.4 (βλ. και τα Διαγράμματα 2.2 και 3.11 για σχετική υγρασία 40 – 70% και $\sim 50\%$ αντίστοιχα).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "5"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι συνολικά και λαμβανομένης υπόψιν μόνο της παραμέτρου της θωρακίσεως, πειράματα βαθμονόμησης που γίνονται με χρόνο έκθεσης 48 h, παρουσιάζουν πολύ μικρότερη διασπορά στα αποτελέσματα από τα πειράματα βαθμονόμησης με χρόνο έκθεσης 24 h. Σημειώνεται βέβαια, ότι πειράματα βαθμονόμησης με χρόνο έκθεσης 72 h δεν πραγματοποιήθηκαν. Έτσι λοιπόν εντοπίστηκε το πείραμα βαθμονόμησης που μπορεί να δώσει ποιοτικότερες πληροφορίες σχετικά με το συντελεστή

βαθμονόμησης και το κατώτερο όριο ανίχνευσης. Σύμφωνα με αυτό το πείραμα η διασπορά του συντελεστή βαθμονόμησης μπορεί να περιορίζεται μεταξύ 12 και 15% και του κατώτερου ορίου ανίχνευσης μεταξύ 18 και 20%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "6"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι συνολικά και λαμβανομένης υπόψιν μόνο της παραμέτρου της θωρακίσεως, πειράματα βαθμονόμησης που γίνονται με χρόνο έκθεσης 48 h παρουσιάζουν ελαφρά χαμηλότερο κατώτατο όριο ανίχνευσης από πειράματα που γίνονται με χρόνο έκθεσης 24 h. Το γεγονός αυτό αναφέρεται και στον George (1984). Επιπλέον, ίσως μπορεί κανείς να ισχυρισθεί, ότι ελαφρά καλύτερος από την άποψη κυρίως του κατώτερου ορίου ανίχνευσης φαίνεται να είναι ο ανιχνευτής CANBERRA – EURISYS, τόσο εντός όσο και εκτός θωράκισης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "7"

Τέλος γίνεται φανερό ότι πάντα για μετρητικές συνθήκες εκτός θωράκισης ο συντελεστής βαθμονόμησης προκύπτει μικρότερος από τον αντίστοιχο για μετρητικές συνθήκες εντός θωράκισης.

6.5.4 Ανάλογα με το δοχείο για τον ανιχνευτή VICTOREEN

(α) Δοχεία με παρέμβυσμα

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (ENA πείραμα)

$$CF = 2.82 (\pm 0.09) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 16.9 (\pm 1.9) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 1.29 (\pm 0.17) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 20.7 (\pm 3.4) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ENA πείραμα)

$$CF = 1.80 (\pm 0.25) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 140.0 (\pm 18.7) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 0.86 (\pm 0.10) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 111.3 (\pm 18.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(β) Δοχεία χωρίς παρέμβυσμα

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 2.13 (\pm 0.50) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 23.7 (\pm 5.0) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ENA πείραμα)

$$CF = 1.13 (\pm 0.05) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 24.4 (\pm 2.7) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 1.46 (\pm 0.38) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 127.5 (\pm 27.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ENA πείραμα)

$$CF = 0.78 (\pm 0.07) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 128.1 (\pm 21.2) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

6.5.5 Ανάλογα με το δοχείο για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS

(α) Δοχεία με παρέμβυσμα

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (ENA πείραμα)

$$CF = 2.54 (\pm 0.16) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 11.5 (\pm 1.6) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 1.20 (\pm 0.15) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 13.5 (\pm 2.2) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ENA πείραμα)

$$CF = 1.87 (\pm 0.24) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 79.2 (\pm 15.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 0.94 (\pm 0.14) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 87.0 (\pm 19.9) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(β) Δοχεία χωρίς παρέμβυσμα

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 2.00 (\pm 0.44) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 15.6 (\pm 3.3) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ENA πείραμα)

$$CF = 1.05 (\pm 0.04) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 16.1 (\pm 2.0) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 1.42 (\pm 0.26) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 108.3 (\pm 24.9) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ENA πείραμα)

$$CF = 0.81 (\pm 0.10) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 104.4 (\pm 11.0) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "8"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι συνολικά και λαμβανομένων υπόψιν μόνο των παραμέτρων της θωρακίσεως και του χρόνου έκθεσης, πειράματα βαθμονόμησης που γίνονται με μεταλλικά δοχεία και ενεργό άνθρακα, τα οποία καλύπτονται με καλύμματα που έχουν παρέμβυσμα φαίνεται να παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά του συντελεστή βαθμονόμησης ή του κατώτερου ορίου ανίχνευσης. Για το συμπέρασμα αυτό αξιολογήθηκαν μόνο τα μετρητικά αποτελέσματα που προέρχονται από περισσότερα του ενός πειράματα. Το συμπέρασμα αυτό συνάδει με τις σχετικά πιο περιορισμένες αποκλίσεις του ρυθμού καταστροφής του Ραδονίου από το ρυθμό διάσπασης του Ραδονίου, που διαπιστώθηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο, για μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα καλυμμένα με καλύμματα που έχουν παρέμβυσμα σε σχέση με τις πιο αυξημένες σχετικές αποκλίσεις για μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα καλυμμένα με καλύμματα που δεν έχουν παρέμβυσμα (παράγραφος 5.4.2).

6.5.6 Ανάλογα με την περιοχή χρόνου t για τον ανιχνευτή VICTOREEN

(α) Περιοχή χρόνου A

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 2.40 (\pm 0.54) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 18.8 (\pm 3.3) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 1.45 (\pm 0.24) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 109.2 (\pm 14.7) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(β) Περιοχή χρόνου B

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (TPIA πειράματα)

$$CF = 2.32 (\pm 0.52) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 23.4 (\pm 3.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 1.25 (\pm 0.17) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 19.9 (\pm 2.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ΤΡΙΑ πειράματα)

$$CF = 1.66 (\pm 0.49) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 121.0 (\pm 30.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 0.87 (\pm 0.11) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 101.3 (\pm 13.7) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(γ) Περιοχή χρόνου Γ

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (ΕΝΑ πείραμα)

$$CF = 1.87 (\pm 0.24) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 32.5 (\pm 0.7) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 1.23 (\pm 0.16) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 24.0 (\pm 3.2) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ΕΝΑ πείραμα)

$$CF = 1.34 (\pm 0.21) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 162.8 (\pm 11.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 0.79 (\pm 0.07) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 132.5 (\pm 13.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

6.5.7 Ανάλογα με την περιοχή χρόνου t για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS

(α) Περιοχή χρόνου Α

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (ΤΡΙΑ πειράματα)

$$CF = 2.21 (\pm 0.49) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 12.4 (\pm 2.1) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ΤΡΙΑ πειράματα)

$$CF = 1.59 (\pm 0.34) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 85.6 (\pm 15.9) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(β) Περιοχή χρόνου Β

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (ΤΡΙΑ πειράματα)

$$CF = 2.13 (\pm 0.44) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 15.4 (\pm 2.3) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 1.16 (\pm 0.15) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 13.1 (\pm 1.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ΤΡΙΑ πειράματα)

$$CF = 1.45 (\pm 0.29) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 113.7 (\pm 22.2) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 0.93 (\pm 0.14) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 80.8 (\pm 15.0) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

(γ) Περιοχή χρόνου Γ

εντός θωράκισης έκθεση 24 h (ΕΝΑ πείραμα)

$$CF = 1.73 (\pm 0.21) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 21.3 (\pm 0.8) \text{ Bqm}^{-3}$$

εντός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 1.15 (\pm 0.15) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 15.7 (\pm 2.2) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 24 h (ΕΝΑ πείραμα)

$$CF = 1.36 (\pm 0.32) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 137.3 (\pm 14.1) \text{ Bqm}^{-3}$$

εκτός θωράκισης έκθεση 48 h (ΔΥΟ πειράματα)

$$CF = 0.86 (\pm 0.12) \text{ Lmin}^{-1} \text{ και } LLD = 104.8 (\pm 15.0) \text{ Bqm}^{-3}$$

σε παρένθεση η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής από όλα τα αντίστοιχα πειράματα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ "9"

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι συνολικά και λαμβανομένων υπόψιν μόνο των παραμέτρων της θωρακίσεως και του χρόνου έκθεσης, πειράματα βαθμονόμησης για τα οποία τα μεταλλικά δοχεία μετρώνται σε διαφορετικές περιοχές χρόνου t δεν φαίνεται να βελτιώνουν τη διασπορά του συντελεστή βαθμονόμησης ή του κατώτερου ορίου ανίχνευσης. Για το

συμπέρασμα αυτό αξιολογήθηκαν μόνο τα μετρητικά αποτελέσματα που προέρχονται από περισσότερα του ενός πειράματα.

6.6 Επίλογος

6.6.1 Προτεινόμενη διαδικασία έκθεσης

Από τα πειράματα βαθμονόμησης που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους και τα συμπεράσματα που εκτέθηκαν, μπορεί κανείς να δεχθεί ότι κατ' αρχήν τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα πρέπει να εκτίθενται 48 h, διότι τα πειράματα 48 ωρης έκθεσης οδηγούν σε συντελεστή βαθμονόμησης και κατώτατο όριο ανίχνευσης με την μικρότερη διασπορά. Όπως αναφέρεται στις παραγράφους 6.5.2 και 6.5.3 για τις περιπτώσεις τέτοιας έκθεσης ο συντελεστής βαθμονόμησης και το κατώτερο όριο ανίχνευσης εκτιμώνται σε:

Για τον ανιχνευτή VICTOREEN

εντός θωράκισης $CF = 1.24 (\pm 0.16) Lmin^{-1}$ και $LLD = 21.9 (\pm 3.6) Bqm^{-3}$

εκτός θωράκισης $CF = 0.83 (\pm 0.10) Lmin^{-1}$ και $LLD = 116.9 (\pm 20.8) Bqm^{-3}$

Για τον ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS

εντός θωράκισης $CF = 1.15 (\pm 0.15) Lmin^{-1}$ και $LLD = 14.4 (\pm 2.4) Bqm^{-3}$

εκτός θωράκισης $CF = 0.90 (\pm 0.14) Lmin^{-1}$ και $LLD = 92.8 (\pm 19.1) Bqm^{-3}$

Για διαφορετικές συνθήκες πειραμάτων βαθμονόμησης δεν είναι δυνατόν να αποφανθεί κανείς οριστικά με βάση τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα, διότι για την καλύτερη συμπεριφορά των πειραματικών διατάξεων πρέπει να ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό της διασποράς με τρόπους που θα παρουσιασθούν στις επόμενες παραγράφους.

6.6.2 Ελαχιστοποίηση συναλλαγής Ραδονίου με το περιβάλλον

Τόσο από τα όσα αναφέρθηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο και ειδικότερα στην παράγραφο 5.4.2, όσο και από τα όσα αναφέρθηκαν στο παρόν Κεφάλαιο και στις παραγράφους 6.5.4 και 6.5.5, φαίνεται ότι η συμπεριφορά των δοχείων επηρεάζεται σημαντικά μετά την έκθεση από την ύπαρξη ή όχι του παρεμβύσματος, από την άποψη των διαρροών και των εισροών Ραδονίου στον περιεχόμενο ενεργό άνθρακα. Με τα πειράματα βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας χωρίς τη χρήση επιπλέον στεγάνωσης από ταινία βινυλίου, αποδείχθηκε ότι

δεν υπάρχει βεβαιότητα σχετικά με την στεγανότητα των δοχείων, τόσο στο διάστημα που μεσολαβεί από το τέλος της θέρμανσής τους μέχρι την έναρξη της έκθεσής τους, όσο και μετά το τέλος της έκθεσής τους και την έναρξη της μέτρησής τους. Προκειμένου να περιορισθεί η επίδραση παραγόντων που συμβάλλουν στην μη στεγανότητα προτείνεται:

1. Να αφαιρεθεί από όλα τα δοχεία το ελαστικό παρέμβυσμα του καλύμματός τους.
2. Αμέσως μετά την διά της θερμάνσεως αναγέννηση του ενεργού άνθρακα, και μέχρι την έκθεσή τους, τα δοχεία να καλύπτονται με τα χωρίς παρέμβυσμα μεταλλικά καλύμματά τους και να χρησιμοποιείται ταινία βινυλίου περιφερειακά του καλύμματος για αποτελεσματικότερη στεγάνωση, όπως εξάλλου προτείνουν ο George (1984) και ο Gray (1987).
3. Αμέσως μετά την διά της θερμάνσεως αναγέννηση του ενεργού άνθρακα, τα μεταλλικά δοχεία που χρησιμεύουν για τη μέτρηση του υποστρώματος να καλύπτονται με τα χωρίς παρέμβυσμα μεταλλικά καλύμματά τους και να χρησιμοποιείται ταινία βινυλίου περιφερειακά του καλύμματος για αποτελεσματικότερη στεγάνωση, όπως εξάλλου προτείνουν ο George (1984) και ο Gray (1987).
4. Αμέσως μετά την έκθεσή τους και μέχρι και το τέλος της μέτρησής τους, τα δοχεία να καλύπτονται με τα χωρίς παρέμβυσμα μεταλλικά καλύμματά τους και να χρησιμοποιείται ταινία βινυλίου περιφερειακά του καλύμματος για αποτελεσματικότερη στεγάνωση, όπως εξάλλου προτείνουν ο George (1984) και ο Gray (1987).
5. Ο χρόνος ωρίμανσης για την δημιουργία των θυγατρικών, να τηρείται κατά το δυνατόν μικρότερος και όσο γίνεται πλησιέστερα στο κατώτερο όριο των τριών (3) ωρών.

Λαμβάνοντας τα μέτρα 1, 2, 3 και 4, είναι βέβαιο ότι θα περιορισθούν σημαντικά οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στις τιμές του συντελεστή βαθμονόμησης και του κατώτερου ορίου ανίχνευσης για τις διάφορες περιπτώσεις έκθεσης. Με άλλα λόγια θα περιορισθεί σημαντικά η διασπορά που παρατηρείται κατά τις παραγράφους 6.5.2 και 6.5.3 τόσο στον συντελεστή βαθμονόμησης όσο και στο κατώτερο όριο ανίχνευσης με βάση τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων. Επισημαίνεται και πάλι

ότι όπως έχουν τα αποτελέσματα, η διασπορά δεν ξεπερνά γενικά την αβεβαιότητα που εκτιμήθηκε στην παράγραφο 5.4.3 του προηγούμενου 5^{ου} Κεφαλαίου.

6.6.3 Περαιτέρω διερεύνηση

Δύο είναι τα κυριότερα σημεία που πρέπει να ερευνηθούν με νέα πειράματα, τα οποία επίσης πρέπει να γίνονται με την βελτιστοποίηση της προηγούμενης παραγράφου.

1. Οφείλουν να πραγματοποιηθούν πειράματα βαθμονόμησης με έκθεση 72 h.
2. Κάθε φορά που γίνεται έκθεση και μέτρηση να γίνεται και βαθμονόμηση του ανιχνευτή με αντίστοιχη μέτρηση του υποστρώματος και του βαθμού απόδοσης.

Σχετικά με το σημείο "2" επισημαίνεται ότι, είναι ακριβώς η μέθοδος που χρησιμοποιεί ο Gray (1987). Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την μέτρηση από την επίδραση που έχει σε αυτήν, η όποια τυχαία μεταβολή του επιπέδου του υποστρώματος και η όποια τυχαία μεταβολή του βαθμού απόδοσης των ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου.

Το σύνολο των νέων πειραμάτων μπορεί προφανώς αλλά και σύμφωνα με τα όσα λέει ο George (1984) να γίνει με τη χρήση δύο μόνο δοχείων, τα οποία πρέπει βέβαια να προετοιμάζονται και να μετρώνται με τις επιπλέον προδιαγραφές της παραγράφου 6.5.2. Είναι προφανές ότι αρκεί για αυτά τα πειράματα η χρήση ενός –οποιοδήποτε– από τους δύο ανιχνευτές που δοκιμάστηκαν, καθόσον αποδείχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ότι και οι δύο διαφορετικές αυτές μονάδες είναι κατάλληλες για αυτόν τον σκοπό. Επισημαίνεται πάντως ότι ο ανιχνευτής VICTOREEN είναι φιλικότερος στον χρήστη.

6.6.4 Σχόλια

Συνοψίζοντας σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία:

1. Παρουσιάστηκαν τα δύο κυριότερα τεχνικά κείμενα που αφορούν στην βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους – George (1984) και Gray (1987) (Κεφάλαια 2 και 3).
2. Διερευνήθηκαν και βρέθηκαν εξαιρετικά επαρκείς οι δυνατότητες του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ για την οργάνωση αντιστοίχων πειραμάτων βαθμονόμησης, τόσο από άποψη εξοπλισμού, όσο και από άποψη τεχνικών διαδικασιών (Κεφάλαιο 4).

3. Οργανώθηκε πρωτόκολλο πειραμάτων βαθμονόμησης με βάση τον διαθέσιμο εξοπλισμό και τις αντίστοιχες διαδικασίες (Κεφάλαιο 5)
4. Αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραμάτων με βάση το πρωτόκολλο αυτό, καταδείχθηκαν αδυναμίες και έγιναν προτάσεις για βελτίωση (στο παρόν Κεφάλαιο 6).
5. Παρόλους τους όποιους προβληματισμούς αποδείχθηκε ότι:
 - Η βαθμονόμηση μεταλλικών δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους είναι κατ' αρχήν δυνατή.
 - Η μετρητική μέθοδος όπως χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που έγιναν έχει φορητότητα, μπορεί δηλαδή να μετρά εκτεθέντα μεταλλικά δοχεία, στον τόπο έκθεσης, εκμεταλλευόμενη (α) τη φορητότητα των ανιχνευτών και (β) το λυόμενο της χρησιμοποιούμενης θωράκισης.
 - Πέρα από την μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου σε έναν εσωτερικό χώρο με αυτή τη μέθοδο, για την ακρίβεια της οποίας μπορεί κανείς να φέρει κάποιες αντιρρήσεις με βάση τις παρατηρήσεις επί του πρωτοκόλλου βαθμονόμησης, είναι βέβαιο ότι τα μεταλλικά δοχεία με ενεργό άνθρακα, μετά από έκθεση και μετρούμενα ακόμα και εκτός θωράκισης μπορούν να δείξουν αν η συγκέντρωση Ραδονίου υπερβαίνει τη σύσταση των 200 Bqm⁻³ (90/143/EURATOM).

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
2A	1815	0.796	5	0.1552	24000	1440	7431.3	1.8	1.76	22.3
2A	1832	0.794	7	0.1243	22900	1374	8747.5	1.8	2.07	23.6
2A	1849	0.792	8	0.1527	23400	1404	7317.3	1.8	1.74	23.0
2A	1866	0.790	9	0.1607	23700	1422	7065.0	1.8	1.68	22.6
2B	3255	0.664	5	0.1552	20500	1230	6078.4	2.0	1.72	27.2
2B	3272	0.662	7	0.1243	19600	1176	7154.9	2.1	2.03	28.9
2B	3289	0.661	8	0.1533	20400	1224	6114.6	2.0	1.74	27.4
2B	3306	0.659	9	0.1607	20400	1224	5833.1	2.0	1.66	27.4
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			4775							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			286.5							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.83							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			13							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			4113							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1470							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1975							

Πίνακας 6.1

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 2, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
2A	1835	0.794	5	0.1552	67700	4062	4007.2	6.8	1.04	136.6
2A	1815	0.796	7	0.1243	67500	4050	4906.7	6.9	1.26	139.2
2A	1821	0.795	8	0.1527	68300	4098	4308.5	6.5	1.11	129.1
2A	1827	0.794	9	0.1607	68400	4104	4131.4	6.4	1.07	127.9
2B	3276	0.662	5	0.1552	65800	3948	3272.8	8.3	1.01	167.2
2B	3255	0.664	7	0.1243	65700	3942	4037.9	8.4	1.25	169.2
2B	3262	0.663	8	0.1533	66300	3978	3509.0	7.8	1.08	157.9
2B	3269	0.662	9	0.1607	66000	3960	3235.4	8.1	1.00	163.3
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			57325							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3440							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.68							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			43							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			4113							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1470							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1975							

Πίνακας 6.2

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 2, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
3Α	1822	0.795	5	0.1553	33000	1980	10904.7	1.4	1.92	20.8
3Α	1838	0.793	7	0.1244	33000	1980	13613.3	1.4	2.40	20.8
3Α	1855	0.792	8	0.1528	33300	1998	11200.9	1.4	1.98	20.6
3Α	1871	0.790	9	0.1608	32200	1932	10233.2	1.4	1.81	21.4
3Β	3233	0.665	5	0.1553	27100	1626	8625.2	1.6	1.81	26.3
3Β	3249	0.664	7	0.1244	27200	1632	10815.9	1.6	2.28	26.2
3Β	3265	0.663	8	0.1528	27600	1656	8962.7	1.6	1.89	25.8
3Β	3281	0.661	9	0.1608	26200	1572	7994.4	1.6	1.69	27.4
3Γ	4699	0.553	5	0.1553	22700	1362	6925.3	1.8	1.75	32.8
3Γ	4715	0.552	7	0.1244	22900	1374	8742.0	1.8	2.21	32.4
3Γ	4731	0.551	8	0.1528	23400	1404	7313.5	1.8	1.86	31.6
3Γ	4747	0.550	9	0.1608	22400	1344	6576.5	1.9	1.67	33.4
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			4775							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			286.5							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.83							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			13							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			5640							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1440							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			2713							

Πίνακας 6.3

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 3, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
3A	1755	0.802	5	0.1553	76200	4572	7289.1	3.9	1.39	103.1
3A	1771	0.800	7	0.1244	75800	4548	8906.8	3.9	1.70	105.3
3A	1788	0.798	8	0.1528	76700	4602	7604.7	3.8	1.45	100.4
3A	1805	0.797	9	0.1608	76200	4572	7039.8	3.9	1.35	103.1
3B	3185	0.669	5	0.1553	71700	4302	5550.5	5.0	1.26	135.4
3B	3257	0.663	7	0.1244	72100	4326	7122.2	4.9	1.64	131.7
3B	3201	0.668	8	0.1528	72700	4362	6034.0	4.7	1.38	126.5
3B	3217	0.667	9	0.1608	71400	4284	5248.8	5.1	1.20	138.2
3Γ	4635	0.558	5	0.1553	69300	4158	4623.3	5.9	1.26	162.5
3Γ	4651	0.557	7	0.1244	69600	4176	5916.4	5.8	1.62	158.5
3Γ	4667	0.555	8	0.1528	70200	4212	5052.4	5.5	1.39	151.1
3Γ	4683	0.554	9	0.1608	68200	4092	4054.7	6.5	1.11	179.0
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			57325							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3440							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.68							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			43							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			5640							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1440							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			2713							

Πίνακας 6.4

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 3, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
4A	1984	0.779	2	0.1498	20800	1248	6418.6	2.0	2.77	15.2
4A	2000	0.777	3	0.1437	20800	1248	6691.0	2.0	2.90	15.2
4A	2016	0.776	4	0.1414	20700	1242	6757.4	2.0	2.93	15.3
4A	2041	0.773	6	0.1483	20500	1230	6362.1	2.0	2.77	15.5
4A	2164	0.761	5	0.1426	20400	1224	6574.3	2.0	2.91	15.6
4A	2195	0.758	7	0.1183	19500	1170	7468.3	2.1	3.32	16.6
4A	2196	0.758	8	0.1465	20300	1218	6358.4	2.0	2.82	15.7
4A	2212	0.757	9	0.1523	19800	1188	5919.2	2.1	2.63	16.3
4B	3484	0.645	2	0.1498	17500	1050	5096.8	2.3	2.66	19.2
4B	3500	0.643	3	0.1437	17800	1068	5438.4	2.3	2.85	18.7
4B	3516	0.642	4	0.1414	17700	1062	5484.4	2.3	2.88	18.9
4B	3532	0.641	6	0.1483	17000	1020	4946.1	2.4	2.60	20.0
4B	3774	0.622	5	0.1426	16700	1002	5017.5	2.5	2.72	20.5
4B	3790	0.620	7	0.1183	16600	996	5997.5	2.5	3.25	20.7
4B	3806	0.619	8	0.1465	17000	1020	5006.8	2.4	2.72	20.0
4B	3822	0.618	9	0.1523	16700	1002	4698.0	2.5	2.56	20.5
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			4775							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			286.5							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.83							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			13							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			3091							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1140							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1127							

Πίνακας 6.5

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 4, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
4A	1920	0.785	2	0.1498	65200	3912	3150.9	8.9	1.47	102.7
4A	1936	0.784	3	0.1437	65800	3948	3535.1	8.3	1.65	95.4
4A	1952	0.782	4	0.1414	65900	3954	3635.1	8.2	1.70	94.3
4A	1968	0.780	6	0.1483	65300	3918	3223.2	8.8	1.51	101.4
4A	2100	0.768	5	0.1426	65600	3936	3478.3	8.5	1.66	97.7
4A	2116	0.766	7	0.1183	65000	3900	3888.4	9.1	1.86	105.4
4A	2132	0.764	8	0.1465	65300	3918	3262.8	8.8	1.57	101.4
4A	2144	0.763	9	0.1523	65100	3906	3059.8	9.0	1.47	104.0
4B	3435	0.649	2	0.1498	65800	3948	3391.2	8.3	1.92	95.4
4B	3451	0.647	3	0.1437	65700	3942	3493.4	8.4	1.98	96.5
4B	3467	0.646	4	0.1414	66300	3978	3804.8	7.8	2.16	90.1
4B	3483	0.645	6	0.1483	66000	3960	3506.4	8.1	1.99	93.2
4B	3725	0.625	5	0.1426	65800	3948	3562.4	8.3	2.09	95.4
4B	3741	0.624	7	0.1183	65700	3942	4243.4	8.4	2.49	96.5
4B	3757	0.623	8	0.1465	66300	3978	3672.4	7.8	2.16	90.1
4B	3773	0.622	9	0.1523	66000	3960	3414.3	8.1	2.01	93.2
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			57325							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3440							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.68							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			43							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			3091							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1140							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1127							

Πίνακας 6.6

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 4, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> μέτρησης	<i>t</i> (σχέση 6.2) (min)	<i>DF</i> (σχέση 6.2)	<i>A/A</i> δοχείου	μάζα δοχείου (kg)	γεγονότα στα 1000 s	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> (σχέση 6.3)	σφάλμα (%) (σχέση 5.9)	<i>CF</i> (σχέση 6.3) (Lmin ⁻¹)	<i>LLD</i> (σχέση 6.5) (Bqm ⁻³)
5A	2809	0.702	2	0.1494	20300	1218	6234.9	2.0	1.43	16.3
5A	2825	0.701	3	0.1434	20900	1254	6746.9	2.0	1.55	15.7
5A	2841	0.699	4	0.1412	19900	1194	6427.1	2.1	1.48	16.7
5A	2857	0.698	6	0.1481	19800	1188	6087.1	2.1	1.40	16.8
5B	4249	0.586	2	0.1494	17600	1056	5150.6	2.3	1.42	19.7
5B	4265	0.584	3	0.1434	17500	1050	5324.3	2.3	1.47	19.9
5B	4281	0.583	4	0.1412	17500	1050	5407.2	2.3	1.49	19.9
5B	4297	0.582	6	0.1481	17300	1038	5074.3	2.4	1.40	20.2
γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s			4775							
<i>CPM_{BKG}</i> (για τη σχέση 6.3)			286.5							
<i>E</i> (σχέση 5.10) [<i>CPM</i> (Bqkg ⁻¹) ⁻¹]			1.83							
<i>MDA</i> (σχέση 5.12) (<i>CPM</i>)			13							
παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)			2649							
χρόνος έκθεσης <i>T_s</i> (min)			2910							
μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm ⁻³) (σχέση 5.4)			1166							

Πίνακας 6.7

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 5, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> μέτρησης	<i>t</i> (σχέση 6.2) (min)	<i>DF</i> (σχέση 6.2)	<i>A/A</i> δοχείου	μάζα δοχείου (kg)	γεγονότα στα 1000 s	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> (σχέση 6.3)	σφάλμα (%) (σχέση 5.9)	<i>CF</i> (σχέση 6.3) (Lmin ⁻¹)	<i>LLD</i> (σχέση 6.5) (Bqm ⁻³)
5A	2745	0.708	2	0.1494	66800	4008	3801.9	7.4	0.94	88.3
5A	2761	0.706	3	0.1434	67500	4050	4253.8	6.9	1.06	82.2
5A	2777	0.705	4	0.1412	67100	4026	4150.1	7.2	1.03	85.6
5A	2793	0.703	6	0.1481	67400	4044	4078.3	7.0	1.02	83.0
5B	4185	0.590	2	0.1494	63700	3822	2556.9	10.9	0.76	131.3
5B	4201	0.589	3	0.1434	64300	3858	2914.9	10.0	0.87	120.0
5B	4217	0.588	4	0.1412	63900	3834	2790.4	10.6	0.83	127.3
5B	4233	0.587	6	0.1481	64600	3876	2944.0	9.6	0.88	115.0
γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s			57325							
<i>CPM_{BKG}</i> (για τη σχέση 6.3)			3440							
<i>E</i> (σχέση 5.10) [<i>CPM</i> (Bqkg ⁻¹) ⁻¹]			1.68							
<i>MDA</i> (σχέση 5.12) (<i>CPM</i>)			43							
παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)			2649							
χρόνος έκθεσης <i>T_s</i> (min)			2910							
μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm ⁻³) (σχέση 5.4)			1166							

Πίνακας 6.8

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 5, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
6A	2704	0.711	2	0.1508	23400	1404	7410.5	1.8	1.09	21.1
6A	2720	0.710	3	0.1448	24200	1452	8049.0	1.8	1.19	20.2
6A	2736	0.708	4	0.1425	23700	1422	7968.4	1.8	1.18	20.8
6A	2752	0.707	6	0.1494	23000	1380	7319.3	1.8	1.08	21.6
6A	2944	0.690	5	0.1437	22600	1356	7442.6	1.9	1.13	22.1
6A	2960	0.689	7	0.1193	21000	1260	8160.1	2.0	1.24	24.2
6A	2976	0.687	8	0.1475	22800	1368	7332.2	1.8	1.11	21.8
6A	2992	0.686	9	0.1533	23200	1392	7211.4	1.8	1.10	21.3
6B	4294	0.582	2	0.1508	20000	1200	6057.7	2.1	1.09	25.8
6B	4310	0.581	3	0.1448	20900	1254	6681.6	2.0	1.20	24.4
6B	4326	0.580	4	0.1425	20000	1200	6410.5	2.1	1.16	25.8
6B	4342	0.579	6	0.1494	19900	1194	6074.3	2.1	1.10	26.0
6B	4168	0.592	5	0.1437	20200	1212	6440.5	2.0	1.14	25.5
6B	4184	0.590	7	0.1193	18100	1086	6701.6	2.3	1.19	29.5
6B	4200	0.589	8	0.1475	20000	1200	6193.2	2.1	1.10	25.8
6B	4216	0.588	9	0.1533	20300	1218	6076.3	2.0	1.08	25.3
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			4775							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			286.5							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.83							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			13							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			4112							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			2880							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1815							

Πίνακας 6.9

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 6, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
6A	2640	0.717	2	0.1508	69300	4158	4761.3	5.9	0.76	108.7
6A	2656	0.716	3	0.1448	70400	4224	5414.4	5.5	0.86	99.6
6A	2672	0.714	4	0.1425	69500	4170	5122.8	5.9	0.82	106.9
6A	2688	0.713	6	0.1494	68900	4134	4645.2	6.1	0.74	112.5
6A	2880	0.696	5	0.1437	69300	4158	4996.5	5.9	0.82	108.7
6A	2896	0.694	7	0.1193	67700	4062	5213.7	6.8	0.85	125.5
6A	2912	0.693	8	0.1475	69700	4182	5030.5	5.8	0.83	105.2
6A	2888	0.695	9	0.1533	69200	4152	4644.5	6.0	0.76	109.6
6B	4230	0.587	2	0.1508	67600	4056	4084.9	6.9	0.79	126.7
6B	4246	0.586	3	0.1448	67700	4062	4295.6	6.8	0.83	125.5
6B	4262	0.585	4	0.1425	67500	4050	4280.7	6.9	0.83	128.0
6B	4278	0.583	6	0.1494	66600	3996	3721.6	7.6	0.73	140.4
6B	4104	0.596	5	0.1437	65300	3918	3326.4	8.8	0.64	163.3
6B	4120	0.595	7	0.1193	65800	3948	4258.2	8.3	0.81	153.7
6B	4136	0.594	8	0.1475	67200	4032	4013.6	7.1	0.77	131.9
6B	4152	0.593	9	0.1533	67600	4056	4018.3	6.9	0.77	126.7
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			57325							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3440							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			1.68							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			43							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			4112							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			2880							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1815							

Πίνακας 6.10

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 6, μέτρηση με ανιχνευτή VICTOREEN, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> μέτρησης	<i>t</i> (σχέση 6.2) (min)	<i>DF</i> (σχέση 6.2)	<i>A/A</i> δοχείου	μάζα δοχείου (kg)	γεγονότα στα 1000 s	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> (σχέση 6.3)	σφάλμα (%) (σχέση 5.9)	<i>CF</i> (σχέση 6.3) (Lmin ⁻¹)	<i>LLD</i> (σχέση 6.5) (Bqm ⁻³)
2A	1833	0.794	5	0.1552	25600	1536	8684.4	1.5	1.64	14.7
2A	1821	0.795	7	0.1243	25100	1506	10601.6	1.5	2.00	15.0
2A	1827	0.794	8	0.1527	24400	1464	8355.1	1.6	1.57	15.5
2A	1839	0.793	9	0.1607	25700	1542	8424.5	1.5	1.59	14.6
2B	3285	0.661	5	0.1552	21200	1272	6983.6	1.7	1.58	18.2
2B	3292	0.661	7	0.1243	20300	1218	8285.0	1.8	1.88	19.2
2B	3299	0.660	8	0.1533	22100	1326	7422.3	1.7	1.68	17.4
2B	3306	0.659	9	0.1607	21500	1290	6856.6	1.7	1.56	17.9
γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s			3140							
<i>CPM_{BKG}</i> (για τη σχέση 6.3)			188							
<i>E</i> (σχέση 5.10) [<i>CPM</i> (Bqkg ⁻¹) ⁻¹]			2.3							
<i>MDA</i> (σχέση 5.12) (<i>CPM</i>)			10							
παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)			4113							
χρόνος έκθεσης <i>T_s</i> (min)			1470							
μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm ⁻³) (σχέση 5.4)			1975							

Πίνακας 6.11

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 2, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
2A	1839	0.793	5	0.1552	80700	4842	6165.4	4.8	1.26	94.9
2A	1845	0.793	7	0.1243	79100	4746	6925.6	5.3	1.41	105.5
2A	1851	0.792	8	0.1527	78200	4692	5284.2	5.6	1.08	112.6
2A	1857	0.791	9	0.1607	81400	4884	6215.7	4.6	1.27	91.0
2B	3312	0.659	5	0.1552	76800	4608	4657.9	6.2	1.14	125.7
2B	3318	0.658	7	0.1243	74700	4482	4802.1	7.5	1.18	152.2
2B	3324	0.658	8	0.1533	75100	4506	4050.3	7.2	1.00	146.3
2B	3330	0.657	9	0.1607	74600	4476	3677.2	7.6	0.90	153.7
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			64750							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3885							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.13							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			46							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			4113							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1470							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1975							

Πίνακας 6.12

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 2, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
3Α	1773	0.800	5	0.1553	36800	2208	13007.1	1.2	1.81	13.4
3Α	1755	0.802	7	0.1244	35900	2154	15803.9	1.2	2.19	13.8
3Α	1761	0.801	8	0.1528	38200	2292	13769.6	1.2	1.91	12.9
3Α	1782	0.799	9	0.1608	34600	2076	11741.3	1.2	1.64	14.4
3Β	3203	0.668	5	0.1553	28900	1734	9954.9	1.4	1.66	17.6
3Β	3185	0.669	7	0.1244	31300	1878	13585.2	1.3	2.26	16.1
3Β	3191	0.669	8	0.1528	33000	1980	11727.7	1.3	1.95	15.1
3Β	3197	0.668	9	0.1608	28800	1728	9577.1	1.4	1.59	17.6
3Γ	4653	0.556	5	0.1553	24300	1458	8177.7	1.6	1.64	21.4
3Γ	4635	0.558	7	0.1244	24100	1446	10112.5	1.6	2.02	21.6
3Γ	4641	0.557	8	0.1528	25500	1530	8782.7	1.5	1.75	20.2
3Γ	4647	0.557	9	0.1608	23700	1422	7674.1	1.6	1.53	22.0
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			3140							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			188							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.3							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			10							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			5640							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1440							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			2713							

Πίνακας 6.13

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 3, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
3Α	1779	0.799	5	0.1553	92300	5538	10643.9	2.9	1.60	75.5
3Α	1785	0.799	7	0.1244	89300	5358	11840.8	3.2	1.78	84.7
3Α	1791	0.798	8	0.1528	88300	5298	9247.4	3.3	1.39	88.3
3Α	1797	0.797	9	0.1608	88900	5334	9011.2	3.2	1.36	86.1
3Β	3209	0.667	5	0.1553	84700	5082	7707.7	3.9	1.39	104.3
3Β	3215	0.667	7	0.1244	81800	4908	8223.5	4.5	1.48	122.0
3Β	3221	0.666	8	0.1528	84500	5070	7755.2	3.9	1.40	105.3
3Β	3227	0.666	9	0.1608	85300	5118	7667.9	3.8	1.38	101.2
3Γ	4659	0.556	5	0.1553	80100	4806	5930.5	5.0	1.28	135.5
3Γ	4665	0.556	7	0.1244	82300	4938	8464.6	4.4	1.83	118.5
3Γ	4671	0.555	8	0.1528	79200	4752	5674.1	5.3	1.23	144.0
3Γ	4677	0.555	9	0.1608	78500	4710	5130.6	5.5	1.11	151.3
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			64750							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3885							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.13							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			46							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			5640							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1440							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			2713							

Πίνακας 6.14

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 3, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
4A	1938	0.783	2	0.1498	20600	1236	6996.0	1.8	2.39	10.8
4A	1920	0.785	3	0.1437	22200	1332	7961.0	1.7	2.72	9.9
4A	1926	0.785	4	0.1414	21700	1302	7878.4	1.7	2.69	10.1
4A	1932	0.784	6	0.1483	22200	1332	7714.1	1.7	2.64	9.9
4A	2118	0.766	5	0.1426	20600	1236	7349.2	1.8	2.57	10.8
4A	2100	0.768	7	0.1183	20900	1254	9011.0	1.7	3.14	10.6
4A	2106	0.767	8	0.1465	20500	1230	7112.6	1.8	2.48	10.8
4A	2112	0.766	9	0.1523	20400	1224	6802.4	1.8	2.38	10.9
4B	3438	0.648	2	0.1498	17900	1074	5914.6	2.0	2.44	12.7
4B	3420	0.650	3	0.1437	18500	1110	6416.1	1.9	2.64	12.2
4B	3426	0.649	4	0.1414	17700	1062	6181.0	2.0	2.55	12.9
4B	3432	0.649	6	0.1483	16600	996	5448.4	2.1	2.25	13.9
4B	3728	0.625	5	0.1426	17200	1032	5918.7	2.0	2.54	13.4
4B	3710	0.627	7	0.1183	16600	996	6830.1	2.1	2.92	13.9
4B	3716	0.626	8	0.1465	16600	996	5515.4	2.1	2.36	13.9
4B	3722	0.626	9	0.1523	16400	984	5226.5	2.1	2.24	14.2
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			3140							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			188							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.3							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			10							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			3091							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1140							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1127							

Πίνακας 6.15

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 4, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
4A	1944	0.783	2	0.1498	76800	4608	4826.4	6.2	1.78	71.7
4A	1950	0.782	3	0.1437	80100	4806	6409.2	5.0	2.37	56.3
4A	1956	0.782	4	0.1414	77800	4668	5537.5	5.8	2.05	66.2
4A	1962	0.781	6	0.1483	76700	4602	4834.8	6.3	1.79	72.3
4A	2124	0.765	5	0.1426	74700	4482	4186.5	7.5	1.58	86.8
4A	2130	0.765	7	0.1183	73500	4410	4437.9	8.5	1.68	98.8
4A	2136	0.764	8	0.1465	76800	4608	4935.2	6.2	1.87	71.7
4A	2142	0.763	9	0.1523	72800	4368	3171.4	9.2	1.20	107.3
4B	3444	0.648	2	0.1498	74900	4494	4065.4	7.4	1.81	85.1
4B	3450	0.648	3	0.1437	74500	4470	4071.0	7.7	1.82	88.6
4B	3456	0.647	4	0.1414	72800	4368	3415.8	9.2	1.53	107.3
4B	3462	0.647	6	0.1483	74800	4488	4066.1	7.4	1.82	86.0
4B	3734	0.625	5	0.1426	73500	4410	3681.6	8.5	1.70	98.8
4B	3740	0.624	7	0.1183	72200	4332	3778.5	9.9	1.75	116.0
4B	3746	0.624	8	0.1465	71700	4302	2846.4	10.6	1.32	124.3
4B	3752	0.623	9	0.1523	73200	4392	3329.0	8.8	1.54	102.3
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			64750							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3885							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.13							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			46							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			3091							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			1140							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1127							

Πίνακας 6.16

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 4, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
5A	2763	0.706	2	0.1494	21600	1296	7416.3	1.7	1.35	10.5
5A	2745	0.708	3	0.1434	21800	1308	7810.3	1.7	1.41	10.4
5A	2751	0.707	4	0.1412	20600	1236	7422.1	1.8	1.34	11.1
5A	2757	0.707	6	0.1481	20800	1248	7157.3	1.8	1.30	11.0
5B	4203	0.589	2	0.1494	17800	1068	5890.2	2.0	1.28	13.3
5B	4185	0.590	3	0.1434	19000	1140	6638.8	1.9	1.44	12.2
5B	4191	0.590	4	0.1412	17800	1068	6232.3	2.0	1.35	13.3
5B	4197	0.589	6	0.1481	17700	1062	5901.4	2.0	1.28	13.3
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			3140							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			188							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.3							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			10							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			2649							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			2910							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1166							

Πίνακας 6.17

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 5, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
5A	2769	0.706	2	0.1494	78300	4698	5441.8	5.6	1.07	66.0
5A	2775	0.705	3	0.1434	77400	4644	5292.9	6.0	1.04	70.7
5A	2781	0.704	4	0.1412	79400	4764	6225.2	5.2	1.22	61.0
5A	2787	0.704	6	0.1481	78200	4692	5449.0	5.6	1.07	66.5
5B	4209	0.588	2	0.1494	74500	4470	3915.7	7.7	0.92	91.7
5B	4215	0.588	3	0.1434	75800	4548	4623.4	6.8	1.09	80.9
5B	4221	0.588	4	0.1412	73400	4404	3675.6	8.6	0.87	103.3
5B	4227	0.587	6	0.1481	74900	4494	4112.1	7.4	0.97	88.1
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			64750							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3885							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.13							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			46							
<i>παραχθέν Ραδόνιο (σχέση 5.1) (Bq)</i>			2649							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			2910							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1166							

Πίνακας 6.18

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 5, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εκτός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
6A	2658	0.715	2	0.1498	25000	1500	8758.3	1.5	1.02	13.8
6A	2640	0.717	3	0.1438	26000	1560	9541.0	1.5	1.11	13.2
6A	2646	0.717	4	0.1415	25100	1506	9314.5	1.5	1.08	13.8
6A	2652	0.716	6	0.1484	24400	1464	8598.4	1.6	1.00	14.2
6A	2898	0.694	5	0.1427	24300	1458	8899.8	1.6	1.07	14.3
6A	2880	0.696	7	0.1183	22000	1320	9568.9	1.7	1.14	16.0
6A	2886	0.695	8	0.1465	24300	1458	8668.9	1.6	1.04	14.3
6A	2892	0.695	9	0.1523	24700	1482	8496.4	1.5	1.02	14.0
6B	4248	0.586	2	0.1498	21600	1296	7396.5	1.7	1.05	16.4
6B	4230	0.587	3	0.1438	21600	1296	7705.1	1.7	1.09	16.4
6B	4236	0.586	4	0.1415	21100	1266	7618.4	1.7	1.08	16.8
6B	4242	0.586	6	0.1484	21300	1278	7345.0	1.7	1.04	16.7
6B	4138	0.594	5	0.1427	21000	1260	7512.3	1.7	1.05	16.9
6B	4120	0.595	7	0.1183	18200	1092	7641.6	1.9	1.07	20.1
6B	4126	0.595	8	0.1465	21400	1284	7481.2	1.7	1.05	16.6
6B	4132	0.594	9	0.1523	21200	1272	7117.5	1.7	1.00	16.7
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			3140							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			188							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.3							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			10							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			4112							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			2880							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1815							

Πίνακας 6.19

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 6, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εντός θωράκισης

<i>A/A</i> <i>μέτρησης</i>	<i>t</i> <i>(σχέση 6.2)</i> <i>(min)</i>	<i>DF</i> <i>(σχέση 6.2)</i>	<i>A/A</i> <i>δοχείου</i>	<i>μάζα</i> <i>δοχείου (kg)</i>	<i>γεγονότα στα</i> <i>1000 s</i>	<i>CPM</i>	<i>N/m</i> <i>(σχέση 6.3)</i>	<i>σφάλμα (%)</i> <i>(σχέση 5.9)</i>	<i>CF</i> <i>(σχέση 6.3)</i> <i>(Lmin⁻¹)</i>	<i>LLD</i> <i>(σχέση 6.5)</i> <i>(Bqm⁻³)</i>
6A	2664	0.715	2	0.1498	83700	5022	7590.1	4.1	0.95	73.4
6A	2670	0.714	3	0.1438	82700	4962	7489.6	4.3	0.94	77.5
6A	2676	0.714	4	0.1415	80600	4836	6720.8	4.8	0.85	87.8
6A	2682	0.713	6	0.1484	82700	4962	7257.4	4.3	0.91	77.5
6A	2904	0.694	5	0.1427	78600	4716	5823.4	5.5	0.75	100.5
6A	2910	0.693	7	0.1183	77900	4674	6669.5	5.7	0.86	105.8
6A	2916	0.693	8	0.1465	81700	4902	6942.0	4.5	0.90	82.1
6A	2922	0.692	9	0.1523	78500	4710	5416.9	5.5	0.70	101.2
6B	4254	0.585	2	0.1498	79100	4746	5747.7	5.3	0.88	97.0
6B	4260	0.585	3	0.1438	75000	4500	4276.8	7.3	0.66	135.8
6B	4266	0.584	4	0.1415	78700	4722	5915.2	5.4	0.91	99.8
6B	4272	0.584	6	0.1484	76800	4608	4872.0	6.2	0.75	115.5
6B	4144	0.593	5	0.1427	78300	4698	5697.3	5.6	0.86	102.7
6B	4150	0.593	7	0.1183	77300	4638	6365.2	6.0	0.96	110.9
6B	4156	0.592	8	0.1465	76500	4590	4812.3	6.4	0.73	118.5
6B	4162	0.592	9	0.1523	77000	4620	4826.0	6.1	0.73	113.6
<i>γεγονότα υποστρώματος στα 1000 s</i>			64750							
<i>CPM_{BKG} (για τη σχέση 6.3)</i>			3885							
<i>E (σχέση 5.10) [CPM(Bqkg⁻¹)⁻¹]</i>			2.13							
<i>MDA(σχέση 5.12) (CPM)</i>			46							
<i>παραχθέν Ραδόνιο(σχέση 5.1) (Bq)</i>			4112							
<i>χρόνος έκθεσης T_s (min)</i>			2880							
<i>μέση συγκέντρωση Ραδονίου (Bqm⁻³)</i> <i>(σχέση 5.4)</i>			1815							

Πίνακας 6.20

Συντελεστής βαθμονόμησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης για το πείραμα έκθεσης 6, μέτρηση με ανιχνευτή CANBERRA - EURISYS, εκτός θωράκισης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγγελόπουλος Μ.Γ., "Πυρηνική Τεχνολογία", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1983
2. Alter H.W., Fleischer R.L., "Passive Integrating Radon Monitor for Environmental Monitoring", Health Physics, 40(5): 693-702, 1981
3. Althuser B., Pasternack B., "Statistical Measures of the Lower Limit of Detection of a Radioactivity Counter", Health Physics, 9(3):293-298, 1963
4. Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E, Angelopoulos M.G., "Natural Radioactivity Mapping of Greek Surface Soils" Environment International (22(S1), S3-S8, 1996.
5. Αναγνωστάκης Μ.Ι., Προσωπική επικοινωνία, 2007
6. Bochicchio F., Venuti G.Campos, Nuccetelli C., Piermattei S., Risica S., Tommasino L., Torri G, "Results of the Representative Italian National Survey on Radon Indoors", Health Physics 71(5):741-748, 1996
7. Cohen B.L., Cohen E.S., "Theory and Practice of Radon Monitoring by Adsorption in Charcoal", Health Physics, 45(2): 501-508, 1983
8. Cohen B.L, Nason R., "A Diffusion Barrier Charcoal Adsorption Collector for Measuring Radon Concentration in Indoor Air", Health Physics, 50(4): 457-463, 1986
9. Countess R.J, "Radon Flux Measurement with a Charcoal Canister", Health Physics, 31: 455, 1976
10. George A.C., "Passive, Integrated Measurement of Indoor Radon Using Activated Carbon", Health Physics, 46(4): 867-872, 1984
11. Cardinal Health, "Victoreen Geiger-Mueller and Scintillation Probe Selection Guide", 2006
12. Elimpex – Medizintechnik, "Victoreen Geiger-Mueller and Scintillation Probe Selection Guide", 2006
13. Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (EURATOM), "Commission Recommendation of 21 February 1990 on the Protection of the Public against Indoor Radon Exposure to Radon", (90/143/EURATOM), Brussels, 1990
14. Γεωργιάδης Ε., Προσωπική επικοινωνία, 2006

15. Gray D.J., Windman S.T., "EERF Standard Operating Procedures for Rn-222 Measurement Using Charcoal Canisters", Report EPA 520/5-87-005, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Eastern Environmental Radiation Facility (EERF), 1890 Federal Drive, Montgomery Alabama 36109, March 1987.
16. ICRP, International Commission on Radiological Protection, "Reference Man: Anatomical Physiological and Metabolic Characteristics", ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford, UK, 1975
17. Καλογερόπουλος ΧΗΜΙΚΑ Α.Ε., Προσωπική επικοινωνία, Γούναρη 35 Πειραιάς, τηλ. +302104179316, 2006
18. Κατανεβάκης Σ., "Μετρήσεις Φυσικής Ραδιενέργειας των Ελληνικών Τσιγάρων και Μελέτη της Επίδρασης του Καπνού τους στη Ραδιενέργεια των Εσωτερικών Χώρων", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 1995.
19. Λεωνίδου Δ.Ι., "Μέθοδοι και Όργανα Ανιχνεύσεως Πυρηνικών Ακτινοβολιών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1990
20. Nikolopoulos D., Louizi A., Koukouliou V., Kehagia K., "Study of a Greek area with enhanced indoor Radon Concentration", Radiation Protection Dosimetry, 106(3), 219-225, 2003.
21. Παπαδάκος Γ., "Διαπίστευση Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2001.
22. Prichard H.M., Mariën K., "A Passive Diffusion Rn-222 Sampler based on Activated Carbon Adsorption", Health Physics, 48(6): 797-803, 1986
23. Ρουμπουλάκης Μ., ΧΗΜΙΚΑ, Προσωπική επικοινωνία, Σωκράτους 30 Αθήνα, τηλ. +302105222294, 2006
24. Sill C.W., "An Integrating Air Sampler for Determination of ²²²Rn", Health Physics 16: 371-377, 1969
25. UNSCEAR 1977 REPORT, "SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1977 report to the General Assembly, with annexes. New York

26. UNSCEAR 1982 REPORT, "SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1982 report to the General Assembly, with annexes. New York
27. UNSCEAR 1982 REPORT, "SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1982 report to the General Assembly, with annexes. New York
28. Victoreen Inc., Instruction Manual, Thyac V Survey Meter Model 190/190AC/190F, U.S.A., August 1996