

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

Διευθυντής: Καθηγητής Σ.Ε. Σιμόπουλος

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ
ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΩΝ**

**CALIBRATION EXPERIMENTS FOR INDOOR AIR
RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS USING
ADSORBING MATERIALS AND LIQUID
SCINTILLATION COCKTAILS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΔΑΛΑΚΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ**

Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Λέκτορας Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
ABSTRACT.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Γενικά.....	1-1
1.2 Παραγωγή Ραδονίου και Ραδόνιο στη φύση.....	1-1
1.3 Επικινδυνότητα Ραδονίου.....	1-2
1.4 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας.....	1-4
1.5 Μέθοδος υγρού σπινθηρισμού.....	1-6
1.5.1 Γενικά.....	1-6
1.5.2 Χρόνος ημιζωής.....	1-7
1.5.3 Μέτρηση ραδιενέργειας και ποσοτικοποίηση ισοτόπων.....	1-8
1.5.4 Ανίχνευση με βάση την αρχή του ιονισμού.....	1-9
1.5.5 Ανίχνευση με βάση την αρχή του σπινθηρισμού.....	1-10
1.5.6 Μηχανισμοί της μεθόδου υγρού σπινθηρισμού.....	1-12
1.5.7 Ο ρόλος του διαλύτη.....	1-12
1.5.8 Ο ρόλος του φωσφοριστή.....	1-13
1.5.9 Ερμηνεία σήματος υγρού σπινθηρισμού.....	1-14
1.5.10 Καταγραφή παλμών σε πολυκαναλικό αναλυτή και ταυτοποίηση ισοτόπων.....	1-15
1.5.11 Βαθμός απόδοσης.....	1-16
1.5.12 Αιτίες μείωσης του βαθμού απόδοσης.....	1-17
1.5.13 Αιτίες πλασματικής αύξησης του βαθμού απόδοσης.....	1-21
1.5.14 Αλλοίωση του βαθμού απόδοσης λόγω γεωμετρίας.....	1-24
1.5.15 Προβλήματα διάθεσης αποβλήτων.....	1-24
1.5.16 Παραδείγματα εφαρμογών.....	1-24
Διαγράμματα του 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	1-28
Πίνακες του 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	1-37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή.....	2-1
2.2 Αρχή μεθόδου ενεργού άνθρακα-υγρού σπινθηρισμού.....	2-2
2.2.1 Γενικά.....	2-2
2.2.2 Μέτρηση Ραδονίου της ατμόσφαιρας με ενεργό άνθρακα και υγρό σπινθηριστή.....	2-3
2.3 Ιστορική ανασκόπηση και παραλλαγές της μεθόδου.....	2-5
2.3.1 Prichard M. και Marlen K. (1983a).....	2-5
2.3.2 Homma Y. et al. (1987).....	2-6
2.3.3 Murase Y. et al. (1989).....	2-6
2.3.4 Schroeder M. et al. (1989).....	2-7
2.3.5 Φιαλίδια NITON (~1989).....	2-8
2.3.6 Kim T. (1992).....	2-9
2.3.7 Schoenhofer F. et al. (1995).....	2-11
2.3.8 Canoba A.C. et al. (1999).....	2-11
2.3.9 Iimoto T. et al. (2005).....	2-12
2.3.10 Stawarz et al. (2006).....	2-13
2.3.11 Cooper et al. (2011).....	2-13
2.4 Σχόλια-Παρατηρήσεις.....	2-14
Διαγράμματα του 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	2-15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υλικά και εξοπλισμός

3.1 Εισαγωγή.....	3-1
3.2 Υλικά.....	3-1
3.2.1 Προσροφητικά υλικά.....	3-1
3.2.2 Φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού.....	3-5
3.2.3 Υγροί σπινθηριστές.....	3-7
3.3 Εξοπλισμός.....	3-11
3.3.1 Φούρνος αναγέννησης.....	3-11
3.3.2 Ζυγός.....	3-12
3.3.3 Θάλαμοι Ραδονίου.....	3-12
3.3.4 Πηγές Ραδονίου.....	3-13

3.3.5 Ενεργητικοί ανιχνευτές Ραδονίου.....	3-14
3.3.6 Συσκευή ανάδευσης.....	3-15
3.3.7 Συσκευή φυγοκέντρισης.....	3-15
3.3.8 Διαθέσιμα υγρόμετρα.....	3-16
3.3.9 Συσκευή υγρού σπινθηρισμού.....	3-18
3.4 Συμπεράσματα.....	3-21
Διαγράμματα του 3^{ου} Κεφαλαίου.....	3-22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μέθοδοι

4.1 Εισαγωγή.....	4-1
4.2 Μέθοδοι.....	4-1
4.2.1 Παραγωγή Ραδονίου από πηγές.....	4-1
4.2.2 Μετάγγιση Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου.....	4-2
4.2.3 Επιλογή πηγής και θαλάμου.....	4-3
4.2.4 Ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου.....	4-6
4.2.5 Προετοιμασία δειγμάτων για έκθεση.....	4-8
4.2.6 Μέτρηση σχετικής υγρασίας στο θάλαμο "Α".....	4-9
4.2.7 Ρύθμιση της σχετικής υγρασίας στο θάλαμο "Α".....	4-11
4.2.8 Έκθεση δειγμάτων.....	4-15
4.2.9 Προετοιμασία δειγμάτων για μέτρηση.....	4-15
4.2.10 Ρύθμιση συσκευής υγρού σπινθηρισμού και επιλογή πρωτοκόλλου μέτρησης.....	4-17
4.2.11 Μέτρηση φιαλιδίων στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού.....	4-20
4.3 Συμπεράσματα.....	4-21
Διαγράμματα του 4^{ου} Κεφαλαίου.....	4-22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Επιλογή υγρού σπινθηριστή και πρωτόκολλο βαθμονόμησης

5.1 Εισαγωγή.....	5-1
5.2 Επιλογή υγρού σπινθηριστή.....	5-1
5.3 Αβεβαιότητες και βέλτιστη οργάνωση των πειραμάτων έκθεσης.....	5-4
5.4 ROI φασμάτων υγρού σπινθηρισμού.....	5-8
5.5 Μέτρηση υποστρώματος.....	5-9

5.6 Ανασκόπηση πρωτοκόλλου βαθμονόμησης.....	5-9
5.6.1 Γενικά.....	5-9
5.6.2 Λογιστικά φύλλα υπολογισμού βαθμού απόδοσης.....	5-9
5.6.3 Minimum Detectable Activity (MDA) και Lower Limit of Detection (LLD)	5-14
5.6.4 Αβεβαιότητες πρωτοκόλλου βαθμονόμησης.....	5-15
5.6.5 Αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας βαθμονόμησης.....	5-15
5.7 Συμπεράσματα.....	5-16
Διαγράμματα του 5^{ου} Κεφαλαίου.....	5-17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Πειραματικά αποτελέσματα	
6.1 Εισαγωγή.....	6-1
6.2 Η χαμηλή απόδοση του ζεόλιθου με μέγεθος πόρου 0.5 nm.....	6-1
6.3 Η χαμηλή απόδοση του silica gel.....	6-2
6.4 Πειραματικά αποτελέσματα.....	6-2
6.5 Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας.....	6-4
6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	6-6
Διαγράμματα του 6^{ου} Κεφαλαίου.....	6-7
Πίνακες του 6^{ου} Κεφαλαίου.....	6-14
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	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 (δύο από τα οποία είναι το Πολώνιο 218 και Πολώνιο 214), εκπέμποντας α -σωματίδια τα οποία είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στο να βλάπτουν τους ιστούς των πνευμόνων. Δεδομένου ότι το Ουράνιο-238 είναι στερεό μέταλλο που συναντάται στο έδαφος, γίνεται αντιληπτό, ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ραδονίου βρίσκονται στο εδαφικό αέριο και είναι της τάξης kBq m^{-3} έως MBq m^{-3} . Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης σε ορυχεία, στο νερό των θερμών πηγών και στον ατμοσφαιρικό αέρα (στον ελεύθερο εξωτερικό αέρα, αλλά και σε αυτόν στους εσωτερικούς χώρους). Ως συστατικό του εδαφικού αερίου, το Ραδόνιο διαχέεται φυσικά δια μέσου πόρων, ρωγμών και ανοιγμάτων στα διαπερατά εδάφη. Μόλις αυτό εισέλθει στην ατμόσφαιρα αραιώνεται και διασκορπίζεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Η συγκέντρωσή του επομένως στον εξωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα είναι για το λόγο αυτό αρκετά χαμηλή (συνήθως από 0 ως 10 Bq m^{-3}). Στο περιβάλλον του αέρα των εσωτερικών χώρων (π.χ. στα σπίτια), το Ραδόνιο συσσωρεύεται σε σημαντικά επίπεδα. Το μέγεθος της συγκέντρωσής του σε αυτούς τους χώρους είναι συνάρτηση του τρόπου κατασκευής των κτισμάτων αλλά και της ποσότητας του Ραδονίου στο υποκείμενο έδαφος. Ενδεικτικά έχει αναφερθεί στον τύπο ότι στην Ελλάδα έχουν βρεθεί συγκεντρώσεις Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους με τιμές έως και 200 Bq m^{-3} (Ξάνθη) ή έως και 500 Bq m^{-3} (Θεσπρωτία). Η είσοδος του Ραδονίου μέσα στο σπίτι από το έδαφος μπορεί να γίνει μέσω ρωγμών στα δάπεδα και στα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέσω των σωλήνων αποχέτευσης των δαπέδων μέσω αντλιών φρεατίων αποστράγγισης, μέσω των κατασκευαστικών αρμών και μικροσκοπικών ρωγμών ή πόρων στους τοίχους. Τα επίπεδα συγκέντρωσης του Ραδονίου στα σπίτια είναι γενικά υψηλότερα στους υπόγειους χώρους και στα δωμάτια των ισογείων, διότι αυτά είναι τα πλησιέστερα στην πηγή του Ραδονίου που είναι το έδαφος. 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 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. Είναι προφανές ότι το Ραδόνιο αποτελεί σημαντικά μικρότερο κίνδυνο στον εξωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα απ' ό,τι στον εσωτερικό αέρα. 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 (πχ. 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 – 1990, αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Οι πιο ακριβείς μέθοδοι διαπιστώθηκε ότι ήταν οι ενεργητικές, όπως πχ. 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 μέθοδος προσρόφησης Ραδονίου με κατάλληλα υλικά και στη συνέχεια η μέτρησή του με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Τέτοια προσροφητικά υλικά μπορεί να είναι ο ενεργός άνθρακας, ο συνθετικός ζεόλιθος ή ακόμα και το silica gel. Σε ό,τι αφορά τον ενεργό άνθρακα, η μέθοδος αυτή έχει διερευνηθεί διεξοδικά από την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα, συνήθως με υγρό σπινθηριστή τύπου Insta-Fluor Plus. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

επαληθεύθηκε η υπάρχουσα επιστημονική διερεύνηση για τον ενεργό άνθρακα και δοκιμάστηκαν για την ίδια μέθοδο για πρώτη φορά και συνθετικοί ζεόλιθοι με διαφορετικά μεγέθη πόρων. Λίγες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν επίσης και με silica gel. Κατά τις δοκιμές διερευνήθηκε επίσης η καταλληλότητα ορισμένων υγρών σπινθηριστών διαφορετικών από τον Insta-Fluor Plus.

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 Καθηγητή κ. Σ.Ε. Σιμόπουλο 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΜΕ

ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ

ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία της Α. Δαλάκα

Μία από τις δύο κυριότερες παθητικές βραχυ-μεσοπρόθεσμες μεθόδους για τη μέτρηση συγκέντρωσης Ραδονίου στην ατμόσφαιρα, η οποία χρησιμοποιείται με επιτυχία από τα τέλη της δεκαετίας του '80 είναι η μέθοδος του ενεργού άνθρακα. Η μέθοδος διερευνήθηκε πειραματικά για πρώτη φορά με επάρκεια από τον George (1984). Κατά τον George (1984) ο άνθρακας που έχει προσροφήσει Ραδόνιο μπορεί να μετρηθεί σε ανιχνευτή φωτονίων. Από το αποτέλεσμα της μέτρησης με κατάλληλη βαθμονόμηση μπορεί να προκύψει η συγκέντρωση του Ραδονίου στο χώρο από όπου ο ενεργός άνθρακας προσρόφησε το αέριο αυτό. Μία παραλλαγή της μεθόδου που εξελίχθηκε στη συνέχεια, από διάφορους, μέσα στη δεκαετία του '90, χρησιμοποιεί υγρό σπινθηριστή για τη μέτρηση της ακτινοβολίας του προσροφηθέντος στον ενεργό άνθρακα Ραδόνιο. Η παραλλαγή αυτή διερευνήθηκε πειραματικά με επάρκεια κυρίως από τον Canoba (1999). Και οι δύο παραλλαγές αποτελούν απλές, χαμηλού κόστους εφαρμογές μέτρησης της συγκέντρωσης του Ραδονίου κυρίως σε εσωτερικούς χώρους κατάλληλες για ένα αρκετά μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων. Ο ενεργός άνθρακας με τη μέθοδο του George (1984), χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου για περίοδο λίγων (συνήθως 3-7) ημερών. Ο ενεργός άνθρακας με τη μέθοδο του Canoba (1999), χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέσης συγκέντρωσης του Ραδονίου για περίοδο λίγων (συνήθως 2-3) ημερών. Οι δύο μέθοδοι εξαιτίας του χαμηλού κόστους τους και της ικανοποιητικής τους ακρίβειας έχουν επιτυχημένη πρακτική εφαρμογή για μεγάλης κλίμακας έρευνες, όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιούνται περίπλοκες και ακριβές ενεργητικές τεχνικές συνεχών μετρήσεων υψηλής ακρίβειας. Δεδομένης της επιτυχίας των παθητικών ανιχνευτών Ραδονίου με ενεργό άνθρακα, από όσο φαίνεται να είναι γνωστό από τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία, η έρευνα για εναλλακτικά του ενεργού άνθρακα προσροφητικά υλικά που πιθανόν να είναι κατάλληλα για ανιχνευτές Ραδονίου είναι περιορισμένη. Ο Paschalides (2010) έδειξε ότι τέτοια εναλλακτικά προσροφητικά υλικά μπορούν να είναι οι συνθετικοί

ζεόλιθοι και τα silica gel. Ορισμένοι τύποι από αυτά τα προσροφητικά υλικά δοκιμάσθηκαν και αποδείχθηκαν αποτελεσματικά με τη μέθοδο του George (1984). Στόχος της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ήταν να διερευνηθεί πειραματικά η δυνατότητα συγκρότησης ανιχνευτών Ραδονίου με προσροφητικά υλικά όπως ο ζεόλιθος και δευτερευόντως το silica gel, με τη μέθοδο του Canoba (1999), που να λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως οι αντίστοιχοι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα και να συγκριθεί η απόδοσή τους με τους αντίστοιχους ανιχνευτές ενεργού άνθρακα. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν συνθετικοί ζεόλιθοι με μέγεθος πόρων 0.5 nm και 1 nm, ενεργός άνθρακας εμπορίου (χύμα), και silica gel blue. Τα πειράματα έκθεσης έγιναν εντός θαλάμου Ραδονίου, σε βαθμονομημένες συγκεντρώσεις Ραδονίου, υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, όπου ως ανιχνευτές χρησιμοποιήθηκαν πλαστικά ανοιχτά φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού τυπικής γεωμετρίας 20 mL, που το κάθε ένα περιείχε μάζα 4g από έναν από τους τέσσερις δοκιμαζόμενους προσροφητές. Η ποσότητα του Ραδονίου που δεσμεύεται στη μάζα του κάθε προσροφητικού υλικού καθορίσθηκε μετρώντας την ακτινοβολία που προέρχεται από τις διασπάσεις των θυγατρικών του Ραδονίου με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Για το σκοπό αυτό δοκιμάσθηκαν δύο είδη υγρών σπινθηριστών: Ο υγρός σπινθηριστής τύπου Insta-Fluor Plus, και ο υγρός σπινθηριστή της σειράς Ultima Gold. Οι σπινθηριστές δοκιμάσθηκαν και αραιωμένοι με μεθανόλη και αιθανόλη σε διάφορες αναλογίες όγκων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι τα εκτιμώμενα κατώτερα όρια ανίχνευσης συγκεντρώσεων Ραδονίου προέκυψαν -όπως και αναμένονταν- αρκετά υψηλότερα σε σύγκριση με αυτά του ενεργού άνθρακα. Πιο αποδοτικό από τα δύο υλικά αλλά όχι ικανοποιητικά κοντά σε συμπεριφορά με τον ενεργό άνθρακα, εμφανίζεται ο συνθετικός ζεόλιθος με μέγεθος πόρων 1 nm. Επομένως, τέτοιοι ανιχνευτές με συνθετικό ζεόλιθο μπορούν να αποτελέσουν μια απλή και χαμηλού κόστους διάταξη παθητικής μέτρησης σχετικά υψηλών συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα.

ABSTRACT

INDOOR AIR RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS USING ADSORBING MATERIALS AND LIQUID SCINTILLATION COCKTAILS

Diploma Dissertation of A. Dalaka

One of the most effective passive integrating methods for short-term measuring of Radon concentrations in air, which has been used with success since the late 80's is the one employing active carbon (or activated charcoal) canisters. This method has been experimentally documented by George (1984). According to this study, Radon, which has been adsorbed by the activated carbon, can be measured by the photons emitted by its daughters, with the use of a scintillator detector. Measurements following a suitable calibration can be used to determine the levels of Radon in the environment, where activated carbon has been exposed. A variation of this method, which includes the use of a liquid scintillator so as to measure Radon adsorbed in the activated carbon, has been tested over the 90's by numerous researchers. This alternative has been validated mainly by Canoba (1999). Both method variations are rather simple, accurate and of low-cost, thus they have been used for indoor Radon detection of wide concentration ranges. According to George's variation, activated carbon can be used in order to determine the average Radon levels for a short-term exposure of detectors (circa 3-7 days), while according to Canoba's, the exposure time should be somewhat shorter (about 2-3 days). Both George's and Canoba's ways of indoor Radon detection have been successfully employed for Radon surveys, where complex and expensive continuous techniques (which are of a higher accuracy) cannot be used easily. Given the fact that, according to studies so far, passive integrating methods for Radon detection, using activated carbon are rather successful, the research for other suitable Radon adsorbing materials is quite limited. However, Paschalides (2010) has proved that both zeolite molecular sieve and silica gel, can be used instead of activated carbon. These adsorbents have been tested with George's variation, and as it turned out they effectively predicted Radon concentrations. The main scope of this Dissertation was to examine, if it is possible to fashion Radon detectors using adsorbents like zeolite molecular sieve and silica gel, which will be able to perform in a similar way to the ones with activated carbon, using

Canoba's variation. For this purpose a series of experiments have been held out using zeolite molecular sieve with pore sizes of 0.5 nm and 1 nm, bulk commercial granulated activated carbon (GAC) and silica gel blue. The detectors were set-up in standard 20 mL liquid scintillation vials. Each detector contained 4 g of a tested adsorbent. The vials have been exposed in a Radon chamber, with precisely calibrated concentrations of Radon, and at controlled levels of temperature and relative humidity. The adsorbed Radon was detected using liquid scintillation to count the α particles which were emitted by Radon and its daughters. Two types of liquid scintillators have been tested: Insta-Fluor Plus, and Ultima Gold. The scintillators were also tested diluted with methanol or ethanol at various proportions per volume. According to the results obtained, it was concluded that the efficiency of the detectors set with zeolite was, as expected, found lower than that of similar detectors with activated carbon. Comparing zeolite molecular sieve with pore size 1 nm and silica gel, the former was found to perform better but not close to the performance of activated carbon. Consequently, such detectors with zeolite molecular sieve can be used as a simple and low-cost passive integrating method for measuring relatively high Radon concentrations in air.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 στην αρχή την επιστημονική κοινότητα να τα αγνοήσουν –εσφαλμένα- ως παράγοντες κινδύνου για τον άνθρωπο, εξαιτίας της χημικής τους αδράνειας. Παρ όλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας –α σωματίδια.

1.2 Παραγωγή Ραδονίου και Ραδόνιο στη φύση

Το Ραδόνιο παράγεται από το ^{238}U , με διαδοχικές –α διασπάσεις και –β διασπάσεις. 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 (Αγγελόπουλος, 1983), 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 η διαθέσιμη ραδιενέργεια από το Ραδόνιο είναι ποσοτικά εξαιρετικά σημαντική. 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 πχ. 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 $0 - 10 \text{ Bq m}^{-3}$.

1.3 Επικινδυνότητα Ραδονίου

Το Ραδόνιο εισέρχεται στα κτίρια κυρίως από το εδαφικό αέριο γύρω από τα θεμέλιά τους, με τη βοήθεια διαδικασιών διάχυσης ή μεταφοράς. Ως αποτέλεσμα υψηλές συγκεντρώσεις Ραδονίου παρατηρούνται συνήθως στους υπόγειους ημιυπόγειους και ισόγειους χώρους. 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 αυτό εισπνεόμενο μαζί του οδηγείται στον

ανθρώπινο πνεύμονα, όπου τα εκπεμπόμενα –α σωματίδια δυνατόν να δημιουργήσουν τραύματα στους εσωτερικούς μαλακούς ιστούς, τα οποία έχουν σοβαρές πιθανότητες αν επαναλαμβάνονται συχνά με τον ίδιο τρόπο στο ίδιο ή κοντινό σημείο να οδηγήσουν σε καρκίνο. Παρ'όλαυτά, 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. Έστω 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. Ο πραγματικός κίνδυνος από το Ραδόνιο, δεν οφείλεται επομένως στο Ραδόνιο αυτό καθαυτό, αλλά στους (αναποφεύκτως) παραγόμενους στερεούς θυγατρικούς πυρήνες του. Ο λόγος είναι διότι, αν στον εισπνεόμενο ατμοσφαιρικό αέρα, υπάρχει Ραδόνιο, πολύ σύντομα (το πολύ σε 5 ώρες) θα υπάρχουν θεωρητικά, ίσες ποσότητες ραδιενέργειας από τους στερεούς θυγατρικούς του πυρήνες ^{218}Po και ^{214}Po . Τα θυγατρικά αυτά εισπνεόμενα δεν εκπνέονται στο σύνολό τους, όπως θα συνέβαινε αν ήταν αέρια. Σημαντικότερο μέρος τους παραμένει στο εσωτερικό των πνευμόνων, όπου 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). 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. 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} . Αβίαστα προκύπτει ότι υπάρχει ανάγκη διαπίστωσης της συγκέντρωσης Ραδονίου που επικρατεί στην ατμόσφαιρα των εσωτερικών χώρων προκειμένου να βρεθεί αν αυτοί είναι επικίνδυνοι

για την ενδιαίτηση του ανθρώπου. Η διαπίστωση αυτή γίνεται με κατάλληλες μετρητικές τεχνικές.

1.4. Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

Μία βραχυπρόθεσμη παθητική τεχνική για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα, διαθέσιμη στην αγορά, μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, βέλτιστο χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου περίπου 48 h, αλλά σχετικά υψηλή αβεβαιότητα (~ 20%), είναι η τεχνική των ανοιχτών δοχείων με περιεχόμενο προσροφητικό υλικό όπως ο ενεργός άνθρακας. Την αρχική εφαρμογή, ανέπτυξε πλήρως ο George (1984) για ενεργό άνθρακα. Η μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου με βάση αυτή τη μέθοδο γίνεται εμμέσως από τα θυγατρικά του, όπως παράγονται από το Ραδόνιο που έχει προσροφηθεί στο υλικό, με τη χρήση ανιχνευτών φωτονίων τύπου NaI. Παρόλο που η μέθοδος βρήκε ευρεία εφαρμογή, από το 1984 και μετά η έρευνα σχετικά με εναλλακτικά προσροφητικά υλικά για το Ραδόνιο, δεν συνεχίστηκε. Οι αιτίες για αυτό μπορούν να συνοψισθούν ως εξής: (1) Η τεχνική του ενεργού άνθρακα κρίθηκε σχετικά επιτυχής και με ικανοποιητικά χαμηλή αβεβαιότητα, (2) Βρέθηκε ότι τα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά τύπου οξειδία του Πυριτίου (SiO_2 ή αλλιώς τα γνωστά silica gel) προσροφούν με καλύτερο ρυθμό την υγρασία από ότι το Ραδόνιο και (3) Ήταν διαπιστωμένο ότι τα εναλλακτικά προσροφητικά υλικά τύπου ζεόλιθοι που υπήρχαν στην φύση δεν είχαν σταθερές και επαναλήψιμες προσροφητικές ιδιότητες. Στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007), έγιναν για πρώτη φορά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ πειράματα βαθμονόμησης τέτοιων δοχείων με ενεργό άνθρακα. Η σχετική έρευνα συνεχίστηκε με την Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008), όπου βαθμονομήθηκαν και δοχεία με προσροφητικό υλικό ζεόλιθο ή silica gel σε διάφορες συνθήκες περιβαλλοντικής υγρασίας. Από την έρευνα αυτή προέκυψε και η δημοσίευση Paschalides (2010). Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση τριών προσροφητικών υλικών (δηλ. ενεργού άνθρακα και ζεόλιθου με διάφορες διαστάσεις πόρων, και δευτερευόντως silica gel) για τη συγκρότηση ανιχνευτών Ραδονίου από δοχεία που είναι τυποποιημένα υάλινα φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού. Για τη μέτρηση τα φιαλίδια πληρώνονται με υγρό σπινθηριστή και μετρώνται σε κατάλληλη συσκευή. Η αρχή της μέτρησης βασίζεται στο γεγονός ότι το Ραδόνιο που έχει προσροφηθεί στο δοκιμαζόμενο προσροφητικό υλικό διαλύεται στον υγρό σπινθηριστή και στη συνέχεια αυτό και τα θυγατρικά του αλληλεπιδρούν με τον

υγρό σπινθηριστή, παράγοντας μετρήσιμο φως. Στη συνέχεια του 1^{ου} Κεφαλαίου, αφιερώνεται μία ειδική ενότητα η οποία περιγράφει τις βασικές αρχές της μεθόδου του υγρού σπινθηρισμού, οι οποίες παρουσιάζονται σε ελληνικό κείμενο για πρώτη φορά. Σημειώνεται ότι η ενότητα αυτή βασίζεται στο κείμενο National Diagnostics Laboratory Staff (2004).

Στο 2^ο Κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζονται οι αρχές της παθητικής μεθόδου μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου με χρήση ενεργού άνθρακα και υγρού σπινθηριστή και αναλύονται οι βασικότερες βιβλιογραφικές αναφορές στο πως αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται με διάφορες παραλλαγές και βελτιώσεις. Με βάση την ανάλυση αυτή θα προκύψει στα επόμενα Κεφάλαια το πώς η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί με τον καλύτερο τρόπο στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, ανάλογα και με τον διαθέσιμο εξοπλισμό, χρόνο και αναλώσιμα υλικά.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι πολλαπλές δυνατότητες υλικών και εξοπλισμού προκειμένου για την οργάνωση της βαθμονόμησης για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου με χρήση προσροφητικών υλικών και υγρών σπινθηριστών, που διαθέτει το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) και χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Οι δυνατότητες δεν είναι ταυτόσημες αλλά είναι παρόμοιες με εκείνες, που παρουσιάστηκαν στη βιβλιογραφία στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο κυρίως για προσροφητή ενεργό άνθρακα και υγρούς σπινθηριστές με βάση το τολουένιο. Διατίθενται δηλαδή όλα τα βασικά απαραίτητα όπως: θάλαμοι Ραδονίου, πηγές ²²⁶Ra για τη δημιουργία συγκεντρώσεων Ραδονίου στους θαλάμους, προσροφητές διάφορων τύπων, υγροί σπινθηριστές διάφορων τύπων, συσκευή υγρού σπινθηρισμού καθώς και άλλα αναγκαία παρελκόμενα υλικά και όργανα και δοκιμασμένες μέθοδοι για την αξιοποίησή τους.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες χρησιμοποιείται ο εξοπλισμός που αναφέρθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο με στόχο την όσο το δυνατόν απλούστερη και με οικονομία χρόνου οργάνωση των πειραμάτων. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι μέθοδοι: (α) η παραγωγή Ραδονίου από τις πηγές, (β) η μετάγχιση Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου, (γ) η επιλογή κατάλληλου συνδυασμού πηγής και θαλάμου, (δ) η ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου, (ε) ο τρόπος προετοιμασίας δειγμάτων για έκθεση, (στ) ο τρόπος μέτρησης σχετικής υγρασίας στο θάλαμο "Α", (ζ) ο προτεινόμενος τρόπος ρύθμισης της σχετικής υγρασίας σε θάλαμο Ραδονίου, (η) ο τρόπος έκθεσης των

δειγμάτων, (θ) ο τρόπος προετοιμασίας εκτεθέντων δειγμάτων για μέτρηση, και τέλος, (ι) ο τρόπος μέτρησης των εκτεθέντων δειγμάτων.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κυρίως: (1) προβληματισμοί και συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή του καταλληλότερου υγρού σπινθηριστή, (2) ο τρόπος μέτρησης του υποστρώματος, (3) οι σχέσεις για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης της μεθόδου συμπεριλαμβανομένων των σχετικών σφαλμάτων, (4) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσότητας Minimum Detectable Activity(MDA) και (5) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσότητας Lower Limit of Detection (LLD). Οι μέθοδοι, και οι σχέσεις, όπως χρησιμοποιούνται, συνιστούν το πρωτόκολλο βαθμονόμησης προσροφητικών υλικών ως ανιχνευτών Ραδονίου που μετρώνται με την μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού.

Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας

1.5. Μέθοδος υγρού σπινθηρισμού

1.5.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό, τα ραδιενεργά ισότοπα έχουν τη δυνατότητα να επαναδιοργανώνουν τους πυρήνες τους με εκπομπή σωματιδίων που συνήθως συνοδεύεται και από έκλυση ενέργειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διάσπαση. Η διάσπαση των πυρήνων συνοδεύεται από την εκπομπή σωματιδίων (-α σωματίδια, -β σωματίδια, -γ ακτινοβολία) είτε ποσών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λόγω των αλλαγών που συμβαίνουν στον πυρήνα του ισότοπου. Από τα εκπεμπόμενα σωματίδια, τα -α είναι τα πιο "βαριά". Κάθε -α σωματίδιο αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια., αποτελεί δηλαδή ένα σταθερό πυρήνα Ηλίου, που είναι σε θέση να διεισδύει ασθενώς σε οποιοδήποτε είδος ύλης συναντήσει. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι τα -α σωματίδια αδυνατούν ακόμα και να διαπεράσουν ακόμα και 5 cm ατμοσφαιρικού αέρα. Στην πράξη τα -α σωματίδια που εκπέμπονται έχουν καθορισμένες ενέργειες, που είναι χαρακτηριστικές για κάθε ισότοπο που διασπάται. Τα -β σωματίδια, αποτελούνται από ηλεκτρόνια (ή ποζιτρόνια) υψηλής ενέργειας, τα οποία παράγονται κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου (ή πρωτονίου) του πυρήνα σε ένα πρωτόνιο (ή νετρόνιο) και ένα ηλεκτρόνιο (ή ποζιτρόνιο). Τα -β σωματίδια εκπέμπονται ταυτόχρονα με ένα νεutrίνο (ή ένα αντινεutrίνο), το οποίο είναι αδύνατον να εντοπιστεί. Το άθροισμα των ενεργειών του νεutrίνου (ή του

αντινετρίνου) και του β σωματιδίου αποτελεί μία σταθερά, δεδομένη για κάθε ισότοπο που διασπάται με αυτόν τον τρόπο, η οποία καθορίζει τη μέγιστη ενέργεια (E_{\max}) που μπορεί να παρατηρηθεί για κάθε β σωματίδιο το οποίο εκπέμπεται από το εν λόγω ισότοπο. Η E_{\max} προσεγγίζεται μόνο από β σωματίδια τα οποία εκπέμπονται μαζί με ένα νεutrino (ή αντινεutrino) χαμηλής ενέργειας. Επομένως, στην πράξη τα β σωματίδια που εκπέμπονται δεν έχουν καθορισμένες ενέργειες αλλά παρουσιάζουν συνεχές φάσμα ενεργειών, διότι η ενέργειά τους εξαρτάται από την ενέργεια του ταυτόχρονα εκπεμπόμενου νεutrino (ή αντινεutrino). Το συνεχές φάσμα ενεργειών των β σωματιδίων έχει τη μορφή του Διαγράμματος 1.1 και χαρακτηρίζεται ποσοτικά από δύο μεγέθη: την μέγιστη ενέργεια E_{\max} και την μέση ενέργεια E_{mean} . Όπως και η E_{\max} έτσι και η E_{mean} αποτελεί μία σταθερή, δεδομένη για κάθε ισότοπο που διασπάται με αυτόν τον τρόπο. Η γ ακτινοβολία, διαφέρει από τις δύο προαναφερθείσες ακτινοβολίες ως προς το ότι πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική και όχι για σωματιδιακή ακτινοβολία. Είναι κατά κανόνα πολύ διεισδυτική ακτινοβολία, η οποία σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα και με την ενέργειά της, μπορεί να διαπεράσει ακόμα και 5 cm μολύβδου. Επιπροσθέτως, η γ ακτινοβολία, έχει την δυνατότητα να επάγει τη δημιουργία δευτερογενούς β ακτινοβολίας. Αυτή παράγεται όταν ένα ηλεκτρόνιο της ύλης, απορροφήσει την ενέργεια της γ ακτινοβολίας, και μεταβεί σε διεγερμένη κατάσταση. Αυτό οδηγεί στη ρήξη του δεσμού του ηλεκτρονίου με τον πυρήνα, με αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να διαφύγει από το άτομο ως β σωματίδιο.

1.5.2 Χρόνος ημιζωής

Έστω ένα πλήθος ραδιενεργών πυρήνων του ίδιου ισότοπου. Ο αριθμός ραδιενεργών διασπάσεων των πυρήνων του πλήθους σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, ονομάζεται ραδιενέργεια (ή ενεργότητα) και συμβολίζεται με R . Η ραδιενέργεια μετράται συνήθως σε διασπάσεις sec^{-1} (ή Bq, προς τιμή του ερευνητή Becquerel) και ισούται με την πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου λ (συνήθως σε sec^{-1}) οποιουδήποτε πυρήνα του πλήθους πολλαπλασιασμένη με τον συνολικό πλήθος των πυρήνων. Η ραδιενέργεια μειώνεται καθώς προχωρά η διαδικασία των διασπάσεων, αλλά παραμένει πάντα ανάλογη του πλήθους των ραδιενεργών πυρήνων που απομένουν. Για να εκφρασθεί η ραδιενέργεια ανεξάρτητα των πυρήνων που απομένουν, εισάγεται η έννοια του χρόνου ημιζωής $T_{1/2}$, δηλαδή του χρονικού διαστήματος εκείνου μέσα στο οποίο το 50% των πυρήνων της αρχικής ποσότητας έχουν διασπασθεί. Οι τιμές του χρόνου ημιζωής μπορεί

να κυμαίνονται από μερικά msec μέχρι και αρκετά εκατοντάδες χρόνια, και αποτελεί σταθερά, χαρακτηριστική για κάθε είδος ραδιενεργών ισοτόπων. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι απαιτούνται 24 ώρες για την διεξαγωγή ενός πειράματος μέτρησης συγκέντρωσης ισοτόπου με χρόνο ημιζωής 6 ώρες, τότε με την λήξη του χρόνου του πειράματος, θα έχει διασπασθεί σχεδόν το 94% των αρχικών πυρήνων. Αυτός είναι και ο λόγος, που τα περισσότερα ισότοπα που χρησιμοποιούνται για πειραματικές μετρήσεις, έχουν χρόνο ημιζωής περίπου 10 ημέρες ή και περισσότερο. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός ραδιενεργών πυρήνων N ενός ισοτόπου που απομένουν, μετά από ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα t , χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad \text{και} \quad N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

όπου

λ : η σταθερά της διάσπασης,

$T_{1/2}$: ο χρόνος ημιζωής,

N : το πλήθος των ραδιενεργών πυρήνων,

N_0 : το αρχικό πλήθος των πυρήνων, και

t : ο χρόνος

Ο χρόνος ημιζωής ενός ισοτόπου, μετράται από τη ραδιενέργειά του.

Δεδομένου ότι ένα πλήθος ραδιενεργών πυρήνων από το ίδιο ισότοπο εκπέμπει ακτινοβολία, έρχεται κάποια στιγμή, που λόγω διασπάσεων δεν εκπέμπει πλέον. Έτσι λοιπόν, ένα δεδομένο πλήθος ραδιενεργών πυρήνων είναι σε θέση να αποδώσει ορισμένο ποσό συνολικής ραδιενέργειας.

1.5.3 Μέτρηση ραδιενέργειας και ποσοτικοποίηση ισοτόπων

Η μέτρηση της περιεκτικότητας των ραδιενεργών ισοτόπων σε ένα δείγμα γίνεται μέσω της μέτρησης της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, η οποία εκφράζεται σε μονάδες ραδιενέργειας όπως:

(α) διασπάσεις ανά λεπτό (DPM, disintegrations per minute).

(β) διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο (Bq) (αντιστοιχεί σε 60 DPM και είναι μονάδα του συστήματος SI), και

(γ) η μονάδα Curie (αντιστοιχεί σε 3.7×10^{10} Bq). Είναι μία προγενέστερη αλλά ακόμα χρησιμοποιούμενη μονάδα.

Μία ακριβής μέτρηση της ραδιενέργειας ενός δείγματος πχ. σε DPM θα απαιτούσε κάθε μία διάσπαση που θα συνέβαινε να ανιχνεύεται και να μετράται, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό να συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις, διότι οι διάφορες ανιχνευτικές μετρητικές διατάξεις έχουν βαθμό απόδοσης.

Επιπλέον οι ανιχνευτικές διατάξεις δέχονται παρεμβολές από ραδιενέργεια που εκλύεται από ισότοπα που υπάρχουν στο περιβάλλον και την κοσμική ακτινοβολία, που μαζί αποτελούν τη λεγόμενη ακτινοβολία υποστρώματος (ή αλλιώς "background").

Έτσι λοιπόν χρειάζονται διορθώσεις ώστε να μετατραπούν οι ανά λεπτό μετρήσεις (CPM, counts per minute), σε DPM (disintegrations per minute), δηλαδή σε ανά λεπτό διασπάσεις, που είναι και αυτές που συμβαίνουν στη πραγματικότητα.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που επιτρέπουν την εφαρμογή διορθώσεων για το βαθμό απόδοσης και το υπόστρωμα, και έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της μέτρησης χρησιμοποιώντας μία ποικιλία από συστήματα ανίχνευσης.

1.5.4 Ανίχνευση με βάση την αρχή του ιονισμού

Η -α, -β και -γ ακτινοβολία, ανήκουν στη κατηγορία της ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Τα -α και -β σωματίδια ιονίζουν απευθείας τα άτομα με τα οποία αλληλεπιδρούν, κυρίως αφαιρώντας ηλεκτρόνια. Η -γ ακτινοβολία προκαλεί δευτερεύουσες εκπομπές ηλεκτρονίων, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να ιονίζουν και άλλα άτομα. Τα κατιόντα και τα ανιόντα που προκύπτουν από τους ιονισμούς αυτούς, μπορούν να ανιχνευθούν από τη αύξηση της αγωγιμότητας που προκαλούν σε κατάλληλα μονωτικά αέρια, που βρίσκονται σε κατάλληλους μετρητικούς θαλάμους, τους λεγόμενους θαλάμους ιονισμού. Αυτές οι συσκευές μετρούν στην ουσία τους παλμούς αγωγιμότητας μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που παράγονται όταν ακτινοβολία από διάσπαση ιονίζει το αέριο που βρίσκεται μεταξύ τους. Εάν στα ηλεκτρόδια εφαρμοστεί μία επαρκώς υψηλή τάση, τότε από τον παλμό αγωγιμότητας μπορεί να εξαχθεί ένα ενισχυμένο σήμα, κάτι που καθιστά αυτού του είδους ανιχνευτές, αρκετά ευαίσθητους. Το Διάγραμμα 1.2 παρουσιάζει την αρχή της μέτρησης του θαλάμου ιονισμού. Βέβαια η χρησιμότητά των θαλάμων ιονισμού για μέτρηση ραδιενέργειας στερεών και υγρών δειγμάτων είναι

περιορισμένη, καθώς στις περισσότερες ερευνητικές εφαρμογές μπορούν να ανιχνεύσουν με καλό βαθμό απόδοσης μόνο γ ακτινοβολία και δευτερευόντως β ακτινοβολία.

1.5.5 Ανίχνευση με βάση την αρχή του σπινθηρισμού

Κάποια από τα άτομα μιας ύλης που έχουν προσβληθεί από ιοντίζουσα ακτινοβολία, δεν ιονίζονται πλήρως, αλλά προάγουν τα ηλεκτρόνιά τους σε διεγερμένες καταστάσεις. Αυτό μπορεί να συμβαίνει επίσης και όταν ένα υποσύνολο του αρχικού πληθυσμού των ιονισμένων ατόμων ανασυντίθενται σε ηλεκτρικά ουδέτερα με ένα αντίθετα φορτισμένο ιόν και μπορεί να προκύψουν με διεγερμένα ηλεκτρόνια. Τα διεγερμένα με αυτόν τον τρόπο άτομα μπορούν να αποδιεγερθούν εκπέμποντας ποσά ενέργειας, με τη μορφή φωτονιακής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σπινθηρισμός. Τέτοια φαινόμενα σπινθηρισμού αποτελούν τη βάση μίας σειράς πολύ ευαίσθητων τεχνικών και συστημάτων ανίχνευσης ραδιενέργειας από τα οποία τα κυριότερα είναι τα συστήματα στερεού σπινθηρισμού και τα συστήματα υγρού σπινθηρισμού. Στα συστήματα στερεού σπινθηρισμού κρύσταλλος από ανόργανο (πχ. NaI) ή οργανικό υλικό, που ονομάζεται σπινθηριστής, ακτινοβολείται από το δείγμα. Ως αποτέλεσμα ο σπινθηριστής εκπέμπει φως το οποίο αποτελεί ένδειξη των επιπέδων της ραδιενέργειας του δείγματος. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο ίδιος κρύσταλλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε δείγμα, γεγονός που ενισχύει την επαναληψιμότητα. Οι στερεοί σπινθηριστές είναι κατάλληλοι για μέτρηση γ ακτινοβολίας η οποία είναι πολύ διεσδυτική και μπορεί να δημιουργήσει σπινθηρισμό οπουδήποτε μέσα σε έναν μεγάλο κρύσταλλο. Η αρχή της μεθόδου του στερεού σπινθηρισμού διακρίνεται στο Διάγραμμα 1.3. Για τη μέτρηση α και β ακτινοβολίας η τεχνική του στερεού σπινθηρισμού έχει σοβαρούς περιορισμούς. Ο κρύσταλλος πρέπει να είναι προστατευμένος από ρύπανση εξαιτίας του δείγματος, το οποίο σημαίνει ότι τα α και β σωματίδια πρέπει να διασχίσουν ένα φράγμα από αέρα καταρχήν και στη συνέχεια το μεταλλικό κάλυμμα του κρυστάλλου, προκειμένου να αλληλεπιδράσουν με τον σπινθηριστή. Συγκεκριμένα, η α ακτινοβολία, εξασθενεί σε μεγάλο βαθμό ακόμα και με 0.05mm αλουμινίου ή χαλκού, και έτσι δεν μπορεί να αναμένεται να φτάσει τον κρύσταλλο του σπινθηριστή ακόμα και με το πιο λεπτό κάλυμμα. Μία από τις μεθόδους ανίχνευσης ραδιενέργειας σε δείγμα που περιέχει ραδιενεργά ισότοπα είναι και η μέθοδος του υγρού σπινθηρισμού. Στα συστήματα υγρού σπινθηρισμού το δείγμα σε υγρή και όσο το δυνατόν πιο διαυγή μορφή πρέπει να

αναμιχθεί με ένα υλικό, επίσης υγρό και κατά κανόνα διαυγές, το οποίο φωσφορίζει (παράγει φως) όταν προσβάλλεται από σωματίδιο α ή β , το οποίο εκπέμπεται λόγω ραδιενεργού διάσπασης. Το μείγμα τοποθετείται σε κατάλληλο διαφανές ή έστω διαφώτιστο φιαλίδιο κατάλληλου μεγέθους από το οποίο το φως αυτό εξέρχεται και μπορεί να καταμετρείται από φωτοπολλαπλασιαστική κατάλληλης μετρητικής διάταξης που ονομάζεται συσκευή υγρού σπινθηρισμού. Επομένως, οι συσκευές υγρού σπινθηρισμού ανιχνεύουν την ραδιενέργεια μέσω της ίδιας ακολουθίας γεγονότων εκπομπής φωτός, όπως και με τον στερεό σπινθηρισμό. Η βασική διαφορά είναι ότι στη μέθοδο υγρού σπινθηρισμού, ο σπινθηρισμός γίνεται σε ένα διάλυμα δείγματος και σπινθηριστή και όχι σε έναν στερεό κρύσταλλο. Αυτό έχει ως συνέπεια να επιτρέπεται η στενή επαφή μεταξύ των ραδιενεργών ισοτόπων του δείγματος και των μορίων του σπινθηριστή, κάτι που δεν είναι εφικτό στον στερεό σπινθηρισμό. Με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού, το γεγονός ότι η β ακτινοβολία έχει μικρή εμβέλεια, έπαυσε να αποτελεί πια εμπόδιο για την ανίχνευσή της. Ο υγρός σπινθηρισμός έχει εξελιχθεί ως μία μέθοδος που καλύπτει τα κενά του στερεού σπινθηρισμού σε ό,τι αφορά τη μέτρηση α και β ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται κυρίως για υδατικά ή οργανικά διαλύματα που περιέχουν ισότοπα που εκπέμπουν β ακτινοβολία. Η μέθοδος του υγρού σπινθηρισμού παρέχει ευκολία, επαναληψιμότητα και μεγάλο βαθμό απόδοσης για την ανίχνευση των πυρήνων που εκπέμπουν β σωματίδια.

Για αρκετές εφαρμογές της μεθόδου αρκεί η ανάμιξη ενός υγρού β ή α ραδιενεργού διαλύματος με τον υγρό σπινθηριστή, χωρίς άλλα επιπρόσθετα βήματα. Σε άλλες περιπτώσεις τα δείγματα πρέπει να έχουν υποστεί και μία προεργασία, προκειμένου να μην παρατηρούνται προβλήματα μέτρησης. Οι πιο κοινές αιτίες που τα προκαλούν είναι η λεγόμενη "σβέση", ο χημικός φθορισμός, ο στατικός ηλεκτρισμός, και η μη διαύγεια του δείγματος. Οι καλύτερες αποδόσεις στις μετρήσεις μπορούν να επιτευχθούν όταν τα δείγματα είναι ομογενή, άχρωμα και ουδέτερου pH. Η ομοιογένεια του μίγματος με τον υγρό σπινθηριστή είναι επίσης βασική και επιτυγχάνεται με την επιλογή του κατάλληλου υγρού σπινθηριστή. Τα οργανικά υγρά δείγματα παρουσιάζουν τα μικρότερα προβλήματα και αναμιγνύονται καλύτερα με τους υγρούς σπινθηριστές, οι οποίοι σε τέτοια περίπτωση δεν χρειάζεται να περιέχουν γαλακτωματοποιητές. Τα οργανικά υγρά δείγματα μπορούν επίσης επιτυχώς να αναμιχθούν με υγρούς σπινθηριστές που περιέχουν γαλακτωματοποιητές. Πολύ συχνά η ευκολία του να

χρησιμοποιηθεί ένας μόνο τύπος υγρού σπινθηριστή για όλους τους τύπους των μιγμάτων, βάζει σε δεύτερη μοίρα το γεγονός ότι σε ορισμένα τέτοια μίγματα παρατηρείται μείωση του βαθμού απόδοσης και της ακρίβειας των μετρήσεων. Τα υδατικά διαλύματα είναι λίγο πιο δύσκολα στο χειρισμό διότι απαιτούν οπωσδήποτε ανάμιξη με υγρούς σπινθηριστές που περιέχουν γλακτωματοποιητές. Η επιλογή του κατάλληλου υγρού σπινθηριστή εξαρτάται επίσης από την αναλογία μαζών υγρού δείγματος - υγρού σπινθηριστή. Ένας απλός κανόνας "τριών δακτύλων" είναι να επιλέγεται ένας υγρός σπινθηριστής που μπορεί να συγκρατήσει τουλάχιστον 10% περισσότερο δείγμα απ'όσο υπάρχει πρόθεση να αναμιχθεί, καθώς η βέλτιστη αναλογία μαζών υγρού δείγματος - υγρού σπινθηριστή, μπορεί να επηρεασθεί σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, ή από τα συστατικά του υγρού δείγματος.

1.5.6 Μηχανισμοί της μεθόδου υγρού σπινθηρισμού

Ο υγρός σπινθηριστής είναι συνήθως μείγμα (cocktail) κατάλληλων υγρών οργανικών ενώσεων σε κατάλληλη αναλογία ώστε να απορροφά την ενέργεια η οποία εκπέμπεται ως ακτινοβολία από τα ραδιενεργά ισότοπα, και στη συνέχεια να εκπέμπει φως. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν αυτές οι δύο διακριτές δραστηριότητες, δηλ. η απορρόφηση και η εκπομπή, ο υγρός σπινθηριστής περιέχει δύο βασικά χαρακτηριστικά, τον διαλύτη και τον φωσφοριστή. Ο διαλύτης έχει ως κύριο καθήκον την απορρόφηση της ενέργειας και τη μεταβίβασή της στον φωσφοριστή. Τα μόρια του φωσφοριστή που βρίσκονται διασκορπισμένα μέσα στο μείγμα, μετατρέπουν την ενέργεια που τους μεταβιβάζεται σε φως. Πολλά από τα cocktail περιέχουν επιπρόσθετα συστατικά, για διάφορους λόγους, αλλά ο διαλύτης και ο φωσφοριστής (ή οι φωσφοριστές, αν χρειάζονται περισσότεροι), είναι αυτοί που ευθύνονται για τον σπινθηρισμό του μίγματος.

1.5.7 Ο ρόλος του διαλύτη

Η αναλογία του διαλύτη στον υγρό σπινθηριστή κυμαίνεται από 60 έως 99% του συνολικού διαλύματος. Όταν ένα ραδιενεργό ισότοπο διαλύεται στον υγρό σπινθηριστή γίνονται διασπάσεις και αποδιεγέρσεις. Τα εκπεμπόμενα από τις διασπάσεις σωματίδια ή τα εκπεμπόμενα από τις αποδιεγέρσεις φωτόνια πιθανότατα θα συναντήσουν μόνο μόρια διαλύτη. Για το λόγο αυτό, ο διαλύτης πρέπει να δρα σαν ένας ισχυρός συλλέκτης ενέργειας, και πρέπει να την μεταβιβάζει στα μόρια του φωσφοριστή και όχι να αποσβένει την εν λόγω ενέργεια με κάποιον άλλο μηχανισμό. Ο διαλύτης επίσης, δεν

πρέπει να εμποδίζει τον σπινθηρισμό του φωσφοριστή, και πρέπει να επιτρέπει την ομογενή ανάμιξή του με τον φωσφοριστή σε ένα σταθερό μείγμα. Οι αρωματικές οργανικές ενώσεις έχουν αποδειχθεί ότι είναι οι πλέον κατάλληλοι διαλύτες για τα cocktail υγρού σπινθηρισμού. Τυπικά οργανικά μόρια από διάφορους διαλύτες διακρίνονται στο Διάγραμμα 1.4. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος είναι το τολουένιο, αν και πια έχει αρχίσει να αντικαθίσταται από άλλους λιγότερο τοξικούς και περισσότερο ασφαλείς. Ο δακτύλιος του τολουενίου (όπως και κάθε αρωματικός δακτύλιος) παρέχει ένα μεγάλο στόχο για αλληλεπιδράσεις κυρίως με τα -β και δευτερευόντως με τα -α σωματίδια, και στη συνέχεια απορροφά την ενέργεια τους. Η ενέργεια αυτή κατά κύριο λόγο διασκορπίζεται μεταξύ των μορίων του διαλύτη και γενικά δεν εκπέμπεται ως φως ή δεν οδηγεί σε κάποιου άλλου είδους αποδιέγερση. Επομένως ένα -α ή -β σωματίδιο που έχει αλληλεπιδράσει με το διαλύτη αφήνει πίσω του έναν αριθμό από διεγερμένα μόρια τολουενίου. Η ενέργεια από αυτά τα μόρια, η οποία διακινείται μεταξύ των αρωματικών δακτυλίων του διαλύτη, απορροφάται τελικά με μεγάλο βαθμό απόδοσης από τα μόρια του φωσφοριστή, και μετατρέπεται σε φως με τον τρόπο που διακρίνεται στο Διάγραμμα 1.5.

1.5.8 Ο ρόλος του φωσφοριστή

Οι φωσφοριστές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: πρωτεύοντες και δευτερεύοντες. Καταλαμβάνουν από 0,3 έως 1% του συνολικού όγκου του διαλύματος, και ευθύνονται για τη μετατροπή της ενέργειας που μεταβιβάστηκε από το διαλύτη σε εκπεμπόμενο φως. Μεταξύ γειτονικών μορίων του φωσφοριστή υπάρχουν τυπικά παραπάνω από 10 μόρια διαλύτη. Τα μόρια του φωσφοριστή επιτρέπουν την άμεση παραλαβή ενέργειας από το διεγερμένο διαλύτη. Οι πρωτεύοντες φωσφοριστές πρέπει (α) να διαλύονται ομογενώς στο συνολικό μείγμα σε κατάλληλη αναλογία ώστε να διεγείρονται επιτυχώς από τον διαλύτη, και (β) να αποδιεγείρονται εκπέμποντας φως. Οι δευτερεύοντες φωσφοριστές δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σήμερα. Είχαν αρχικά ενταχθεί στα cocktail υγρού σπινθηρισμού διότι το παραγόμενο φως από τον πρωτεύοντα σπινθηριστή έχει μικρό μήκος κύματος (408 nm), με αποτέλεσμα να μην είναι ορατό καλά από τους παλαιότερους φωτοπολλαπλασιαστές. Ο δευτερεύων φωσφοριστής έχει την ιδιότητα να διεγείρεται από το φως του πρωτεύοντος φωσφοριστή και να αποδιεγείρεται παράγοντας φως με μεγαλύτερο μήκος κύματος, με αποτέλεσμα να είναι ορατό καλά από όλους τους φωτοπολλαπλασιαστές. Με την πρόοδο της τεχνολογίας των φωτοπολλαπλασιαστών η

ανάγκη για δευτερεύοντα φωσφοριστή περιορίσθηκε. Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται η μεταβίβαση ενέργειας μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος φωσφοριστή δεν είναι σαφής (αν και το φάσμα εκπομπής του πρωτεύοντος και το απορροφούμενο φάσμα από τον δευτερεύοντα γενικά επικαλύπτονται, η κινητική της ανταλλαγής, δείχνει μία άμεση επαφή και όχι μία διαδικασία εκπομπής-απορρόφησης). Αν και οι φωτοπολλαπλασιαστές που χρησιμοποιούνται σήμερα (2012) είναι γενικά ικανοί να μετρήσουν τους παλμούς φωτός από τον πρωτεύοντα φωσφοριστή, οι δευτερεύοντες, έχει αποδειχθεί ότι είναι σε θέση να βελτιώνουν την απόδοση σε πολλές περιπτώσεις, οπότε και συμπεριλαμβάνονται ακόμα στα περισσότερα cocktail. Έχει αποδειχθεί ότι συνδεδεμένοι δακτύλιοι βενζολίου, συγκριτικά με μεγαλύτερα αρωματικά συστήματα, δημιουργούν γενικά αποδοτικότερους φωσφοριστές. Ο PPO φωσφοριστής είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος πρωτεύων και ο Bis-MSB ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος δευτερεύων. Η ναφθαλίνη, είναι κατά κάποιον τρόπο μοναδική, καθώς είναι σε θέση να λειτουργεί και ως διαλύτης και ως φωσφοριστής και είναι κατάλληλη για ανίχνευση ακτινοβολίας -β χαμηλών ενεργειών.

1.5.9 Ερμηνεία σήματος υγρού σπινθηρισμού

Συνοπτικά, τα -α και -β σωματίδια τα οποία διαπερνούν τον υγρό σπινθηριστή, αφήνουν κάποια διεγερμένα μόρια του διαλύτη, τα οποία μεταβιβάζουν την ενέργειά τους σε μόρια του φωσφοριστή, τα οποία στη συνέχεια αποδίδουν φως. Κάθε μόριο φωσφοριστή αποδίδει μόνο ένα φωτόνιο από κάθε διέγερσή του και το μήκος κύματος του φωτονίου είναι χαρακτηριστικό για τον σπινθηριστή, και όχι για την ενέργεια του -α ή του -β σωματιδίου. Παρόλαυτά, πολλά διαφορετικά μόρια φωσφοριστή διεγείρονται από πολλά διεγερμένα μόρια διαλύτη τα οποία προέκυψαν από ένα -α ή -β σωματίδιο. Επομένως ένα -α ή -β σωματίδιο μπορεί να καταλήξει να παράγει και τυπικά περίπου 1000 φωτόνια ανά keV από τον φωσφοριστή. Η διαδρομή που ακολουθεί ένα -β σωματίδιο σε ένα cocktail υγρού σπινθηρισμού είναι λιγότερο από 0.1 cm, και ο χρόνος διαδρομής είναι αντίστοιχα πολύ μικρός, γεγονός που σημαίνει ότι η έκλυση των φωτονίων που προέρχονται από μία αλληλεπίδραση του cocktail με -β σωματίδιο απορρέει από έναν μικρό χώρο, ο οποίος σχηματικά αποδίδεται στο Διάγραμμα 1.6. Το πλήθος των φωτονίων που παράγονται με αυτόν τον τρόπο είναι ευθέως ανάλογο με το μήκος διαδρομής των -β σωματιδίων, το οποίο καθορίζεται από την ενέργεια εκπομπής τους (τα -β σωματίδια μεταβιβάζουν ενέργεια από μόριο διαλύτη σε μόριο διαλύτη μέχρι να

εξαντλήσουν την ενέργειά τους). Τα φωτόνια αυτά προσβάλλουν τον φωτοπολλαπλασιαστή σχεδόν ταυτόχρονα, και το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται θεωρείται ότι οφείλεται σε ένα μόνο παλμό φωτός. Όσο δυνατότερος ο παλμός (=όσο περισσότερα τα φωτόνια) τόσο ισχυρότερο το ηλεκτρικό σήμα σε V από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Επομένως, το ηλεκτρικό σήμα από κάθε παλμό φωτός αντιστοιχεί στην ενέργεια εκπομπής του β σωματιδίου και το πλήθος των παλμών φωτός στη μονάδα του χρόνου αντιστοιχεί στο αντίστοιχο πλήθος των β διασπάσεων. Τα σχετικά με τα α σωματίδια είναι αντίστοιχα.

1.5.10 Καταγραφή παλμών σε πολυκαναλικό αναλυτή και ταυτοποίηση ισοτόπων

Ένας μετρητής υγρού σπινθηρισμού πρέπει να είναι σε θέση να ταξινομεί κάθε ηλεκτρικό σήμα από παλμό φωτός ανάλογα με την τιμή του σε V σε κανάλια πολυκαναλικού αναλυτή. Οι παλμοί ανά λεπτό (CPM) κάθε καναλιού καταγράφονται ηλεκτρονικά. Κάθε κανάλι του πολυκαναλικού αναλυτή αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος ενεργειών β ακτινοβολίας. Διαδοχικά κανάλια καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος ενεργειών και ονομάζονται μετρητικά παράθυρα, και καταγράφουν ενέργειες β σωματιδίων εντός ενός κατώτερου και ανώτερου ορίου που έχουν τεθεί, ανάλογα με τον αριθμό και τη θέση των διαδοχικών καναλιών. Η συνήθης πρακτική είναι να επιλέγονται τρία μετρητικά παράθυρα, τα οποία διαχωρίζουν το ενεργειακό φάσμα εκπομπών β ακτινοβολίας σε χαμηλή, μέση και υψηλή ενέργεια. Το χαμηλότερο μετρητικό παράθυρο αντιστοιχεί στην ενέργεια β σωματιδίων από διάσπαση H-3. Το υψηλότερο μετρητικό παράθυρο αντιστοιχεί στην ενέργεια β σωματιδίων από διάσπαση P-32. Το ενδιάμεσο μετρητικό παράθυρο χρησιμοποιείται γενικά για τις ενέργειες όλων των υπόλοιπων β σωματιδίων. Στο Διάγραμμα 1.7 παρατηρούνται ποιοτικά τα φάσματα ενεργειών β σωματιδίων που εκπέμπονται από το H-3, τον C-14 και τον P-32. Για κάθε ένα από αυτά τα φάσματα μπορεί να ορισθεί αντίστοιχο μετρητικό παράθυρο. Όταν μία μέτρηση τελειώσει (συμπληρωθεί δηλαδή ο χρόνος μέτρησης) όλοι οι παλμοί έχουν ταξινομηθεί από τον πολυκαναλικό αναλυτή και ο ερευνητής γνωρίζει την ένταση της ακτινοβολίας, η οποία συνήθως εκφράζεται σε παλμούς ανά λεπτό (CPM), και την ενεργειακή κατανομή της, ή αλλιώς το φάσμα της. Οι παλμοί ανά λεπτό είναι φυσικά ανάλογοι της ποσότητας των ισοτόπων που βρίσκονται στο δείγμα, και το φάσμα δείχνει χονδρικά την ταυτότητα των ισοτόπων ανάλογα με τα μετρητικά παράθυρα. Με τη βοήθεια ενός θεωρητικού, ιδανικού υγρού σπινθηριστή, όλη η ενέργεια από τα β

σωματίδια μπορεί να συλληχθεί και να μετατραπεί σε φως. Τα πραγματικά cocktail παρ'ολ'αυτά είναι λιγότερο από 100% αποτελεσματικά στη συλλογή ενέργειας, κυρίως από τις χαμηλότερης ενέργειας -β εκπομπές, γεγονός που απαιτεί τον υπολογισμό ενός διαφορετικού βαθμού απόδοσης για κάθε μετρητικό παράθυρο. Το φάσμα της εκπεμπόμενης -β ακτινοβολίας μπορεί να ληφθεί απευθείας από τα δεδομένα. Οι υψηλότερες ενεργειακές εκπομπές μπορούν γενικά να συγκριθούν με τις μέγιστες ενέργειες εκπομπής που είναι γνωστές για κάθε ισότοπο, ώστε να ταυτοποιηθεί το κάθε ισότοπο.

1.5.11 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης ενός υγρού σπινθηριστή δίνεται συνήθως ως το ποσοστό των γεγονότων εκπομπής που παράγουν έναν ανιχνεύσιμο παλμό φωτονίων. Με άλλα λόγια ο βαθμός απόδοσης είναι το πηλίκο των παλμών ανά λεπτό (counts per minute ή CPM) προς το πλήθος των διασπάσεων ανά λεπτό (disintegrations per minute ή DPM) εκφρασμένο ως % ποσοστό. Ο βαθμός απόδοσης διαφέρει όχι μόνο ανάλογα με τον υγρό σπινθηριστή αλλά και ανάλογα με το ισότοπο, τα συστατικά του δείγματος και τις συσκευές υγρού σπινθηρισμού. Μικρές τιμές του βαθμού απόδοσης, μπορεί να οφείλονται κυρίως σε πολύ χαμηλή ενέργεια -β σωματιδίων, ή σε χαμηλό βαθμό απόδοσης της μετατροπής σε φως (απόδοση φωσφορισμού). Έχει υπολογιστεί ότι μόνο το 4% περίπου από την ενέργεια μίας εκπομπής -α ή -β σωματιδίου μετατρέπεται σε φως ακόμα και από το πιο αποδοτικό cocktail. Ευτυχώς αυτό το ποσοστό δεν διαφέρει μέσα σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών -β ακτινοβολίας, γεγονός που αποτρέπει ένα επιπρόσθετο στάδιο πολυπλοκότητας στον προσδιορισμό του συνολικού βαθμού απόδοσης. Παρ'ολ'αυτά η χαμηλή απόδοση του φωσφορισμού σημαίνει ότι τα -β σωματίδια χαμηλής ενέργειας μπορούν να δημιουργήσουν λίγα μόνο φωτόνια. Το H-3 για παράδειγμα, έχει μέγιστη ενέργεια -β ακτινοβολίας $E_{\max} = 0.019 \text{ MeV}$, η οποία με απόδοση φωσφορισμού στο 4%, θα οδηγήσει στην παραγωγή περίπου 240 φωτονίων. Η μέση ενέργεια εκπομπής E_{mean} του H-3 κυμαίνεται περίπου στο 30-40% της μέγιστης ενέργειας από την οποία θα προκύψουν περίπου 70 με 100 φωτόνια. Είναι φανερό ότι πολλές εκπομπές -β σωματιδίων που είναι κάτω από τη μέση ενέργεια δεν θα καταμετρηθούν. από το όργανο καταλήγοντας σε μειωμένο βαθμό απόδοσης για την περίπτωση του H-3.

1.5.12 Αιτίες μείωσης του βαθμού απόδοσης

(Α) Σβέση

Σημαντικό ρόλο όταν παρατηρούνται μειωμένοι βαθμοί απόδοσης έχει το φαινόμενο της σβέσης (στα αγγλικά quenching). Η σβέση οφείλεται

(α) στην απορρόφηση της ενέργειας των β σωματιδίων στο διάλυμα με διαφορετικούς τρόπους πέρα από αυτούς που περιγράφηκαν. Αυτό συνεπάγεται μείωση στον αριθμό των φωτονίων που παράγονται από κάθε β σωματίδιο.

και

(β) στην απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων του παραγόμενου φωτός προτού αυτά φθάσουν στον φωτοπολλαπλασιαστή για να παράγουν ηλεκτρικό σήμα. Σε αυτή τη περίπτωση αν και το πλήθος των εκπεμπόμενων φωτονίων είναι σταθερό, το πλήθος που φτάνει στον φωτοπολλαπλασιαστή είναι μειωμένο.

Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε απομείωση της ενέργειας των φωτονιακών παλμών και μείωση του πλήθους των καταγραφόμενων παλμών ανά λεπτό, διότι παράγονται παλμοί ενέργειας κάτω από τα όρια ανίχνευσης, όπως σχηματικά αποδίδεται και στο Διάγραμμα 1.8. Το φαινόμενο της σβέσης μπορεί να μειώσει το βαθμό απόδοσης πολύ σημαντικά.

Η σβέση οφείλεται κυρίως στην κακή αναλογία υγρού διαλύματος – υγρού σπινθηριστή ή στη χημική αντίδραση του υγρού διαλύματος με τον υγρό σπινθηριστή, η οποία μπορεί να αλλοιώνει την απόδοση του υγρού σπινθηριστή (chemical quenching) ή και στον χρωματισμό του μίγματος ως αποτέλεσμα χημικής αντίδρασης (color quenching). Το φαινόμενο της σβέσης παρουσιάζεται ποιοτικά στο Διάγραμμα 1.9.

(Β) Τεχνικές διόρθωσης σβέσης

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι προκειμένου να διορθωθεί το φαινόμενο της σβέσης. Η πιο απλή αν και κοπιώδης πρακτική είναι η χρήση κάποιου προτύπου διαλύματος με βαθμονομημένη συγκέντρωση β ραδιενεργού ισοτόπου. Μία γνωστή ποσότητα ραδιενέργειας προστίθεται από το πρότυπο διάλυμα στο προς μέτρηση δείγμα. Η πρόσθεση αυξάνει το πλήθος των διασπάσεων το λεπτό κατά ένα προβλέψιμο ποσοστό. Η διαφορά μεταξύ του αναμενόμενου σήματος σε CPM και αυτού που εν τέλει λαμβάνεται οφείλεται στο φαινόμενο της σβέσης και επιτρέπει τον προσδιορισμό του βαθμού απόδοσης της μέτρησης του προς μέτρηση δείγματος. Βέβαια ένα σημαντικό

αρνητικό της μεθόδου αυτής, είναι ότι κάθε δείγμα πρέπει να μετράται δύο φορές. Ακόμη είναι αρκετά δύσκολη η πρόσθεση προτύπων διαλυμάτων σε αρκετά φιαλίδια, δεδομένου ότι τα πρότυπα διαλύματα είναι πολύ ακριβά.. Αρκετές συσκευές υγρού σπινθηρισμού δίνουν τη δυνατότητα χρήσης εξωτερικού προτύπου για το σκοπό αυτό, ως εξής:·. Μετά την αρχική μέτρηση ενός δείγματος, μία ισχυρή πηγή γ ακτινοβολίας τοποθετείται δίπλα στο φιαλίδιο και το δείγμα μετράται ξανά. Η γ ακτινοβολία προκαλεί δευτερεύουσα εκπομπή ηλεκτρονίων από το δείγμα βάσει του φαινομένου Compton. Τα ηλεκτρόνια αυτά φωσφορίζουν στο cocktail σαν β σωματίδια. Όταν τελειώσει η δεύτερη μέτρηση, οι παλμοί εξαιτίας της πραγματικής β ραδιενέργειας του δείγματος αφαιρούνται, αφήνοντας μόνο το φάσμα από όσους οφείλονται στα ηλεκτρόνια εξαιτίας του φαινομένου Compton. Το φάσμα της θεωρητικά αναμενόμενης ενέργειας των ηλεκτρονίων αυτών συγκρίνεται στη συνέχεια με εκείνο που βρέθηκε μετά την αφαίρεση, προκειμένου να προσδιοριστεί το μέγεθος της σβέσης. Τα δείγματα πρέπει και πάλι να μετρώνται 2 φορές, αλλά δεν χρειάζεται να προστεθεί κάτι στα φιαλίδια, και η διαδικασία μπορεί να γίνει αυτόματα από την συσκευή.

Η ανάλυση της έντασης του φαινομένου της σβέσης για τη μέτρηση ενός ισοτόπου που διασπάται παράγοντας β σωματίδια, μπορεί να γίνει υπολογιστικά με τη χρήση των μετρητικών παραθύρων. Έστω ότι για την περιγραφή της μεθόδου ανάλυσης υπάρχουν δύο μετρητικά παράθυρα: το παράθυρο χαμηλών ενεργειών A και το παράθυρο υψηλών ενεργειών B. Οι ανιχνευόμενοι παλμοί, καταγράφονται στα παράθυρα αυτά βάσει των σχετικών τους ενεργειών. Το πλήθος των παλμών υψηλής ενέργειας (παράθυρο B), συγκρίνεται με το πλήθος των παλμών χαμηλής ενέργειας (παράθυρο A). Η αναλογία B/A ή αλλιώς $B/(A+B)$ είναι τότε και μόνο τότε μέγιστη όταν δεν υπάρχει καθόλου σβέση. Η αναλογία αυτή μπορεί να μειωθεί λόγω του φαινομένου της σβέσης στο δείγμα, διότι μειώνεται η ένταση του κάθε φωτονιακού παλμού, οπότε οι παλμοί παρουσιάζονται ως να είναι χαμηλότερης ενέργειας. Αυτό μπορεί να μετατρέψει παλμούς που καταγράφονται "κανονικά" στο παράθυρο B σε παλμούς που καταγράφονται λόγω σβέσης στο παράθυρο A.

Για τη μέτρηση της έντασης του φαινομένου της σβέσης μπορούν

(1) να χρησιμοποιούνται πρότυπα διαλύματα στα οποία έχει προστεθεί ένα αίτιο σβέσης σε διαφορετικές ποσότητες. Μετά από μετρήσεις προσδιορίζεται η αναλογία των

παλμών $B/(A+B)$ και δημιουργείται μία συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας του αιτίου σβέσης και της αναλογίας $B/(A+B)$, η οποία μπορεί να χρησιμοποιείται γενικότερα.

(2) να εφαρμόζεται η μέτρηση της αναλογίας των παλμών $B/(A+B)$ ακόμα και στο ίδιο το προς μέτρηση δείγμα ως εξής: Από το δείγμα κατασκευάζονται μία σειρά από φιαλίδια με υγρό σπινθηριστή, στο κάθε ένα από τα οποία προστίθεται μία διαφορετική αλλά γνωστή ποσότητα β ραδιενέργειας, κατά προτίμηση από το ίδιο ή κοντινού είδος¹ του προς μέτρηση ισοτόπου. Στη συνέχεια τα φιαλίδια μετρώνται και δημιουργείται μία καμπύλη συσχέτισης του λόγου CPM/DPM με το λόγο $B/(A+B)$. Από τη στιγμή που η καμπύλη αυτή δημιουργηθεί, η σβέση κάθε δείγματος που θα ακολουθήσει μπορεί να προσδιορισθεί από την αναλογία των καναλιών και ταυτόχρονα να προκύψει ο βαθμός απόδοσης CPM/DPM για τη μέτρηση του αναζητούμενου ισοτόπου.

(Γ) Σβέση σε σχέση με υδρόφοβους και υδρόφιλους υγρούς σπινθηριστές

Όπως έχει συζητηθεί και νωρίτερα, οι καλύτεροι διαλύτες για ένα πείραμα σπινθηρισμού είναι οι οργανικοί αρωματικοί δακτύλιοι, όπως το τολουένιο (αλλά και το ξυλένιο), οι οποίοι είναι όμως υδρόφοβοι και ακατάλληλοι για την ανάμιξη με υδατικά διαλύματα. Η ανάλυση υδατικών διαλυμάτων με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού απαιτεί τη κατασκευή πιο πολύπλοκων υδρόφιλων υγρών σπινθηριστών, που θα είναι ικανοί να φέρουν τα μόρια ενός υδατικού δείγματος σε καλή ανάμιξη με τον υγρό διαλύτη του σπινθηριστή, ώστε ο τελευταίος να απορροφά με καλή απόδοση την ενέργεια των β σωματιδίων από διασπάσεις μέσα στο υγρό δείγμα. Οι περισσότεροι σπινθηριστές που έχουν σχεδιαστεί ως υδρόφιλοι (δηλ. για υδατικά δείγματα) περιέχουν επιφανειοδραστικές ουσίες, (ή surfactants, στην ουσία δηλ. σάπωνες ή απορρυπαντικά), οι οποίες βοηθούν το δείγμα να διαλυθεί στον οργανικό διαλύτη. Το τολουένιο συνεργάζεται συνήθως με το απορρυπαντικό Triton-X100. Όταν το νερό του δείγματος προστίθεται στο διάλυμα του Triton-X100 στο τολουένιο, τα μόρια του απορρυπαντικού προσανατολίζονται και σχηματίζουν γαλάκτωμα από φορτισμένες δομές από πολυμερή μόρια με τις υδρόφοβες αλυσίδες αλκανίων να βλέπουν προς το διάλυμα και τις υδρόφιλες πολυεθυλενικές αλυσίδες γλυκόλης να βλέπουν προς μικροθύλακες αδιάλυτου ύδατος, όπως σχηματικά αποδίδεται στο Διάγραμμα 1.10.

Επειδή οι επιφανειοδραστικές και άλλες παρόμοιες ουσίες είναι γενικά λιγότερο αποδοτικές στην απορρόφηση της ενέργειας από τα β σωματίδια, τα cocktail με

¹ από την άποψη της ενέργειας των εκπεμπόμενων β

γαλακτωματοποιητή είναι λιγότερο αποδοτικά από τα cocktail που δεν έχουν απορροπατικά. Ακόμα, ο σχηματισμός φορτισμένων δομών από πολυμερή μόρια σημαίνει ότι οι ραδιενεργές εκπομπές πρέπει να "δραπετεύσουν" από αυτές προκειμένου να αρχίσει η διαδικασία φωσφορισμού, γεγονός που οδηγεί σε κατανάλωση ενέργειας και άρα μείωση των φωτονίων ανά -β σωματίδιο που φτάνουν για καταμέτρηση. Ως αποτέλεσμα λοιπόν, στους υγρούς σπινθηριστές για υδατικά διαλύματα παρατηρείται εντονότερη σβέση, η οποία μπορεί να ληφθεί υπόψη με τους τρόπους που έχουν προαναφερθεί. Η σβέση αυτή είναι και η συνηθέστερη παρατηρούμενη και εξαρτάται από το μέγεθος των φορτισμένων δομών, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την αναλογία δείγματος - υγρού σπινθηριστή, τη λεγόμενη φόρτιση του σπινθηριστή. Όσο μεγαλύτερη η φόρτιση αυτή τόσο εντονότερη η σβέση. Επομένως η αιτία αυτού του τύπου σβέσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ως συνάρτηση της αναλογίας δείγματος - υγρού σπινθηριστή και της ποσότητας $B/(A+B)$ και να κατασκευασθεί η σχετική διορθωτική καμπύλη για τον βαθμό απόδοσης.

(Δ) Σβέση λόγω φόρτισης υγρού σπινθηριστή

Όταν αυξάνεται η αναλογία ενός δείγματος με βάση το νερό που αναμιγνύεται με ένα υδρόφιλο υγρό σπινθηριστή το μέγεθος των φορτισμένων δομών από πολυμερή μόρια μεγαλώνει. Ως αποτέλεσμα τα -β σωματίδια καταναλώνουν πολύ από την ενέργειά τους για να "δραπετεύσουν" από τις δομές και να αλληλεπιδράσουν με το διαλύτη και τον φωσφοριστή. Όταν η αναλογία αυτή γίνει πολύ μεγάλη οι μικροθύλακες αδιάλυτου ύδατος δεν είναι πια μικροί με αποτέλεσμα να μην γίνεται πλέον καλή ανάμιξη του νερού με τον οργανικό διαλύτη και να παρατηρείται διαχωρισμός. Αυτό σημαίνει ότι τα -β σωματίδια που παράγονται στο μη αναμεμιγμένο νερό δεν έχουν την ευκαιρία να φθάσουν στον φωσφοριστή με αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά ο βαθμός απόδοσης της μέτρησης. Υπάρχει ένα δεδομένο άνω όριο αναλογίας υδατικού μίγματος - υγρού σπινθηριστή πέρα από το οποίο παρατηρείται διαχωρισμός. Αυτό το όριο ονομάζεται μέγιστη φόρτιση (ή μέγιστη χωρητικότητα) του σπινθηριστή. Η μέγιστη φόρτιση εξαρτάται από τη σύσταση του δείγματος και από τη θερμοκρασία. Ένα μείγμα υδατικού διαλύματος - σπινθηριστή που ξεπερνά τη μέγιστη φόρτιση είτε είναι είναι ετερογενές διότι το νερό διαχωρίζεται μερικώς από τον σπινθηριστή, είτε αδιαφανές διότι έχει δημιουργηθεί γαλάκτωμα. Τα φωτόνια τα οποία παράγονται μέσα σε ένα τέτοιο γαλάκτωμα δεν φθάνουν στον φωτοπολλαπλασιαστή διότι απορροφούνται. Επομένως

για καλές μετρήσεις με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού, είναι βασικό να διασφαλισθεί ότι ο όγκος του υδατικού διαλύματος δεν είναι κοντά στην χωρητικότητα του σπινθηριστή. Μίγματα κατασκευασμένα κοντά στη μέγιστη φόρτιση του σπινθηριστή μπορούν να γίνουν αδιαφανή ακόμα και με μεταβολή της θερμοκρασίας της τάξης των 1-2 °C, δίνοντας έτσι εσφαλμένα αποτελέσματα. Επίσης όταν χρησιμοποιούνται διαφώτιστα πλαστικά φιαλίδια σπινθηρισμού, το αδιαφανές μείγμα μπορεί να μη γίνει αντιληπτό οδηγώντας έτσι σε μεγάλα σφάλματα.

(E) Σβέση λόγω χρωματισμού

Η επίτευξη ενός άχρωμου μίγματος ραδιενεργού υγρού με υγρό σπινθηριστή είναι γενικά εύκολη, καθώς τα περισσότερα δείγματα είναι άχρωμα, ή περιέχουν πολύ λίγο χρώμα το οποίο με την διάλυση στο cocktail δίνει ένα σχετικά άχρωμο διάλυμα. Στις περιπτώσεις τις οποίες τα δείγματα είναι πολύ χρωματισμένα, και ιδιαίτερα όταν το δείγμα απορροφά το φως στην περιοχή μήκους κύματος 300-400 nm (περίπου υπεριώδες φως) όπου εκπέμπουν οι υγροί σπινθηριστές, μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα σβέσης. Καθώς το τυχόν ορατό χρώμα εξαρτάται γενικά από τη σύζευξη μακρών συστημάτων πολυενίου μπορούν να χρησιμοποιούνται ισχυρά οξέα προκειμένου να "λευκάνουν" τα δείγματα. Η επεξεργασία των δειγμάτων πριν τη μέτρηση με οξέα, επιτρέπεται να είναι πολύ επιθετική, καθώς οι χημικές αλλαγές που θα επιβληθούν με αυτά δεν θα αλλάξουν το πλήθος των αποδιεγέρσεων ανά λεπτό που θα προκύψουν.

1.5.13 Αιτίες πλασματικής αύξησης του βαθμού απόδοσης

(A) Χημικός φθορισμός

Ένα ευρέως συναντούμενο σφάλμα στον υγρό σπινθηρισμό είναι ο χημικός φθορισμός. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από οποιαδήποτε χημική αντίδραση δημιουργεί διεγερμένο μοριακό προϊόν, το οποίο αποδιεγείρεται με εκπομπή φωτός. Αυτές οι αντιδράσεις παράγουν φωτόνια, τα οποία προφανώς δεν οφείλονται σε $-\beta$ ή $-\alpha$ διασπάσεις και το οποίο μπορεί είτε να απορροφηθούν στο διάλυμα ή να προσμετρηθούν λανθασμένα ως γεγονότα εκπομπής χαμηλής ενέργειας. Κάτι τέτοιο μπορεί να παράξει μέχρι και ~100 επιπλέον CPM, για τυπικά φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού χωρητικότητας μίγματος 20 mL, καταστρέφοντας έτσι τόσο τις ολικές πληροφορίες που λαμβάνονται για τους παλμούς ανά λεπτό αλλά και τις πληροφορίες για το λόγο $B/(A+B)$ που αναλύθηκαν προηγουμένως. Ο χημικός φθορισμός γενικά εξαρτάται από την κινητική

της χημικής αντίδρασης που τον προκαλεί και μπορεί να προσδιοριστεί με το να μετρώνται τα δείγματα δύο φορές με μία χρονική απόσταση περίπου μίας ώρας μεταξύ των μετρήσεων. Καθώς ο χρόνος περνά, το ποσοστό των παραγόμενων φωτονίων λόγω χημικού φθορισμού μειώνεται αισθητά λόγω ολοκλήρωσης της χημικής αντίδρασης που τον προκαλεί. Κατά κανόνα ο χημικός φθορισμός μετά από την πάροδο μίας ώρας από το σχηματισμό του διαλύματος είναι πρακτικά αμελητέος, και συνήθως προσεγγίζει το μηδέν μετά από την πάροδο 2 έως το πολύ 24 ωρών. Ο χημικός φθορισμός μπορεί επομένως να είναι ενοχλητικός όταν πρέπει να γίνει μέτρηση ισοτόπων με πολύ μικρό χρόνο ημιζωής. Εάν υποπτευόμαστε ότι υπάρχει πιθανότητα να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο του χημικού φθορισμού, σε δείγματα ισοτόπων μικρού χρόνου ημιζωής, τα δείγματα πρέπει να μετρώνται σε συνεχή διαστήματα μεγαλύτερα της μίας ώρας μέχρι να καταλήξει κανείς σε σταθερές μετρήσεις.

Πολλές συσκευές σπινθηρισμού, χρησιμοποιούν μετρήσεις τύπου "σύμπτωσης" προκειμένου να μειωθούν οι επιπλέον μετρήσεις φωτονίων λόγω του φαινομένου αυτού. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο φωτοπολλαπλασιαστές, οι οποίοι συνήθως τοποθετούνται απέναντι ο ένας από τον άλλο. Ανάμεσα από τους φωτοπολλαπλασιαστές τοποθετείται το φιαλίδιο με το μείγμα. Επειδή με τον χημικό φθορισμό παράγονται λίγα φωτόνια χαμηλής ενέργειας, το πιθανότερο είναι ότι αυτά θα ενεργοποιήσουν μόνο τον ένα από τους δύο φωτοπολλαπλασιαστές. Αντίθετα, το πλήθος των φωτονίων που προκύπτουν από μία διάσπαση, συνήθως ενεργοποιούν και τους δύο. Δεκτές επομένως μπορούν να είναι οι μετρήσεις που προέρχονται "ταυτόχρονα" από δύο πολλαπλασιαστές μέσα σε ένα αρκετά μικρό χρονικό παράθυρο. Το αρνητικό της μεθόδου αυτής είναι ότι μερικές εκπομπές φωτονίων χαμηλής ενέργειας που οφείλονται σε διασπάσεις δεν θα προσμετρηθούν.

Άλλη μέθοδος ελέγχου του χημικού φθορισμού είναι η λεγόμενη εξουδετέρωση δείγματος, η οποία μπορεί να εφαρμόζεται για αλκαλικά υγρά δείγματα. Η εξουδετέρωση ενός αλκαλικού διαλύματος μπορεί να επιτευχθεί με τη προσθήκη κατάλληλου οξέως. Εάν το δείγμα έχει υψηλή περιεκτικότητα αλκαλίων, με τον τρόπο αυτό ενδέχεται να αυξηθεί πάντως η συγκέντρωση αλάτων πέρα από το όριο κορεσμού του μίγματος με τον υγρό σπινθηριστή και να εμφανισθεί ίζημα. Σε αυτή τη περίπτωση το δείγμα μπορεί να χρειαστεί να αραιωθεί πριν να προστεθεί ο υγρός σπινθηριστής.

Οι παλμοί φωτός που οφείλονται στον χημικό φθορισμό σε σχέση με εκείνους που οφείλονται στο φθορισμό λόγω ραδιενέργειας διακρίνονται ποιοτικά στο Διάγραμμα 1.11.

(Β) Στατικός ηλεκτρισμός

Μία ακόμα πηγή εσφαλμένων μετρήσεων αποτελεί ο στατικός ηλεκτρισμός. Η ενέργεια που συσσωρεύεται λόγω του στατικού ηλεκτρισμού μπορεί να ελευθερωθεί με εκφόρτιση (δηλ. σπινθήρα) η οποία μετατρέπεται σε μία έκλυση φωτός από το cocktail. Σε ξηρά περιβάλλοντα, με πλαστικά φιαλίδια και γάντια από latex, μπορούν να δημιουργηθούν υψηλά επίπεδα στατικού ηλεκτρισμού, αρκετά ώστε να δώσουν για περιορισμένο χρονικό διάστημα ~100 CPM ή και περισσότερο. Ο στατικός ηλεκτρισμός είναι η πιθανή αιτία από την οποία διαδοχικές μετρήσεις από ένα και μόνο δείγμα, μπορούν να διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Το αρνητικό αυτό φαινόμενο μπορεί να μειωθεί με το να καθαρίζονται τα φιαλίδια με ένα υγρό χαρτομάντιλο, καθώς το νερό απωθεί τον στατικό ηλεκτρισμό, ή με ένα αντιστατικό ύφασμα.

(Γ) Φως περιβάλλοντος

Τα φωτόνια από το φως του περιβάλλοντος είναι δυνατόν να αλληλεπιδρούν με τον υγρό σπινθηριστή και να παράγουν επιπλέον φως, πέρα από αυτό που οφείλεται στις ραδιενεργές διασπάσεις. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο, τα προετοιμασμένα δείγματα με υγρό σπινθηριστή πρέπει να φυλάσσονται σε σκοτεινό μέρος προτού μετρηθούν. Το φαινόμενο, αν παρατηρείται, είναι σημαντικό, μόνο για μετρήσεις που διαρκούν λίγο. Ο θάλαμος μέτρησης στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού είναι σκοτεινός και ως εκ τούτου η επίδραση του φωτός του περιβάλλοντος εκλείπει σύντομα.

(Δ) Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Τα φωτόνια από ακτινοβολία (υπέρυθρο μήκος κύματος) είναι δυνατόν να αλληλεπιδρούν με τον υγρό σπινθηριστή και να παράγουν επιπλέον φως, πέρα από αυτό που οφείλεται στις ραδιενεργές διασπάσεις. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο, τα προετοιμασμένα δείγματα με υγρό σπινθηριστή πρέπει να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία με αυτήν στην οποία πρόκειται να μετρηθούν. Το φαινόμενο, αν παρατηρείται, είναι σημαντικό, μόνο για μετρήσεις που διαρκούν λιγότερο από το χρόνο εξισορρόπησης της θερμοκρασίας του δείγματος με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος

του θαλάμου μέτρησης της συσκευής υγρού σπινθηρισμού. Διατίθενται στο εμπόριο συσκευές σπινθηρισμού που ρυθμίζουν τη θερμοκρασία του θαλάμου μέτρησης.

1.5.14 Αλλοίωση βαθμού απόδοσης λόγω γεωμετρίας

Συχνά είναι αναγκαίο να μετρώνται δείγματα με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού, τα οποία δεν είναι κατάλληλα για να διαλύονται ομογενώς μέσα σε υγρό σπινθηριστή. Το πρόβλημα που δημιουργείται τότε συνήθως έχει να κάνει με την κακή γεωμετρία μέτρησης, η οποία σχετίζεται με την κακή διασπορά του δείγματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα εκπεμπόμενα -β ή -α σωματίδια χάνονται με απορρόφηση καθώς πολλές φορές εκπέμπονται σε μία κατεύθυνση η οποία δεν επιτρέπει να αλληλεπιδράσουν με το cocktail. Για παράδειγμα, για δείγμα το οποίο καθιζάνει στον πυθμένα του φιαλιδίου υγρού σπινθηρισμού, το 50% των διασπάσεων ενδέχεται να χαθεί, καθώς από όσες εκπομπές γίνονται προς τον πυθμένα είτε θα αποτυγχάνει ο σπινθηρισμός τους, είτε ο παραγόμενοι σπινθηρισμοί δεν θα μπορέσουν να φτάσουν στον φωτοπολλαπλασιαστή. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται προφανώς και κατά τη μέτρηση φίλτρων με ραδιενεργά ισότοπα μέσα σε υγρό σπινθηριστή (βλ. και Διάγραμμα 1.12).

1.5.15 Προβλήματα διάθεσης αποβλήτων

Κάτι που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν κατά το σχεδιασμό ενός πειράματος υγρού σπινθηρισμού είναι η διάθεση των αποβλήτων. Σε αντίθεση με τον στερεό σπινθηρισμό, ο υγρός στηρίζεται στην πρόσθεση δραστικών χημικών συστατικών χαμηλής τοξικότητας στο δείγμα, αυξάνοντας επιπλέον και τον όγκο του ραδιενεργού υλικού. Τα προστιθέμενα τοξικά είναι ανεπιθύμητο γενικά να διαχυθούν στο περιβάλλον στα συμβατικά συστήματα απόρριψης αποβλήτων. Επιπλέον, το ίδιο ανεπιθύμητη είναι η απόρριψη ραδιενεργών διαλυμάτων. Ευτυχώς αρκετοί από τους διαθέσιμους σήμερα υγρούς σπινθηριστές είναι βιοδιασπώμενοι και για τα περισσότερα πειράματα, μόνο ένα μικρό ποσοστό των μετρούμενων δειγμάτων έχει σημαντική ραδιενέργεια και επιβάλλει ειδικούς τρόπους χειρισμού.

1.5.16 Παραδείγματα εφαρμογών

(A) Μέτρηση συγκεντρώσεων ^{14}C

Προγενέστερη μέθοδος από αυτή του υγρού σπινθηρισμού στην ανίχνευση συγκεντρώσεων ^{14}C ήταν η καύση οργανικών υλικών και η ανίχνευση του $^{14}\text{CO}_2$ το οποίο παραγόταν σε αέρια φάση. Εξαλείφοντας τα βήματα καύσης που απαιτούνται για

μία ανάλυση σε αέρια φάση, η μέθοδος υγρού σπινθηρισμού μείωσε τον απαιτούμενο χρόνο για ανάλυση ραδιενεργών δειγμάτων για ^{14}C , από ώρες, σε μερικά λεπτά. Πολλά όμως σύγχρονα πρωτόκολλα μέτρησης για ^{14}C εξακολουθούν ακόμα να βασίζονται στην καύση και στη μέτρηση του $^{14}\text{CO}_2$ με υγρό σπινθηρισμό. Το παραγόμενο $^{14}\text{CO}_2$ παγιδεύεται σε υγρά διαλύματα χρησιμοποιώντας πολύ δυνατές οργανικές βάσεις (carbamate - βλ. και το Διάγραμμα 1.13). Τα υγρά αυτά διαλύματα αναμιγνύονται στη συνέχεια με κατάλληλους υγρούς σπινθηριστές.

(B) Δοκιμή κηλίδας ή Wipe Testing ή Smear Testing

Κατά το χειρισμό ραδιενεργών ισοτόπων πρέπει να τηρούνται όλοι οι κανόνες ασφάλειας, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν επικίνδυνες εκθέσεις. Καθώς η ραδιενέργεια είναι αδύνατον να ανιχνευθεί χωρίς τη χρήση οργάνων, ρυπάνσεις από ισότοπα είναι πολύ εύκολο να αρχίσουν να διασπείρονται μέσα αλλά και έξω από το εργαστήριο, χωρίς καν να γίνουν αντιληπτές. Όταν τελειώνει ένα πείραμα, στο οποίο εμπλέκονται υγρά ραδιενεργά διαλύματα απαιτείται γενικά ένας διεξοδικός έλεγχος όλων των επιφανειών για ρύπανση από ραδιενέργεια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κατάλληλο φίλτρο από χαρτί ή κάποιο άλλο υλικό με απορροφητικές ικανότητες, το οποίο τρίβεται έντονα στην επιφάνεια εργασίας, και στη συνέχεια τοποθετείται μέσα σε υγρό σπινθηριστή και μετράται. Εάν μετρηθούν επίπεδα ραδιενέργειας πάνω απ'αυτά του φυσικού υποστρώματος, τότε η μολυσμένη περιοχή πρέπει να καθαριστεί και να ξαναδοκιμαστεί, μέχρι να μην ανιχνεύεται πια η μόλυνση. Ο τύπος του φίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό παίζει ρόλο στην αξιοπιστία της δοκιμής, για αυτό και συχνά χρησιμοποιούνται φίλτρα από ίνες γυαλιού (Glass Fiber Filters), τα οποία όταν τοποθετηθούν στον υγρό σπινθηριστή γίνονται διαφανή. Σε περίπτωση που το φιαλίδιο τοποθετηθεί στη συσκευή μέτρησης υγρού σπινθηρισμού έτσι ώστε το φίλτρο να βρίσκεται στην πλευρά προς τον φωτοπολλαπλασιαστή, τότε το περισσότερο από το φως το οποίο εκπέμπεται από τον υγρό σπινθηριστή γύρω από το φίλτρο θα απορροφηθεί από το φίλτρο, γεγονός που έχει ως συνέπεια να λαμβάνονται τεχνητά χαμηλότερες μετρήσεις, με αποτέλεσμα να μετρώνται μολυσμένες επιφάνειες ως καθαρές. Στα Διαγράμματα 1.14 και 1.15 διακρίνονται διαφορετικές συμπεριφορές φίλτρων μέσα σε υγρούς σπινθηριστές. Η απόδοση του καθαρισμού από τη ρύπανση στηρίζεται στη γνώση της χημικής φύσης του ρυπαντή ισοτόπου. Τα υλικά που διαλύονται στο νερό θα μπορέσουν να καθαριστούν

από τις επιφάνειες οι οποίες δεν είναι απορροφητικές με τη χρήση διαλυμάτων απορρυπαντικών. Τα υδρόφοβα συστατικά απαιτούν τη χρήση απορρυπαντικών με υψηλότερη συγκέντρωση. Εξαιρετικά υδρόφοβα συστατικά ή απορροφητικές επιφάνειες, ενδεχομένως να απαιτούν τη χρήση οργανικών διαλυτών.

(Γ) Μέτρηση ραδιοσημασμένων δειγμάτων ιστού

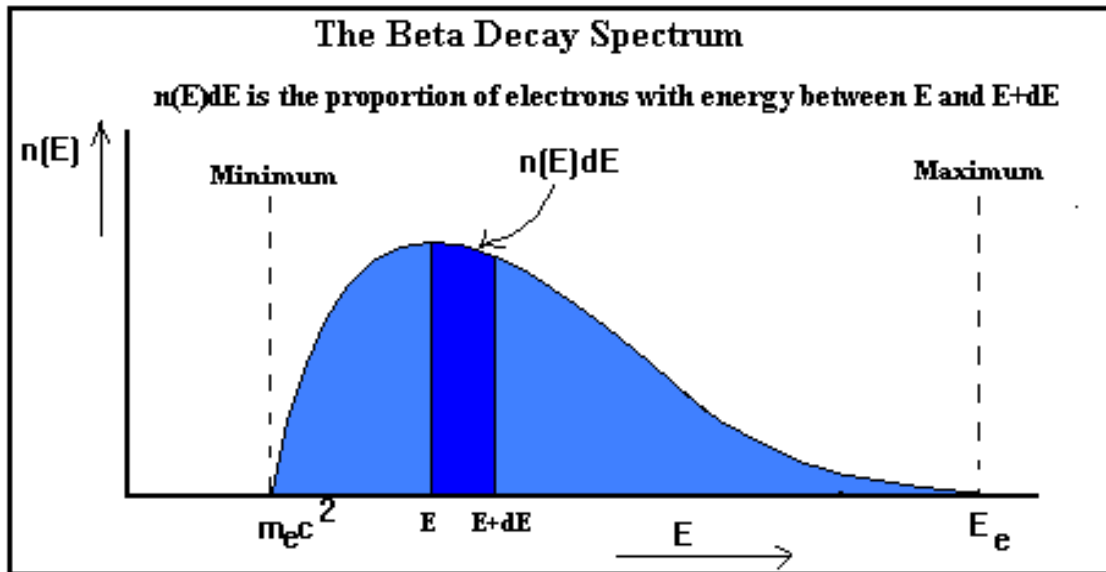
Τα δείγματα από ραδιοσημασμένο φυτικό ή ζωικό ιστό, σπάνια είναι αρκετά λεπτά ή μικρά ώστε να επιτρέπουν μέτρηση σε όλη τους τη μάζα. Η ομογενοποίηση τέτοιων δειγμάτων με κατάλληλους παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να διαλύουν ιστούς σε μέτρια αυξημένες θερμοκρασίες, μπορεί να επιτρέψει την ισότροπη διασπορά τους μέσα στον υγρό σπινθηριστή και επομένως τη μέτρηση της ενεργότητάς τους.

(Δ) Συνεχής μέτρηση με ροή

Οι συσκευές υγρού σπινθηρισμού με ροή έχουν εισαχθεί προκειμένου να επιτρέψουν την συνεχή μέτρηση με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού κυρίως για εφαρμογές χρωματογραφίας. Η μέθοδος αυτή προσφέρει μετρήσεις υψηλής ποιότητας για μεγάλες μάζες δειγμάτων. Κατά τη μέθοδο, τα ραδιενεργά υγρά δείγματα αναμιγνύονται με υγρό σπινθηριστή και οδηγούνται μέσα σε ένα διαφανές ή διαφώτιστο κανάλι το οποίο ελέγχεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή. Σχηματική παράσταση της μεθόδου βρίσκεται στο Διάγραμμα 1.16. Το ποσοστό υγρού δείγματος / cocktail μετράται συνεχώς προκειμένου να παρέχεται μία σταθερή αναλογία, και το κανάλι (συνήθως από πλαστικό σωλήνα), μπορεί να είναι περιτυλιγμένο γύρω από το φωτοπολλαπλασιαστή. Τα cocktail για πειράματα συνεχούς μέτρησης ροής πρέπει να παρέχουν υψηλή απόδοση, υψηλή επιτρεπόμενη φόρτιση, και να έχουν χαμηλό ιξώδες. Η υψηλή επιτρεπόμενη φόρτιση είναι σημαντική καθώς με αυτού του είδους τα πειράματα δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών αποβλήτων. Με υψηλή φόρτιση ο όγκος των αποβλήτων μειώνεται σημαντικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μία τυπική παροχή στη μέθοδο είναι 1mL/min. Για μία συνεχή χρήση του συστήματος για περίπου 8 ώρες μέσα σε μία μέρα, θα παραχθούν περίπου $1 \times 60 \times 8 = 480\text{mL}$ άχρηστου διαλύματος. Αν το cocktail που χρησιμοποιείται έχει χαμηλή δυνατότητα φόρτισης (για παράδειγμα κάποιο που απαιτεί 10πλάσιο όγκο cocktail από τον όγκο του δείγματος), θα παραχθούν πάνω από 5 λίτρα αποβλήτων. Με τη χρήση cocktail που έχουν υψηλή δυνατότητα φόρτισης (3:1 ή 2:1), έχουμε μείωση του ποσοστού αυτού μέχρι και 70%, κρατώντας έτσι το κόστος των διαχείρισης των αποβλήτων κάτω από έλεγχο. Βέβαια, οι συσκευές αυτού του τύπου

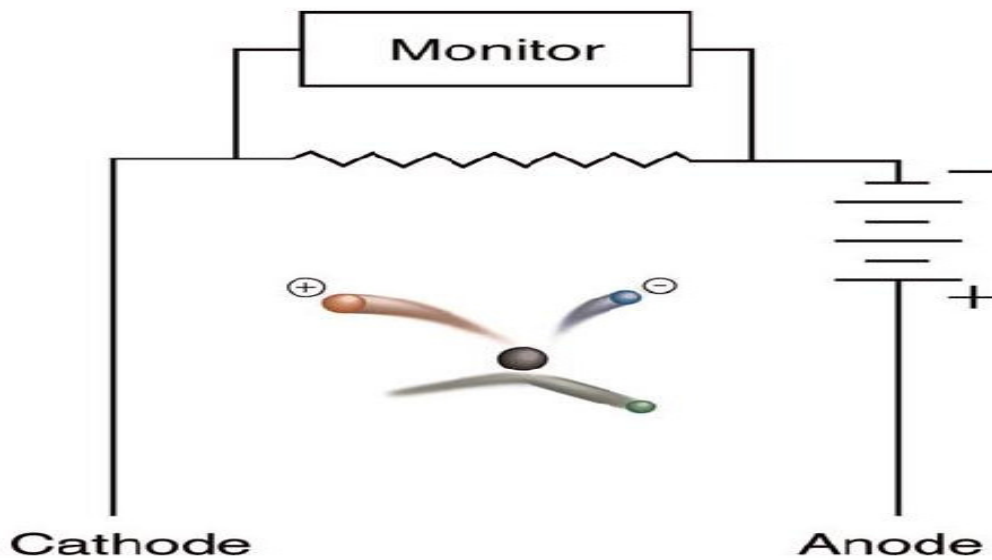
έχουν μεταβλητή παροχή, και επιτρέπουν έτσι το διαχωρισμό του μίγματος σε ραδιενεργό ή μη. Το ραδιενεργό δείγμα μπορεί να απομονώνεται για επιπλέον ανάλυση ή απόρριψη με ειδικούς κανόνες.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



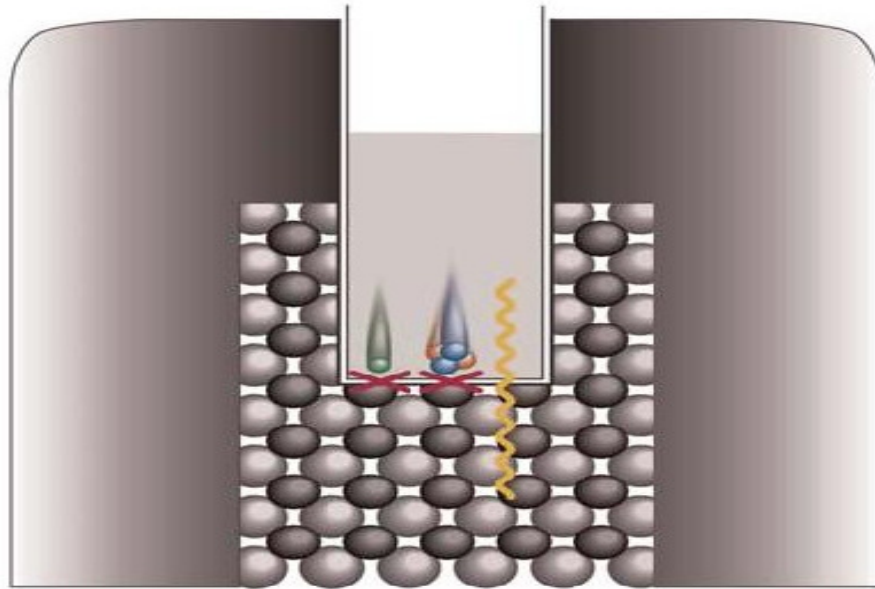
Διάγραμμα 1.1

Συνεχές φάσμα ενεργειών $-\beta$ σωματιδίων
(<http://www.egglescliffe.org.uk/physics/particles/nuclearforces/nuclear.html>)



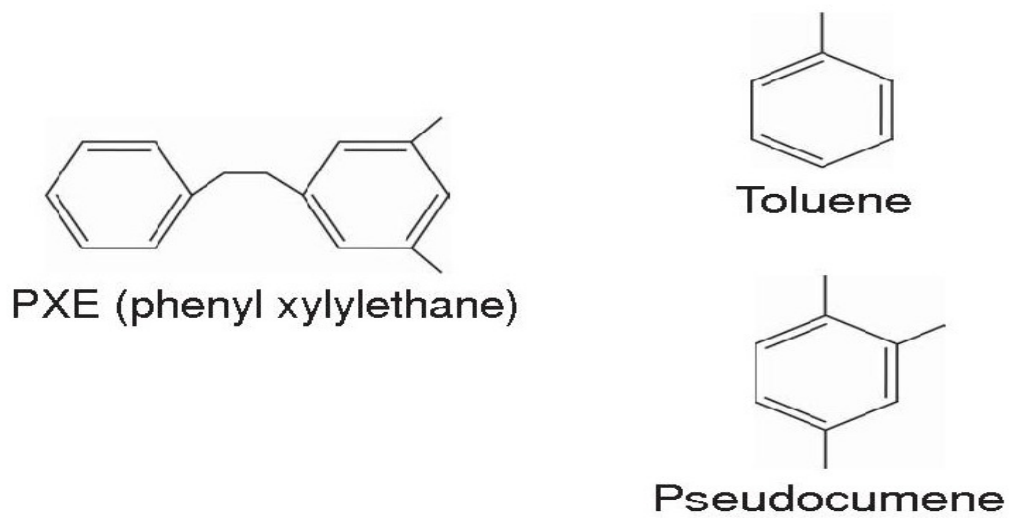
Διάγραμμα 1.2

Αρχή μέτρησης θαλάμου ιονισμού (National Diagnostics, 2004)



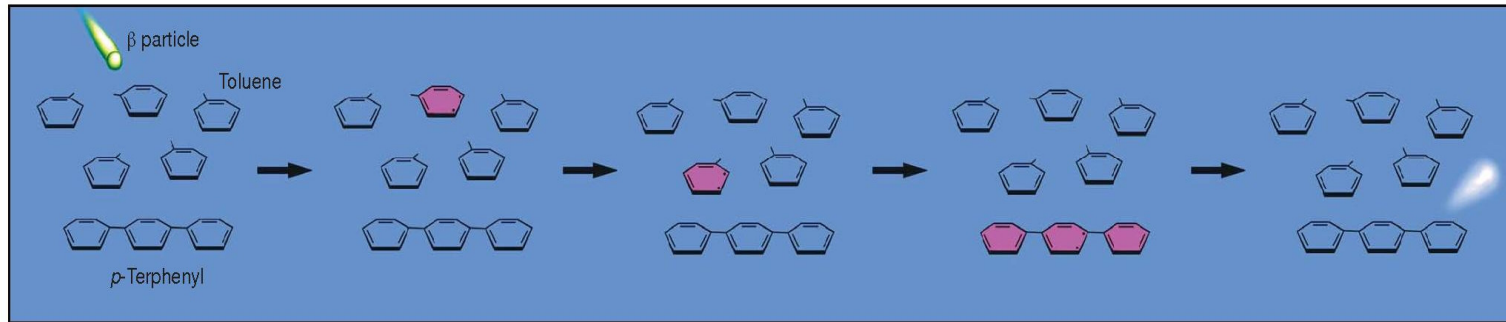
Διάγραμμα 1.3

Παραγωγή φωτός από στερεό σπινθηριστή (National Diagnostics, 2004)



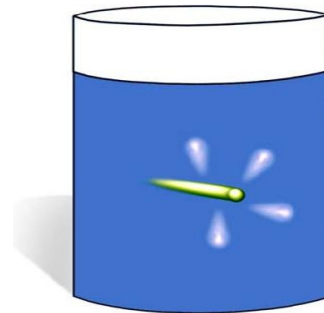
Διάγραμμα 1.4

Διάφορα οργανικά μόρια διαλυτών (αρωματικοί υδρογονάνθρακες) κατάλληλα για διαλύτες σε υγρούς σπινθηριστές (National Diagnostics, 2004)



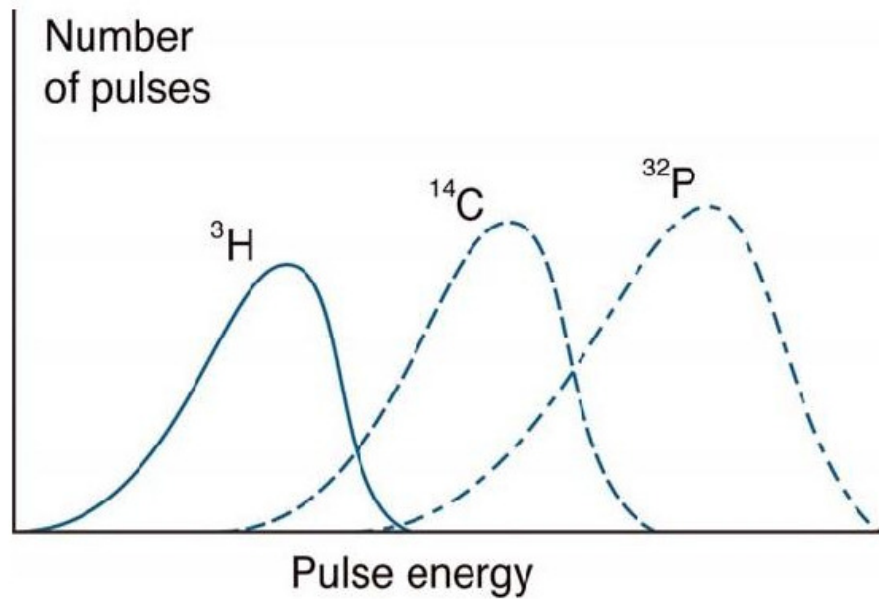
Διάγραμμα 1.5

Διέγερση μορίων διαλύτη και παραγωγή φωτός από τον φθοριστή (National Diagnostics, 2004)



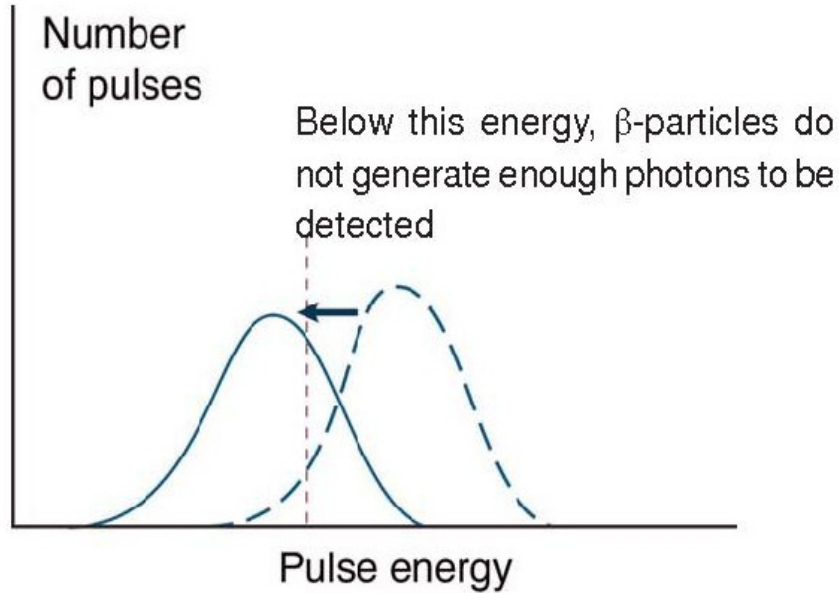
Διάγραμμα 1.6

Διάδοση του φωτός από το φθοριστή μέσα στον υγρό σπινθηριστή (National Diagnostics, 2004)



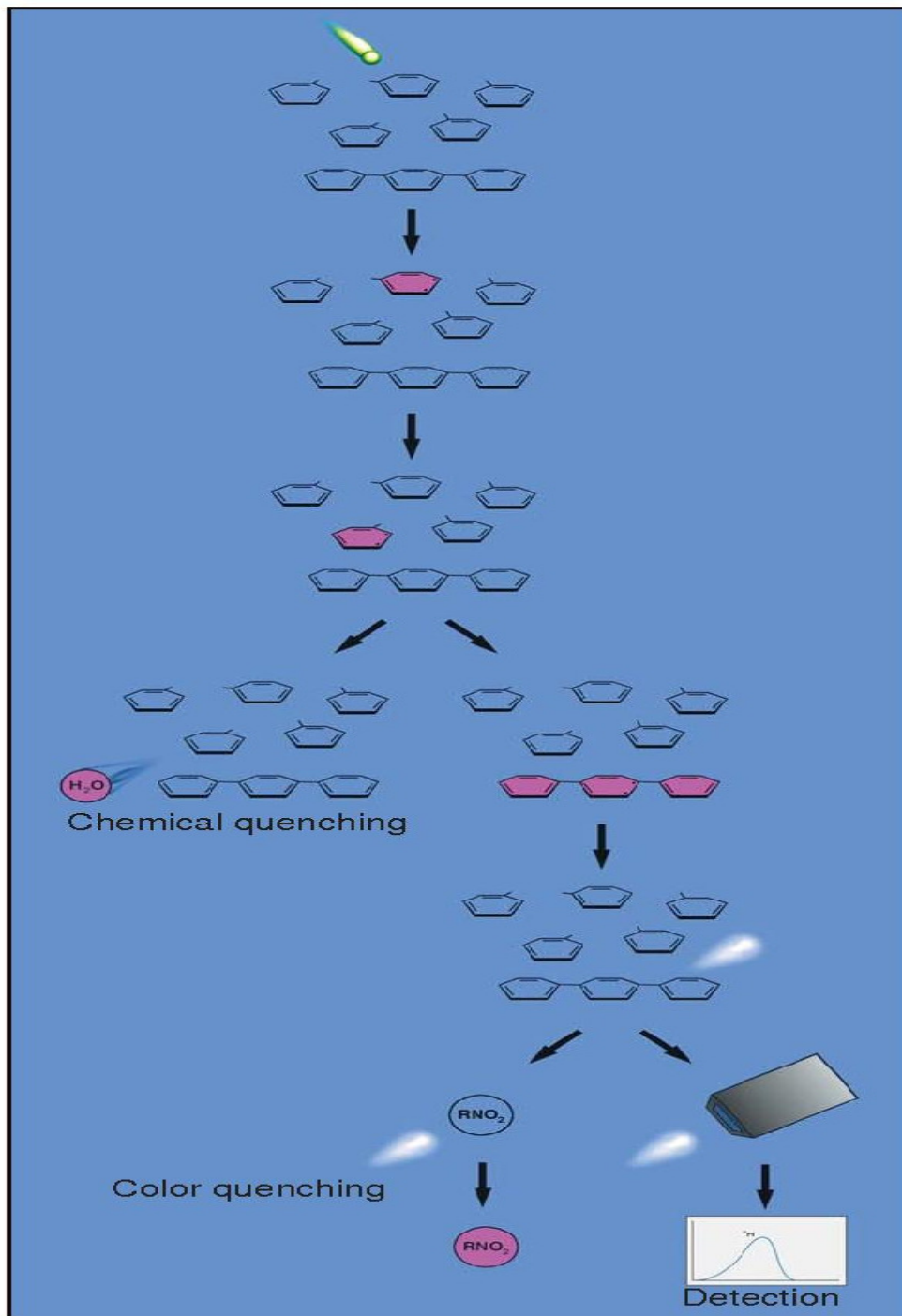
Διάγραμμα 1.7

Διαφορετικά φάσματα ενεργείας των β σωματιδίων που εκπέμπονται από το H-3, τον C-14 και το P-32 (National Diagnostics, 2004)



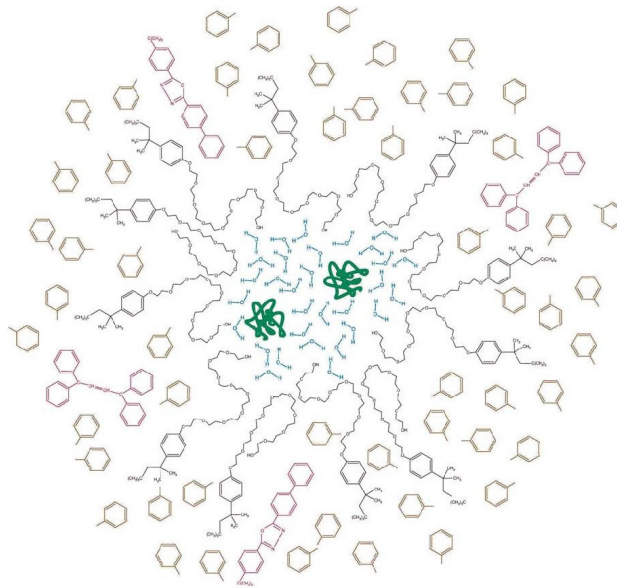
Διάγραμμα 1.8

Μεταφορά του φάσματος ενέργειας β σωματιδίου (διακεκομμένη γραμμή) προς χαμηλότερες ενέργειες (συνεχής γραμμή) λόγω σβέσης (National Diagnostics, 2004)



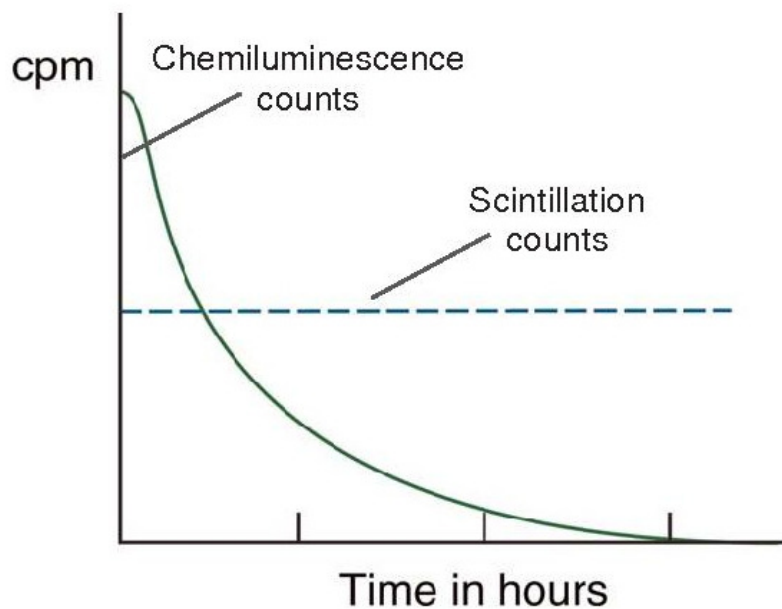
Διάγραμμα 1.9

Γραφική αναπαράσταση διαφόρων αιτιών σβέσης
(Color quenching, Chemical quenching κλπ, National Diagnostics, 2004)



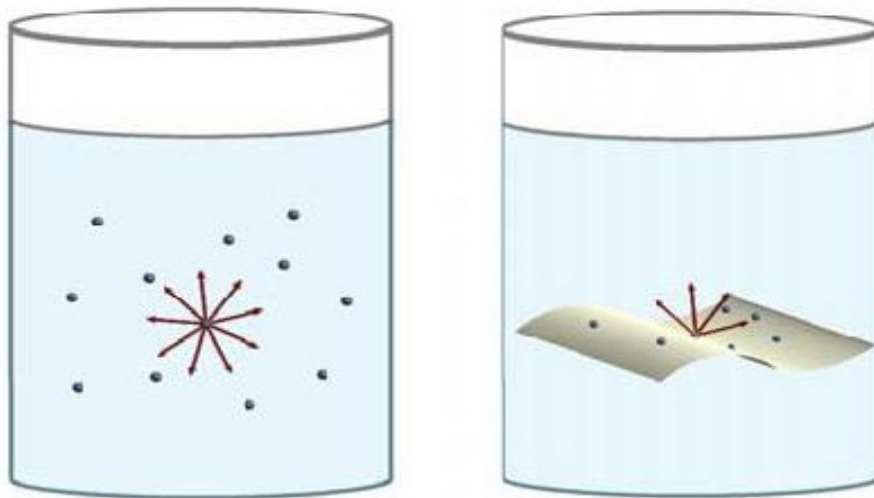
Διάγραμμα 1.10

Τα μόρια του απορρυπαντικού προσανατολίζονται και σχηματίζουν γαλάκτωμα από φορτισμένες δομές από πολυμερή μόρια με τις υδρόφοβες αλυσίδες αλκανίων να βλέπουν προς το διάλυμα και τις υδρόφιλες πολυεθυλενικές αλυσίδες γλυκόλης να βλέπουν προς μικροθύλακες αδιάλυτου ύδατος (National Diagnostics, 2004)



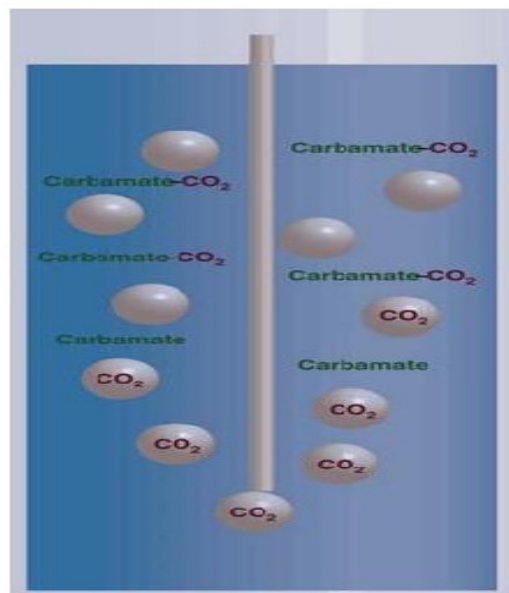
Διάγραμμα 1.11

Οι παλμοί από χημικό φθορισμό προστίθενται στους παλμούς από σπινθηρισμό λόγω ραδιενέργειας και αλλοιώνουν την πληροφορία που παρέχει η μέθοδος του υγρού σπινθηρισμού (National Diagnostics, 2004)



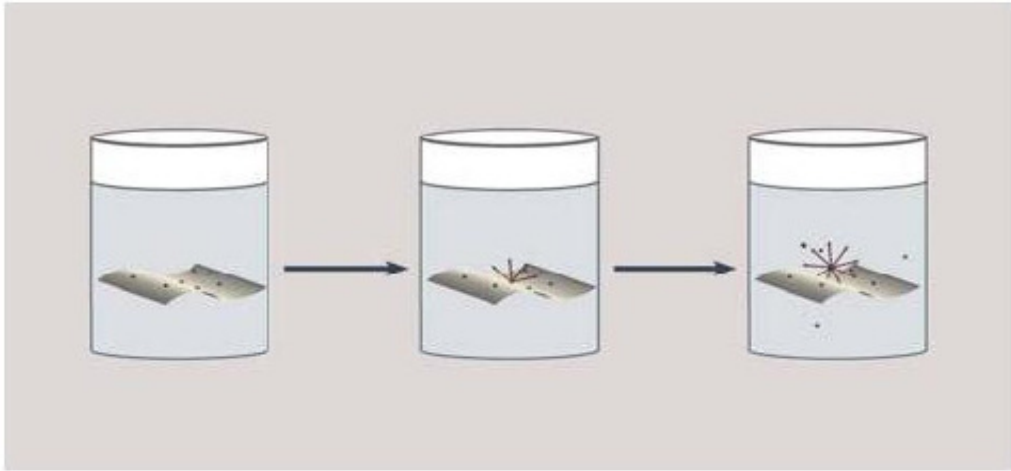
Διάγραμμα 1.12

Κατά τη μέτρηση φίλτρων με ραδιενεργά ισότοπα μέσα σε υγρό σπινθηριστή (δεξιά) ποσοστό των διασπάσεων ενδέχεται να μην ανιχνευθεί, καθώς από όσες εκπομπές γίνονται πάνω στο φίλτρο είτε θα αποτυγχάνει ο σπινθηρισμός τους, είτε το παραγόμενο φως δεν θα μπορέσει να φτάσουν στον φωτοπολλαπλασιαστή. Αριστερά ο τρόπος που διαδίδεται το φως των σπινθηρισμών όταν δεν υπάρχουν εμπόδια (National Diagnostics, 2004)



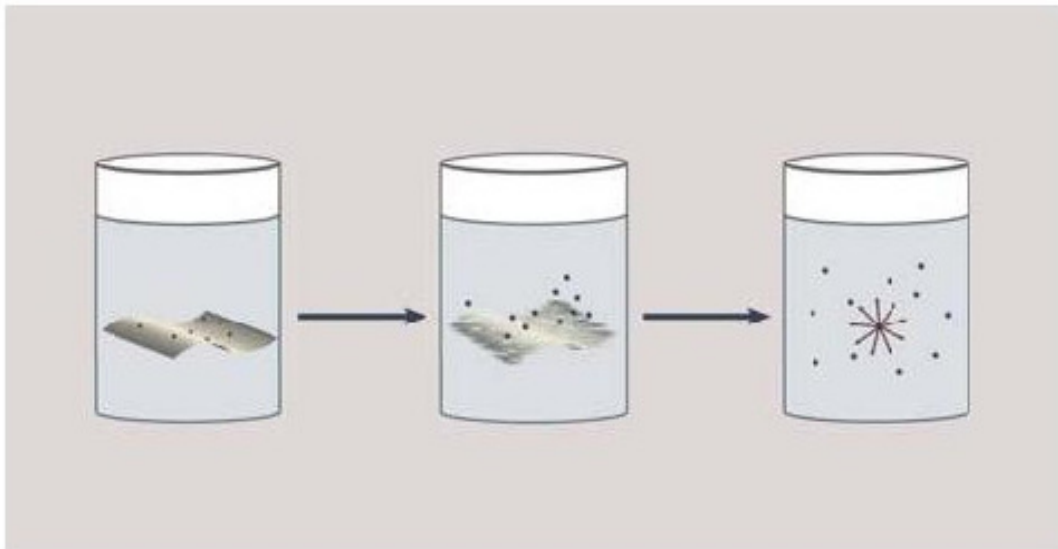
Διάγραμμα 1.13

Το $^{14}\text{CO}_2$ που παράγεται από διαδικασίες απομόνωσης του ^{14}C , μπορεί να παγιδεύεται σε υγρά διαλύματα χρησιμοποιώντας πολύ δυνατές οργανικές βάσεις (carbamates, National Diagnostics, 2004)



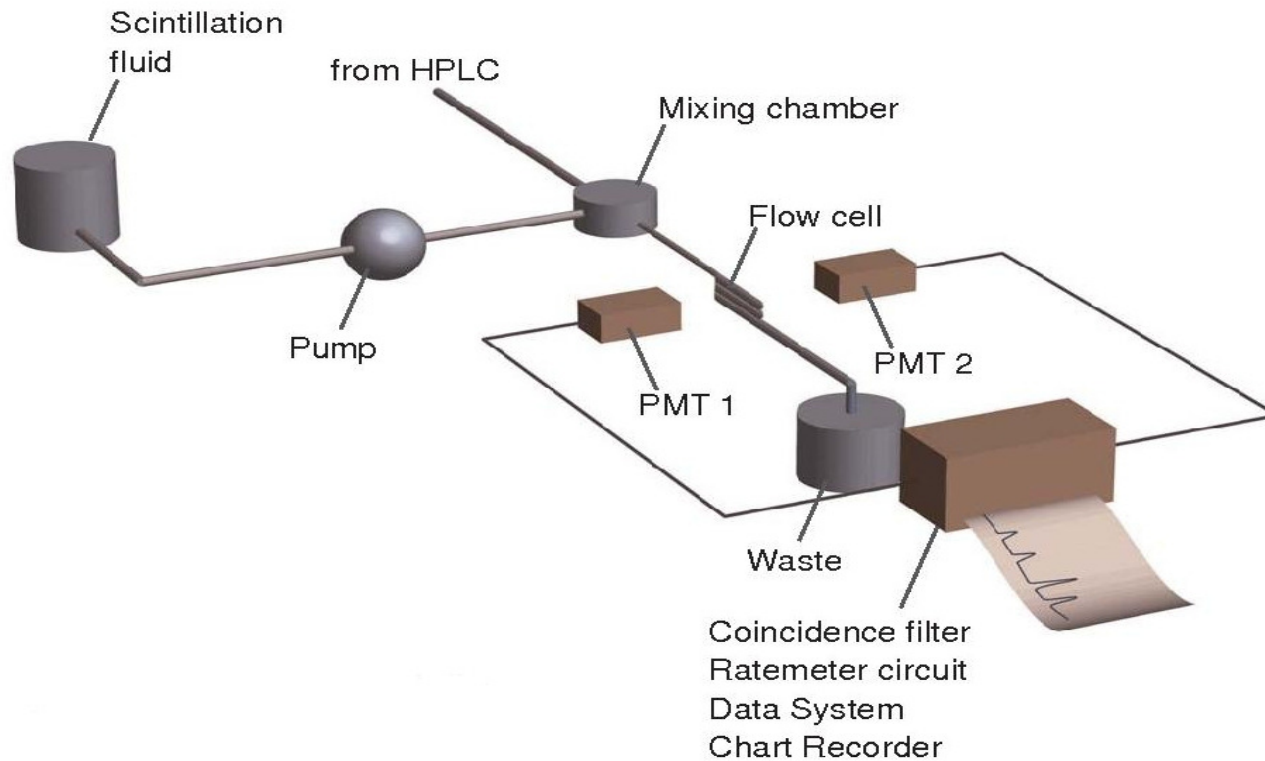
Διάγραμμα 1.14

Διαφορετικές συμπεριφορές φίλτρων μέσα σε υγρούς σπινθηριστές: Φίλτρο που δεν διαλύεται μέσα στον υγρό σπινθηριστή (National Diagnostics, 2004)



Διάγραμμα 1.15

Διαφορετικές συμπεριφορές φίλτρων μέσα σε υγρούς σπινθηριστές: Φίλτρο που διαλύεται μέσα στον υγρό σπινθηριστή (National Diagnostics, 2004)



Διάγραμμα 1.16

Οι συσκευές υγρού σπινθηρισμού με ροή έχουν εισαχθεί προκειμένου να επιτρέψουν την συνεχή μέτρηση με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού κυρίως για εφαρμογές χρωματογραφίας. Κατά τη μέθοδο, τα ραδιενεργά υγρά δείγματα (from HPLC) αναμιγνύονται με υγρό σπινθηριστή (Scintillation fluid) σε ειδικό θάλαμο ανάμιξης (Mixing chamber) με τη βοήθεια αντλίας (Pump) και οδηγούνται μέσα σε ένα διαφανές ή διαφώτιστο κανάλι (Flow cell), το οποίο ελέγχεται από φωτοπολλαπλασιαστές (PMT1 & PMT2) (National Diagnostics, 2004)

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο Κεφάλαιο, το φυσικά ραδιενεργό ευγενές αέριο Ραδόνιο (^{222}Rn), είναι μία σημαντική πηγή φυσικής ραδιενέργειας. Έχει υπολογιστεί ότι το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του, είναι υπεύθυνα για το 50% περίπου της ετήσιας δόσης λόγω φυσικού υποστρώματος που δέχεται ο άνθρωπος. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της δόσης, λαμβάνεται μέσω της αναπνοής του Ραδονίου και των θυγατρικών του, κυρίως από τον αέρα στο εσωτερικό των κτιρίων. Όπως είναι λογικό λοιπόν, τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει ένα μεγάλο ενδιαφέρον, σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από το Ραδόνιο, και έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που προσδιορίζουν τις συγκεντρώσεις του στον ατμοσφαιρικό αέρα σε Bqm^{-3} .

Υπάρχει μια αρκετά μεγάλη ποικιλία μεθόδων για τη μέτρηση του Ραδονίου και των θυγατρικών του. Η χρήση κάθε μίας από αυτές, υπαγορεύεται από τις εκάστοτε συνθήκες, καθώς και από το τι είναι επιθυμητό να προσδιορισθεί. Οι μέθοδοι αυτές, μπορούν να χωριστούν σε 3 κύριες κατηγορίες: (α) τις στιγμιαίες με χρήση ενεργητικού εξοπλισμού, για μετρήσεις μικρής χρονικής διάρκειας, (β) τις συνεχείς με χρήση ενεργητικού εξοπλισμού, που δείχνουν τις μεταβολές των συγκεντρώσεων του Ραδονίου και των θυγατρικών του με το χρόνο, και (γ) της μεγάλης διάρκειας με χρήση παθητικού εξοπλισμού, που χρησιμοποιούνται για ολοκληρωτικές μετρήσεις με σκοπό το να καθορίσουν τη μέση συγκέντρωση του Ραδονίου για μια μεγάλη χρονική περίοδο. Δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις Ραδονίου ποικίλουν και μεταβάλλονται με το χρόνο, οι συνεχείς μετρήσεις είναι οι πλέον κατάλληλες για να προσδιορισθεί η συγκέντρωση Ραδονίου μέσα σε έναν χώρο. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται αρκετά περίπλοκος και ακριβός εξοπλισμός, γεγονός που καθιστά μια τέτοια πρακτική ασύμφορη για μελέτες μεγάλης κλίμακας.

Έχει τεκμηριωθεί από πολλές μελέτες ότι η χρήση της παθητικής ανίχνευσης συγκεντρώσεων Ραδονίου με ενεργό άνθρακα είναι απλή και αξιόπιστη, για τη μέτρηση των επιπέδων του Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα για μία χρονική περίοδο από 2 ως 4 μέρες και είναι κατάλληλη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας διότι είναι οικονομικά προσιτή και αποδεκτή από το κοινό. Πιο συγκεκριμένα, ο ενεργός άνθρακας έχει την

ικανότητα σε αυτό το χρονικό διάστημα να προσροφά Ραδόνιο από τον αέρα του περιβάλλοντος. Το προσροφηθέν Ραδόνιο και τα παραγόμενα θυγατρικά του μπορούν στη συνέχεια να μετρηθούν με διάφορες μεθόδους και από εκεί να εκτιμηθεί η συγκέντρωση του Ραδονίου στον αέρα του περιβάλλοντος. Σε προηγούμενες Διπλωματικές Εργασίες (Μαρινάκης, 2007 και Πασχαλίδης, 2008) αναλύθηκε ο τρόπος μέτρησης προσροφηθέντος Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα με τη χρήση ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου. Μία άλλη δοκιμασμένη αναλυτική μέθοδος μέτρησης του προσροφηθέντος Ραδονίου στον ενεργό άνθρακα είναι η με κατάλληλο τρόπο απορρόφηση του Ραδονίου αυτού σε διάλυμα υγρού σπινθηριστή και η μέτρηση των αλληλεπιδράσεων των εκπεμπόμενων α -σωματιδίων από το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του με τον υγρό σπινθηριστή σε κατάλληλη συσκευή που μετρά το φως που παράγεται από τις αλληλεπιδράσεις αυτές. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει υψηλό βαθμό απόδοσης, λόγω της γενικά καλής διαλυτότητας του Ραδονίου στα υγρά σπινθηρισμού, στα οποία μπορούν να διαλυθούν οργανικά διαλύματα (τέτοια είναι πχ. τα υγρά σπινθηρισμού με βάση το τολουένιο ή τα ορυκτά έλαια).

Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν οι αρχές της παθητικής μεθόδου μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου με χρήση ενεργού άνθρακα και υγρού σπινθηριστή και θα αναλυθούν οι βασικότερες βιβλιογραφικές αναφορές στο πως αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται με διάφορες παραλλαγές και βελτιώσεις. Με βάση την ανάλυση αυτή θα προκύψει στα επόμενα Κεφάλαια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας το πώς η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί με τον καλύτερο τρόπο στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, ανάλογα και με τον διαθέσιμο εξοπλισμό, χρόνο και αναλώσιμα υλικά.

2.2 Αρχή μεθόδου ενεργού άνθρακα – υγρού σπινθηρισμού

2.2.1 Γενικά

Ο ενεργός άνθρακας, χρησιμοποιείται για μετρήσεις της συγκέντρωσης του Ραδονίου στο εσωτερικό των κτιρίων πρακτικά από τις αρχές της δεκαετίας του '80 (βλ. πχ. και George, 1984). Η προσρόφηση του Ραδονίου από τον ατμοσφαιρικό αέρα στον ενεργό άνθρακα, μπορεί να περιγραφεί, όπως αναφέρει ο Cohen (1986) ή και ο Ren (1987), από το νόμο του Henry, ως εξής:

$$v = k p \quad (2.1)$$

όπου:

v : ο όγκος του αερίου που προσροφάται, ανά μονάδα μάζας ενεργού άνθρακα σε cm^3g^{-1}

p : η μερική πίεση του Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα σε cm^3 Ραδονίου ανά cm^3 ατμοσφαιρικού αέρα, και

k : η σταθερά προσρόφησης σε cm^3g^{-1}

Η προσρόφηση του Ραδονίου είναι γραμμική μέχρι πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις $1.4 \cdot 10^6$ Bq m^{-3} . Μία τυπική τιμή της σταθεράς k είναι $4000 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ (Cohen, 1986). Η τιμή της σταθεράς αυτής εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αν ο ενεργός άνθρακας τοποθετηθεί σε δοχείο, τότε δεν εκτίθεται στο Ραδόνιο του ατμοσφαιρικού αέρα ισότροπα. Επομένως, η διάχυση του Ραδονίου μέσα στον χώρο που καταλαμβάνει ο άνθρακας, όπως περιγράφεται από το νόμο του Fick καθορίζει τον απαιτούμενο χρόνο, ώστε το Ραδόνιο να προσροφηθεί σε όλο τον όγκο του. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη γεωμετρία του χώρου στον οποίο βρίσκεται ο ενεργός άνθρακας και από την ελεύθερη επιφάνεια που αυτός παρουσιάζει προς την ατμόσφαιρα που περιέχει Ραδόνιο. Για την περιγραφή του φαινομένου έχουν γίνει πολλές μελέτες (βλ. και την χαρακτηριστική μελέτη του Cohen, 1986).

2.2.2 Μέτρηση Ραδονίου της ατμόσφαιρας με ενεργό άνθρακα και υγρό σπινθηριστή

Η διαδικασία της μέτρησης της συγκέντρωσης (Bq m^{-3}) του Ραδονίου στην ατμόσφαιρα με ενεργό άνθρακα και υγρό σπινθηριστή έχει ως εξής:

Καταρχήν προετοιμάζεται ο ενεργός άνθρακας με θέρμανση στους $120 \text{ }^\circ\text{C}$ για περίπου 12 ώρες (βλ. πχ. Πασχαλίδης, 2008), προκειμένου να αφαιρεθεί κάθε υγρασία που πιθανώς είχε απορροφήσει. Μικρή ποσότητα πχ. 2-10 g ενεργού άνθρακα τοποθετείται σε τυποποιημένα φιαλίδια με όγκο 20 mL διαφανή ή διαφώτιστα κατάλληλα για μέτρηση με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού, όπως αυτά που διακρίνονται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 2.1. Η θέση του ενεργού άνθρακα μέσα στα φιαλίδια μπορεί να είναι είτε στον πυθμένα, είτε σε κατάλληλη θήκη κοντά στο στόμιο. Τα φιαλίδια έχουν πώμα που επιτρέπει το αεροστεγές τους κλείσιμο, πριν αλλά και μετά από κάθε έκθεση. Στη συνέχεια, τα φιαλίδια κλείνουν αεροστεγώς. Όταν είναι να γίνει η έκθεση του ενεργού άνθρακα σε συγκεντρώσεις Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα, τα φιαλίδια ανοίγουν και παραμένουν ανοιχτά για χρόνο που δεν πρέπει να υπερβαίνει

τυπικά τις 2 έως το πολύ 5 ημέρες. Αν ο χρόνος έκθεσης είναι μεγαλύτερος από το άνω αυτό όριο τότε ο ενεργός άνθρακας παύει να προσροφά Ραδόνιο διότι έχει κορεσθεί από προσρόφιση υγρασίας του περιβάλλοντος. Μετά το τέλος της έκθεσης, τα φιαλίδια πληρώνονται με υγρό σπινθηριστή κατάλληλου τύπου -συνήθως με βάση το τολουένιο- και κλείνονται αεροστεγώς. Ο υγρός σπινθηριστής, (α) αν μεν ο ενεργός άνθρακας είναι στον πυθμένα του φιαλιδίου έρχεται σε απευθείας επαφή μαζί του, (β) αν δε ο άνθρακας είναι κοντά στο στόμιο του φιαλιδίου μπορεί με κατάλληλο τρόπο είτε (β1) να πληρώσει το φιαλίδιο εμβαπτίζοντας πλήρως τον ενεργό άνθρακα, είτε (β2) να πληρώσει το φιαλίδιο έως κατάλληλη στάθμη χωρίς να έρθει καθόλου σε επαφή με τον ενεργό άνθρακα. Στην περίπτωση (α) η (β1) ο υγρός σπινθηριστής εισέρχεται στους πόρους του ενεργού άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο, το αέριο Ραδόνιο διαχέεται από τον ενεργό άνθρακα προς το τολουένιο (δηλ. τον διαλύτη) του υγρού σπινθηριστή. Αυτό είναι το φαινόμενο της έκπλυσης του Ραδονίου. Για την πλήρη έκπλυση πρέπει να παρέλθει ικανός χρόνος ο οποίος ονομάζεται χρόνος εμβάπτισης ή καλύτερα χρόνος έκπλυσης (στα αγγλικά: soak time, ή washout time). Στην περίπτωση (β2) το αέριο Ραδόνιο διαχέεται και πάλι από τον ενεργό άνθρακα προς το τολουένιο του υγρού σπινθηριστή. Αυτό είναι το φαινόμενο της έκλουσης του Ραδονίου. Για την πλήρη έκλουση πρέπει να παρέλθει ικανός χρόνος ο οποίος ονομάζεται χρόνος έκλουσης (στα αγγλικά: elution time). Οι χρόνοι έκπλυσης και έκλουσης είναι συνήθως ίσοι ή πολύ μεγαλύτεροι με το διάστημα των 3h που απαιτείται ώστε το Ραδόνιο που βρίσκεται διαλυμένο στον υγρό σπινθηριστή να έρθει σε ραδιενεργή ισορροπία με τα θυγατρικά του. Κατά το χρόνο αναμονής για την έκπλυση ή την έκλουση:

- (1) αποσβένονται πιθανές χημικές αντιδράσεις σπινθηριστή και ενεργού άνθρακα που δημιουργούνται στις περιπτώσεις (α) και (β1),
- (2) καθιζάνει ο ενεργός άνθρακας και γίνεται και πάλι διαυγής όσο το δυνατόν ο υγρός σπινθηριστής διότι μπορεί να έχει θολώσει στις περιπτώσεις (α) και (β1), και
- (3) επέρχεται ραδιενεργή ισορροπία του Ραδονίου και των θυγατρικών του.

Μετά την πάροδο του χρόνου έκπλυσης ή έκλουσης τα φιαλίδια μπορούν να μετρηθούν σε μετρητική μονάδα υγρού σπινθηρισμού.

Όπως είναι γνωστό (βλ. πχ. Fox, 1976; L'Annunziata, 1998), η ενέργεια από κάθε -α διάσπαση του Ραδονίου και των θυγατρικών του, απορροφάται από τον υγρό σπινθηριστή, ο οποίος αποδιεγειρόμενος ελευθερώνει φωτόνια, που ανιχνεύονται στη μονάδα υγρού σπινθηρισμού από έναν φωτοπολλαπλασιαστή. Από τη βαθμονόμηση της μεθόδου προκύπτει η ζητούμενη ποσότητα της συγκέντρωσης του Ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Η μέθοδος αυτή έχει πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης, κι αυτός είναι και ο λόγος που απαιτούνται μικρές σχετικά ποσότητες ενεργού άνθρακα. Είναι γνωστό ότι για τη μέτρηση του προσροφηθέντος Ραδονίου σε ενεργό άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μέθοδοι ολικής -γ μέτρησης (βλ. πχ. Μαρινάκης 2007, Πασχαλίδης 2008) αλλά στην περίπτωση αυτή χρειάζονται πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ενεργού άνθρακα λόγω πολύ μειωμένου βαθμού απόδοσης.

2.3 Ιστορική ανασκόπηση και παραλλαγές της μεθόδου

2.3.1. Prichard M. και Marlen K. (1983a)

Οι ερευνητές αυτοί χρησιμοποίησαν 2g ενεργού άνθρακα με μεγάλους κόκκους και χαμηλή πυκνότητα (Nuchar WV 8x30 Mesh), τα οποία επεξεργάστηκαν με μεθυλική αλκοόλη, ώστε να αφαιρεθούν τυχόν προσμίξεις, και στη συνέχεια τα θέρμαναν στους 110° C για 24 ώρες για να αποβληθεί η υγρασία. Τον άνθρακα που προέκυψε μετά από αυτή τη διαδικασία, τον τοποθέτησαν σε τυποποιημένα διαφανή φιαλίδια με όγκο ~20 mL κατάλληλα για μέτρηση με τη μέθοδο υγρού σπινθηρισμού (βλ. και το Διάγραμμα 2.1) και τον εξέθεσαν στη συνέχεια σε Ραδόνιο μεγάλης συγκέντρωσης 50 – 200 pCiL⁻¹ (1850 – 7400 Bqm⁻³) για τυπικό χρόνο 24h. Μετά την έκθεση τα φιαλίδια πληρώθηκαν ήπια με υγρό σπινθηριστή με βάση το τολουένιο και σφραγίστηκαν. Μετά την πάροδο 6 ωρών για την έκπλυση του Ραδονίου από τον ενεργό άνθρακα και την αποκατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας του Ραδονίου με τα θυγατρικά του μέσα στο τολουένιο, τα φιαλίδια μετρήθηκαν για 60min σε συσκευή υγρού σπινθηρισμού, από όπου με κατάλληλη βαθμονόμηση προέκυψε η συγκέντρωση του Ραδονίου. Οι ερευνητές αυτοί απέδειξαν με κατάλληλο πείραμα ότι το Ραδόνιο που είχε προσροφηθεί στον ενεργό άνθρακα εκπλύθηκε σχεδόν εξ'ολοκλήρου προς τον υγρό σπινθηριστή και στην ουσία υπέδειξαν πρώτοι ότι η μέθοδος είναι κατάλληλη για μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα.

2.3.2. Homma Y. et al. (1987)

Οι ερευνητές αυτοί πραγματοποίησαν μετρήσεις ως εξής: Ραδόνιο υψηλής ραδιενέργειας συλλέχθηκε από διάλυμα $^{226}\text{RaCl}_2$ σε HCl 0.1M, και τοποθετήθηκε στον αέρα φιαλιδίου όγκου 20.5mL, το οποίο εν συνεχεία κλείστηκε αεροστεγώς. Το ^{222}Rn έμεινε στο φιαλίδιο για 3.5 ώρες πριν αρχίσουν οι μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια αυτή επήλθε ισορροπία μεταξύ του Ραδονίου και των θυγατρικών του. Στη συνέχεια 5mL υγρού σπινθηριστή (4g PPO, 2.5-διφενυλοξαζόλη, σε 1L τολουενίου), προστέθηκαν στο φιαλίδιο αέρα, μέσω μίας σύριγγας. Ακολούθησε βίαιη ανακίνηση για περίπου 5 λεπτά. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι συσκευών υγρού σπινθηρισμού: (α) ο Mark III, μοντέλο 6880, της Tracor Analytic Inc., με την ακόλουθη τροποποίηση: παλμοί από το σύστημα οδηγούνταν σε έναν γραμμικό ενισχυτή, κατόπιν σε έναν πολυκαναλικό αναλυτή 1024 καναλιών και το αποτέλεσμα μπορούσε να εκτυπωθεί σε plotter ή εκτυπωτή, οι μετρήσεις σε αυτή τη συσκευή έγιναν στους 13° C (β) ο LS 5801 της Beckman Instr. Inc. με λογαριθμικό ενισχυτή, οι μετρήσεις σε αυτή τη συσκευή έγιναν στους 21° C. Οι ερευνητές αυτοί απέδειξαν με τα πειράματά τους ότι το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του που υπήρχαν στον αέρα του φιαλιδίου:

(α) Παράγουν φωταύγεια (luminescence) από τη διέγερση των μορίων του αέρα εξαιτίας των -α διασπάσεων. Από τη φωταύγεια αυτή είναι δυνατόν να μετρηθεί η συγκέντρωση του Ραδονίου στο φιαλίδιο χωρίς τη χρήση υγρού σπινθηριστή (βλ. και Homma, 1996, Murase, 1999 με αποτελέσματα για διάφορες θερμοκρασίες και υγρασίες έκθεσης)

(β) Προσροφούνται ικανοποιητικά στον υγρό σπινθηριστή όταν αυτός προστεθεί στον αέρα του φιαλιδίου. Από την παραγωγή φωτός που συμβαίνει στον υγρό σπινθηριστή είναι δυνατόν να μετρηθεί επίσης η συγκέντρωση του Ραδονίου στο φιαλίδιο.

Επίσης, παρατήρησαν ότι, όπως αναμενόταν, υπάρχει και ακτινοβολία Cherenkov, που παράγεται μέσα στον υγρό σπινθηριστή από τις -β διασπάσεις των θυγατρικών του Ραδονίου.

2.3.3. Murase Y. et al. (1989)

Με αφορμή την έρευνα των Homma Y. et al. (1987) οι ερευνητές αυτοί χρησιμοποίησαν την ίδια τεχνική για να διερευνήσουν το ποσοστό της φωταύγειας στο συνολικό φως που παράγεται στο φιαλίδιο για διάφορους όγκους υγρού σπινθηριστή. Το βασικό

συμπέρασμα της μελέτης ήταν ότι για φιαλίδια όγκου 20 mL που περιέχουν Ραδόνιο, η φωταύγεια του αέρα είναι σημαντική αν ο υγρός σπινθηριστής (4g PPO, 2.5-διφενυλοχαιζόλη, σε 1L τολουενίου) στο φιαλίδιο έχει όγκο μικρότερο από 16 mL. Αν ο όγκος του υγρού σπινθηριστή είναι μεγαλύτερος τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι όλο το Ραδόνιο του αέρα του φιαλιδίου έχει διαλυθεί πλήρως στο υγρό και επομένως όλο το φως που συλλέγεται από τον φωτοπολλαπλασιαστή της συσκευής υγρού σπινθηρισμού οφείλεται μόνο στην αλληλεπίδραση των α και β διασπάσεων του Ραδονίου και των θυγατρικών του με τον υγρό σπινθηριστή. Επομένως, όταν η μέθοδος του υγρού σπινθηρισμού χρησιμοποιείται για την μέτρηση Ραδονίου, πρέπει -από την ασφαλή πλευρά, το φιαλίδιο να γεμίζει πλήρως με υγρό σπινθηριστή. Η έρευνα των Murase Y. et al. (1989) έγινε με χρήση συσκευών υγρού σπινθηρισμού τύπου LSC 3500 της εταιρείας Aloka Co. Ltd, Tokyo, Japan και τύπου LS 5801 της Beckman Instr. Inc.

2.3.4. Schroeder M. et al. (1989)

Οι ερευνητές αυτοί, χρησιμοποίησαν για τα πειράματά τους ένα σύστημα προσρόφησης Ραδονίου που αποτελείται από ένα μικρό κυλινδρικό δοχείο τύπου "Sorbit" με 2 g silica gel και ένα μικρό κυλινδρικό δοχείο τύπου "Getter" με 1-2 g ενεργού άνθρακα. Τα δοχεία τύπου "Sorbit" είναι μικρά πλαστικά κυλινδρικά δοχεία, των οποίων οι δύο βάσεις είναι διάτρητες και το εσωτερικό τους περιέχει μικρή ποσότητα συνήθως αφυγραντικού υλικού. Τα δοχεία τύπου "Getter", ομοίως είναι μικρά πλαστικά κυλινδρικά δοχεία, των οποίων οι δύο βάσεις είναι διάτρητες και το εσωτερικό τους περιέχει μικρή ποσότητα προσροφητικού υλικού με επιθυμητές ιδιότητες προσρόφησης. Στο Διάγραμμα 2.2 διακρίνονται φωτογραφία δοχείου τύπου "Sorbit". Τα δοχεία τύπου "Getter" είναι ακριβώς αντίστοιχα. Το δοχείο τύπου "Sorbit" τοποθετήθηκε από πάνω από το δοχείο τύπου "Getter" και τα δύο συνδέθηκαν με διαφανή κολλητική ταινία (σελλοτέϊπ), ώστε να μην μπορεί να περάσει αέρας μέσα από τη μάζα του ενεργού άνθρακα εάν πρώτα δεν έχει περάσει από τον αφυγραντή, ο οποίος εκτιμάται ότι κατακρατάει το σύνολο σχεδόν της υγρασίας του αέρα, πράγμα επιθυμητό, καθώς αυτή είναι ανταγωνιστική ως προς την προσρόφηση του Ραδονίου από τον ενεργό άνθρακα. Εκτός αυτού, ο αφυγραντής έχει την ικανότητα να λειτουργεί και ως διαχύτης, επιτρέποντας έτσι να επιτυγχάνεται ομογενέστερη απορρόφηση του Ραδονίου από τον άνθρακα. Ο συνδυασμός των δοχείων "Sorbit" και "Getter" τοποθετήθηκαν στη συνέχεια σε μη τυποποιημένο πλαστικό φιαλίδιο όγκου 15 mL, το οποίο διαθέτει και πώμα για να

κλείνει αεροστεγώς, όπως διακρίνεται στο σχήμα του Διαγράμματος 2.3. Προκειμένου να γίνει η έκθεση στο Ραδόνιο του ατμοσφαιρικού αέρα, αρκεί να ανοίξει το πώμα του φιαλιδίου και να μείνει έτσι για χρονικό διάστημα έως και 4 ημέρες. Στη συνέχεια το πώμα κλείνει και το φιαλίδιο αποστέλλεται για ανάλυση. Για την ανάλυση, αφαιρούνται από το φιαλίδιο τα δοχεία "Sorbit" και "Getter" και από το δοχείο "Getter" λαμβάνεται ο περιεχόμενος ενεργός άνθρακας και τοποθετείται σε ένα τυποποιημένο φιαλίδιο των 20mL, που περιέχει 15 mL από διάλυμα υγρού σπινθηριστή με σύνθεση 4g PPO, 0.05g POPOP σε 1L τολουενίου. Ακολουθεί ανάδευση. Το φιαλίδιο αυτό σφραγίζεται στη συνέχεια αεροστεγώς και αφήνεται για διάστημα 10 ωρών, το οποίο είναι απαραίτητο για την έκπλυση του Ραδονίου από τον ενεργό άνθρακα, για να σταματήσουν τυχόν χημικές αντιδράσεις του ενεργού άνθρακα με τον υγρό σπινθηριστή και για την αποκατάσταση της ραδιενεργού ισορροπίας του Ραδονίου που έχει εκπλυθεί προς τον υγρό σπινθηριστή με τα θυγατρικά του. Ακολουθεί η μέτρηση με χρήση των κλασσικών μεθόδων υγρού σπινθηρισμού. Σε σχέση με τους προηγούμενους ερευνητές οι Schroeder M. et. Al (1989) έδειξαν με την εργασία τους ότι η προσρόφηση του Ραδονίου σε ενεργό άνθρακα και η μέτρησή του με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού είναι πολύ αποδοτικότερη αν η υγρασία του αέρα δεν αφηθεί να προσροφηθεί στον ενεργό άνθρακα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν αφυγραντή silica gel σε κατάλληλη διάταξη

2.3.5 Φιαλίδια NITON (~1989)

Η πολυεθνική εταιρεία NITON (<http://www.niton.com>), περί το 1989 και αφού έλαβε υπόψιν, τις έρευνες του Prichard (1983α), του Homma (1987), του Murase (1989) και του Schroeder (1989), παρουσίασε έναν ανιχνευτή Ραδονίου με βάση την αρχή της μεθόδου του υγρού σπινθηρισμού, ο οποίος διακρίνεται σε φωτογραφία και σε τομές στο Διάγραμμα 2.4 και στον οποίο δόθηκαν τα εμπορικά ονόματα PICO-RAD ή ST-100. Ο ανιχνευτής είναι ένα τυποποιημένο διαφώτιστο φιαλίδιο υγρού σπινθηρισμού των 20mL από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Το φιαλίδιο αυτό είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε στο άνω μέρος του, κοντά στο στόμιο, να έχει ένα μικρό κυλινδρικό δοχείο όγκου περίπου 8mL, το οποίο περιέχει ένα μείγμα ενεργού άνθρακα και αφυγραντή silica gel. Όταν αφαιρεθεί το πώμα από το φιαλίδιο το περιεχόμενο κυλινδρικό δοχείο επικοινωνεί κατευθείαν με την ατμόσφαιρα μέσω μιας διαπερατής μεμβράνης. Η έκθεση του φιαλιδίου στην ατμόσφαιρα συνιστάται να διαρκεί 24 έως 48h. Στη συνέχεια το φιαλίδιο

κλείνει αεροστεγώς με το πώμα και αποστέλλεται σε εργαστήριο για μέτρηση. Στο εργαστήριο, ανοίγει το φιαλίδιο και πληρώνεται με υγρό σπινθηριστή με βάση το τολουένιο, με αποτέλεσμα το Ραδόνιο που έχει προσροφηθεί στον ενεργό άνθρακα να διαχέεται σταδιακά και με τη βοήθεια ανάδευσης προς τον υγρό σπινθηριστή (έκπλυση). Ακολουθεί η μέτρηση με χρήση των κλασσικών μεθόδων υγρού σπινθηρισμού, αφού αφηθεί το φιαλίδιο για αρκετές ώρες (οπωσδήποτε για τουλάχιστον για 3h) προκειμένου να εκλουσθεί το Ραδόνιο από τον ενεργό άνθρακα προς τον υγρό σπινθηριστή και να αποκατασταθεί ραδιενεργή ισορροπία μεταξύ του Ραδονίου και των θυγατρικών του μέσα στον υγρό σπινθηριστή. Ο αριθμός των "αρκετών" ωρών δίνεται στις οδηγίες που συνοδεύουν τη μέθοδο. Σήμερα (2011) τα φιαλίδια PICO-RAD, κατασκευάζονται πλέον από την εταιρεία Accustar των ΗΠΑ (<http://www.accustaralabs.com>), δεδομένου ότι η NITON αποσύρθηκε από την κατασκευή τέτοιων προϊόντων.

2.3.6 Kim T. (1992)

Ο ερευνητής αυτός χρησιμοποίησε ως ανιχνευτές Ραδονίου, φιαλίδια της NITON, του τύπου που παρουσιάστηκε πιο πάνω, στα οποία το μικρό εσωτερικό κυλινδρικό δοχείο περιέχει 1.2 \diamond 0.5 g ενεργού άνθρακα και 1.7 g silica gel. Ο σκοπός της έρευνας ήταν η βαθμονόμηση των ανιχνευτών και η πραγματοποίηση μίας μικρής περιφερειακής επισκόπησης Ραδονίου. Για τη βαθμονόμηση τα σφραγισμένα φιαλίδια ανοίχθηκαν για να εκτεθούν σε ειδικό θάλαμο Ραδονίου όγκου 250L ώστε ο ενεργός άνθρακας να απορροφήσει Ραδόνιο από ατμόσφαιρα με δεδομένη συγκέντρωση. Ο θάλαμος Ραδονίου περιείχε ένα υγρό διάλυμα ^{226}Ra ενεργότητας 100 μCi (3700 kBq) σε 4N HCl, ως πηγή Ραδονίου, μία αντλία αέρα ενυδρείου για την αποδέσμευση του Ραδονίου από το διάλυμα με τη μέθοδο των φουσαλίδων και έναν ανεμιστήρα για την ομογενή διάδοση του Ραδονίου στο θάλαμο. Δια μέσου μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη λειτουργική διάρκεια έκθεσης για τη βαθμονόμηση ήταν 48h (absorption time ή exposure time ή, στα ελληνικά, χρόνος έκθεσης). Για περισσότερο χρόνο έκθεσης, αποδείχθηκε ότι οι ανιχνευτές κοραίνονται¹. Μετά την έκθεση τα φιαλίδια πληρώθηκαν προσεκτικά με 10 mL υγρό σπινθηριστή, του οποίου δεν αναφέρεται ο τύπος, χωρίς να εμβαπτισθεί σε αυτόν ο ενεργός άνθρακας, έως περίπου τη στάθμη που διακρίνεται στο σχήμα του Διαγράμματος 2.5. Το Ραδόνιο που είχε προσροφηθεί στον ενεργό άνθρακα αφέθηκε να εκλουσθεί προς τον υγρό σπινθηριστή για χρόνο περίπου 18h. Στο χρόνο

¹ Σ.Σ.: Προφανώς διότι υγρασία από το υγρό διάλυμα ^{226}Ra που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση προσροφήθηκε στον ενεργό άνθρακα μέχρι κορεσμού του.

αυτόν φυσικά επιτυγχάνεται και η επιθυμητή ραδιενεργή ισορροπία. Σημειώνεται ότι, όπως προέκυψε από μία διαδικασία βελτιστοποίησης ο χρόνος έκλυσης πρέπει να είναι τουλάχιστον μεγαλύτερος από 6-8h. Μετά τη συμπλήρωση και του χρόνου έκλυσης, ακολούθησε η μέτρηση των φιαλιδίων με χρήση των κλασσικών μεθόδων υγρού σπινθηρισμού, προκειμένου να προκύψουν οι κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης. Η συσκευή υγρού σπινθηρισμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Tri_Carb 2200CA της εταιρείας κατασκευής Packard. Σε σχέση με τους προηγούμενους ερευνητές ο Kim T. (1992) έδειξε στην εργασία του ότι:

(α) τις σχέσεις βαθμονόμησης της μεθόδου των ανιχνευτών Ραδονίου φιαλιδίων NITON, όπως εφαρμόστηκε. Στις σχέσεις αυτές παίζει ρόλο τόσο ο χρόνος έκθεσης, όσο και ο χρόνος έκλυσης. Ο χρόνος μέτρησης γενικά δεν λαμβάνεται υπόψιν για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης διότι είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με τον χρόνο έκλυσης και πολύ περισσότερο σε σύγκριση με το χρόνο έκθεσης.

(β) οι συγκεντρώσεις Ραδονίου στην ατμόσφαιρα μπορούν να μετρηθούν με τη μέθοδο των ανιχνευτών Ραδονίου φιαλιδίων NITON, ακόμα και αν -σύμφωνα με την αρχή της μεθόδου- ο υγρός σπινθηριστής δεν έρθει σε άμεση επαφή με τον ενεργό άνθρακα που έχει προσροφήσει Ραδόνιο.

(γ) φαίνεται ότι το μικρό μέγεθος του θαλάμου Ραδονίου παίζει κάποιο ρόλο στον τρόπο που προσροφάται το Ραδόνιο στον ενεργό άνθρακα των ανιχνευτών. Ο ρόλος αυτός δεν εξηγείται με επιστημονική επάρκεια.

(δ) από διαδικασία βελτιστοποίησης προέκυψε ότι οι ανιχνευτές κοραίνονται σε 48h. Αυτό έρχεται σε αντίθεση τόσο με αυτά που σημειώνει ο Schroeder (1989), αλλά και με τις οδηγίες της NITON, σύμφωνα με τις οποίες ο ανιχνευτής είναι κατάλληλος για έκθεση σε Ραδόνιο διάρκειας έως και 96h. Ο κορεσμός αυτός επέρχεται μάλλον λόγω υπερβολικής υγρασίας στο θάλαμο βαθμονόμησης.

(ε) ο ικανοποιητικός χρόνος έκλυσης του προσροφηθέντος Ραδονίου προς τον υγρό σπινθηριστή, μπορεί να ξεκινάει και από τις 3h, αλλά αυτό δεν παρουσιάζεται με ικανοποιητική απόδειξη.

τέλος

(στ) η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται στην πράξη για επισκοπήσεις Ραδονίου

2.3.7 Schoenhofer F. et. al. (1995)

Οι ερευνητές αυτοί χρησιμοποίησαν τα φιαλίδια NITON και τη μέθοδο του Kim (1992) (= ο υγρός σπινθηριστής δεν έρχεται σε επαφή με τον ενεργό άνθρακα), προκειμένου να πραγματοποιήσουν επισκόπηση Ραδονίου. Οι χρόνοι έκθεσης ήταν κατά μέγιστο 5 ημέρες (120h) και ο χρόνος έκλυσης σε υγρό σπινθηριστή με βάση το τολουένιο 8h. Η συσκευή υγρού σπινθηρισμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Quantulus της εταιρείας Wallac ΟΥ Φινλανδίας. Ένα τυπικό φάσμα από τη μέτρηση ενός τέτοιου φιαλιδίου διακρίνεται στο σχήμα του Διαγράμματος 2.6. Φαίνονται από αριστερά: η -α κορυφή του ^{222}Rn , η -α κορυφή του ^{218}Po (όχι πολύ καθαρά) και η -α κορυφή του ^{214}Po . Οι ερευνητές αυτοί έδειξαν άλλη μια φορά ότι η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται στην πράξη για επισκοπήσεις Ραδονίου.

2.3.8 Canoba A.C. et. al. (1999)

Οι ερευνητές αυτοί χρησιμοποίησαν τυποποιημένα γυάλινα φιαλίδια των 20mL, με χαμηλή περιεκτικότητα σε ^{40}K , προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος από τα -β σωματίδια από αυτό το ισότοπο στις μετρήσεις. Στον πυθμένα τους τοποθέτησαν 2g ενεργού άνθρακα (τύπου Norit RKJ 1,5). Ο άνθρακας αυτός θερμάνθηκε στους 120°C , για να αποβάλει τυχόν υγρασία που είχε προσροφήσει. Πάνω από τον άνθρακα τοποθέτησαν 1cm συνθετικού σπόγγου για να βοηθήσει στη διάχυση, και 4 g silica gel που λειτουργεί ως αφυγραντής. Ομοίως με τον ενεργό άνθρακα και το silica gel πέρασε την ίδια θερμική επεξεργασία για τον ίδιο λόγο. Στη συνέχεια σφράγισαν τα φιαλίδια. Ο χρόνος έκθεσης ξεκινά με άνοιγμα των φιαλιδίων και τοποθέτησή τους στον χώρο διεξαγωγής των μετρήσεων συγκέντρωσης Ραδονίου, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το Ραδόνιο διαχέεται στο φιαλίδιο και προσροφάται από τον ενεργό άνθρακα. Ο χρόνος έκθεσης τελειώνει με το σφράγισμα των φιαλιδίων. Στο εργαστήριο, τα φιαλίδια ανοίγονται, αφαιρείται το silica gel και ο σπόγγος, προστίθεται 10mL υγρός σπινθηριστής (5g PPO, 0.5g POPOP διαλυμένα σε 1L τολουενίου), και μετά τα φιαλίδια σφραγίζονται εκ νέου. Στη συνέχεια ακολουθεί έντονη ανακίνηση, και τέλος φυγοκέντριση στις 2000RPM για 5 λεπτά. Έπειτα τα φιαλίδια αφήνονται για χρόνο έκπλυσης 6 ωρών προκειμένου να επέλθει χημική και ραδιενεργή ισορροπία, ώστε να πραγματοποιηθούν τελικά μετρήσεις με συσκευή υγρού σπινθηρισμού (τύπος Tri-Carb 2550LL, της εταιρείας κατασκευής Packard). Σε σχέση με τους προηγούμενους ερευνητές οι Canoba et al. (1999) έδειξαν με την εργασία τους ότι:

(α) η μέθοδος μπορεί να βαθμονομηθεί με ακρίβεια αν δημιουργηθούν βαθμονομημένες συγκεντρώσεις Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου, όγκου 1m^3 , κατασκευασμένο με ακρυλικά τοιχώματα. Δίνονται οι σχέσεις βαθμονόμησης της μεθόδου όπως εφαρμόστηκε. Οι σχέσεις είναι παρόμοιες με εκείνες που παρουσίασε ο Kim (1992),

(β) η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται στην πράξη για επισκοπήσεις Ραδονίου,

(γ) η μέθοδος είναι συγκρίσιμη στα αποτελέσματά της με τις γνωστές μεθόδους μέτρησης συγκέντρωσης Ραδονίου με ανιχνευτές ιχνών (track etch detectors) και ηλεκτρίτες (E-PERM electrets), και

(δ) Ο χρόνος μέτρησης στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού προτείνεται να είναι 1h.

2.3.9 Iimoto T. et. al. (2005)

Οι ερευνητές αυτοί βαθμονόμησαν τα φιαλίδια NITON με τη μέθοδο του Canoba (1999) (= ο υγρός σπινθηριστής έρχεται σε επαφή με τον ενεργό άνθρακα, μέσω ανακίνησης) για διάφορες υγρασίες της ατμόσφαιρας μέτρησης. Η βαθμονόμηση έγινε στο θάλαμο Ραδονίου όγκου 25m^3 του National Institute of Radiological Sciences της Ιαπωνίας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C , σε βαθμονομημένη συγκέντρωση Ραδονίου 1900Bqm^{-3} , για τρεις σχετικές υγρασίες 30%, 60% και 90%, για διάφορους χρόνους έκθεσης 3, 6, 9, 15, 18, 21 και 24 ώρες, και για χρόνο έκπλυσης τουλάχιστον 3 ώρες. Ως υγρός σπινθηριστής με βάση το τολουένιο χρησιμοποιήθηκε ο Insta-Fluor Plus και ως συσκευή υγρού σπινθηρισμού ο τύπος Tri-Carb 3100TR της εταιρείας κατασκευής Perkin Elmer (πρώην Packard). Ο χρόνος μέτρησης που προτιμήθηκε ήταν 10 min. Οι Iimoto et al. (2005) έδειξαν στην εργασία τους ότι:

(α) Ο χρόνος έκθεσης πρέπει να είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερος από 15h. Τα αποτελέσματα για μικρότερο χρόνο έκθεσης παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, διότι δεν επιτυγχάνεται καλή διάχυση του Ραδονίου στο χώρο που καταλαμβάνει ο ενεργός άνθρακας.

(β) στην περιοχή σχετικών υγρασιών από 30 έως 60% ο συντελεστής βαθμονόμησης της μεθόδου παραμένει πρακτικά σταθερός

(γ) Η μείωση το βαθμού απόδοσης της μεθόδου είναι σημαντική στην υψηλή σχετική υγρασία του 90%, πράγμα που επιβεβαιώνει και τα αντίστοιχα συμπεράσματα όπως

καταγράφηκαν από τον Πασχαλίδη (2008). Η μείωση αυτή οφείλεται στον κορεσμό του ενεργού άνθρακα σε νερό και ως εκ τούτου στον περιορισμό της δυνατότητάς του να προσρροφά Ραδόνιο.

2.3.10 Stawarz et. al. (2006)

Οι ερευνητές αυτοί επίσης βαθμονόμησαν τα φιαλίδια NITON με τη μέθοδο του Canoba (1999) (= ο υγρός σπινθηριστής έρχεται σε επαφή με τον ενεργό άνθρακα, μέσω ανακίνησης) για διάφορες υγρασίες της ατμόσφαιρας μέτρησης. Η βαθμονόμηση έγινε στο θάλαμο Ραδονίου όγκου $\sim 12.5\text{m}^3$ του Central Laboratory for Radiological Protection της Πολωνίας. Τα συνολικά 33 πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $\sim 25^\circ\text{C}$, για διάφορες σχετικές υγρασίες στην περιοχή μεταξύ 20 και 96%. Οι χρόνοι έκθεσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στην περιοχή από 12 έως 96h. Ο χρόνος έκπλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 8h. Για τα πειράματα στο θάλαμο δημιουργήθηκε αρχικά βαθμονομημένη συγκέντρωση Ραδονίου $11\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης η συγκέντρωση αυτού του Ραδονίου αφέθηκε να μειώνεται κατά το νόμο της ραδιενεργής του διάσπασης. Ως υγρός σπινθηριστής χρησιμοποιήθηκε ο Insta-Fluor Plus και ως συσκευή υγρού σπινθηρισμού ο τύπος Tri-Carb 1900TR της εταιρείας κατασκευής Packard. Οι Stawarz et al. (2006) έδειξαν στην εργασία τους κυρίως ότι:

(α) Για χρόνο έκθεσης μικρότερο από 24h ο αφυγραντής που περιέχουν τα φιαλίδια NITON είναι αρκετός για να απορροφά όλη την υγρασία που διαχέεται μέσα στο φιαλίδιο. Έτσι ο περιεχόμενος ενεργός άνθρακας δεν επηρεάζεται και ο βαθμός απόδοσης της μεθόδου παραμένει υψηλός και σταθερός για υγρασίες στην περιοχή από 20 έως 96%. Το συμπέρασμα αυτό δεν συμφωνεί με εκείνο του Iimoto (2005) για υψηλές σχετικές υγρασίες. Ένας πιθανός λόγος είναι ότι τα πειράματα βαθμονόμησης των Stawarz et al. (2006) πραγματοποιήθηκαν σε πάρα πολύ υψηλές συγκεντρώσεις Ραδονίου σε σχέση με τα πειράματα του Iimoto (2005).

(β) Για χρόνο έκθεσης μεγαλύτερο από 24h και υψηλές σχετικές υγρασίες στην περιοχή από 75 – 96% η μείωση το βαθμού απόδοσης της μεθόδου είναι σημαντική.

2.3.11 Cooper et al. (2011)

Οι ερευνητές αυτοί βαθμονόμησαν τα φιαλίδια NITON με τη μέθοδο του Kim (1992) (= ο υγρός σπινθηριστής δεν έρχεται σε επαφή με τον ενεργό άνθρακα), για διάφορες

θερμοκρασίες. Η βαθμονόμηση έγινε στο θάλαμο Ραδονίου όγκου 25m³ του National Institute of Radiological Sciences της Ιαπωνίας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος στην περιοχή από 5 - 30° C, σε βαθμονομημένη συγκέντρωση Ραδονίου 5000 Bqm⁻³, για σχετική υγρασία μικρότερη από 60% και για χρόνους έκθεσης μικρότερους από 37h. Ο χρόνος έκλυσης που προτιμήθηκε ήταν 8 ώρες. Ως υγρός σπινθηριστής χρησιμοποιήθηκε ο Insta-Fluor Plus και ως συσκευή υγρού σπινθηρισμού ο τύπος Tri-Carb 3100TR της εταιρείας κατασκευής Perkin Elmer (πρώην Packard). Οι Cooper et al. (2005) έδειξαν στην εργασία τους ότι:

(α) Υπάρχει σοβαρή επίδραση της θερμοκρασίας στη βαθμονόμηση της μεθόδου όπως εφαρμόστηκε και παρουσιάστηκε σχετική ημιεμπειρική εξίσωση. Συγκεκριμένα, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία έκθεσης, τόσο χαμηλότερος προκύπτει και ο βαθμός απόδοσης.

(β) Ο βαθμός απόδοσης της μεθόδου θεωρείται σταθερός αν η έκθεση και η βαθμονόμηση της μεθόδου όπως εφαρμόζεται γίνεται στην ίδια μέση θερμοκρασία.

2.4 Σχόλια – Παρατηρήσεις

Στα προηγούμενα παρουσιάστηκαν οι αρχές της παθητικής μεθόδου μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου με χρήση ενεργού άνθρακα και υγρού σπινθηριστή και αναλύθηκαν οι βασικότερες βιβλιογραφικές αναφορές στο πως αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμόζεται με διάφορες παραλλαγές και βελτιώσεις. Με βάση την ανάλυση αυτή αλλά και την παλαιότερη Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008), θεωρείται εύλογο να διερευνηθεί αν άλλα διαφορετικά από τον ενεργό άνθρακα προσροφητικά υλικά όπως πχ οι ζεόλιθοι και τα silica gel μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου με χρήση υγρού σπινθηριστή. Στο επόμενο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση των ιδιοτήτων των ζεολίθων και των silica gel, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον Πασχαλίδη (2008) και εξετάζονται τα υλικά, ο εξοπλισμός και οι μέθοδοι με τα οποία μπορούν αυτά τα προσροφητικά υλικά αλλά και ο ενεργός άνθρακας να εκτίθενται σε περιβάλλοντα με βαθμονομημένες συγκεντρώσεις Ραδονίου και σχετικές υγρασίες, ώστε να διαπιστωθεί αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παθητικοί ανιχνευτές Ραδονίου σε αλληλεπίδραση με υγρούς σπινθηριστές.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Low Diffusion Polyethylene Vial – 20 mL

Our Low Diffusion Polyethylene Vial carries a micron thin Teflon®-type coating on the inside surface, reducing the diffusion of classical type solvents by a factor of 10–20 times. The cap is lined with aluminum foil as a barrier. This vial was developed for long-term low-level measurements as a cost effective alternative to very expensive Teflon counting vials. They are 100% anti-static and provide high counting efficiency and low background.

Specifications

- Height with cap: 60.8 mm.
- Diameter: 27.0 mm.
- Diameter of opening: 17.5 mm.
- Diameter of cap: 24.9 mm.
- Wall thickness: 1 mm.
- Nominal volume: 20.0 mL.
- Maximum volume: 24.0 mL.
- Temperature resistance: up to 80 °C.



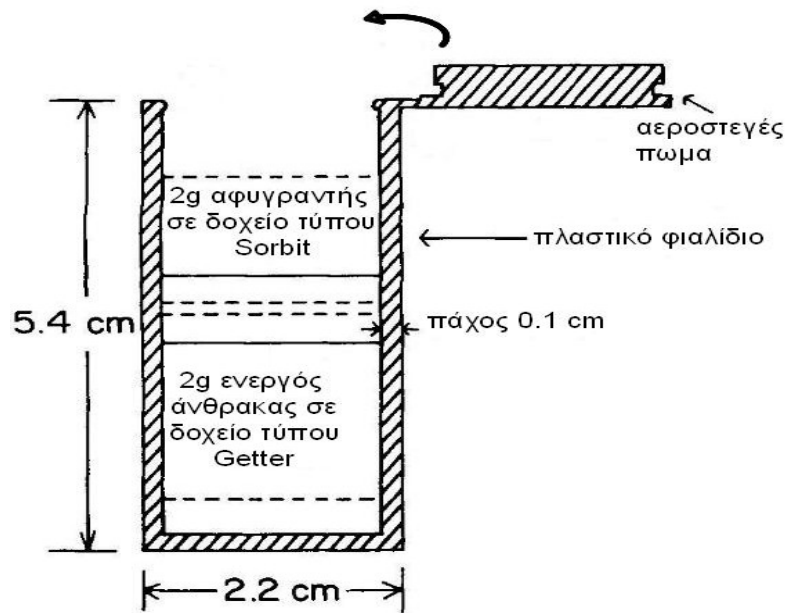
Διάγραμμα 2.1

Τυποποιημένο φιαλίδιο όγκου 20mL για μέτρηση με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού.



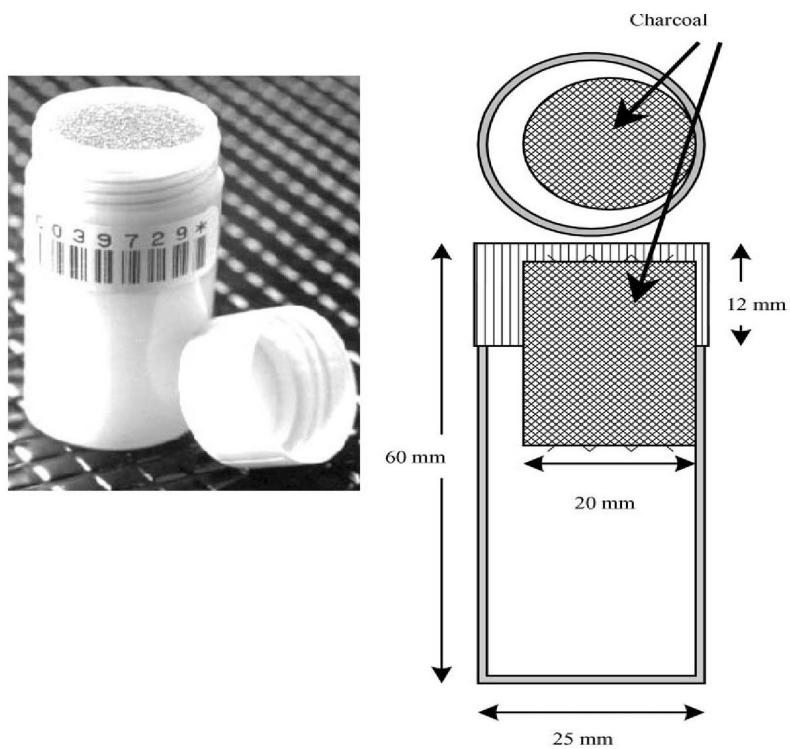
Διάγραμμα 2.2

Δοχείο τύπου "Sorbit".



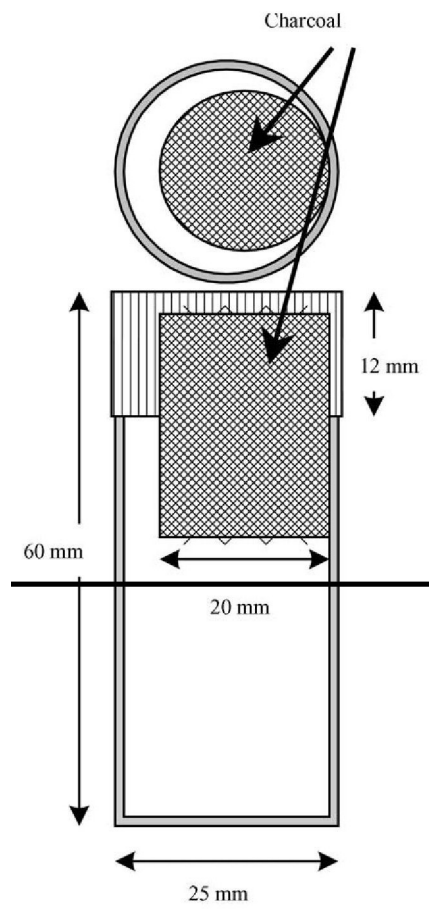
Διάγραμμα 2.3

Μη τυποποιημένο φιαλίδιο χωρητικότητας 15mL για τα πειράματα του Schroeder (1989).



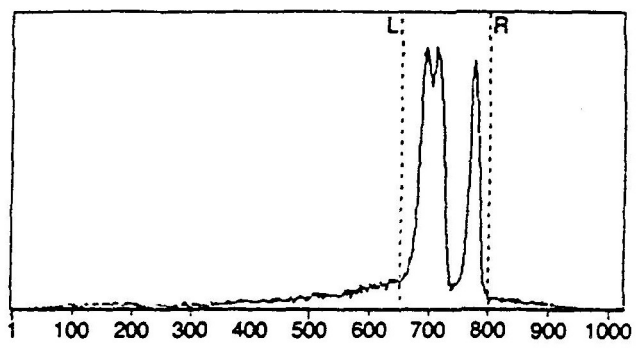
Διάγραμμα 2.4

Φιαλίδιο NITON.



Διάγραμμα 2.5

Στάθμη πλήρωσης φιαλιδίων NITON με υγρό σπινθηριστή στην εργασία του Kim (1992).



Διάγραμμα 2.6

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού Ραδονίου και θυγατρικών του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) διαθέτει πολλαπλές δυνατότητες υλικών και εξοπλισμού προκειμένου για την οργάνωση της βαθμονόμησης για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου με χρήση προσροφητικών υλικών και υγρών σπινθηριστών. Οποσδήποτε αυτές οι δυνατότητες δεν είναι ταυτόσημες με εκείνες, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο κυρίως για προσροφητή ενεργό άνθρακα και υγρούς σπινθηριστές με βάση το τολουένιο. Διατίθενται όμως όλα τα βασικά απαραίτητα όπως: θάλαμοι Ραδονίου, πηγές ²²⁶Ra για τη δημιουργία συγκεντρώσεων Ραδονίου στους θαλάμους, προσροφητές διάφορων τύπων, υγροί σπινθηριστές διάφορων τύπων, συσκευή υγρού σπινθηρισμού καθώς και άλλα αναγκαία παρελκόμενα υλικά και όργανα και δοκιμασμένες μέθοδοι για την αξιοποίησή τους. Στη συνέχεια θα παρουσιασθεί τα υλικά και ο εξοπλισμός, όπως οργανώθηκαν για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

3.2 Υλικά

3.2.1 Προσροφητικά υλικά

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας δοκιμάζονται ορισμένα προσροφητικά υλικά για τη συγκρότηση παθητικών ανιχνευτών με υγρό σπινθηριστή, ως εξής: (α) ο ενεργός άνθρακας, (β) συνθετικοί ζεόλιθοι ορισμένων τύπων με διαφορετικό μέγεθος πόρων και (γ) silica gel ορισμένου τύπου. Οι δοκιμές με ενεργό άνθρακα πραγματοποιήθηκαν για την επαλήθευση της συμπεριφοράς του ως παθητικός ανιχνευτής συγκεντρώσεων Ραδονίου σε αλληλεπίδραση με υγρό σπινθηριστή για πρώτη φορά και στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία που παρουσιάστηκε στο 2^ο Κεφάλαιο. Οι δοκιμές με συνθετικούς ζεόλιθους πραγματοποιήθηκαν δεδομένου ότι όπως αποδείχθηκε στη Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008) και δημοσιεύθηκε στην επιστημονική εργασία Paschalides (2010), ο ζεόλιθος προσροφά Ραδόνιο με παρόμοιο τρόπο όπως ο ενεργός άνθρακας και αποφασίστηκε ότι αξίζει να δοκιμασθεί και η συμπεριφορά του ως παθητικός ανιχνευτής συγκεντρώσεων Ραδονίου σε αλληλεπίδραση με υγρό σπινθηριστή. Οι δοκιμές με silica gel πραγματοποιήθηκαν δευτερευόντως δεδομένου ότι όπως αποδείχθηκε στη Διπλωματική Εργασία του

Πασχαλίδη (2008) και δημοσιεύθηκε στην επιστημονική εργασία Paschalides (2010), το silica gel προσροφά Ραδόνιο με παρόμοιο τρόπο όπως ο ενεργός άνθρακας και αποφασίστηκε ότι αξίζει να δοκιμασθεί και η συμπεριφορά του ως παθητικός ανιχνευτής συγκεντρώσεων Ραδονίου σε αλληλεπίδραση με υγρό σπινθηριστή. Σε κάθε περίπτωση αποφασίστηκε, σύμφωνα και με τα όσα αναφέρονται στο 2^ο Κεφάλαιο, η μάζα των προσροφητικών υλικών που δοκιμάστηκε ανά ανιχνευτή να είναι 4g, μέσα σε φιαλίδια χωρητικότητας 20 mL, όπως θα αναλυθεί στην παράγραφο για τα φιαλίδια. Ακολουθούν λίγες πληροφορίες για τα πιο πάνω τρία προσροφητικά υλικά όπως χρησιμοποιήθηκαν:

Ενεργός άνθρακας:

Καταρχήν παρατηρείται από τα όσα γράφονται στις βιβλιογραφικές αναφορές που εξετάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, ότι γενικά δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές διαστάσεων κόκκου ή διαστάσεων πόρων ή τύπων ενεργού άνθρακα. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του όποιου τύπου ενεργού άνθρακα χρησιμοποιείται είναι θέμα βαθμονόμησης. Στην ευρωπαϊκή αγορά διατίθενται χημικά καθαρός ενεργός άνθρακας σε διάφορες τυποποιημένες διαστάσεις κόκκων και πόρων, 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 πχ. για τα φίλτρα καθαρισμού των ενυδρείων (βλ. και Διάγραμμα 3.1) και υπάρχει άμεσα διαθέσιμος στην αγορά, σε χαμηλό κόστος από κεντρικούς προμηθευτές χονδρικής χημικών υλικών. Η αγορά του "χύμα" ενεργού άνθρακα έγινε από τον προμηθευτή ΚΑΛΟΓΕΡΟΠΟΥΛΟΣ ΧΗΜΙΚΑ Α.Ε. (βλ. και <http://www.kalogeropoulos-chemicals.gr/greek/index.htm> και στη Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη -2007).

Συνθετικός ζεόλιθος

Μια λεπτομερή ανάλυση των συνθετικών ζεολίθων ως προσροφητικών υλικών, μπορεί κάποιος να βρει στην §2.2 της Διπλωματικής Εργασίας του Πασχαλίδη (2008). Εδώ γίνεται μία συνοπτική αναφορά. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι αναπτύχθηκαν τεχνητά

συμπληρωματικά προς τους φυσικούς ζεόλιθους ήδη από τη δεκαετία του 1970. Οι διαθέσιμοι τύποι συνθετικών ζεολίθων ανέρχονται σήμερα (2012) σε περίπου 150. Οι πρώτες ύλες για την παρασκευή συνθετικών ζεόλιθων είναι η πυριτική άμμος, το NaCl και ο βωξίτης. Τα συνθετικά αυτά προϊόντα κατασκευάζονται σε μια ομοιόμορφη, τυποποιημένη και καθαρή μορφή με επιθυμητές κρυσταλλικές δομές που δεν εμφανίζονται στη φύση. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι ονομάζονται και λειτουργούν ως "μοριακά κόσκινα" (ελεύθερη μετάφραση του αγγλικού όρου "molecular sieves"). Ο όρος αναφέρεται στην ιδιότητα των συνθετικών ζεόλιθων να κατατάσσουν με επιλεκτικότητα μεγέθους τα μόρια ή τα ιόντα ενός αερίου ή υγρού διαλύματος. Αυτό οφείλεται στην πολύ συγκεκριμένη και σχετικά σταθερή δομή των πόρων των συνθετικών ζεόλιθων. Οι διαδικασίες παραγωγής που χρησιμοποιούνται για τους συνθετικούς ζεόλιθους απαιτούν το σημαντικά λιγότερο χρόνο από τα 50 έως 50.000 έτη που ορίζονται από τη φύση για τους φυσικούς ζεόλιθους. Δεδομένου ότι οι κύριες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ζεόλιθων είναι το πυρίτιο και η αλουμίνα, τα οποία είναι μεταξύ των αφθονότερων ορυκτών συστατικών στη γη, η δυνατότητα να παραχθούν συνθετικοί ζεόλιθοι είναι ουσιαστικά απεριόριστη. Παρ'όλ'αυτά το βασικό μειονέκτημα των συνθετικών ζεόλιθων είναι ότι οι ανθρώπινες κατασκευές δεν μπορούν ακόμα να αναπαράγουν όλες τις μικρο-πορώδεις δομές των φυσικών ζεόλιθων. Ένας από τους κυριότερους κατασκευαστές συνθετικών ζεολίθων είναι η εταιρεία Merck. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι που παράγει έχουν προδιαγραφές σύμφωνα με τα φύλλα τεχνικών προδιαγραφών που περιέχονται στο Παράρτημα "Α" της Διπλωματικής Εργασίας του Πασχαλίδη (2008). Η Merck (με έδρα την Ομοσπονδιακή Γερμανία) είναι μία από τις μεγαλύτερες πολυεθνικές εταιρείες παραγωγής χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Η εταιρεία αυτή αντιπροσωπεύεται στην Ελλάδα από την Merck Εμπορική Βιομηχανική Φαρμακευτική Χημική ΑΕ, Λ. Κηφισίας 41-45, 15123 Μαρούσι, Αθήνα, τηλ. +30 210 6165-100, 50, Fax: +30 210 6105302. Οι συνθετικοί ζεόλιθοι που επιλέχθηκαν ως προσροφητικά υλικά δοκιμής για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ήταν της κατασκευάστριας εταιρείας Merck, σε συνέχεια δοκιμών με τον έναν από αυτούς τους ζεόλιθους από τον Πασχαλίδη (2008) και τον Pascahlides (2010). Ο ένας ζεόλιθος -που δοκιμάστηκε και από τον Πασχαλίδη- είναι ο συνθετικός ζεόλιθος της Merck με κωδικό προϊόντος 1.0575. Ο υπόψιν ζεόλιθος είναι σε μορφή μικρών σφαιριδίων ή μικροκυλίνδρων διαμέτρου 1.6 mm (βλ. και Διάγραμμα 3.2), έχει μέγεθος πόρων 0.5 nm και δεν διαθέτει αποχρωματιζόμενο δείκτη

βαθμού προσρόφησης υγρασίας (indicator) ενώ χαρακτηρίζεται από την Merck ως "Drying agent - Molecular sieve". Ο συνθετικός αυτός ζεόλιθος προμηθεύεται σε υάλινες αεροστεγείς συσκευασίες με καθαρό βάρος 1 kg (βλ. και φωτογραφία της συσκευασίας στο Διάγραμμα 3.3). Ο δεύτερος ζεόλιθος είναι παρόμοιος με τον πρώτο, έχει κωδικό προϊόντος 1.05703, και η διαφορά του από τον πρώτο είναι ότι το μέγεθος πόρων του είναι 1 nm.

Silica gel

Μια λεπτομερή ανάλυση του silica gel ως προσροφητικού υλικού, μπορεί κάποιος να βρει στην §2.3 της Διπλωματικής Εργασίας του Πασχαλίδη (2008). Εδώ γίνεται μία συνοπτική αναφορά. Το silica gel είναι μια κοκκώδης, πορώδης κρυσταλλική μορφή οξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Παρά το όνομα "gel" (δηλ. "ζελέ") είναι ένα στερεό, το οποίο παρουσιάζει εξαιτίας της πορώδους μορφής του πολύ υψηλό λόγο επιφάνειας προς μάζα, ο οποίος υπολογίζεται μέχρι και $800 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Εξαιτίας αυτής της ιδιότητας απορροφάει το νερό εύκολα, και έτσι μπορεί να λειτουργεί ως αφυγραντικό με εξαιρετικές ιδιότητες για την προσρόφηση υγρασίας από τον περιβάλλοντα αέρα. Το silica gel παράγεται σήμερα πρακτικά μόνο συνθετικά συνήθως σε μορφή μικρών σφαιριδίων με γενικά ακανόνιστη εξωτερική επιφάνεια. Στην καθημερινή πράξη το silica gel χρησιμοποιείται ως απορροφητής της υγρασίας και για αυτό το σκοπό τοποθετείται στο εσωτερικό της συσκευασίας προϊόντων ή εξαρτημάτων (κυρίως ηλεκτρονικών κυκλωμάτων) ευπαθών σε υγρασία, σε ικανές ποσότητες μέσα σε διαπερατούς από τον αέρα πλαστικούς φακέλους (κατασκευασμένους από συνθετικό ύφασμα). Το silica gel χρησιμοποιείται επίσης για να ξηράνει τον αέρα στα βιομηχανικά συστήματα συμπιεσμένου αέρα. Επίσης το silica gel χρησιμοποιείται αρκετές φορές για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας στον εσωτερικό χώρο ενός μουσείου ή μιας βιβλιοθήκης. Αφού έχει απορροφήσει υγρασία, το silica gel μπορεί να αναγεννηθεί με θέρμανση σε $120^\circ - 150^\circ \text{ C}$ για τουλάχιστον τρεις ώρες. Το silica gel ως υλικό δεν είναι τοξικό, ούτε εύφλεκτο και γενικά είναι χημικά αδρανές. Παρόλαυτά, συνηθίζεται να εμποτίζεται με μάλλον τοξικές χημικές προσμίξεις, οι οποίες λειτουργούν ως δείκτες ποσοστού προσρόφησης υγρασίας. Ένας συνήθης τέτοιος δείκτης σε ποσοστό 2% κ.μ. είναι το χλωριούχο κοβάλτιο (cobalt(II)chloride). Silica gel που περιέχει χλωριούχο κοβάλτιο ονομάζεται "silica gel blue". Χωρίς προσροφηθείσα υγρασία το silica gel blue, έχει το

χαρακτηριστικό μπλε χρώμα των αλάτων του κοβαλτίου, με προσροφηθείσα υγρασία το silica gel blue, παίρνει ροζ χρώμα. Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται από παλαιότερες αγορές ικανές ποσότητες silica gel της Merck, τύπου silica gel blue σε κοκκώδη μορφή (ρύζι) με διαστάσεις κόκκου 1 – 3 mm (βλ. και Merck-b Product Data Sheet Cat. No. 1.01925). Το φύλλο τεχνικών προδιαγραφών αυτού του silica gel περιέχεται στο Παράρτημα "Α" της Διπλωματικής Εργασίας του Πασχαλίδη (2008). Το silica gel blue είναι κατάλληλο για αφύγρανση και δεν διατίθενται για αυτό περισσότερες πληροφορίες εκτός από το ότι η δυνατότητα προσρόφησης υγρασίας μπορεί να φθάσει έως και το 27% της ξηρής μάζας του. Σημειώνεται ότι η αλλαγή χρώματος του δείκτη χλωριούχο κοβάλτιο γίνεται σχεδόν πλήρως όταν η προσροφούμενη υγρασία φθάσει στο 7 με 10% της ξηρής μάζας του. Με βάση τα παραπάνω, αλλά έχοντας επίσης υπόψιν ότι το μέγεθος κόκκων του ενεργού άνθρακα με του οποίου τις προσροφητικές ιδιότητες σε ό,τι αφορά το Ραδόνιο ενδεχομένως να συγκρίνεται το silica gel blue, είναι 1 – 3 mm αποφασίσθηκε ότι το silica gel blue μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσροφητικό υλικό δοκιμής για τους σκοπούς της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, σε συνέχεια δοκιμών με το ίδιο silica gel blue από τον Πασχαλίδη (2008) και τον Paschalides (2010).

3.2.2 Φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού

Οι γεωμετρικοί τύποι των φιαλιδίων υγρού σπινθηρισμού που είναι διαθέσιμα προς χρήση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ καθορίζονται από τις γεωμετρικές φιαλιδίων που μπορεί να δεχθεί η διαθέσιμη συσκευή υγρού σπινθηρισμού. Αυτές οι γεωμετρικές είναι βασικά τρεις:

(α) η γεωμετρία των "20 mL"

Πρόκειται για κυλινδρικά φιαλίδια με ονομαστική χωρητικότητα 20 mL και τυπικές εξωτερικές διαστάσεις με βιδωτό πώμα: Ύψος: 60 – 61 mm, Διάμετρος: 27.0 – 27.5 mm. Τα φιαλίδια αυτά διατίθενται ως διαφανή (transparent) γυάλινα ή διαφώτιστα (translucent) πλαστικά, σύμφωνα και με τις φωτογραφίες του Διαγράμματος 3.4. Ο όγκος του κυλινδρίσκου που αντιστοιχεί στο πώμα των φιαλιδίων αυτών (2 mL) δεν προσμετράται στον ονομαστικό όγκο των 20 mL. Παρ'όλ'αυτά αρκετές φορές τα φιαλίδια αυτά θεωρούνται χωρητικότητας 22 mL.

(β) η γεωμετρία των "6, 7 και 8 mL"

(β1) Πρόκειται για κυλινδρικά φιαλίδια με ονομαστική χωρητικότητα 6 mL και τυπικές εξωτερικές διαστάσεις με πώμα push-on/twist-off : Ύψος: 56.5 – 57.5

mm, Διάμετρος: 15 - 16 mm. Τα φιαλίδια αυτά διατίθενται ως διαφώτιστα πλαστικά, σύμφωνα και με τις φωτογραφίες του Διαγράμματος 3.5

(β2) Πρόκειται για κυλινδρικά φιαλίδια με ονομαστική χωρητικότητα 7 mL και τυπικές εξωτερικές διαστάσεις με βιδωτό πώμα: Ύψος: ~57 mm, Διάμετρος: ~17 mm. Τα φιαλίδια αυτά διατίθενται ως διαφανή γυάλινα, σύμφωνα και με τις φωτογραφίες του Διαγράμματος 3.6

(β3) Πρόκειται για κυλινδρικά φιαλίδια με ονομαστική χωρητικότητα 8 mL και τυπικές εξωτερικές διαστάσεις με πώμα push-on/twist-off: Ύψος: 59 - 62 mm, Διάμετρος: 17.5 mm. Τα φιαλίδια αυτά διατίθενται ως διαφώτιστα πλαστικά, παρόμοια και με τις φωτογραφίες του Διαγράμματος 3.5.

(γ) η γεωμετρία τύπου "Eppendorf"

Πρόκειται για διαφώτιστα πλαστικά κωνικά φιαλίδια με ονομαστική χωρητικότητα 1.5 mL και σχήμα όπως αυτό που διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 3.7, με πώμα push-on / pull-off.

Πέρα από αυτές τις βασικές γεωμετρίες διατίθενται και άλλες όπως πχ. η γεωμετρία των "4 mL" και η γεωμετρία των "18 mL", οι οποίες δεν είναι συμβατές με τους υποδοχείς φιαλιδίων της διαθέσιμης συσκευής υγρού σπινθηρισμού. Τα περισσότερα από αυτά τα φιαλίδια κατασκευάζονται από τον οίκο Perkin Elmer. Πληροφορίες για τα υλικά και τα χαρακτηριστικά των φιαλιδίων δίνονται στον οδηγό Perkin Elmer (2010-2011) στις σελίδες 150 έως 156 καθώς και στον δικτυακό τόπο <http://www.perkinelmer.com/>. Το διαφανές γυαλί των φιαλιδίων παρέχεται σε δύο ποιοτικές κατηγορίες: (1) την απλή: βοριοπυριτικό (borosilicate) γυαλί χαμηλού υποστρώματος καλής διαύγειας, και (2) την υψηλής απόδοσης: βοριοπυριτικό (borosilicate) γυαλί χαμηλού υποστρώματος καλής διαύγειας, χαμηλής περιεκτικότητας σε K-40 και υψηλής διαύγειας σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το υλικό των διαφώτιστων πλαστικών φιαλιδίων είναι από: (1) αντιστατικό παρθένο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (γραμμικό) ή αλλιώς στα αγγλικά virgin high-density (linear) polyethylene HDPE, ή (2) 100% αντιστατικό HDPE Low Diffusion δηλ. με εσωτερική επίστρωση τεφλόν, η οποία εμποδίζει την διάχυση και την απορρόφηση του υγρού σπινθηριστή στα τοιχώματα του πλαστικού φιαλιδίου κατά ένα παράγοντα 10 έως και 20 φορές. Τα πώματα των φιαλιδίων παρέχονται σε δύο ποιοτικές κατηγορίες: (1) τα (αδιαφανή - λευκά) αμιλοπλαστικά (με βάση την ουρία), και (2) τα

(αδιαφανή - λευκά) πολυαιθυλενίου. Η στεγάνωση των βιδωτών πωμάτων με τα φιαλίδια γίνεται με κατάλληλα παρεμβύσματα ή κωνικές συναρμογές. Διατίθενται και παρεμβύσματα στεγάνωσης με επιφάνεια αλουμινίου, η οποία είναι κατάλληλη για την ανάκλαση των φωτονίων που παράγονται στον υγρό σπινθηριστή όταν αυτός αλληλεπιδρά με -α ή -β σωματίδια.

Στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκαν, διαφώτιστα πλαστικά φιαλίδια, γεωμετρίας 20 mL, από 100% αντιστατικό HDPE Low Diffusion, με βιδωτό αμιλοπλαστικό πώμα και παρέμβυσμα στεγάνωσης με επιφάνεια αλουμινίου όπως αυτά που διακρίνονται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 3.8 (ο σχετικός κωδικός προϊόντος στον κατάλογο της Perkin Elmer είναι 6000477). Τα πλαστικά φιαλίδια του προτεινόμενου τύπου, προτιμήθηκαν διότι από το διαφώτιστο τοίχωμά τους επιτρέπουν να φθάνει στον φωτοπολλαπλασιαστή της συσκευής υγρού σπινθηρισμού κυρίως το έντονο φως που παράγεται από την αλληλεπίδραση των θυγατρικών του Ραδονίου που παράγουν -α, με τον υγρό σπινθηριστή και όχι το λιγότερο έντονο φως που παράγεται και από την αλληλεπίδραση των θυγατρικών του Ραδονίου που παράγουν -β, με τον υγρό σπινθηριστή. Είναι φανερό ότι αν αντί για τα πλαστικά χρησιμοποιούνταν τα γυάλινα διαφανή, τότε και οι δύο φωτεινές ακτινοβολίες (από τα -α και τα -β) θα έφθαναν στο φωτοπολλαπλασιαστή παράγοντας πληροφορία με πολύ θόρυβο.

3.2.3 Υγροί σπινθηριστές

Οι τύποι των υγρών σπινθηριστών που είναι διαθέσιμοι προς χρήση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ καθορίζονται από τις ανάγκες των εφαρμογών μέτρησης που τρέχουν στη διαθέσιμη συσκευή υγρού σπινθηρισμού. Αυτοί οι τύποι παρέχονται κυρίως από την εταιρεία κατασκευής Perkin Elmer και κατά δεύτερο λόγο από την εταιρεία Hidex Oy (<http://www.hidex.com>). Στο εμπόριο υπάρχουν και αντίστοιχοι τύποι, οι οποίοι άρχισαν πρόσφατα να διατίθενται από την εταιρεία κατασκευής TRISKEM – International (βλ. και <http://www.triskem-international.com>). Πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των υγρών σπινθηριστών δίνονται στον οδηγό Perkin Elmer (2003), επίσης στον οδηγό Perkin Elmer (2010-2011) στις σελίδες 137 έως 149, καθώς και στον δικτυακό τόπο <http://www.perkinelmer.com/>. Σχεδόν όλοι οι σήμερα (2012) διαθέσιμοι εμπορικά τύποι χαρακτηρίζονται ως ασφαλέστεροι (safer)¹, με την έννοια ότι αποτελούν μίγματα

¹Κανένα μείγμα χημικών ενώσεων δεν μπορεί εξορισμού να χαρακτηρίζεται "ασφαλές".

(cocktails) με βασικό συστατικό οργανικούς διαλύτες μειωμένης τοξικότητας και μειωμένης αναφλεξιμότητας, σε σχέση με τους διαλύτες που χρησιμοποιούνταν ως βασικό συστατικό κατά το παρελθόν (κυρίως το τολουένιο και δευτερευόντως το ξυλένιο). Οι υγροί σπινθηριστές φυλάσσονται σε φωτοστεγανές πλαστικές ή γυάλινες φιάλες (όπως στη φωτογραφία του Διαγράμματος 3.9) και έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής συνήθως μεταξύ 2 και 3 ετών. Οι διαθέσιμοι σήμερα (2012) τύποι των οποίων η διάρκεια ζωής δεν έχει λήξει είναι βασικά οι ακόλουθοι:

(α) Ο τύπος "Ultima Gold", με βάση τον διαλύτη DIPN (Di-isopropyl Naphthalene), της εταιρείας κατασκευής Perkin Elmer, ο οποίος περιλαμβάνει μια πλήρη σειρά από υγρούς σπινθηριστές της ίδιας οικογένειας ως εξής:

(α1) απλό Ultima Gold: διατίθενται σε μία πλήρη συσκευασία 5 L και σε μία πλήρη συσκευασία 1 L.

(α2) Ultima Gold XR: διατίθενται σε μία πλήρη συσκευασία 1 L.

(α3) Ultima Gold LLT: διατίθενται σε μία πλήρη συσκευασία 1 L.

(α4) Ultima Gold uLLT: διατίθενται σε μία πλήρη συσκευασία 1 L.

(α5) Ultima Gold MV: διατίθενται σε μία πλήρη συσκευασία 1 L.

(α6) Ultima Gold AB: διατίθενται ~200 mL από μία πλήρη συσκευασία 1 L.

(α7) Ultima Gold F: διατίθενται ~750 mL από μία πλήρη συσκευασία 1L.

(β) Ο τύπος Insta-Fluor Plus, με βάση τον διαλύτη Pseudocumene (1,2,4-Trimethylbenzene), της εταιρείας κατασκευής Perkin Elmer: διατίθενται τέσσερις πλήρεις συσκευασίες 1L.

(γ) Ο τύπος MaxiLight με βάση τον διαλύτη DIPN (Di-isopropyl Naphthalene), της εταιρείας κατασκευής Hidex Oy: διατίθενται ~500 mL από μία πλήρη συσκευασία 1L.

Για περισσότερα είδη υγρών σπινθηριστών μπορεί κανείς να δει και στους δικτυακούς τόπους των αναφερόμενων εταιρειών κατασκευής. Οι διαθέσιμοι τύποι υγρών σπινθηριστών μπορούν να αναμιγνύονται ομογενώς (κολλοειδώς) με οργανικά διαλύματα. Διατίθενται όμως και τύποι υγρών σπινθηριστών που μπορούν να αναμιγνύονται και με υδατικά διαλύματα, σε συγκεκριμένες αναλογίες (φόρτιση του σπινθηριστή). Αυτοί οι τύποι είναι οι λεγόμενοι υδρόφιλοι σπινθηριστές. Οι υδρόφιλοι σπινθηριστές περιέχουν σε μικρό ποσοστό υδρόφιλες οργανικές ενώσεις όπως πχ

κατάλληλα απορρυπαντικά. Οι σπινθηριστές που δεν περιέχουν υδρόφιλες οργανικές ενώσεις είναι υδρόφοβοι. Είναι προφανές ότι οι υδρόφιλοι σπινθηριστές μπορούν να χρησιμοποιούνται και για οργανικά διαλύματα. Οι τύποι των σπινθηριστών (α1) έως και (α6) είναι υδρόφιλοι κατάλληλοι για υδατικά διαλύματα, ενώ οι τύποι (α7), (β) και (γ) είναι υδρόφοβοι κατάλληλοι για οργανικά διαλύματα.

Ειδικά για τα οργανικά διαλύματα σημειώνεται:

Δεν υπάρχουν προτεινόμενες αναλογίες οργανικού διαλύματος και υγρού σπινθηριστή δηλαδή η δημιουργία του ομογενούς διαλύματος εξασφαλίζεται σχεδόν πάντα με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις, όπου η χημική σύνθεση του οργανικού διαλύματος σε σχέση με εκείνη του υγρού σπινθηριστή είναι ασύμβατη ή όπου το μοριακό βάρος του οργανικού διαλύματος είναι πολύ διαφορετικό από το μοριακό βάρος του υγρού σπινθηριστή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αν η αναλογία του οργανικού διαλύματος και σπινθηριστή είναι ακατάλληλη, τότε το μείγμα δεν γίνεται πλέον κολλοειδές αλλά διαχωρίζεται είτε πλήρως ή παρουσιάζει αζεοτροπική συνιστώσα. Επιπλέον, αν η διάρκεια ζωής του σπινθηριστή έχει λήξει, το οργανικό διάλυμα ακόμα και αν είναι στην κατάλληλη αναλογία, συνήθως δεν αναμιγνύεται καλά με τον υγρό σπινθηριστή.

Ειδικά για τα υδατικά διαλύματα σημειώνεται:

Οι συνήθεις αναλογίες υδατικού διαλύματος και υγρού σπινθηριστή κυμαίνονται από 1 mL υδατικού διαλύματος σε 10 mL υγρού σπινθηριστή έως 10 mL υδατικού διαλύματος σε 10 mL υγρού σπινθηριστή, ανάλογα και με την οξύτητα του υδατικού διαλύματος μετρημένη σε μοριακότητα στην περιοχή από 0 έως πάνω από 1 M. Αν η αναλογία του υδατικού διαλύματος και σπινθηριστή είναι ακατάλληλη, τότε το μείγμα δεν γίνεται πλέον κολλοειδές αλλά διαχωρίζεται είτε πλήρως ή παρουσιάζει αζεοτροπική συνιστώσα. Επιπλέον, αν η διάρκεια ζωής του σπινθηριστή έχει λήξει, το υδατικό διάλυμα ακόμα και αν είναι στην κατάλληλη αναλογία, συνήθως δεν αναμιγνύεται καλά με τον υγρό σπινθηριστή.

Για όλα τα διαλύματα υδατικά και ανόργανα σημειώνεται:

Σε κάθε περίπτωση η φόρτιση του σπινθηριστή θα πρέπει γενικά να μην ξεπερνάει το όριο που επηρεάζει τη διαύγεια ή το χρώμα του κολλοειδούς διαλύματος, ώστε το φως που παράγεται από τον σπινθηριστή να μην εξασθενεί σε ένα μη διαυγές έγχρωμο διάλυμα, προτού φθάσει να μετρηθεί στον φωτοπολλαπλασιαστή της συσκευής υγρού

σπινθηρισμού. Φυσικά αν η μείωση της διαύγειας ή ο χρωματισμός του κολλοειδούς δεν μπορεί να αποφευχθεί απαιτείται προσεκτικότερη βαθμονόμηση της μεθόδου.

Ειδικά για όταν ζητείται η μέτρηση Ραδονίου, διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

(A) Μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στο νερό

Αν υπάρχει Ραδόνιο στο νερό, τότε αυτό βρίσκεται διαλυμένο ομογενώς, χωρίς να έχει αντιδράσει με το μόριο του νερού. Υπάρχουν δύο μέθοδοι:

(A1) Μέθοδος για μεγάλες συγκεντρώσεις: Δείγμα νερού από 8 έως 2 mL, προστίθεται σε 12 έως 18 mL υδρόφιλου υγρού σπινθηριστή, ώστε να προκύψει ομογενές μείγμα που να μπορεί να χωρέσει σε ένα φιαλίδιο των 20 mL, όπως έχει ήδη περιγραφεί. Το μείγμα μετρείται σε συσκευή υγρού σπινθηρισμού με κατάλληλη βαθμονόμηση (βλ. και Hidex DOC 413-009).

(A2) Μέθοδος για μικρές συγκεντρώσεις: Σε δείγμα νερού 250 mL, προστίθεται 25 mL υδρόφοβου υγρού σπινθηριστή, ώστε να προκύψει ετερογενές μείγμα. Το μείγμα ανακινείται δυνατά για περισσότερο από 30 s. Κατά την ανακίνηση το Ραδόνιο του νερού διαλύεται στον υδρόφοβο υγρό σπινθηριστή. Μετά το μείγμα αφήνεται να "ηρεμήσει" για τρεις περίπου ώρες ώστε να διαχωρισθεί ο υδρόφοβος σπινθηριστής από το νερό και να έρθει σε ισορροπία το Ραδόνιο που έχει παγιδευθεί σε αυτόν με τα θυγατρικά του. Στη συνέχεια λαμβάνονται 20 mL από τα 25 mL του σπινθηριστή και μετρώνται σε συσκευή υγρού σπινθηρισμού με κατάλληλη βαθμονόμηση, σε ένα φιαλίδιο των 20mL, όπως έχει ήδη περιγραφεί (βλ. και Hidex DOC 413-009).

(B) Μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στον αέρα

Όπως έγινε φανερό στο προηγούμενο 2^ο Κεφάλαιο, η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει αν διατίθεται ενεργός άνθρακας και υγροί σπινθηριστές με βάση το τολουένιο ή το Pseudocumene (βρίσκεται στον υγρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus). Λίγα γραμμάρια (πχ 2-4 g) ενεργός άνθρακας προσροφά Ραδόνιο κατά τον τρόπο που έχει περιγράψει ο George (1982) και στη συνέχεια:

(B1) το Ραδόνιο μπορεί να διαχέεται προς ένα κοντινό υγρό σπινθηριστή με όγκο ~20 mL, ο οποίος μετά την πάροδο εύλογου χρόνου μετράται σε φιαλίδιο των 20 mL σε συσκευή υγρού σπινθηρισμού με κατάλληλη βαθμονόμηση, ή

(B2) ο ενεργός άνθρακας μπορεί να εμβαπτίζεται και να αναδεύεται σε 20 mL υγρό σπινθηριστή και το μείγμα μετά την πάροδο εύλογου χρόνου μετράται σε φιαλίδιο των 20 mL σε συσκευή υγρού σπινθηρισμού με κατάλληλη βαθμονόμηση. Στην περίπτωση B2 κατά τον εύλογο χρόνο όχι μόνο επιτυγχάνεται ισορροπία Ραδονίου και θυγατρικών αλλά και ο διαλύτης του υγρού σπινθηριστή εισέρχεται στους πόρους του ενεργού άνθρακα και διαλύει το Ραδόνιο που βρίσκεται εκεί προς τον υπόλοιπο υγρό σπινθηριστή.

Η μέθοδος B2 μπορεί, όπως γίνεται κατανοητό, να επεκταθεί και για άλλα προσροφητικά υλικά με παρόμοια συμπεριφορά όπως ο ενεργός άνθρακας. Ήδη σημειώθηκε ότι τέτοια προσροφητικά υλικά μπορεί να είναι διάφοροι ζεόλιθοι ή silica gel. Η μέθοδος B2 μπορεί επίσης, όπως γίνεται κατανοητό, να επεκταθεί και για άλλους υγρούς σπινθηριστές που δεν βασίζονται στους διαλύτες τολουένιο ή Pseudocumene αλλά στον διαλύτη DIPN. Δεδομένου ότι το μόριο του DIPN ($C_{16}H_{20}$) έχει πάρα πολύ μεγαλύτερο MB (~ 212) από το μόριο του τολουενίου (C_7H_8 , MB=92) ή το μόριο του Pseudocumene (C_9H_{12} , MB=120), γεννάται το ερώτημα αν ο διαλύτης DIPN στους υγρούς σπινθηριστές είναι κατάλληλος για να εισέρθει στους πόρους του προσροφητικού υλικού και να παραλάβει το Ραδόνιο. Το ερώτημα αυτό θα διερευνηθεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο.

Συμπερασματικά, με την επιφύλαξη του ρόλου του διαλύτη DIPN, όλοι οι διαθέσιμοι υγροί σπινθηριστές στο ΕΠΤ-ΕΜΠ είναι κατάλληλοι για τη μέτρηση Ραδονίου με τη βοήθεια προσροφητικών υλικών κατά τη μέθοδο B2. Η Perkin Elmer, σύμφωνα με το διαδικτυακό εργαλείο επιλογής <http://www.perkinelmer.com/Toolkit>, προτείνει ως καταλληλότερο τον σπινθηριστή Ultima Gold F ή τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus, διότι προσφέρουν διακριτική ικανότητα που μπορεί να διαχωρίζει τα -α σωματίδια που προέρχονται από το θυγατρικό του Ραδονίου Po-218, από εκείνα που προέρχονται από το θυγατρικό Po-214, πράγμα που δεν είναι τόσο εύκολο για τους υπόλοιπους υγρούς σπινθηριστές.

3.3 Εξοπλισμός

3.3.1 Φούρνος αναγέννησης

Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ικανές μάζες από τα προσροφητικά υλικά που δοκιμάστηκαν (~ 250 g από το

κάθε ένα), τοποθετήθηκε χύδην σε εργαστηριακό φούρνο του κατασκευαστή οίκου Hellenic LABWARE τύπου KA 120P, που διατίθεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, όπου και θερμάνθηκαν επί 10 –12 h, στη θερμοκρασία των ~ 120° C, ώστε, όπως έχει σημειωθεί στον Μαρινάκη (2007) και στον Πασχαλίδη (2008), να απαλλαγούν από τυχόν προσροφηθείσα υγρασία, είτε από τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο, είτε αυτά προέρχονται από το περιβάλλον, είτε από προηγούμενη έκθεση σε Ραδόνιο. Η διεργασία αυτή ονομάζεται αναγέννηση. Το Διάγραμμα 3.10 παρουσιάζει σχετική φωτογραφία του φούρνου. Τα προσροφητικά αυτά υλικά φυλάχθηκαν στη συνέχεια σε αεροστεγή δοχεία "μαρμελάδας", ώστε να μην μπορούν να προσροφήσουν Ραδόνιο ή υγρασία. Από τις μάζες αυτές λήφθηκαν οι μικροποσότητες των 4g που χρειάστηκαν να τοποθετηθούν μέσα σε φιαλίδια των 20 mL προς έκθεση σε διάφορες συγκεντρώσεις Ραδονίου.

3.3.2 Ζυγός

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθεται ψηφιακός ζυγός ακρίβειας του κατασκευαστή οίκου OHAUS, τύπου AS60, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την ζύγιση των προσροφητικών υλικών που τοποθετήθηκαν σε φιαλίδια των 20 mL, προς έκθεση σε συγκεντρώσεις Ραδονίου. Το Διάγραμμα 3.11 παρουσιάζει σχετική φωτογραφία του ζυγού. Ο ζυγός αυτός έχει (α) ικανότητα ζύγισης μέχρι 62 g, και (β) διακριτική ικανότητα 0.1 mg. Οδηγίες χρήσεως του ζυγού μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο της OHAUS Corporation (βλ. βιβλιογραφία).

3.3.3 Θάλαμοι Ραδονίου

Όπως αναφέρεται και στον Μαρινάκη (2007), το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει δύο θαλάμους Ραδονίου κατάλληλους για την έκθεση παθητικών ανιχνευτών Ραδονίου από προσροφητικά υλικά (αλλά και άλλων παθητικών ανιχνευτών και ενεργητικών συσκευών) προκειμένου να βαθμονομηθούν. Τα γενικά χαρακτηριστικά των θαλάμων έχουν ως εξής:

- ΘΑΛΑΜΟΣ "Α": Όγκος 1.9 m³, 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 3.12)
- ΘΑΛΑΜΟΣ "Β": Όγκος 8.5 m³ 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 3.13)

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 "A" στην περιοχή από 250 έως και 150000 Bqm⁻³

στον θάλαμο "B" 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.

3.3.4 Πηγές Ραδονίου

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει, όπως ήδη σημειώθηκε αλλά και όπως αναφέρεται στον Μαρινάκη (2007), 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 3.14 παρουσιάζεται το σχετικό πιστοποιητικό για την ραδιενέργεια της πηγής "1". Στο Διάγραμμα 3.15 παρουσιάζεται το σχετικό πιστοποιητικό για τη ραδιενέργεια της πηγής "2".

Προκειμένου οι πηγές "1" και "2" να συνεργάζονται λειτουργικά, με τους θαλάμους Ραδονίου "Α" και "Β", όπως αναλυτικά περιγράφεται στον Μαρινάκη (2007), 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 3.16. Φωτογραφική απεικόνιση του δοχείου "1", όπως είναι αυτό τοποθετημένο πλησίον των θαλάμων Ραδονίου "Α" και "Β" στο ΕΠΤ-ΕΜΠ παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.17. Η πηγή "2", δεν διαθέτει τέτοιο δοχείο (στο εξής: δοχείο "2") εκ κατασκευής. Έτσι, όταν παρουσιάστηκε η σχετική ανάγκη (δεκαετία του '90), πραγματοποιήθηκε η σχετική κατασκευή, η οποία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.18. Διαπραγμάτευση σχετικά με την υπόψιν κατασκευή γίνεται στον Κατσανεβάκη (1995).

3.3.5 Ενεργητικοί ανιχνευτές Ραδονίου

Για την παρακολούθηση και την επαλήθευση των συγκεντρώσεων Ραδονίου που επικρατούν μέσα σε θαλάμους Ραδονίου, το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει σειρά ενεργητικών ανιχνευτών Ραδονίου των κατασκευαστών SAPHYMO και SARAD διαφόρων τύπων. Από αυτούς οι πλέον ακριβείς είναι οι ανιχνευτές της εταιρείας SAPHYMO τύπου AlphaGuard P2000 (βλ. φωτογραφία του Διαγράμματος 3.19). Η εταιρεία SAPHYMO, έχει εξαγοράσει την αρχική κατασκευάστρια εταιρεία των ενεργητικών ανιχνευτών AlphaGuard P2000, την Genitron GmbH. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει δύο τέτοιους ανιχνευτές. Οι ανιχνευτές αυτοί λειτουργούν με την αρχή του ανοιχτού θαλάμου ιονισμού και έχουν την δυνατότητα να μετρούν συγκεντρώσεις Ραδονίου συναρτήσει του χρόνου με ελάχιστο βήμα 10 λεπτά. Η ακρίβεια των οργάνων AlphaGuard P2000

είναι ευρέως γνωστή, και χρησιμοποιούνται ως δευτερεύοντα όργανα αναφοράς. AlphaGuard P2000, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλαπλώς σε Διπλωματικές Εργασίες του ΕΠΤ-ΕΜΠ (βλ. πχ Δήμου-Σακελλαρίου, 2011).

3.3.6 Συσκευή ανάδευσης

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθεται μικροσυσκευή ελλειπτικής ανάδευσης (vortex) υγρών δειγμάτων, στην οποία μπορούν να τοποθετείται το φιαλίδιο γεωμετρίας 20 mL, που περιέχει το μείγμα προσροφητικού υλικού και υγρού σπινθηριστή για καλή ανάδευση, όταν χρειάζεται. Η μικροσυσκευή είναι εταιρείας κατασκευής Gilson και τύπου GVLab και διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 3.20. Η μικροσυσκευή δέχεται φιαλίδια μέχρι διαμέτρου 33 mm, τα οποία μπορούν να αναδεύονται ελλειπτικά μέχρι στις 2800 RPM.

3.3.7 Συσκευή φυγοκέντρισης

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται συσκευή φυγοκέντρισης εταιρείας κατασκευής ALC International, τύπου 4218-D, ικανότητας φυγοκέντρισης υγρών όγκου μέχρι 350 mL, μέγιστης πυκνότητας 1.3 gcm^{-3} , μέγιστης ταχύτητας περιστροφής 4800 RPM, μέγιστης μάζας προς φυγοκέντριση στις 4800 RPM 0.468 kg ($=350 \text{ mL} \times 1.3 \text{ gcm}^{-3}$), με χρονοδιακόπτη φυγοκέντρισης 0 – 30 min, με στροφόμετρο, με περιστροφικό κομβίο ρύθμισης στροφών, με χρόνο επιτάχυνσης προς τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής ~28 sec, με χρόνο επιβράδυνσης από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής ~20 sec, αυτόματο κλείδωμα καλύμματος, αυτόματη πέδη σε περίπτωση μη ζυγοσταθμισμένης φόρτισης με εκπομπή προειδοποιητικού ήχου, μέγιστου δείκτη RCF 2086 (βλ. και wikipedia, λήμμα: "centrifuge") στην ακτίνα 8cm. Συλλογή φωτογραφιών από τη συσκευή φυγοκέντρισης δίνονται στο Διάγραμμα 3.21. Η συσκευή συνοδεύεται από σετ δοχείων φυγοκέντρισης (με δύο ή τέσσερα ισοζυγισμένα δοχεία το κάθε σετ). Το δοχείο ενός σετ μπορεί να έχει χωρητικότητα από 1.5 mL έως 135 mL. Διατίθενται στο εμπόριο 5 σετ δοχείων διαφορετικής χωρητικότητας για φυγοκέντριση υπό σταθερή γωνία και 3 σετ δοχείων για οριζόντια φυγοκέντριση. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει 2 σετ δοχείων για οριζόντια φυγοκέντριση ως εξής: δύο ισοζυγισμένα δοχεία όπως αυτά που διακρίνονται στην φωτογραφία του Διαγράμματος 3.22 (κάθε δοχείο από αυτά έχει 4 θέσεις υποδοχής των 10 mL) και τέσσερα ισοζυγισμένα δοχεία όπως αυτά που διακρίνονται στην φωτογραφία του Διαγράμματος 3.23 (κάθε δοχείο από αυτά έχει χωρητικότητα 80 mL). Στο γράφημα του Διαγράμματος 3.24 διακρίνεται η σχέση "θέση του περιστροφικού κομβίου ρύθμισης

στροφών – στροφές ανά λεπτό (RPM)", όπως διαμορφώνεται πειραματικά. Η προφανής γραμμική συσχέτιση υπολογίστηκε από το λογισμικό Origin 8.0 με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης "1", και είναι:

$$RPM = -1550 + 500 \text{ "θέση κομβίου"} \quad (3.1)$$

Σύμφωνα με όσα σημειώνει ο Canoba (1999), ο ενεργός άνθρακας και ως εκ τούτου και τα προσροφητικά υλικά γενικά όταν εμβαπτίζονται μέσα σε υγρό σπινθηριστή και αναδεύονται σε αυτόν, τυχόν σκόνη των προσροφητικών υλικών ή άλλες ενώσεις από αυτά είναι δυνατόν να θολώσουν τον υγρό σπινθηριστή, πράγμα που γενικά είναι ανεπιθύμητο διότι ο περιορισμός της διαύγειας του υγρού σπινθηριστή εξασθενεί το φως που παράγεται από τον σπινθηριστή προτού φθάσει να μετρηθεί στον φωτοπολλαπλασιαστή της συσκευής υγρού σπινθηρισμού. Ο Canoba (1999) προτείνει ως τρόπο για τη διατήρηση της διαύγειας του υγρού σπινθηριστή τη φυγοκέντριση του φιαλιδίου των 20 mL που περιέχει το μίγμα προσροφητικού υλικού και υγρού σπινθηριστή επί 5 min στις 2000 RPM. Το πως μπορεί να εφαρμόζεται αυτός ο τρόπος θα εξετασθεί με λεπτομέρεια στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο.

3.3.8 Διαθέσιμα υγρόμετρα

Η σχετική υγρασία (στο εξής απλώς υγρασία) στον αέρα μετρείται με ειδικά όργανα, τα οποία ονομάζονται υγρόμετρα. Η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης της υγρασίας σε όλο το εύρος τιμών της από 0 έως 100% είναι η λεγόμενη ψυχομετρική. Τα αντίστοιχα όργανα ονομάζονται και ψυχρόμετρα και μετρούν έμμεσα την υγρασία με τρόπο που παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια από τον Πασχαλίδη (2008). Η ψυχομετρική μέθοδος δεν χρειάζεται βαθμονόμηση αρκεί οι αισθητήρες θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται να είναι επαρκώς ακριβείς (τουλάχιστον $\pm 0.5^{\circ} \text{C}$).

Η πιο κοινή μέθοδος μέτρησης της υγρασίας είναι η λεγόμενη υγρομετρική. Τα όργανα που βασίζονται στην υγρομετρική μέθοδο μετρούν άμεσα την υγρασία και είναι γενικά μικρά, σχετικά αξιόπιστα και φθηνά και βασίζονται σε απλούς μηχανισμούς που λειτουργούν με βάση την αρχή ότι:

*Οι φυσικές διαστάσεις διαφόρων υλικών μπορούν να μεταβάλλονται
με την προσρόφηση υγρασίας.*

Τέτοια υλικά είναι οι τρίχες (από μαλλί), οι ζωικές μεμβράνες και κάποια πλαστικά. Για να κατασκευασθεί ένα υγρόμετρο από τέτοια υλικά αρκεί τμήμα τρίχας ή μεμβράνης ή

πλαστικού, να διατηρείται τεταμένο με τη βοήθεια ενός ελατηρίου. Η μετρούμενη μεταβολή του μήκους του υλικού είναι απευθείας ανάλογη με τη σχετική υγρασία. Η μέτρηση με τέτοια όργανα χάνει σε ακρίβεια με το γήρας της συσκευής καθώς και με την επικάλυψη σκόνης. Η υγρομετρική μέθοδος χρειάζεται συχνή βαθμονόμηση. Συνήθως η βαθμονόμηση αυτή γίνεται με την έκθεση των υγρομέτρων αυτών σε περιβάλλον 100% σχετικής υγρασίας.

Πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των πολύ λεπτών φιλμ και η ανάπτυξη των τεχνολογιών μικροκατεργασιών επέτρεψε την παραγωγή υψηλής ποιότητας μεταλλακτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη θέση των πιο πάνω απλών, φθηνών υλικών, στα σύγχρονα υγρόμετρα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Οι μεταλλάκτες αυτοί λειτουργούν με βάση την αρχή ότι:

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες διαφόρων υλικών μπορούν να μεταβάλλονται με την προσρόφηση υγρασίας.

Οι μεταλλάκτες αυτοί είναι δύο τύπων, τύπου πυκνωτή και τύπου αντίστασης και έχουν το πλεονέκτημα πως είναι ακριβείς, μικροί και επαναλήψιμοι στις μετρήσεις τους.. Συχνά όμως τίθενται ερωτήματα σχετικά με την ακρίβεια αυτών των μετρήσεων, η οποία μπορεί σε απόλυτες τιμές να φθάνει μέχρι και $\pm 7\%$ RH. Τα υγρόμετρα με μεταλλάκτη χρειάζονται συχνή βαθμονόμηση. Συνήθως η βαθμονόμηση αυτή γίνεται με την έκθεση των υγρομέτρων αυτών σε περιβάλλον βαθμονομημένης σχετικής υγρασίας.

Όπως αναφέρεται και στον Πασχαλίδη (2008), στο ΕΠΤ-ΕΜΠ διατίθενται για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας απλά υγρόμετρα τριχός, καθώς και υγρόμετρα με μεταλλάκτες (α) εταιρείας κατασκευής OMEGA, τύπου HHM25 , (β) εταιρείας κατασκευής CAREL, τύπου SHWOOP απευθείας συνδεδεμένο με αναλογοψηφιακό μετατροπέα και H/Y, και (γ) εταιρείας κατασκευής OMEGA, τύπου HX13C απευθείας συνδεδεμένο με αναλογοψηφιακό μετατροπέα και H/Y. Είναι φανερό από τα προηγούμενα ότι όλα αυτά τα υγρόμετρα χρειάζονται βαθμονόμηση, αλλά δεδομένης της ελλείψεως σχετικών διαλυμάτων αλάτων, η βαθμονόμηση και ο έλεγχός τους δεν είναι εύκολος. Για τη μέτρηση της υγρασίας που απαιτείται για την πειραματική διαδικασία έκθεσης προσροφητικών υλικών σε διάφορες συγκεντρώσεις Ραδονίου σε διάφορες υγρασίες, στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί η ψυχομετρική μέθοδος, όπως έγινε και στον Πασχαλίδη (2008). Για

το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο απλά ψυχρόμετρα ξηρού – υγρού βολβού με υδραργυρικά θερμομέτρα (βλ. και στο Διάγραμμα 3.25).

3.3.9 Συσκευή υγρού σπινθηρισμού

Στο εμπόριο διατίθεται κυρίως συσκευές υγρού σπινθηρισμού από δύο κατασκευαστές: (α) την Perkin Elmer, πολυεθνική που παράγει τις συσκευές της σειράς Tricarb και της σειράς Quantulus -αντιπροσωπεύεται στην Ελλάδα από την εταιρεία ANTISEL, ΑΦΟΙ ΣΕΛΙΔΗ ΑΕ (<http://www.antisel.gr>), και (β) την Hidex Oy Φινλανδίας που παράγει τις συσκευές της σειράς Triathler και 300 SL -αντιπροσωπεύεται στην Ελλάδα από την εταιρεία Κορδοπάτης ΕΠΕ (<http://www.kordopatis.gr>). Οι συσκευές της σειράς Tricarb της Perkin Elmer, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν αρχικά από την Packard Instrument, ώσπου ο συγκεκριμένος κλάδος της Packard πουλήθηκε στην Perkin Elmer. Οι συσκευές της Hidex Oy ενσωματώνουν τεχνολογία της επίσης Φινλανδικής εταιρείας Wallac, η οποία δεν παράγει πλέον συσκευές. Άλλοι τύποι συσκευών υγρού σπινθηρισμού των οποίων η κατασκευή και η εμπορία έχει σταματήσει είναι αυτές της Beckman. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει συσκευή υγρού σπινθηρισμού εταιρείας κατασκευής Hidex Oy Φινλανδίας τύπου Triathler MLT (δηλ. Multilabel Tester) ή ισοδύναμα μοντέλο 425-004, η οποία διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 3.26. Σε αντίθεση με τον κανόνα των άλλων διαθέσιμων στο εμπόριο συσκευών υγρού σπινθηρισμού που μπορούν να μετρούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα η συσκευή Triathler MLT είναι διάταξη μέτρησης ενός δείγματος τη φορά. Επίσης, πάλι σε αντίθεση με τον κανόνα, το δείγμα σε αυτή τη συσκευή μετριέται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή (μεγάλου όγκου) ενώ στις άλλες συσκευές του εμπορίου από δύο ή τρεις (μικρότερου όγκου). Η συσκευή αυτή είναι σε θέση να παρέχει ακριβή και γρήγορα αποτελέσματα σε μια μεγάλη ποικιλία επιστημονικών εφαρμογών. Μπορεί να πραγματοποιεί μετρήσεις με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού, με τη μέθοδο της φωταύγειας, καθώς και να μετρά φωτόνια. Αυτός είναι και ο λόγος που ονομάστηκε έτσι (Triathler), διότι είναι σε θέση να πραγματοποιεί τρεις (3) διαφορετικού είδους μετρήσεις. Ως συσκευή υγρού σπινθηρισμού διαθέτει και την ικανότητα για μέτρηση τριτίου με καλό βαθμό απόδοσης στην περιοχή του 45%. Εξαιτίας του πολύ μικρού της μεγέθους και του μικρού της βάρους μπορεί εύκολα να μεταφερθεί στον χώρο των πειραμάτων, προκειμένου να διεξαχθούν μετρήσεις επί τόπου. Η συσκευή αυτή έχει πολλά προηγμένα χαρακτηριστικά ως βασικό εξοπλισμό, όπως: (α) Φωτοπολλαπλασιαστή διαμέτρου 1.5",

(β) γραμμικό και λογαριθμικό ενισχυτή, (γ) αλφαριθμητική οθόνη 32 χαρακτήρων, (γ) ρυθμιζόμενο χρόνο μέτρησης από 0.1 s έως 99999 min, (δ) προηγμένη ανάλυση φάσματος με χρήση πολυκαναλικού αναλυτή 1000 καναλιών (Multi Channel Analyzer – MCA), (ε) προρρυθμισμένα ενεργειακά παράθυρα μετρήσεως (πρωτόκολλα μετρήσεως) για τα ισότοπα που εκπέμπουν -β σωματίδια H-3, C-14, P-32, S-35, P-33, I-125 και Cr-51, (στ) ενσωματωμένο ανιχνευτή NaI για τη μέτρηση φωτονίων από δείγματα, (ζ) προρρυθμισμένα ενεργειακά παράθυρα μετρήσεως για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια I-125, Cr-51, Co-57 και Co-58, (η) προρρυθμισμένο πρωτόκολλο για μετρήσεις φωταύγειας, (θ) δυνατότητα ρύθμισης και άλλων ενεργειακών παραθύρων για -β σωματίδια ή φωτόνια, ανάλογα με τις ανάγκες, (ι) δυνατότητα επικοινωνίας με H/Y μέσω σειριακής θύρας RS-232 και λογισμικού σε Λειτουργικό Σύστημα MS Windows, (ια) δυνατότητα μέτρησης φωτός Cherenkov ώστε να γίνονται μετρήσεις υγρών διαλυμάτων με ισότοπα που εκπέμπουν -β σωματίδια μεγάλης ενέργειας χωρίς τη χρήση υγρού σπινθηριστή (πχ. Y-90 κλπ), και τέλος (ιβ) υποδοχείς (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 3.27) για όλους σχεδόν τους τύπου φιαλιδίων υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "20 mL", γεωμετρίας "6, 7 ή 8 mL" γυάλινα ή πλαστικά και γεωμετρίας "Eppendorf". Από τον προαιρετικό εξοπλισμό (βλ. σχετικά και Hidex DOC 412-001) το Triatler MLT του ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει: (1) εσωτερική θωράκιση μολύβδου (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 3.28), και (2) ηλεκτρονικό σύστημα διαχωρισμού παλμών που προέρχονται από -α και -β σωματίδια (alpha/beta separation electronics). Με τη βοήθεια του λογισμικού που διατίθεται το υπόψιν ηλεκτρονικό σύστημα διαχωρίζει τους παλμούς που οφείλονται σε -α από εκείνους που οφείλονται σε -β σε λογιστικό φύλλο Excel και τους αποτυπώνει πάνω σε δισδιάστατο γράφημα για παραστατικότερη ανάγνωση. Σημειώνεται ότι η συσκευή Triathler MLT, μπορεί επίσης να μετρήσει P-32, χωρίς τη χρήση υγρού σπινθηριστή. Στην περίπτωση αυτή, το υγρό διάλυμα με τον P-32 τοποθετείται σε ένα φιαλίδιο Eppendorf και αυτό με τη σειρά του σε ένα μικρό πλαστικό δοχείο γεωμετρίας ~7 mL, το οποίο είναι κατασκευασμένο από πλαστικό (οργανικό) σπινθηριστή (βλ. και τη φωτογραφία του Διαγράμματος 3.29). Τα σωματίδια -β που εκπέμπονται από τον P-32 έχουν ικανή ενέργεια για να διαπεράσουν τα τοιχώματα του φιαλιδίου Eppendorf και να προσβάλλουν τον οργανικό σπινθηριστή του εξωτερικού δοχείου, ο οποίος με τη σειρά του παράγει φως, που μπορεί να μετρηθεί από τον φωτοπολλαπλασιαστή της συσκευής.

Η συσκευή αυτή είναι εύκολη στη χρήση, και διαθέτει πληκτρολόγιο που δίνει τη δυνατότητα πλήρους χειρισμού μέσω απλών εντολών, για τη λήψη άμεσων αποτελεσμάτων με χρήση των ήδη υπαρχόντων πρωτοκόλλων για κάθε ραδιοϊσότοπο. Γενικά, οι συσκευές υγρού σπινθηρισμού της σειράς Triathler, δεδομένου μάλιστα ότι είναι μικρές σε όγκο και βάρος και μεταφέρονται εύκολα, έχουν εξεταστεί και δοκιμασθεί σε ακραίες συνθήκες και έχουν πιστοποιηθεί ότι είναι σε θέση να δίνουν αποτελέσματα με ακρίβεια. Δεδομένα της Hidex Oy αναφέρουν ότι πάνω από 1500 συσκευές έχουν πωληθεί σε εργαστήρια και χρησιμοποιούνται ακόμα και στα πιο "απαιτητικά" περιβάλλοντα του πλανήτη. Η εμπειρία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει γενικά αποδείξει, μέσω της συμμετοχής του Εργαστηρίου σε διεθνείς ασκήσεις διασύγκρισης (intercomparison) ότι με την κατάλληλη προεργασία στο δείγμα, οι μετρήσεις που γίνονται είναι ικανοποιητικά ακριβείς (βλ. και NPL (2004) (Εργαστήριο 30), NPL (2008) (Εργαστήριο 30), IRMM (2010) (Εργαστήριο 33), IAEA (2011) (Εργαστήριο 56)].

Παραδείγματα τυπικών εφαρμογών του Triathler MLT, για μελέτες που έχουν να κάνουν με θέματα εθνικής και ραδιολογικής ασφαλείας, τεστ κηλίδας, μοριακής βιολογίας, οικολογίας, και περιβαλλοντικών δοκιμών, έχουν ως εξής:

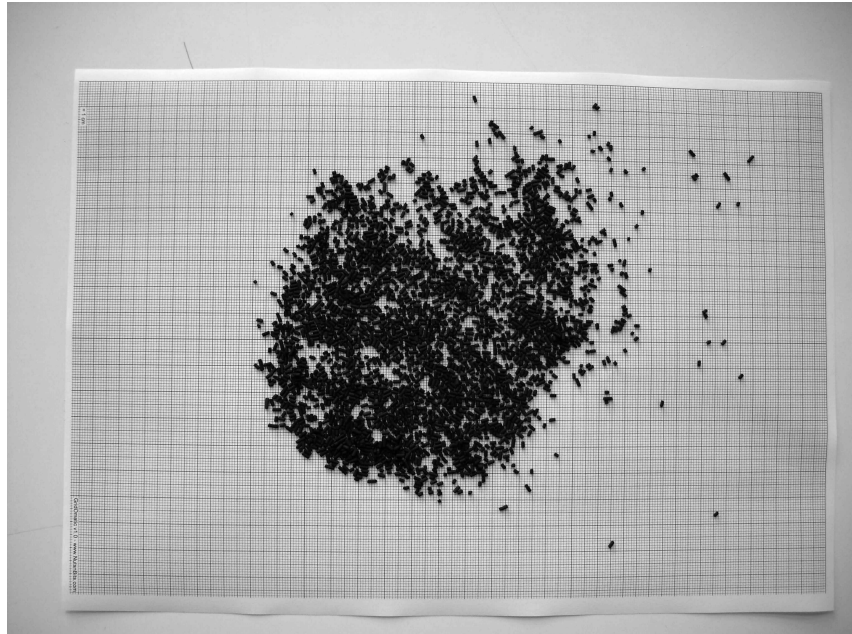
1. Για τεστ κηλίδας (wipe test ή smear test), παρέχει γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα.
2. Για μετρήσεις στο νερό, δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαχωρισμού των παλμών -α, από τους -β, κάτι που το καθιστά ιδανικό για τη μέτρηση -α ισοτόπων στο νερό, πχ . Ραδονίου και θυγατρικών.
3. Για μετρήσεις σε δείγματα εδάφους κατάλληλα επεξεργασμένα και διαλυμένα σε υγρά χρησιμοποιείται για την ανίχνευση περιεχόμενων ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν -α ή/και -β σωματίδια.
4. Για επιστήμες υγείας, όπως η μοριακή βιολογία, μπορεί να χρησιμοποιείται για μελέτες που έχουν να κάνουν με μεταβολικές διαδικασίες, γενετική κλπ.
5. Για την υδροβιολογία, μπορεί να χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν τόσο στο θαλασσινό νερό, όσο και στο νερό των λιμνών, με τον προσδιορισμό του περιεχόμενου C-14, και τέλος

6. Για εφαρμογές με φωταύγεια, μπορεί να χρησιμοποιείται ως ένας υψηλής ευαισθησίας φωτοπολλαπλασιαστής, για πειράματα που βασίζονται στη μέτρηση του φθορισμού ουσιών (ΑΤΡ, μετρήσεις σε βακτηριακούς πληθυσμούς κλπ).

3.4 Συμπεράσματα

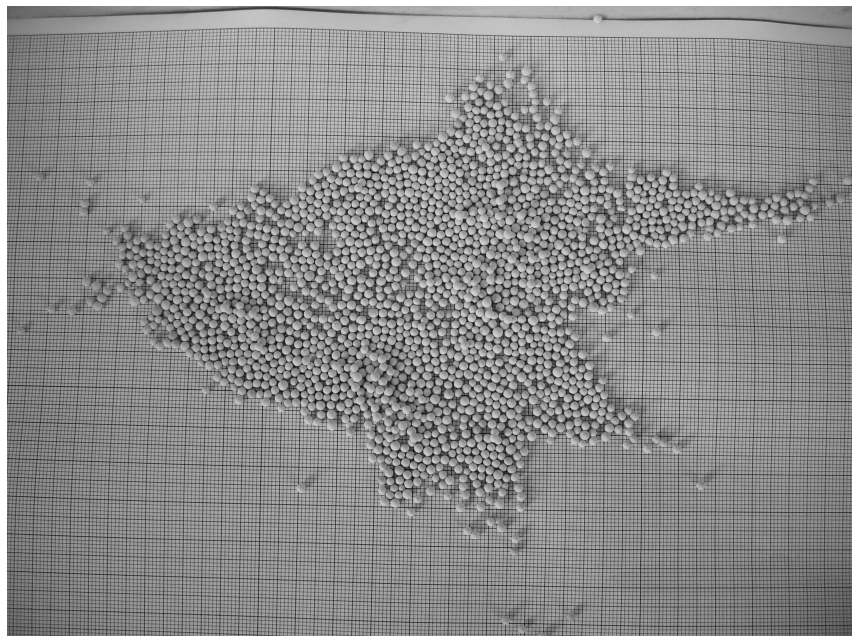
Ο εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, φαίνεται ότι επαρκεί με πληρότητα για την οργάνωση πειραμάτων βαθμονόμησης για προσροφητικά υλικά που εκτίθενται και προσροφούν Ραδόνιο και στη συνέχεια μετρώνται με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Από τη διαθέσιμη ποικιλία έγιναν οι κατάλληλες επιλογές εργαστηριακών συσκευών και υλικών, ώστε να γίνει δυνατό να πραγματοποιηθούν πειράματα βαθμονόμησης, τα οποία θα περιγραφούν με λεπτομέρειες σε επόμενο Κεφάλαιο. Στο ακόλουθο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες χρησιμοποιείται ο εξοπλισμός που αναφέρθηκε με στόχο την όσο το δυνατόν απλούστερη και με οικονομία χρόνου οργάνωση των πειραμάτων.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 3.1

Ο ενεργός άνθρακας πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί: εκτίμηση διαστάσεων και μορφής κόκκου



Διάγραμμα 3.2

Ο συνθετικός ζεόλιθος πάνω σε χιλιοστομετρικό χαρτί: εκτίμηση διαστάσεων και μορφής κόκκου



Διάγραμμα 3.3
Υάλινη συσκευασία συνθετικού ζεολίθου.



Διάγραμμα 3.4
Γυάλινα (αριστερά) και πλαστικά (δεξιά) φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "20 mL".



Διάγραμμα 3.5

Φωτογραφία διαφώτιστου πλαστικού φιαλιδίου υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "6 ή 8 mL" με πώμα push-on/twist-off.



Διάγραμμα 3.6

Φωτογραφία διαφανών φιαλιδίων υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "7 mL".



Διάγραμμα 3.7

Φωτογραφία πλαστικού φιαλιδίου υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "Eppendorf" με πώμα push-on/pull-off.



Διάγραμμα 3.8

Διαφώτιστα πλαστικά φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "20 mL" και τα πώματά τους από αμιλοπλαστικό και παρέμβυσμα στεγάνωσης με επιφάνεια αλουμινίου, όπως χρησιμοποιούνται στην Διπλωματική Εργασία.



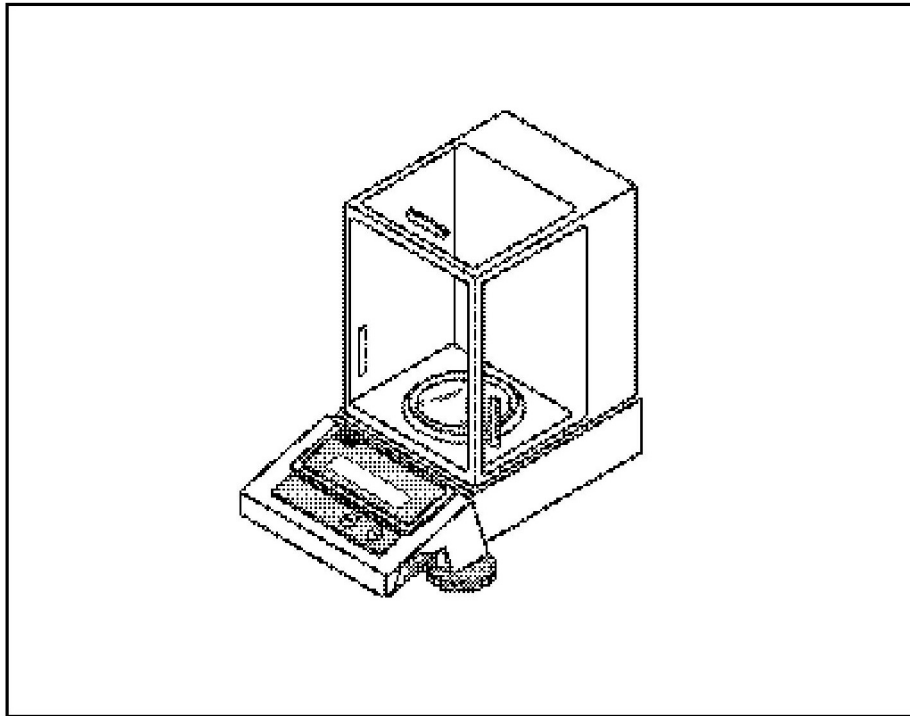
Διάγραμμα 3.9

Φωτοστεγανές φιάλες φύλαξης και μεταφοράς υγρών σπινθηριστών με όγκο 4L (μαύρες πλαστικές) και όγκο 1L (γυάλινη).



Διάγραμμα 3.10

Εργαστηριακός φούρνος Hellenic LABWARE KA 120P.



Διάγραμμα 3.11

Ζυγός ακριβείας τύπου AS60 εταιρείας κατασκευής OHAUS.



Διάγραμμα 3.12
Θάλαμος Ραδονίου "Α".



Διάγραμμα 3.13
Θάλαμος Ραδονίου "B".



CERTIFICATE

Certificate No.: 931 - OI - 049/98 Type: RF 200 Prod. No.: 524-01
Radionuclide: ^{226}Ra Half life: 5843000 days
Activity: 274,3 kBq Mass of ^{226}Ra : 7,499 μg Emanating power: 0,997 ± 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 ^{222}Rn 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 ITR 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
GREECE



Pavel Dryák
RNDr. Pavel Dryák, CSc.
director

Phone: 4202-67008497 Fax: 4202-67008456

Διάγραμμα 3.14

Πιστοποιητικό πηγής Ραδονίου "1".



CERTIFICATE OF CALIBRATION
RADIUM-226

ΑΝΤΙ - ΣΕΛ Ο.Ε.
ΑΦΟΙ Α. ΣΕΛΙΔΗ
ΑΝΔΡΙΜΑΔΡΟΥ - ΦΛΕΜΙΝΚ 2
54250 ΘΕΣΣΟΝΙΚΗ ΤΗΛ. 322.525 FAX 321.912
ΜΙΧΑΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ 116 - 115 27 ΑΘΗΝΑ
ΤΗΛ. 7795.980 - 7700.753

PYLON MODEL	<u>RN-2000A</u>	SERIAL NO.	<u>159</u>
ACTIVE MATERIAL	<u>Radium-226</u>	FORM	<u>dry powder</u>
HALF-LIFE	<u>1600±7 yr</u>	HOUSING	<u>aluminum</u>
DATE OF CALIBRATION	<u>February 3, 1993</u>		
<input type="checkbox"/> SOURCE ACTIVITY	_____ DPM±4%		
<input checked="" type="checkbox"/> SOURCE ACTIVITY	<u>102.8</u>	kBq±4%	
<input type="checkbox"/> ACTIVITY DEPOSITED	_____ DPM/cm ² ±4%		
<input type="checkbox"/> DISPENSED ACTIVITY	_____ Bq±4%		
METHOD OF CALIBRATION			
<input checked="" type="checkbox"/>	Source calibrated by Alpha Scintillation methods on a Model RM-1003 Radon Gas Monitor against NIST Standards. RM-1003 S/N <u>118-112</u>		
<input checked="" type="checkbox"/>	Source calibrated by Alpha Scintillation methods on a Model AB-5 Radon Gas Monitor against NIST Standards. AB-5 S/N <u>235</u>		
<input type="checkbox"/>	Source assayed by Gamma Spectrometry on a NaI(Tl) detector in conjunction with a Multi-Channel Analyzer against NIST Standards. MCA S/N _____		
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			
<u><i>[Signature]</i></u> Laboratory Supervisor		Date <u>September 15, 1993</u>	
<u><i>[Signature]</i></u> Quality Control Inspector		Date <u>September 15, 1993</u>	

B201203

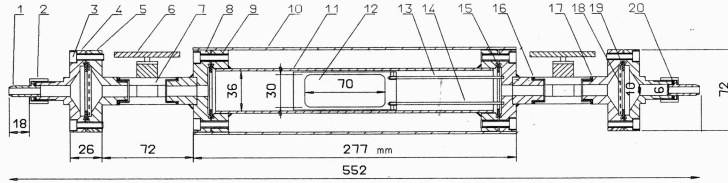
PYLON ELECTRONIC DEVELOPMENT company, ltd.

147 Colonnade Rd., Ottawa, Ontario Canada K2E 7L9

Διάγραμμα 3.15

Πιστοποιητικό πηγής Ραδονίου "2".

222Rn Flow Through Source - Model RF

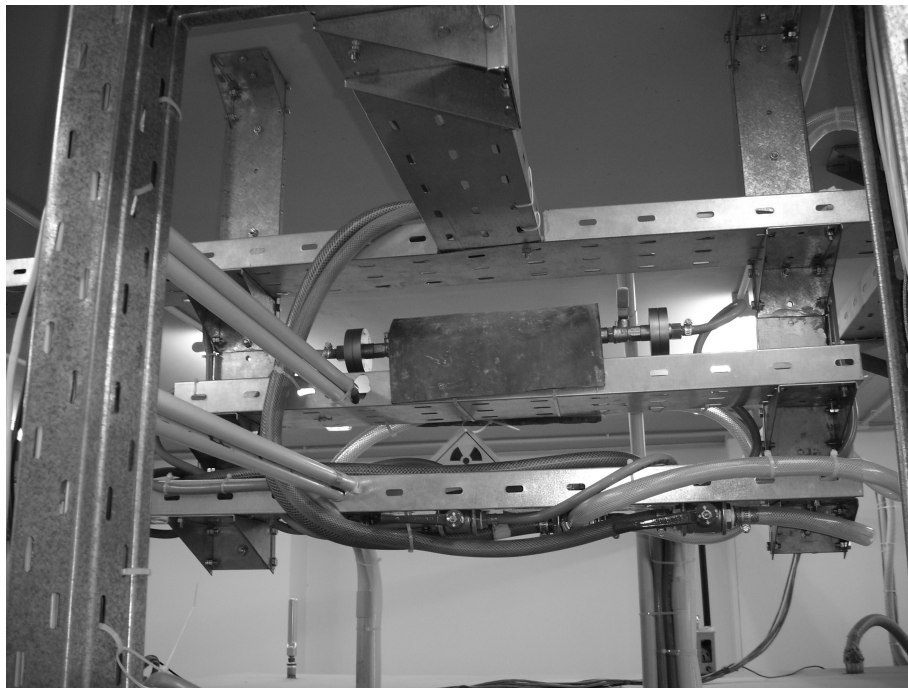


RF source, IIZ Praha 1998			
1	inlet/outlet tube	11	tube with emanator
2	nut	12	emanator
3	screw M6	13,14	emanator holders
4,5	filter head	15	aluminium seal ring
6	valve lever	16,17	teflon seal ring
7	brass ball valve	18	filter
8	outer flange	19	aluminium seal ring
9	inner flange	20	teflon seal ring
10	case		

Material: stainless steel, if not specified otherwise.

Διάγραμμα 3.16

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



Διάγραμμα 3.17

Πηγή "1" – Δοχείο "1": Φωτογραφία.



Διάγραμμα 3.18

Πηγή "2" – Δοχείο "2": Φωτογραφία .



Διάγραμμα 3.19

Ενεργητικός ανιχνευτής Ραδονίου τύπου AlphaGuard P2000 της εταιρείας κατασκευής SAPHYMO.



Διάγραμμα 3.20

Μικροσυσκευή ανάδευσης τύπου GV Lab της εταιρείας κατασκευής Gilson.



Διάγραμμα 3.21

**Συσκευή φυγοκέντρισης εταιρείας κατασκευής ALC International, τύπου 4218-D.
Πάνω: κάλυμμα κλειστό, Κάτω: κάλυμμα ανοιχτό.**



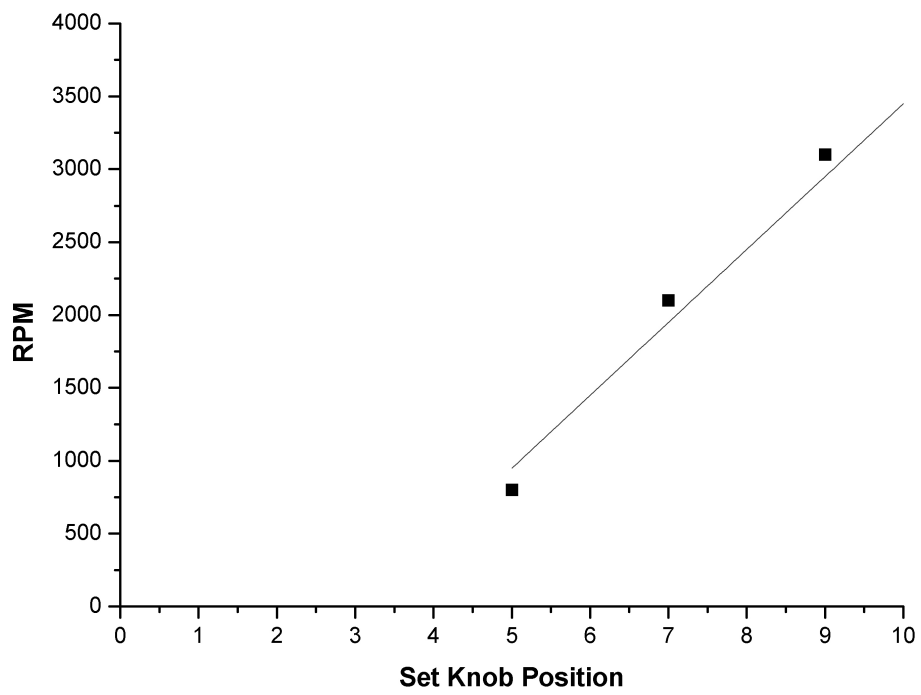
Διάγραμμα 3.22

Σετ δοχείων για οριζόντια φυγοκέντρωση: δύο ισοζυγισμένα δοχεία, κάθε δοχείο από αυτά έχει 4 θέσεις υποδοχής των 10 mL.



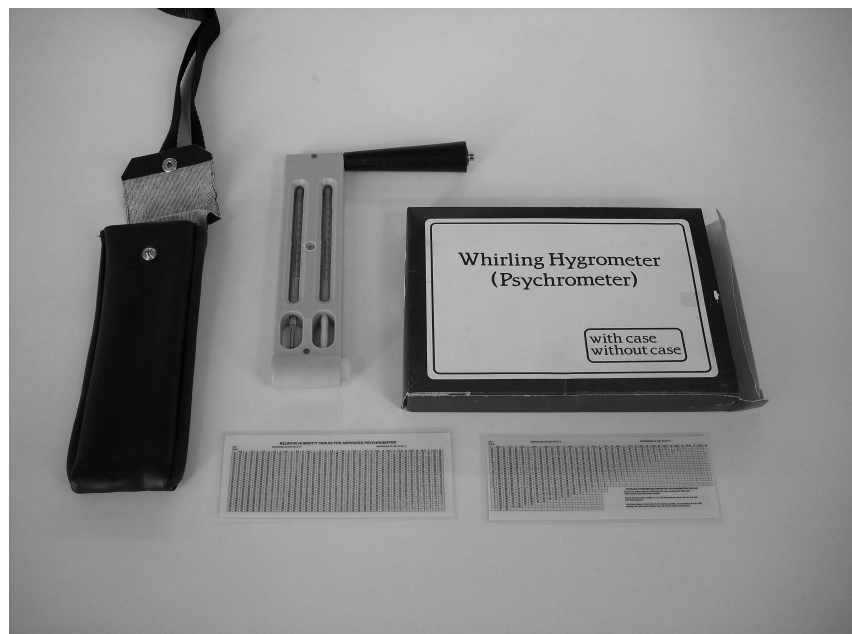
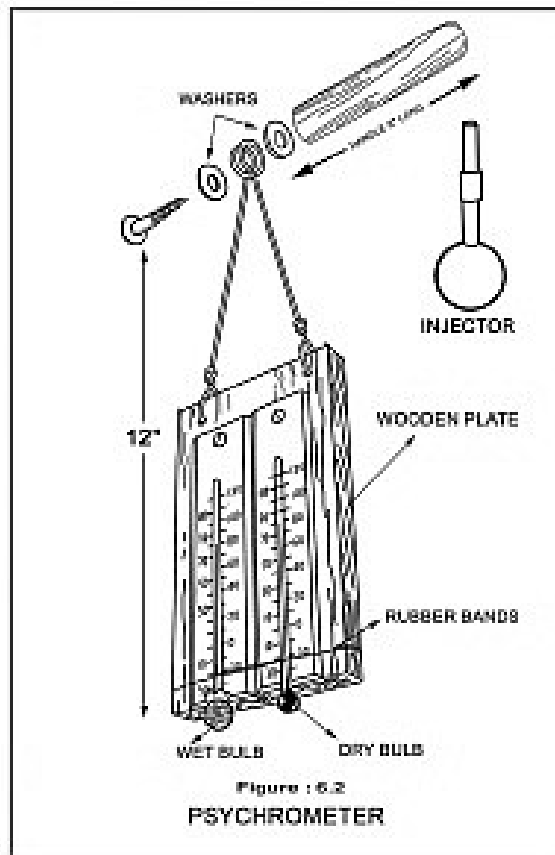
Διάγραμμα 3.23

Σετ δοχείων για οριζόντια φυγοκέντρωση: τέσσερα ισοζυγισμένα δοχεία, κάθε δοχείο από αυτά έχει 4 θέσεις υποδοχής των 80 mL.



Διάγραμμα 3.24

Καμπύλη ρύθμισης στροφών συσκευής φυγοκέντρισης (σχέση 3.1).



Διάγραμμα 3.25

Παραστατικό σκαρίφημα και φωτογραφία απλού ψυχομέτρου ξηρού – υγρού βολβού με υδραργυρικά θερμομέτρα.



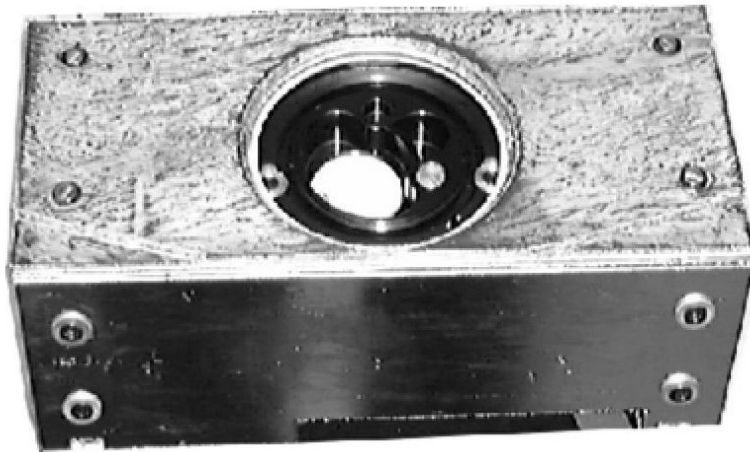
Διάγραμμα 3.26

Συσκευή υγρού σπινθηρισμού εταιρείας κατασκευής Hidex Oy Φινλανδίας τύπου Triathler MLT (425-004).

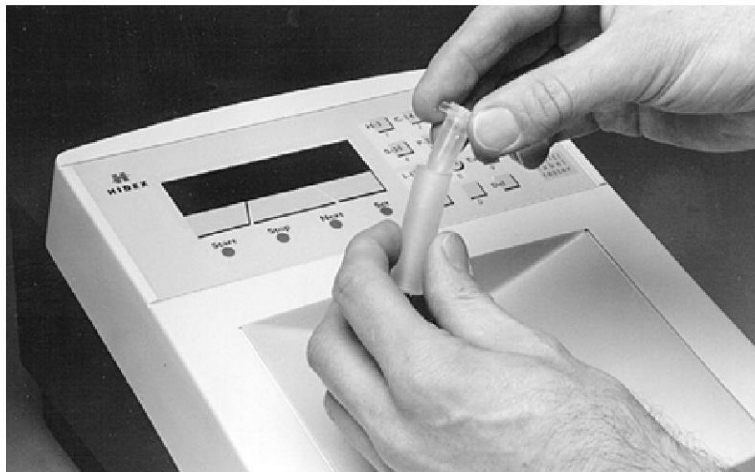


Διάγραμμα 3.27

Υποδοχείς του Triathler MLT για όλους σχεδόν τους τύπου φιαλιδίων υγρού σπινθηρισμού γεωμετρίας "20 mL", γεωμετρίας "6, 7 ή 8 mL" γυάλινα ή πλαστικά και γεωμετρίας "Eppendorf".



Διάγραμμα 3.28
Εσωτερική θωράκιση μολύβδου.



Διάγραμμα 3.29
Μικρό πλαστικό δοχείο γεωμετρίας ~7 mL, το οποίο είναι κατασκευασμένο από πλαστικό (οργανικό) σπινθηριστή κατάλληλο για τη μέτρηση διαλυμάτων με P-32.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες χρησιμοποιείται ο εξοπλισμός που αναφέρθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο με στόχο την όσο το δυνατόν απλούστερη και με οικονομία χρόνου οργάνωση των πειραμάτων. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι μέθοδοι: (α) η παραγωγή Ραδονίου από τις πηγές, (β) η μετάγγιση Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου, (γ) η επιλογή κατάλληλου συνδυασμού πηγής και θαλάμου, (δ) η ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου σε θάλαμο Ραδονίου, (ε) ο τρόπος προετοιμασίας δειγμάτων για έκθεση, (στ) ο τρόπος μέτρησης σχετικής υγρασίας στο θάλαμο "Α", (ζ) ο προτεινόμενος τρόπος ρύθμισης της σχετικής υγρασίας σε θάλαμο Ραδονίου, (η) ο τρόπος έκθεσης των δειγμάτων, (θ) ο τρόπος προετοιμασίας εκτεθέντων δειγμάτων για μέτρηση, και τέλος, (ι) ο τρόπος μέτρησης των εκτεθέντων δειγμάτων.

4.2 Μέθοδοι

4.2.1 Παραγωγή Ραδονίου από πηγές

Προκειμένου οι πηγές "1" και "2", που αναφέρθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο, να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βαθμονομημένων ποσοτήτων Ραδονίου, πρέπει να περάσουν πρώτα 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 περιγράφεται λεπτομερώς από τον Μαρινάκη (2007) κυρίως για την πηγή "1" (βλ. και τις εκεί §§ 5.2.3, 5.2.4 και 5.2.5). 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".

Έστω 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:

$$A(t) = A_0(1 - e^{-\lambda T}) \quad (4.1)$$

όπου

A είναι η ραδιενέργεια του παραγόμενου Ραδονίου σε Bq

A_0 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:

$$A_{max} = A_0$$

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.

Στην περίπτωση της πηγής "1" (βλ. και στο 3^ο Κεφάλαιο) επομένως, αμέσως μετά τον μηδενισμό αυτή βρίσκεται στην χρονική στιγμή "0". Από το χρονικό σημείο αυτό και μετά, αρχίζει να μετράει ο χρόνος T και στο δοχείο της πηγής να παράγεται Ραδόνιο, η ραδιενέργεια του οποίου είναι συνάρτηση του χρόνου T (min):

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

4.2.2 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 περιγράφεται λεπτομερώς στον Μαρινάκη (2007) (§5.2.6). Αν θεωρηθεί ότι με τη μέθοδο που ακολουθείται η μετάγχιση είναι πλήρης, τότε μέσα στο θάλαμο Ραδονίου θα δημιουργηθεί συγκέντρωση Ραδονίου Rn_0 (Bqm^{-3}) ίση με:

$$Rn_0 = A(T)/V \quad (4.2)$$

Κατά συνέπεια παρακολουθώντας τον χρόνο T , είναι δυνατόν να μεταγγιστεί πχ. από το δοχείο της πηγής "1" πχ. 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".

Αν θεωρηθεί ότι με τη μέθοδο που ακολουθείται η μετάγγιση είναι πλήρης, τότε μέσα στο θάλαμο Ραδονίου "Α" θα δημιουργηθεί συγκέντρωση Ραδονίου Rn_0 ($Bq\cdot m^{-3}$) ίση με:

$$Rn_0 = A(T)/1.9$$

όπου:

1.9 είναι ο όγκος του θαλάμου Ραδονίου σε m^3 .

Η συγκέντρωση Ραδονίου που δημιουργείται θεωρείται βαθμονομημένη καθώς προέρχεται από την πρότυπη και πιστοποιημένη πηγή Ραδονίου "1".

Έτσι 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' ($Bq\cdot m^{-3}$) μεταβάλλεται με την πάροδο χρόνου t με βάση τον απλό εκθετικό νόμο ραδιενεργού απομείωσης:

$$Rn' = Rn_0 e^{-\lambda t} \quad (4.3)$$

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

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} Rn_0 e^{-\lambda t} dt}{T_s} \quad (4.4)$$

4.2.3 Επιλογή πηγής και θαλάμου

Στην επιλογή του συνδυασμού πηγής και θαλάμου που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια πειραμάτων βαθμονόμησης παθητικών ανιχνευτών Ραδονίου από προσροφητικά υλικά 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, οδηγός για τέτοιες βαθμονομήσεις μπορεί να είναι οι Διπλωματικές Εργασίες του Μαρινάκη (2007) και του Πασχαλίδη (2008), από όπου συνάγεται ότι μία σχετικά κατάλληλη τάξη μεγέθους αυτής της συγκέντρωσης πρέπει να έχει την τάξη 10^0 kBq m^{-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 ισχυόντων 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 τη διαδικασία μηδενισμού
- (ii) Χρόνος για την παραγωγή Ραδονίου μέσα στο δοχείο της πηγής
- (iii) Χρόνος για την μετάγγιση του Ραδονίου από το δοχείο στον όποιο θάλαμο
- (iv) Χρόνος έκθεσης παθητικών ανιχνευτών με προσροφητικά υλικά
- (v) Χρόνος αλληλεπίδρασης με υγρό σπινθηριστή και αναμονής προκειμένου να δημιουργηθούν τα αναγκαία για τη μέτρηση θυγατρικά
- (vi) Χρόνος μέτρησης δειγμάτων

Σχετικά με τη συνιστώσα χρόνου (i) 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 (ii) 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. Έστω λοιπόν ότι είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί στον θάλαμο "Α" (όγκου $V = 1.9$ m 3), αρχική συγκέντρωση Ραδονίου $Rn_0 = 4$ kBq m^{-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 x 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 (iii), μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ίση με "0".

Για τη συνιστώσα χρόνου (iv) μπορεί να σημειωθεί ότι, παρακολουθώντας την οργάνωση των σχετικών πειραμάτων βαθμονόμησης του Μαρινάκη (2007) και του Πασχαλίδη (2008), η διάρκεια της έκθεσης προσροφητικών υλικών σε συγκεντρώσεις Ραδονίου διαρκεί από 24 έως και 72 h, σε βήματα περίπου 24h.

Για τη συνιστώσα χρόνου (v), όλοι δέχονται, υπακούοντας

(α) στους νόμους που υπαγορεύουν τη ραδιενεργό ισορροπία Ραδονίου – θυγατρικών, και

(β) στον χρόνο που απαιτείται ώστε το Ραδόνιο να φύγει (να εκπλυθεί, όπως αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο) από τους πόρους του προσροφητικού υλικού και να διαλυθεί στον υγρό σπινθηριστή

ότι απαιτούνται ανελαστικά, τουλάχιστον 3 h. Παρ'όλαυτά, στη βιβλιογραφία που παρουσιάστηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, δεν φαίνεται να υπάρχει συμφωνία στους ερευνητές σχετικά με το βέλτιστο χρόνο (v), δεδομένου ότι η πλήρης έκλυση του Ραδονίου από τους πόρους του προσροφητικού υλικού είναι δυνατόν να διαρκεί πολύ περισσότερο από 3 ώρες. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι:

- (i) στη παρούσα Διπλωματική Εργασία δεν υπήρχε χρόνος για τη διερεύνηση του βέλτιστου χρόνου (v)
- (ii) ένας μεγάλος χρόνος έκπλυσης βοηθά στον καλύτερο βαθμό απόδοσης της μέτρησης, και
- (iii) ένας μεγάλος χρόνος (v) μειώνει το βαθμό απόδοσης της μέτρησης λόγω διάσπασης του Ραδονίου που περιέχεται στο προσροφητικό υλικό

προτείνεται η μέτρηση να γίνεται μετά από χρόνο (v) τουλάχιστον 12h ή με χονδρικό κανόνα "την επόμενη μέρα" από τη λήξη της έκθεσης.

Τέλος για τη συνιστώσα χρόνου (vi), μπορούν να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές που εξετάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, ένας εύλογος χρόνος μέτρησης ενός δείγματος στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού είναι 1h. Αν τα δείγματα είναι περισσότερα τότε ο χρόνος (vi) πολλαπλασιάζεται ανάλογα και επαυξάνεται και κατά το χρόνο διαλειμμάτων του χειριστή.

Από την ανάλυση των πιο πάνω χρονικών συνιστωσών προκύπτει, ότι απαιτείται γενικά καλή διαχείριση χρόνου για την πραγματοποίηση πειραμάτων βαθμονόμησης παθητικών

ανιχνευτών με προσροφητικά υλικά και υγρό σπινθηριστή. Η επιτυχημένη διαχείριση του χρόνου αυτού στα πλαίσια του περιορισμένου χρονικού διαστήματος που διατίθεται για μια Διπλωματική 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 "I" + θάλαμος "A"

και αυτός επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, όπως εξάλλου έγινε και στις Διπλωματικές Εργασίες του Μαρινάκη (2007) και του Πασχαλίδη (2008).

4.2.4 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:

- (1) Είναι κατά κανόνα μεγάλου όγκου, έχουν δηλαδή τις διαστάσεις μικρού δωματίου.
- (2) Δεν είναι αεροστεγείς και παρουσιάζουν μεγάλες συναλλαγές ατμόσφαιρας με το περιβάλλον, οι οποίες μετρώνται με το μέγεθος "ρυθμός ανανέωσης του αέρα" (σε h^{-1}).
- (3) 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 πχ. στο Διάγραμμα 4.1 ότι για χρόνο $T_s = 76$ h, η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο εκείνον ήταν 30 pCiL^{-1} ($\sim 1100 \text{ Bqm}^{-3}$) ενώ διαπιστώνεται μία ομαλή κύμανση από 15 έως 50 pCiL^{-1} (δηλ. περίπου από 500 έως 1900 Bqm^{-3}). Επίσης στο ίδιο Διάγραμμα για χρόνο $T_s = 50$ h, η μέση συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο εκείνον ήταν 27 pCiL^{-1} ($\sim 1000 \text{ Bqm}^{-3}$) ενώ διαπιστώνεται μία ομαλή κύμανση από 15 έως 55 pCiL^{-1} (δηλ. περίπου από 500 έως 2000 Bqm^{-3}).

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

- (1) Έχουν σχετικά μικρό όγκο.
- (2) Είναι αεροστεγείς.
- (3) 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 μεταγίσεις 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 πχ. στο θάλαμο που λειτουργεί κατά το Διάγραμμα 4.1 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.

4.2.5 Προετοιμασία δειγμάτων για έκθεση

Όπως έχει αναφερθεί στο 3^ο Κεφάλαιο και αλλού, τρία είναι τα προσροφητικά υλικά που δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ως ανιχνευτές Ραδονίου με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού: (1) ενεργός άνθρακας εμπορίου, (2) συνθετικοί ζεόλιθοι ορισμένων τύπων εταιρείας κατασκευής Merck με δύο διαφορετικά μεγέθη πόρων, και (3) silica gel blue ορισμένου τύπου εταιρείας κατασκευής Merck. Ικανή μάζα από τα προσροφητικά αυτά υλικά στην περιοχή από 250 έως 500 g, τοποθετήθηκε στον φούρνο που παρουσιάσθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο (§ 3.3.1), επί 10 – 12 h στη θερμοκρασία των ~ 120° C, ώστε να απαλλαγούν από τυχόν προσροφηθείσα υγρασία, είτε από τυχόν προσροφηθέν Ραδόνιο, είτε αυτά προέρχονται από το περιβάλλον, είτε από προηγούμενη έκθεση σε Ραδόνιο. Στη συνέχεια τα προσροφητικά αυτά υλικά φυλάχθηκαν σε αεροστεγείς συσκευασίες. Κάθε φορά που χρειαζόταν να προετοιμασθεί δείγμα προς έκθεση 4g από το δοκιμαζόμενο προσροφητικό υλικό λαμβάνονταν από την αεροστεγή συσκευασία και τοποθετούνταν σε πλαστικό διαφώτιστο φιαλίδιο υγρού σπινθηρισμού, γεωμετρίας 20 mL (βλ. και § 3.2.2), το οποίο στη συνέχεια ασφαλιζόταν αεροστεγώς με το πώμα του μέχρι τη στιγμή έναρξης της έκθεσης. Η ζύγιση της μάζας των 4g πραγματοποιούνταν σε ζυγό ακριβείας (βλ. και § 3.3.2). Η επιλογή της μάζας των 4g έγινε με βάση την τεχνική των φιαλιδίων NITON (βλ. και § 2.3.5) χωρητικότητας επίσης 20 mL, στα οποία ο χώρος που καταλαμβάνει ο ενεργός άνθρακας είναι περίπου 7-8 cm³. Αν μετατραπεί αυτός ο όγκος σε μάζα ενεργού άνθρακα, χρησιμοποιώντας μία τυπική φαινόμενη πυκνότητα για το υλικό αυτό στην περιοχή των 0.6 gcm⁻³, τότε προκύπτει ότι η πλήρωση των φιαλιδίων υγρού σπινθηρισμού που χρησιμοποιούνται εδώ, θα πρέπει να γίνεται με ~4g ενεργού άνθρακα. Για λόγους ευκολότερης σύγκρισης, η ίδια μάζα πλήρωσης χρησιμοποιήθηκε και για τα άλλα -εκτός του ενεργού άνθρακα- δοκιμαζόμενα προσροφητικά υλικά. Στο

σημείο αυτό αναφέρεται, ότι πριν την αναγέννηση των προσροφητικών υλικών με θέρμανση, μερικές φορές είναι απαραίτητη η πλύση τους με ελαφρύ οργανικό διαλύτη όπως πχ. η μεθυλική αλκοόλη, ώστε να απομακρυνθεί από αυτά τυχόν σκόνη (βλ. και Prichard, 1983α). Η σκόνη αυτή, αν ανακατευθεί με υγρό σπινθηριστή σε επόμενο στάδιο της διαδικασίας, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξασθένηση του παραγόμενου φωτός από την αλληλεπίδραση των -α σωματιδίων του προσροφηθέντος Ραδονίου και των θυγατρικών του με τον υγρό σπινθηριστή. Η μέθοδος της πλύσης δεν χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

4.2.6 Μέτρηση σχετικής υγρασίας στο θάλαμο "Α"

Ο ρόλος της σχετικής υγρασίας στον αέρα του περιβάλλοντος σε σχέση με τη βαθμονόμηση προσροφητικών υλικών ως ανιχνευτών συγκεντρώσεων Ραδονίου επισημάνθηκε από πολλούς [βλ. πχ και George (1984), Gray (1987)] αλλά και από τον Πασχαλίδη (2008) και τον Paschalides (2010). Με τον όρο υγρασία στον αέρα του περιβάλλοντος στην καθημερινή γλώσσα εννοείται συνήθως η σχετική υγρασία (στα αγγλικά Relative Humidity ή RH). Ως σχετική υγρασία ορίζεται η ποσότητα νερού (στη μορφή υδρατμού), που υπάρχει σε έναν δεδομένο όγκο αέρα σε μία θερμοκρασία, σε σχέση με την μέγιστη ποσότητα νερού (κορεσμός), που θα μπορούσε να υπάρξει στον ίδιο όγκο στην ίδια θερμοκρασία χωρίς να υγροποιείται.

Επειδή η συνηθισμένη διαδικασία χρήσης της ψυχρομετρικής μεθόδου που προτιμάται να χρησιμοποιείται για την ακριβή μέτρηση της υγρασίας (Πασχαλίδης, 2008), προϋποθέτει προφανώς την παρουσία του ανθρώπου για τη λειτουργία του ψυχομέτρου στο προς μέτρηση περιβάλλον, κάτι το οποίο δεν μπορεί φυσικά να γίνεται σε κλειστό θάλαμο περιορισμένου όγκου, στον οποίο εκτίθενται σε συγκεντρώσεις Ραδονίου τα προσροφητικά υλικά. Επομένως για να επιτευχθεί η λειτουργία του ψυχομέτρου χωρίς τη μεσολάβηση ανθρώπου έπρεπε να γίνει τεχνική τροποποίηση ώστε αυτό να λειτουργεί αυτόματα.. Η βασική απαίτηση για την επιτυχημένη τροποποίηση ήταν η εξασφάλιση επαρκούς ρεύματος αέρα με αυτόματο τρόπο. Για το σκοπό αυτό αποφασίστηκε στη Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008) ότι για την ψύξη του υγρού βολβού του ψυχομέτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανός ανεμιστήρας. Για το σκοπό αυτό ένα διαθέσιμο ψυχόμετρο διαμορφώθηκε κατά τον τρόπο που δείχνει η φωτογραφία του Διαγράμματος 4.2, ως εξής: (1) αφαιρέθηκε η χειρολαβή για την περιστροφή του ψυχομέτρου, (2) ένας ανεμιστήρας τύπου 8 x 8 cm, 12V, από θήκη

(κουτί) Η/Υ τύπου PC συμβατού (βλ. και φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.3) προσαρμόστηκε σε κατάλληλο πλαστικό πλαίσιο, το οποίο απαλλοτριώθηκε από παλαιό PC, IBM. PIII, 133 MHz, (3) το πλαίσιο αυτό τοποθετήθηκε (με βίδες) στο άνω μέρος του πλαστικού καλύμματος ενός πλαστικού δοχείου πληρωμένου με νερό, (3) το ψυχρόμετρο τοποθετήθηκε πάνω από το πλαστικό δοχείο και δίπλα στο πλαίσιο με τον ανεμιστήρα, με τρόπο ώστε το παραγόμενο ρεύμα αέρα να στοχεύει στους βολβούς, (4) το άκρο του φυτίλιού του υγρού βολβού του ψυχομέτρου βυθίστηκε στο πλαστικό δοχείο με το νερό για να εξασφαλίζεται η συνεχής ύγρανσή του. Στο πλαστικό κάλυμμα του δοχείου ανοίχθηκε για το σκοπό αυτό μικρή οπή για να περνά το φυτίλι και να μην χύνεται το νερό, και τέλος (5) ο ανεμιστήρας συνδέθηκε με μικρό κατάλληλο τροφοδοτικό. Το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, όταν τοποθετείται σε ένα κλειστό θάλαμο, μπορεί να διαβάζεται οπτικά από υπάρχον διαφανές παράθυρο. Ο έλεγχος του ανεμιστήρα του σε αυτήν την περίπτωση γίνεται από εξωτερικό διακόπτη.

Για τη μέτρηση της υγρασίας στο θάλαμο έκθεσης (πρόκειται για τον θάλαμο "Α" – βλ. και Μαρινάκης, 2007) μπορεί χρησιμοποιείται εξοπλισμός ως εξής:

(α) για την "υψηλή" σχετική υγρασία: το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, και κατά δεύτερο λόγο ένα υγρόμετρο τριχός και ένα ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25 [τα δύο τελευταία τοποθετημένα στον θάλαμο, όπως δείχνουν οι φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.4 (α και β)].

(β) για τη "μεσαία" σχετική υγρασία: επίσης το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, και κατά δεύτερο λόγο το υγρόμετρο τριχός και το ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25.

(γ) για τη "χαμηλή" σχετική υγρασία: μόνο το υγρόμετρο τριχός και το ηλεκτρονικό υγρόμετρο OMEGA HHM25. Ο λόγος για αυτήν την επιλογή υπαγορεύεται από το γεγονός ότι, όπως διαπιστώθηκε πειραματικά (βλ. Πασχαλίδης, 2008), ο υδρατμός από το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο (που βγαίνει από την οπή του καλύμματος του πλαστικού δοχείου ή κατευθείαν από το φυτίλι) μπορεί να αλλοιώσει πολύ γρήγορα (λίγες ώρες) σε σημαντικό βαθμό από την άποψη της σχετικής υγρασίας, μία σχετικά ξηρή ατμόσφαιρα στο θάλαμο, ενδεικτικά δηλαδή να ανεβάσει τη σχετική υγρασία από 20 σε 40%.

4.2.7 Ρύθμιση της σχετικής υγρασίας στο θάλαμο "Α"

Μια μεταβολή στη σχετική υγρασία μπορεί να προκληθεί με ένα από τους δυο παρακάτω τρόπους:

(α) Αν υπάρχει μια ελεύθερη επιφάνεια νερού, η σχετική υγρασία μπορεί να αυξηθεί με την εξάτμιση. Αυτή η διεργασία είναι βαθμιαία και προϋποθέτει τη διάχυση των υδρατμών μέσα στην ατμόσφαιρα.

(β) Όταν αυξάνει η θερμοκρασία του αέρα, παράλληλα αυξάνει και η ικανότητα του να συγκρατεί περισσότερη υγρασία. Σε μια τέτοια περίπτωση εφόσον δεν προστίθενται καινούρια ποσά υδρατμών η σχετική υγρασία θα ελαττωθεί, αντίθετα με τη μείωση της θερμοκρασίας η σχετική υγρασία αυξάνεται γιατί μειώνεται η ικανότητα κατακράτησης υδρατμών από τον αέρα.

Για τα πειράματα έκθεσης μπορούν να επιλέγονται, όμοια όπως στην Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008), τρεις ονομαστικές σχετικές υγρασίες: (α) 20%, (β) 50% και (γ) 80%, οι οποίες αντιστοιχούν ενδεικτικά στις εξής περιοχές σχετικών υγρασιών: τη "χαμηλή" 10 – 30%, τη "μεσαία" 30 – 70%, και την "υψηλή" 70 – 100%. Με τη βοήθεια αυτών των τριών επιπέδων υγρασίας, μπορεί να διερευνηθεί για τη μέθοδο μέτρησης υγρού σπινθηρισμού, η επίδραση της σχετικής υγρασίας στην προσροφητικότητα Ραδονίου από τα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά, κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που παρουσιάζεται από τον Πασχαλίδη (2008). Ο λόγος για τον οποίο πρέπει να γίνει αυτή η διερεύνηση είναι ότι τα προσροφητικά υλικά, παρουσιάζουν κυρίως το μειονέκτημα ότι, αν η σχετική υγρασία του εσωτερικού χώρου έκθεσης είναι υψηλότερη από τη συνήθως επικρατούσα 40 – 50% για την ανθρώπινη άνεση, τότε οι όποιες προσροφητικές ικανότητες Ραδονίου μειώνονται με αποτέλεσμα να απαιτείται ειδική βαθμονόμηση.

Για τη ρύθμιση της υγρασίας στο θάλαμο έκθεσης "Α", χρησιμοποιούνται απλές τεχνικές που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους. Οι τεχνικές αυτές για να λειτουργήσουν προϋποθέτουν ότι, η θερμοκρασία του θαλάμου έκθεσης παραμένει περίπου σταθερή. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση που έχει ρυθμισθεί η σχετική υγρασία σε ένα επιθυμητό επίπεδο, τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας θα την μειώσει ενώ τυχόν πτώση θα την αυξήσει. Στην εδώ περίπτωση ο χρησιμοποιούμενος θάλαμος δεν είναι αδιαβατικός (έχει τοίχωμα από ανοξείδωτο χάλυβα), οπότε η θερμοκρασία του, χωρίς άλλη παρέμβαση,

μπορεί να διατηρείται "σταθερή" στην περιοχή θερμοκρασιών ανθρώπινης άνεσης 21 – 25° C, που επικρατεί στο περιβάλλον του Εργαστηρίου.

Ρύθμιση "υψηλής" υγρασίας

Έχοντας υπόψιν ότι η πυκνότητα του αέρα στις συνθήκες του περιβάλλοντος του Εργαστηρίου (25° C, 1 bar) είναι περίπου 1.2 kgm^{-3} και λαμβάνοντας υπόψιν το γράφημα του προσεγγιστικού Διαγράμματος 4.5, μπορεί κανείς να πει ότι ο κορεσμένος σε υγρασία αέρας περιέχει υδρατμό περίπου 15 gm^{-3} . Δεδομένου ότι ο χρησιμοποιούμενος θάλαμος "Α" έχει όγκο 2 m^3 απαιτούνται περίπου 30 g υδρατμού ώστε αυτός να φθάσει να έχει περιβάλλον με 100% σχετική υγρασία. Για να επιτευχθεί η πλήρωση του θαλάμου με αυτή την ποσότητα υδρατμών και έτσι να εξασφαλισθεί στο περιβάλλον του θαλάμου η "υψηλή" σχετική υγρασία στην περιοχή 70 – 100%, προσφέρεται η μέθοδος της εξάτμισης. Χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό δοχείο από αλουμίνιο μικρού ύψους και μεγάλης επιφάνειας (ταψί), διαστάσεων M60 x Π40 x Υ4 cm, το οποίο αφού γεμίσει με 1 L νερό τοποθετείται στο πάτωμα του θαλάμου "Α". Το νερό λόγω εξάτμισης αναμένεται να διαχέεται στο εσωτερικό του θαλάμου και να αυξάνει την σχετική υγρασία μέχρι και 100% σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η επαλήθευση της καλής λειτουργίας αυτής της ρύθμισης "υψηλής" υγρασίας έγινε πειραματικά στην Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008). Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επαλήθευσης με το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο σημειώνεται ότι αρκούν μόλις δύο ώρες εξάτμισης μέσα στο θάλαμο "Α" –υπενθυμίζεται ότι είναι όγκου 2 m^3 - προκειμένου να επιτευχθεί υγρασία $> 85\%$. Μάλιστα διαπιστώθηκε ότι αυτή η υψηλή σχετική υγρασία διατηρείται χωρίς ανάδευση της ατμόσφαιρας μέσω του ανεμιστήρα του θαλάμου, τόσο μετά από μία ώρα, όσο και μετά από περίπου 20 ώρες, βεβαιώνοντας ότι ο τρόπος που επιλέχθηκε για τη ρύθμιση του περιβάλλοντος του θαλάμου σε "υψηλή" υγρασία είναι συνεπής και αποδοτικός.

Ρύθμιση "μεσαίας" υγρασίας

Για την επίτευξη "μεσαίας" υγρασίας στην περιοχή σχετικών υγρασιών από 30 – 70%, αποφασίσθηκε ότι δεν απαιτείται ειδική ρύθμιση διότι μετά από σειρά μετρήσεων με το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο διαπιστώθηκε πως η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος του Εργαστηρίου βρίσκεται στην περιοχή που ενδιαφέρει (μεταξύ 40 – 60 %). Επομένως

κάθε φορά που κλείνει ο θάλαμος έκθεσης περικλείει αέρα της ατμόσφαιρας του Εργαστηρίου, οπότε προκύπτει και η επιθυμητή ρύθμιση.

Ρύθμιση "χαμηλής" υγρασίας

Η επίτευξη "χαμηλής" υγρασίας στην περιοχή σχετικών υγρασιών από 10 – 30% παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία από τις προηγούμενες δύο ρυθμίσεις. Ο προφανής και ευκολότερος τρόπος ρύθμισης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας του θαλάμου, μέθοδος που όμως απορρίφθηκε διότι αλλοιώνει τη σταθερή περιοχή θερμοκρασιών (21 – 25^o C), στην οποία πρέπει να οργανωθούν τα πειράματα.

Άλλος σχετικά εύκολος τρόπος ρύθμισης είναι η αφύγρανση του αέρα του θαλάμου μέσω συμπύκνωσης με ψύξη. Η μέθοδος αυτή δεν επιλέχθηκε για οικονομοτεχνικούς λόγους. Συγκεκριμένα, για την μέθοδο αυτή έπρεπε να γίνει προμήθεια και τοποθέτηση μικρού ψυγείου (ίσως ένα ψυγείο καλοριφέρ αυτοκινήτου να ήταν κατάλληλο), υδατοπαγίδα, σωληνώσεων, βαλβίδων, δοχείων συλλογής συμπυκνώματος και δοχείων συλλογής ψυκτικών μέσων κ.ο.κ.

Μετά την απόρριψη από τον Πασχαλίδη (2008) των προηγούμενων μεθόδων χρησιμοποιείται έκτοτε κατάλληλη διάταξη δοχείου με υλικό που να προσροφά υγρασία τοποθετημένη εξωτερικά του θαλάμου έκθεσης, μέσα από την οποία να μπορεί να κυκλοφορεί ο αέρας του θαλάμου σε κλειστό κύκλωμα. Ως δοχείο για το αφυγραντικό υλικό χρησιμοποιείται χύτρα ταχύτητας εταιρείας κατασκευής SEB Γαλλίας, τυπικής χωρητικότητας 6L, η οποία διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.6. Στη χύτρα αυτή έχει γίνει τροποποίηση και έχουν τοποθετηθεί στο σώμα, κοντά στο χείλος της χύτρας και αντιδιαμετρικά βαλβίδες, οι οποίες επιτρέπουν την είσοδο και έξοδο του αέρα (βλ. και φωτογραφίες στο Διάγραμμα 4.7). Η μία από τις δύο βαλβίδες, αυτή που αποτελεί την είσοδο (αναγράφεται ΕΙΣΟΔΟΣ στο σώμα), συνδέεται με το εσωτερικό της χύτρας με διάτρητο σωληνάκι, το οποίο διατρέχει όλον το πυθμένα της χύτρας στην περιφέρεια του κύκλου που ορίζεται από αυτόν (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.8).

Η χύτρα πληρώνεται με τα εξής προσροφητικά υλικά, των οποίων ο συνολικός όγκος φθάνει τον ονομαστικό όγκο της (βλ. και φωτογραφίες Διαγράμματος 4.9):

-1 kg ζεόλιθο, σαν αυτόν του οποίου δοκιμάζεται η προσροφητικότητα Ραδονίου

-1 kg silica gel blue, σαν αυτό του οποίου δοκιμάζεται η προσροφητικότητα Ραδονίου. Το silica gel blue αυτό, υπήρχε στο Εργαστήριο από παλαιότερα πειράματα προσδιορισμού του συντελεστή προσρόφησης Ραδονίου, και

-2 kg ενεργού άνθρακα, σαν αυτόν του οποίου δοκιμάζεται η προσροφητικότητα Ραδονίου

Όλα αυτά τα προσροφητικά υλικά τοποθετούνται στην χύτρα (βλ. και φωτογραφία στο Διάγραμμα 4.10) αφού έχουν πρώτα αφυγρανθεί με θέρμανση κατά το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007).

Η χύτρα τοποθετείται κλειστή εξωτερικά του θαλάμου έκθεσης, με τρόπο ώστε, όπως σημειώθηκε πιο πάνω, μέσα από την οποία να μπορεί να κυκλοφορεί ο αέρας του θαλάμου σε κλειστό κύκλωμα, με την βοήθεια αντλίας κυκλοφορίας (βλ. και την πορεία του αέρα του θαλάμου μέσα από τα βέλη που παρουσιάζονται στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.11). Η αντλία κυκλοφορίας που χρησιμοποιείται βρίσκεται μέσα στο θάλαμο και διακρίνεται στη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.12. Η αντλία ελέγχεται από τον εξωτερικό διακόπτη H18 (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.13). Η επαλήθευση της καλής λειτουργίας του συστήματος ρύθμισης χαμηλής υγρασίας έγινε πειραματικά στη Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008). Προϋπόθεση για την επιτυχία της ρύθμισης είναι να μην βρίσκεται στον θάλαμο το μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, διότι αποτελεί από την κατασκευή του πηγή σχετικής υγρασίας. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά (ενδείξεις υγρομέτρου OMEGA) διαπιστώθηκε ότι μετά από 3 ωρο πείραμα η μέθοδος αποδίδει σαφώς περισσότερο. Μάλιστα, μετά την πάροδο 20 περίπου ωρών χωρίς άλλη παρέμβαση στον αέρα του θαλάμου, πέρα από την ανάδευση με τον εσωτερικό ανεμιστήρα διαπιστώνεται ότι η σχετική υγρασία του θαλάμου διατηρείται πολύ κοντά στην τελική τιμή του ~20% που επιτυγχάνεται στο τέλος ενός 3ώρου αφύγρανσης, βεβαιώνοντας ότι ο τρόπος που επιλέχθηκε για τη ρύθμιση του περιβάλλοντος του θαλάμου σε "χαμηλή" υγρασία είναι συνεπής και αποδοτικός, αρκεί να μην δίνεται ευκαιρία σε υδρατμούς να εισέρχονται στο θάλαμο με οποιοδήποτε τρόπο και να αλλοιώνουν την ατμόσφαιρά του από την άποψη της σχετικής υγρασίας.

4.2.8 Έκθεση δειγμάτων

Ακριβώς πριν από την έκθεση, αφαιρείται το πώμα από τα φιαλίδια των δειγμάτων που έχουν προετοιμασθεί για έκθεση. Αμέσως έπειτα, τα φιαλίδια τοποθετούνται για έκθεση στο γεωμετρικό κέντρο του θαλάμου Ραδονίου (βλ. και τη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.14), και ο θάλαμος κλείνει αεροστεγώς. Ακολουθεί η ρύθμιση της υγρασίας του θαλάμου, αν χρειάζεται αυτή να γίνει πριν τη μετάγγιση βαθμονομημένης ποσότητας Ραδονίου σε αυτόν, δηλ. στην περίπτωση "χαμηλής" υγρασίας. Μετά τη ρύθμιση "χαμηλής" υγρασίας μεταγγίζεται βαθμονομημένη ποσότητα Ραδονίου στον κλειστό θάλαμο, με τον τρόπο που περιγράφει ο Μαρινάκης (2007). Τα φιαλίδια εκτίθενται στο Ραδόνιο επί 24, 48 ή 72 h κατά την τυποποίηση που ακολουθήθηκε και στα πειράματα του Πασχαλίδη (2008). Κατά το διάστημα της έκθεσης η βαθμονομημένη συγκέντρωση του Ραδονίου στο θάλαμο, απομειώνεται κατά το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων με χρόνο ημιζωής 3.8 ημέρες. Μετά τη συμπλήρωση του προγραμματισμένου χρόνου έκθεσης, ο θάλαμος ανοίγει και τα φιαλίδια σφραγίζονται άμεσα με το πώμα τους, ώστε να μην αποβληθεί με διάχυση το προσροφηθέν Ραδόνιο από τον ενεργό άνθρακα, τον ζεόλιθο ή το silica gel.

4.2.9 Προετοιμασία δειγμάτων για μέτρηση

Τα φιαλίδια αμέσως μετά τη σφράγιση, ανοίγουν πάλι σε άλλο εργαστηριακό χώρο και πληρώνονται μέχρι το απολύτως ανώτερο ύψος στη γραμμή που φαίνεται στο Διάγραμμα 4.15, με κατάλληλο υγρό σπινθηριστή, ο τρόπος επιλογής του οποίου θα αναλυθεί στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο. Στη συνέχεια τα φιαλίδια σφραγίζονται και πάλι και ανακινούνται δυνατά είτε χειροκίνητα είτε αναδεύονται για αρκετά δευτερόλεπτα με τη βοήθεια της συσκευής ανάδευσης GVLab (βλ. και § 3.3.6). Μετά την ανακίνηση / ανάδευση, στα φιαλίδια δημιουργείται μείγμα προσροφητικού υλικού που καθιζάνει στο κάτω μέρος και υγρού σπινθηριστή που το περιβάλλει. Τα φιαλίδια στη συνέχεια τοποθετούνται σε σκοτεινό χώρο (πχ. σε ερμάριο), προς αναμονή για μέτρηση. Ο χώρος αναμονής πρέπει να είναι σκοτεινός, ώστε ο υγρός σπινθηριστής να μην συσσωρεύει ενέργεια από το φως του περιβάλλοντος, την οποία τη στιγμή της μέτρησης -όταν έρθει να αποδίδει ως φως, που φυσικά θα είναι θόρυβος και δεν θα οφείλεται στη ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδονίου και των θυγατρικών του. Ο χρόνος αναμονής επιλέγεται με τον κανόνα της παραγράφου 4.2.3 ως τουλάχιστον 12 ώρες ή "μέχρι την επόμενη μέρα" από την έκθεση. Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος αυτού γίνονται οι εξής

διεργασίες: (α) το προσροφηθέν Ραδόνιο διαχέεται από τους πόρους του προσροφητή προς τον περιβάλλοντα υγρό σπινθηριστή (έκπλυση), (β) το Ραδόνιο που καταλήγει διαλυμένο στον υγρό σπινθηριστή έρχεται σε ραδιενεργό ισορροπία με τα δημιουργούμενα θυγατρικά, (γ) τυχόν εξώθερμες χημικές αντιδράσεις του προσροφητή με τον υγρό σπινθηριστή αποσβένονται με αποτέλεσμα να παύει η συσσώρευση ενέργειας στον υγρό σπινθηριστή από αυτή την αιτία, η οποία τη στιγμή της μέτρησης -όταν έρθει- αποδίδεται ως φως που φυσικά θα είναι θόρυβος και δεν θα οφείλεται στη ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδονίου και των θυγατρικών του, και τέλος (δ) κατακάθεται η σκόνη που προκύπτει στο μείγμα ως αποτέλεσμα της ανακίνησης ή της ανάδευσης του υγρού σπινθηριστή με τον προσροφητή.

Ο υγρός σπινθηριστής που προστίθεται στα φιαλίδια γενικά θολώνει από σκόνη που προέρχεται από τον προσροφητή. Η σκόνη αυτή μπορεί να εξασθενήσει το φως που παράγεται από την αλληλεπίδραση των -α σωματιδίων από τη διάσπαση του προσροφηθέντος Ραδονίου και των θυγατρικών του με τον υγρό σπινθηριστή, πράγμα που είναι πολύ ανεπιθύμητο. Ο Canoba (1999), προτείνει για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, την φυγοκέντριση των φιαλιδίων επί 5 min στις 2000 στροφές ανά λεπτό, ώστε η σκόνη να μετακινηθεί υποχρεωτικά στον πυθμένα των φιαλιδίων. Η φυγοκέντριση των φιαλιδίων στη συσκευή φυγοκέντρισης του ΕΠΤ-ΕΜΠ (βλ. και § 3.3.7), δεν ήταν καταρχήν δυνατή διότι δεν διατίθενται υποδοχείς για τη συγκράτηση και φυγοκέντριση δειγμάτων σε φιαλίδια αυτής της γεωμετρίας (βλ. τους διαθέσιμους υποδοχείς στις φωτογραφίες των Διαγραμμάτων 3.22 και 3.23). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν στον τόρνο του Εργαστηρίου (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.16), δύο νέοι κατάλληλοι υποδοχείς από κύλινδρο plexiglass (βλ. και φωτογραφία του Διαγράμματος 4.17 και μηχανολογικό σχέδιο του Διαγράμματος 4.18). Η γεωμετρία των υποδοχέων αυτών επιλέχθηκε ώστε να χωρούν στους ήδη διαθέσιμους υποδοχείς των 80 mL (βλ. Διάγραμμα 3.22). Προσοχή δόθηκε ώστε όχι μόνο οι νέοι υποδοχείς να είναι όμοιοι σε διαστάσεις αλλά και ίσοι σε βάρος (± 0.2 g) ώστε η συσκευή φυγοκέντρισης να περιστρέφεται ζυγοσταθμισμένα και ο αισθητήρας ζυγοστάθμισης, να μην ενεργοποιεί προειδοποιητικό ήχο και το αυτόματο σταμάτημα της φυγοκέντρισης. Εννοείται ότι για το σκοπό αυτό και τα φιαλίδια που τοποθετούνται στους υποδοχείς θα πρέπει να είναι επίσης του ίδιου βάρους.

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με τα προσροφητικά υλικά και τους υγρούς σπινθηριστές στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα της σκόνης είναι έντονο για τον ενεργό άνθρακα και πολύ μικρότερο για το ζεόλιθο και το silica gel. Επίσης διαπιστώθηκε ότι κατά το χρόνο αναμονής το πρόβλημα υποχωρεί σημαντικά. Δοκιμαστικές φυγοκεντρίσεις που πραγματοποιήθηκαν σε φιαλίδια με υγρό σπινθηριστή και ενεργό άνθρακα έδειξαν ότι η υποχώρηση της σκόνης στον πυθμένα, με φυγοκέντριση ή αναμονή είναι περίπου παρόμοια. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, αποφασίστηκε ότι δεν είναι γενικά αναγκαία η φυγοκέντριση των μιγμάτων, στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο θα ήταν δυνατό να περιορισθεί η σκόνη που αναφέρθηκε, είναι: οι προσροφητές να τοποθετηθούν εξαρχής σε μικρό φάκελλο από λεπτό πορώδες συνθετικό υλικό σαν εκείνο που χρησιμοποιείται σήμερα (2012) για το τσάι (βλ. πχ και τη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.19). Το υλικό αυτό λέγεται Polylactide (ή PLA). Ο φάκελλος με το προσροφητικό υλικό να τοποθετηθεί στη συνέχεια μέσα στο φιαλίδιο. Κατά την έκθεση ο φάκελλος αυτός δεν εμποδίζει την προσρόφηση του Ραδονίου στο προσροφητικό υλικό. Μετά την έκθεση, όταν προστίθενται υγρός σπινθηριστής, ο φάκελος επιτρέπει στον υγρό σπινθηριστή να διαβρέχει πλήρως το προσροφητικό υλικό, αλλά δεν επιτρέπει στη σκόνη από το προσροφητικό υλικό να διαλύεται στον υγρό σπινθηριστή, εξαλείφοντας το πρόβλημα της θολότητας και διατηρώντας τον υγρό σπινθηριστή ικανοποιητικά διαυγή. Ο εναλλακτικός αυτός τρόπος χειρισμού του προβλήματος της σκόνης δεν δοκιμάστηκε στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας.

4.2.10 Ρύθμιση συσκευής υγρού σπινθηρισμού και επιλογή πρωτοκόλλου μέτρησης

Για την μέτρηση η συσκευή έχει προρυθμισθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων για αυτή τη Διπλωματική Εργασία. Η προρύθμιση της συσκευής γίνεται με ευκολία χρησιμοποιώντας τις οδηγίες του εγχειριδίου (βλ. και Hidex DOC 410-001) και με τη βοήθεια ενός "μενού" επιλογών, του "αριθμητικού" πληκτρολογίου και μίας σειράς από πλήκτρα που βρίσκονται στο κάτω μέρος της ενσωματωμένης οθόνης στην άνω όψη της συσκευής (βλ. και τη φωτογραφία του Διαγράμματος 4.20). Αν όλες οι ρυθμίσεις της συσκευής είναι οι εργοστασιακές, δύο είναι μόνο οι προρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν για τις απαιτήσεις των μετρήσεων:

(α) ο χρόνος μέτρησης των φιαλιδίων να προρρυθμισθεί στα 60 min, όπως προτείνεται για ανάλογες δοκιμές με προσροφητικά υλικά στον Canoba (1999). Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο για τη συσκευή Triathler Hidex DOC 410-001 (πχ σελ. 19 δεξιά για την έκδοση 1.7), ο χρόνος μέτρησης, ορίζεται ως ο χρόνος κατά τον οποίο ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας προωθεί ψηφιακά σήματα προς τον πολυκαναλικό αναλυτή. Αυτός ο χρόνος ονομάζεται LIVE time. Ο χρόνος LIVE time, ως γνωστό είναι κατά τι μικρότερος από τον πραγματικό χρόνο TRUE time, κατά το χρόνο που ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας είναι απασχολημένος με μετατροπές ενώ υπάρχουν ταυτόχρονα και αναλογικά σήματα τα οποία πρέπει και αυτά να μετατραπούν ψηφιακά. Ο χρόνος αυτός αδράνειας του μετατροπέα ονομάζεται και νεκρός χρόνος ή DEAD time. Ισχύει:

$$TRUE\ time = LIVE\ time + DEAD\ time$$

Ο χρόνος DEAD time για τα φαινόμενα που μετρώνται με τη συσκευή υγρού σπινθηρισμού δεν ξεπερνά, όπως διαπιστώθηκε από τον Ευσταθόπουλο (2004), συνήθως το 5% του LIVE time.

(β) ο πολυκαναλικός αναλυτής να ρυθμισθεί στην λογαριθμική αντί για τη γραμμική κλίμακα. Η προρρύθμιση αυτή αποφασίστηκε ως αναγκαία μετά από δοκιμές, διότι επιτρέπει την ευκολότερη αναγνώριση του φάσματος των παλμών από -α σωματίδια που παράγονται από την αλληλεπίδραση του Ραδονίου και των θυγατρικών του με τον υγρό σπινθηριστή. Για παράδειγμα μπορεί κανείς να συγκρίνει το φάσμα από το ίδιο φιαλίδιο σε ρύθμιση γραμμικού πολυκαναλικού αναλυτή και σε ρύθμιση λογαριθμικού πολυκαναλικού αναλυτή στο Διάγραμμα 4.21. Το πως λειτουργεί η ρύθμιση γραμμικού πολυκαναλικού αναλυτή και η ρύθμιση λογαριθμικού πολυκαναλικού αναλυτή αναφέρεται στον L'Annunziata (1998) (βλ. σελ. 220). Η προρρύθμιση λογαριθμικού πολυκαναλικού αναλυτή εξυπηρετεί διότι ο πολυκαναλικός αναλυτής της συσκευής έχει μικρό εύρος καναλιών (1024). Η προρρύθμιση αυτή δεν θα ήταν αναγκαία αν ο πολυκαναλικός αναλυτής της συσκευής ήταν μεγαλύτερου εύρους καναλιών (έστω 4096) και η ενίσχυση του σήματος (= η τάση στον φωτοπολλαπλασιαστή) ήταν κατάλληλη. Παρόμοιο αποτέλεσμα με την προρρύθμιση αυτή ακόμα και στον γραμμικό πολυκαναλικό αναλυτή 1024 καναλιών, του αναλυτή Triathler θα μπορούσε να επιτευχθεί αν μετέβαλλε κάποιος την ενίσχυση του σήματος (= την τάση στον φωτοπολλαπλασιαστή) σε καταλληλότερη τιμή. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται από το

"μενού" επιλογών του οργάνου αλλά δεν χρησιμοποιήθηκε. Τη ρύθμιση λογαριθμικού πολυκαναλικού αναλυτή, φαίνεται ότι χρησιμοποιούν για ανάλογες δοκιμές με προσροφητικά υλικά οι Homma (1987) και Murase (1989). Εννοείται ότι ενώ ο άξονας τετμημένων του γραμμικού πολυκαναλικού αναλυτή είναι κανάλια, δεν ισχύει το ίδιο για τον άξονα τετμημένων του λογαριθμικού πολυκαναλικού αναλυτή. Ο όρος "κανάλι" για τον λογαριθμικό πολυκαναλικό αναλυτή θα χρησιμοποιείται στο παρόν κείμενο καταχρηστικά εντός εισαγωγικών (βλ. και Διάγραμμα 4.21).

Η συσκευή διαθέτει εργοστασιακά προρρυθμισμένα πρωτόκολλα για τη μέτρηση τόσο σωματιδιακής ακτινοβολίας (-α ή/και -β), όσο και φωτονιακής ακτινοβολίας χαμηλής ενέργειας. Κάθε πρωτόκολλο είναι έτσι ρυθμισμένο ώστε να παρέχει στην ενσωματωμένη οθόνη της συσκευής το άθροισμα των παλμών που έχουν καταγραφεί σε συγκεκριμένο εύρος καναλιών του πολυκαναλικού αναλυτή. Έτσι, διατίθενται προρρυθμισμένα πρωτόκολλα μετρήσεων για τα ισότοπα που διασπώνται εκπέμποντας -β ακτινοβολία H-3, C-14, P-32, S-35, P-33, για το Rn-222 που διασπάται εκπέμποντας -α ακτινοβολία, και για τα ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια I-125, Cr-51, I-129, Co-57, Co-58, I-131 και Cs-137. Για τις απαιτήσεις των μετρήσεων πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα από τα πρωτόκολλα για τη μέτρηση σωματιδιακής ακτινοβολίας. Τα κατάλληλα για το σκοπό αυτό πρωτόκολλα μπορεί να είναι των ισοτόπων H-3, C-14, P-32 και Rn-222. Από αυτά αποκλείστηκε το πρωτόκολλο του Rn-222, διότι η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του απαιτεί λεπτομερείς προρρυθμίσεις της συσκευής ανάλογα με τον υγρό σπινθηριστή που χρησιμοποιείται. Οποιοδήποτε από τα άλλα πρωτόκολλα των ισοτόπων H-3, C-14 και P-32 μπορούν να χρησιμοποιηθούν, διότι είναι ρυθμισμένα στην ίδια ενίσχυση του σήματος (τάση στον φωτοπολλαπλασιαστή = 1115 V) και για το ίδιο δείγμα παρέχουν το ίδιο φάσμα στον πολυκαναλικό αναλυτή. Η μόνη διαφορά των πρωτοκόλλων αυτών μεταξύ τους είναι ότι δίνουν διαφορετικές ενδείξεις στην ενσωματωμένη οθόνη της συσκευής διότι κάθε ένα από τα πρωτόκολλα αυτά αθροίζει στην οθόνη τους παλμούς από διαφορετικά εύρη καναλιών. Για τους σκοπούς των μετρήσεων της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας δεν ενδιαφέρουν οι ενδείξεις της ενσωματωμένης οθόνης αλλά η καταγραφή του φάσματος στο τέλος του προρρυθμισμένου χρόνου των 60 min.

4.2.11 Μέτρηση φιαλιδίων στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού

Για να ξεκινήσει η διαδικασία των μετρήσεων, πρέπει φυσικά να τεθεί η συσκευή σε λειτουργία, πατώντας τον ειδικό διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος της. Αυτό για λόγους προθέρμανσης του φωτοπολλαπλασιαστή πρέπει να γίνεται περίπου 1 ώρα πριν την έναρξη των μετρήσεων. Αν ο χρήστης σκοπεύει να ξεκινήσει μία νέα ανεξάρτητη ενότητα μετρήσεων καλό είναι να προβεί στις εξής επιπλέον ενέργειες:

- (i) να διαγράψει από τη μνήμη της συσκευής προηγούμενες αποθηκευμένες μετρήσεις (σύμφωνα με τον τρόπο που αναφέρεται στο εγχειρίδιο Hidex DOC 410-001 , πχ σελ. 24, για την έκδοση 1.7).
- (ii) να βεβαιωθεί ότι ή ώρα και η ημερομηνία της συσκευής είναι ορθές και αν όχι να τις διορθώσει κατάλληλα (σύμφωνα με τον τρόπο που αναφέρεται στο εγχειρίδιο Hidex DOC 410-001 , πχ. σελ. 39, για την έκδοση 1.7)

Πριν την μέτρηση πρέπει αρχικά να τοποθετηθεί μέσα στον μετρητικό θάλαμο η κατάλληλη υποδοχή για το είδος του φιαλιδίου που θα μετρηθεί (βλ. την υποδοχή στις φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.22 για το φιαλίδιο των 20 mL). Στη συνέχεια το προς μέτρηση φιαλίδιο (το οποίο μέχρι εκείνη τη στιγμή βρισκόταν σε περιβάλλον που επικρατούσε σκοτάδι) τοποθετείται στην υποδοχή του στο μετρητικό θάλαμο, ο οποίος έπειτα σφραγίζεται φωτοστεγανά με ειδικό πώμα (βλ. και φωτογραφίες του Διαγράμματος 4.23). Έπειτα επιλέγεται ένα από τα προρυθμισμένα πρωτόκολλα H-3, C-14 και P-32 (συνήθως το H-3) πιέζοντας το αντίστοιχο προγραμματισμένο πλήκτρο. Η μέτρηση ενός φιαλιδίου μπορεί να ξεκινήσει πατώντας το πλήκτρο "START". Η μέτρηση του φιαλιδίου σταματάει αυτόματα όταν συμπληρωθεί ο προρυθμισμένος χρόνος των 60 min LIVE time, δηλαδή όταν συμπληρωθούν περίπου 63 – 65 min TRUE time. Η μεταφορά του συλλεχθέντος φάσματος σε H/Y γίνεται ως εξής:

- (α) Πρέπει η σειριακή θύρα του Triathler να συνδεθεί με αντίστοιχη θύρα του H/Y.
- (β) Πρέπει στον H/Y να έχει εγκατασταθεί σχετικό λογισμικό επικοινωνίας. Το λογισμικό αυτό δίνεται από την εταιρία Hidex σε δύο παραθυρικές εκδόσεις: την Commfil1 και την Commfil2. Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει την έκδοση Commfil, η οποία είναι απλούστερη και έχει πιο περιορισμένες δυνατότητες. Το λογισμικό Commfil1 εγκαθίσταται στον H/Y σύμφωνα με τις οδηγίες του εγχειριδίου Hidex DOC 410-001.

(γ) Πρέπει να "τρέχει" το λογισμικό Commfil1.

(δ) Πιέζοντας τα πλήκτρα της συσκευής 1 + enter το φάσμα μεταφέρεται στον H/Y.

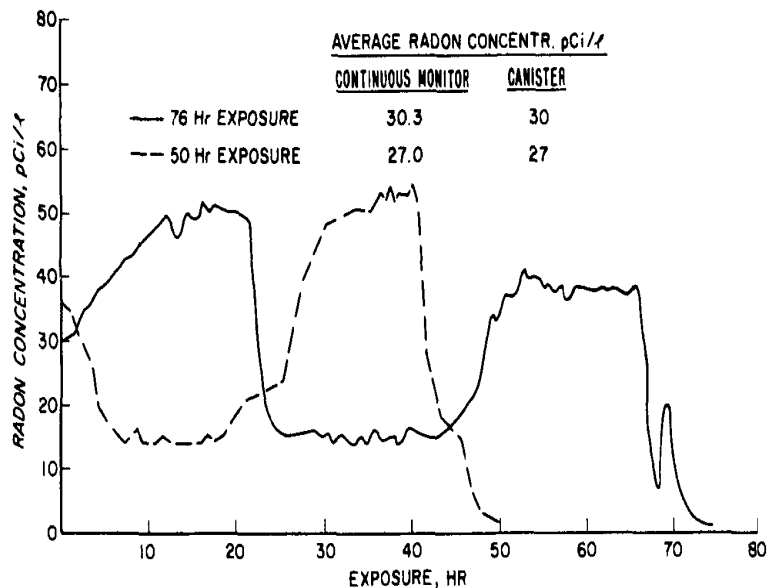
(ε) Ο χρήστης πρέπει στη συνέχεια να "ανοίξει" προκαθορισμένο από το λογισμικό ειδικό φύλλο Excel τύπου "READ ONLY", στο οποίο μπορεί να εισάγει το φάσμα, εκτελώντας την μακροεντολή "Insert Spectrum". Το φάσμα σώνεται σε κατάλληλο άλλο αρχείο Excel με τη διαδικασία "Save as". Το λογισμικό Commfil1 μπορεί στη συνέχεια να "σταματήσει" να λειτουργεί.

Το φάσμα που μεταφέρθηκε σε H/Y με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει αποθηκευμένο και στη μνήμη (buffer) της συσκευής. Ο χρήστης μπορεί να μεταφέρει παλαιότερα φάσματα που βρίσκονται στη μνήμη στον H/Y αν χρειάζεται με διαδικασία που περιγράφεται στο εγχειρίδιο Hidex DOC 410-001. Η μνήμη διατηρείται, μέχρι να "γεμίσει", οπότε ο χρήστης χρειάζεται να την αδειάσει με κατάλληλες εντολές από το πληκτρολόγιο της συσκευής. Τονίζεται ότι αν η μνήμη "γεμίσει" η συσκευή δεν μπορεί πλέον να αποθηκεύει φάσματα. Σε τέτοια περίπτωση περίπου στο 70% χωρητικότητας της μνήμης η συσκευή δίνει σχετική προειδοποίηση στην οθόνη της.

4.3 Συμπεράσματα

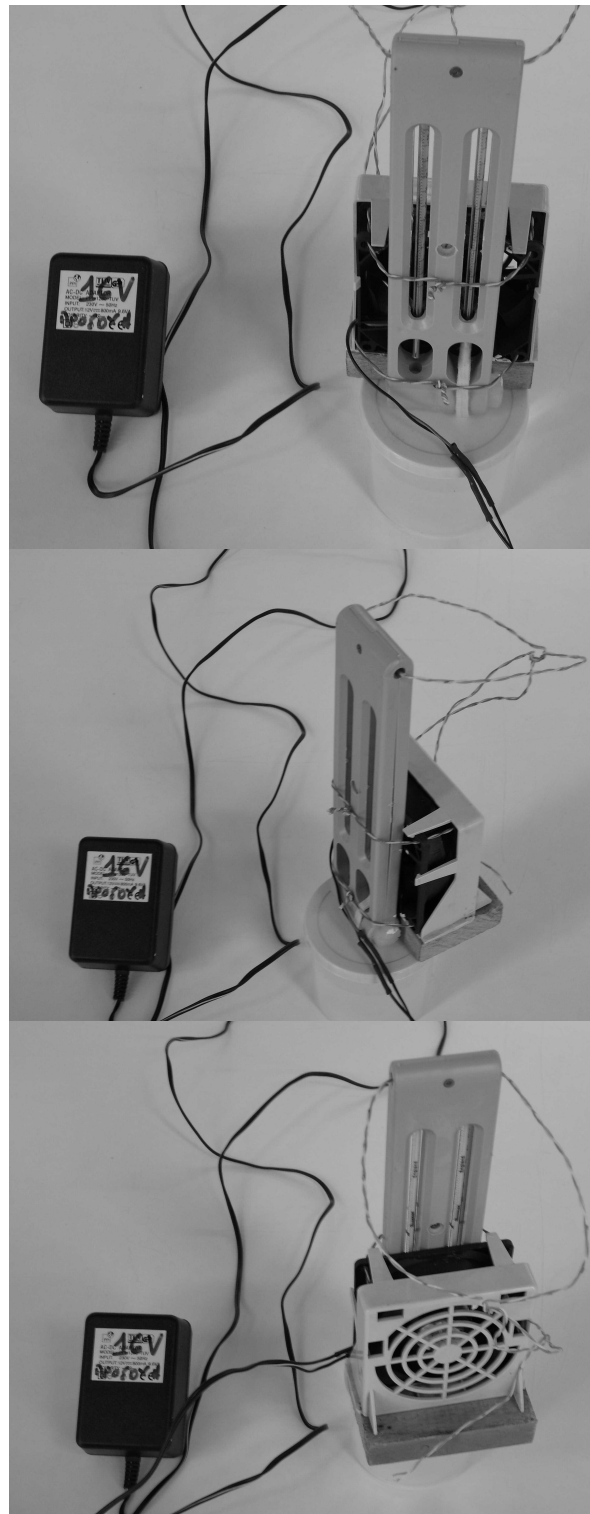
Στο παρόν 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια, οι μέθοδοι με τις οποίες χρησιμοποιείται ο διαθέσιμος εξοπλισμός για τους σκοπούς της Διπλωματικής Εργασίας. Ο εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, φαίνεται ότι επαρκεί με πληρότητα για την οργάνωση πειραμάτων βαθμονόμησης για προσροφητικά υλικά που εκτίθενται και προσροφούν Ραδόνιο και στη συνέχεια μετρώνται με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Στο επόμενο 5^ο Κεφάλαιο θα παρουσιασθούν κυρίως: (1) προβληματισμοί και συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή του καταλληλότερου υγρού σπινθηριστή, (2) ο τρόπος μέτρησης του υποστρώματος, (3) οι σχέσεις για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης της μεθόδου συμπεριλαμβανομένων των σχετικών σφαλμάτων, (4) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσότητας Minimum Detectable Activity(MDA) και (5) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσότητας Lower Limit of Detection (LLD). Οι μέθοδοι, και οι σχέσεις, όπως χρησιμοποιούνται, συνιστούν το πρωτόκολλο βαθμονόμησης προσροφητικών υλικών ως ανιχνευτών Ραδονίου που μετρώνται με την μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



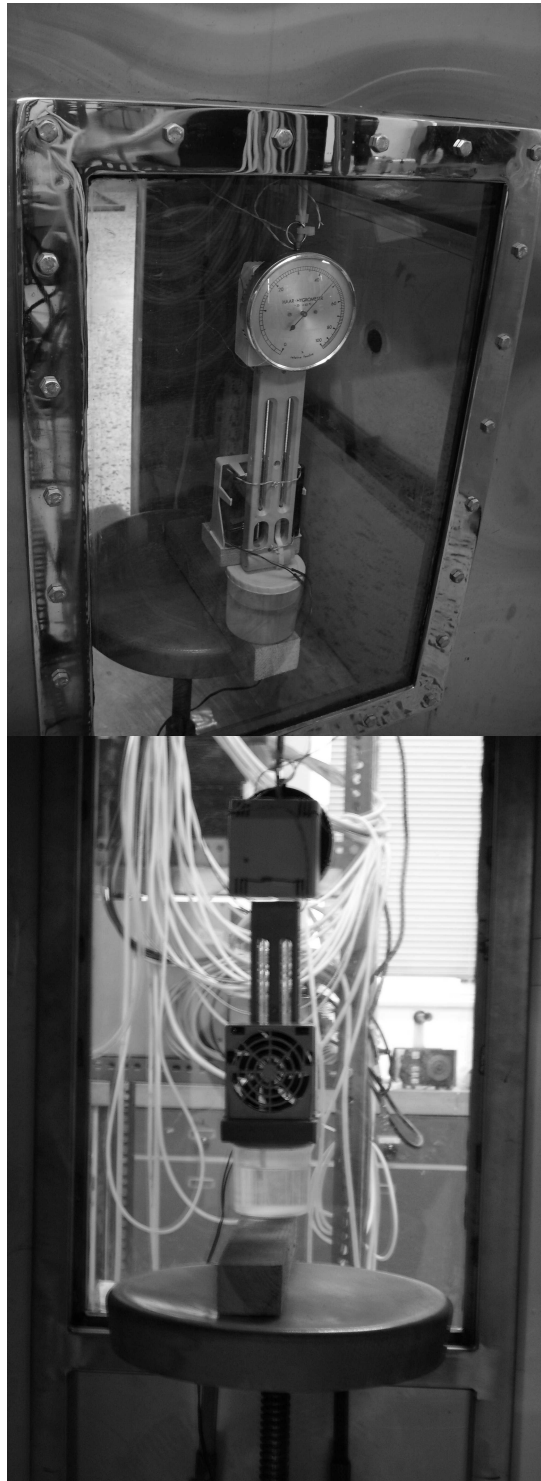
Διάγραμμα 4.1

Έκθεση (exposure) ενεργού άνθρακα σε μεταβλητή συγκέντρωση Ραδονίου σε θάλαμο 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).



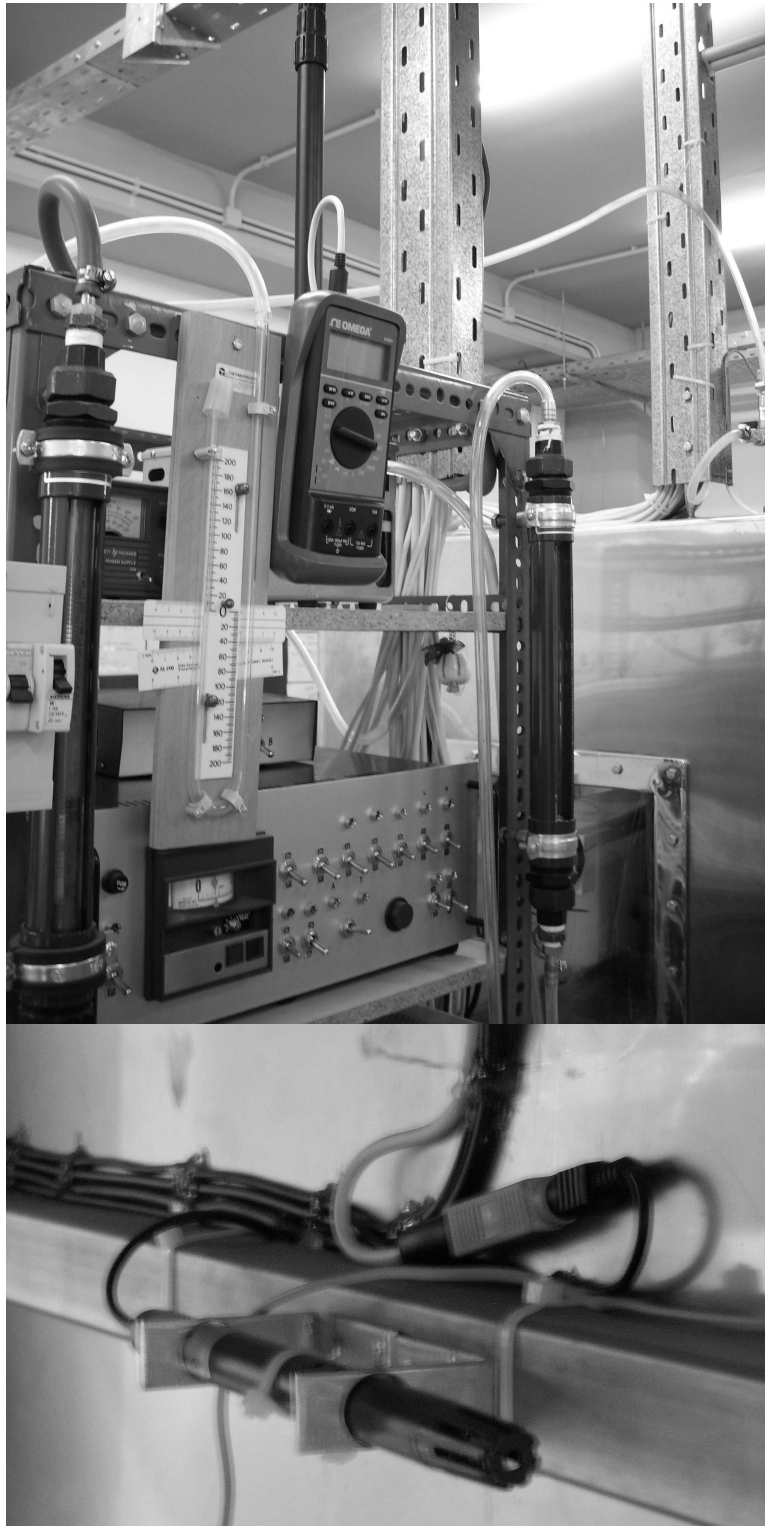
Διάγραμμα 4.2

Διάφορες όψεις του μετασκευασμένου ψυχομέτρου (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.3

Μετασκευασμένο ψυχρόμετρο, τοποθετημένο στο θάλαμο Ραδονίου, φωτογραφημένο (πάνω) από έξω και (κάτω) από μέσα (Πασχαλίδης, 2008).



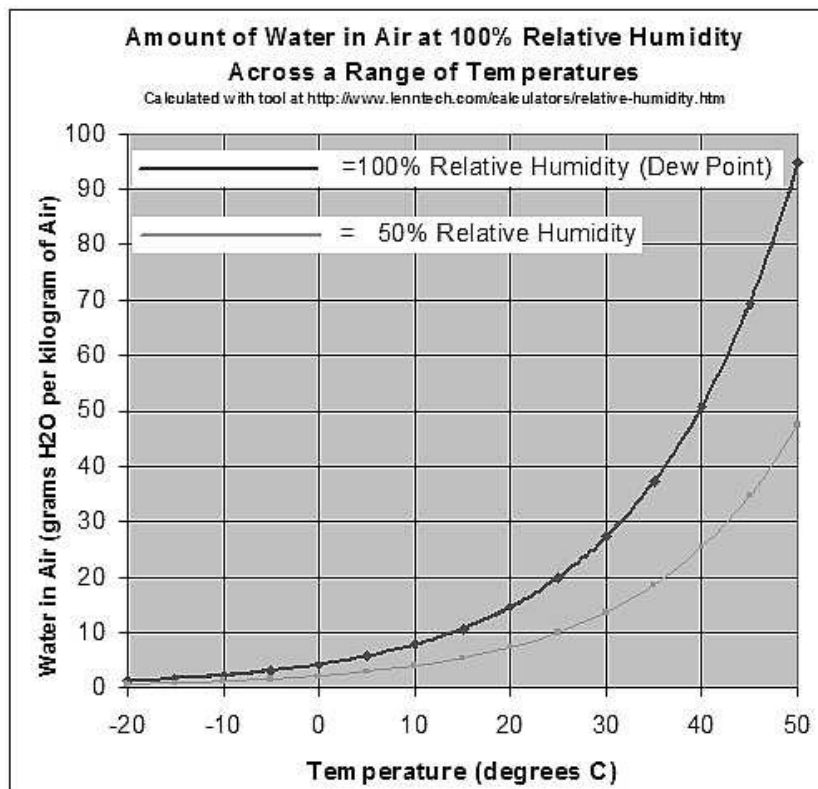
Διάγραμμα 4.4α

Υγρόμετρο και αισθητήρας υγρασίας OMEGA HHM25 (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.4β

Υγρόμετρο τριχός (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.5

Απόσπασμα ψυχομετρικού χάρτη (μάζα νερού στον κορεσμένο από υγρασία αέρα).



Διάγραμμα 4.6

Χύτρα ταχύτητας (pressure cooker) χωρητικότητας 6 L του κατασκευαστή SEB Γαλλίας (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.7

Αντιδιαμετρικά τοποθετημένες βαλβίδες για την είσοδο (αριστερά) και την έξοδο του αέρα (δεξιά) από τη χύτρα (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.8

Εσωτερικό χύτρας (κενό): Διακρίνεται διάτρητο σωληνάκι από τεφλόν συνδεδεμένο με την βαλβίδα εισόδου (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.9

Μείγμα προσροφητικών υλικών και χύτρα (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.10

Εσωτερικό χύτρας πλήρες με προσροφητικά υλικά (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.11

Σύνδεση της χύτρας με το θάλαμο έκθεσης. Ο αέρας που αφυγραίνεται ακολουθεί την πορεία ΣΒ3 > ΣΒ3' > ΕΙΣΟΔΟΣ > ΕΞΟΔΟΣ > ΣΒ4' > ΣΒ4 (Πασχαλίδης, 2008).



Διάγραμμα 4.12

Θάλαμος Ραδονίου: Μικρή εσωτερική αεραντλία (Μαρινάκης, 2007).



Διάγραμμα 4.13

Διακόπτης ελέγχου H18 για τη μικρή εσωτερική αεραντλία (Μαρινάκης, 2007).



Διάγραμμα 4.14

Φιαλίδια με προσροφητικά υλικά προς έκθεση στον θάλαμο Ραδονίου.



Διάγραμμα 4.15

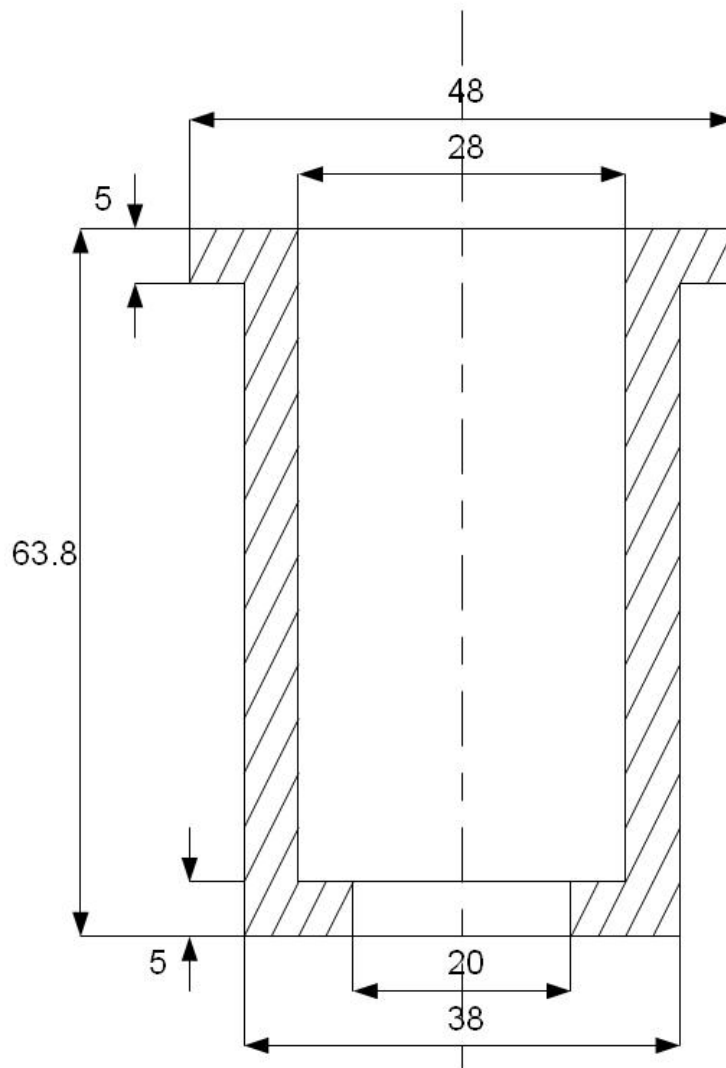
Όριο πλήρωσης φιαλιδίου, με εκτεθειμένο σε Ραδόνιο προσροφητικό υλικό, με υγρό σπινθηριστή.



Διάγραμμα 4.16
Μικρός μηχανουργικός τόνος Εργαστηρίου.



Διάγραμμα 4.17
**Υποδοχείς για τη συγκράτηση και φυγοκέντριση δειγμάτων
σε φιαλίδια γεωμετρίας 20 mL.**



Διάγραμμα 4.18

Μηχανολογικό σκαρίφημα για υποδοχέα συγκράτησης και φυγοκέντρισης δείγματος σε φιαλίδιο γεωμετρίας 20 mL.



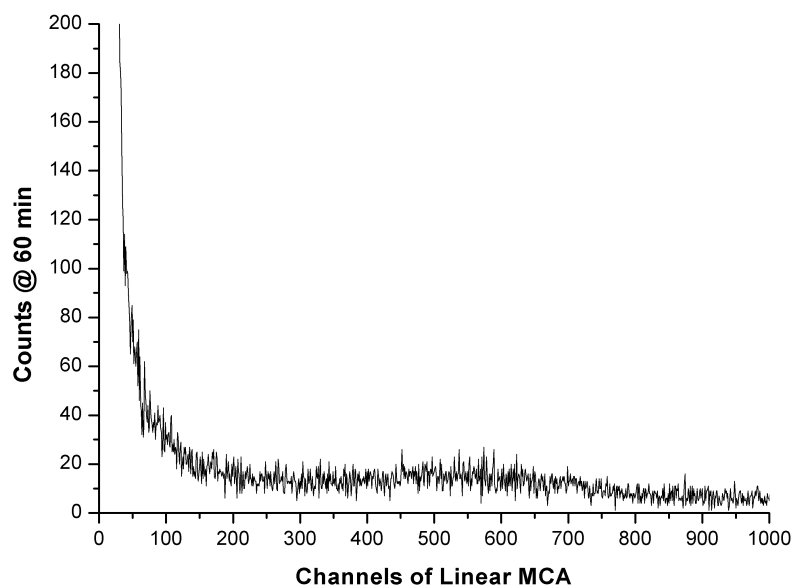
Διάγραμμα 4.19

Φάκελλοι από λεπτό πορώδες συνθετικό υλικό σαν εκείνο που χρησιμοποιείται σήμερα (2012) για το τσάι.



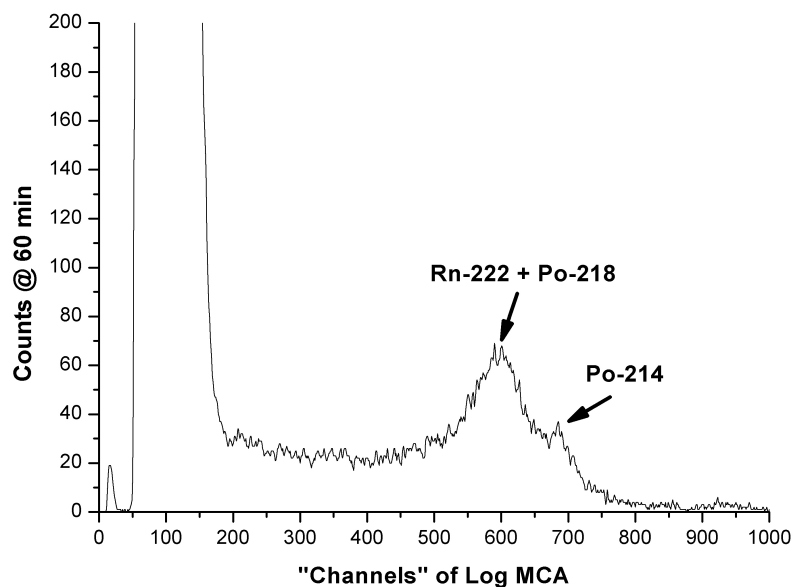
Διάγραμμα 4.20

"Αριθμητικό" πληκτρολόγιο (δεξιά) και σειρά από πλήκτρα που βρίσκονται στο κάτω μέρος της ενσωματωμένης οθόνης στην άνω όψη της συσκευής Triathler.



Διάγραμμα 4.21α

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού σε γραμμικό πολυκαναλικό αναλυτή από διάλυμα που περιέχει θυγατρικά του Ραδονίου.



Διάγραμμα 4.21β

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού σε λογαριθμικό πολυκαναλικό αναλυτή από διάλυμα που περιέχει θυγατρικά του Ραδονίου (διακρίνονται οι -α κορυφές των Rn-222 + Po-218 και του Po-214).



Διάγραμμα 4.22α

Κέντρο: Υποδοχέας για φιαλίδιο γεωμετρίας 20 mL. Αριστερά: Φιαλίδιο γεωμετρίας 20 mL. Δεξιά: Πόμα θαλάμου μέτρησης συσκευής Triathler.



Διάγραμμα 4.22β

Τοποθέτηση υποδοχέα για φιαλίδιο γεωμετρίας 20 mL στο θάλαμο μέτρησης.



Διάγραμμα 4.23α

Τοποθέτηση φιαλιδίου γεωμετρίας 20 mL στο θάλαμο μέτρησης.



Διάγραμμα 4.23β

Τοποθέτηση πώματος στο θάλαμο μέτρησης για την εξασφάλιση φωτοστεγανότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΓΡΟΥ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ & ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν 5^ο Κεφάλαιο θα παρουσιασθούν κυρίως: (1) προβληματισμοί και συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή του καταλληλότερου υγρού σπινθηριστή, (2) ο τρόπος μέτρησης του υποστρώματος, (3) οι σχέσεις για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης της μεθόδου συμπεριλαμβανομένων των σχετικών σφαλμάτων, (4) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσότητας Minimum Detectable Activity (MDA), (5) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της ποσότητας Lower Limit of Detection (LLD) και (6) οι σχέσεις για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της μεθόδου όπως θα εφαρμόζεται. Οι μέθοδοι, και οι σχέσεις, όπως χρησιμοποιούνται, συνιστούν το πρωτόκολλο βαθμονόμησης προσροφητικών υλικών ως ανιχνευτών Ραδονίου που μετρώνται με την μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού.

5.2 Επιλογή υγρού σπινθηριστή

Όπως έγινε φανερό στο 3^ο Κεφάλαιο, οι μετρήσεις που αφορούν στις δοκιμές προσροφητικών υλικών αυτής της Διπλωματικής Εργασίας αποφασίσθηκε να πραγματοποιηθούν με υδρόφοβο υγρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus με διαλύτη Pseudocumene. Ο σπινθηριστής Insta-Fluor Plus διατίθεται στο Εργαστήριο και είναι και προτεινόμενος στη βιβλιογραφία για τέτοιες ή παρόμοιες μετρήσεις (βλ. πχ. Iimoto, 2005 και τις αναφορές που γίνονται στο 2^ο Κεφάλαιο). Επίσης αποφασίσθηκε να γίνουν μετρήσεις και με χρήση του υδρόφιλου σπινθηριστή Ultima Gold με διαλύτη DIPN. Ο σπινθηριστής Ultima Gold διατίθεται επίσης στο Εργαστήριο αλλά δεν είναι προτεινόμενος στη βιβλιογραφία για τέτοιες ή παρόμοιες μετρήσεις, διότι το μόριο του DIPN ($C_{16}H_{20}$) έχει πάρα πολύ μεγαλύτερο MB (~ 212) από το μόριο του τολουενίου (C_7H_8 , MB=92) ή το μόριο του Pseudocumene (C_9H_{12} , MB=120) και όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Perlman, 1990), ο διαλύτης DIPN δεν είναι, ως εκ τούτου κατάλληλος για να εισέλθει στους πόρους του προσροφητικού υλικού και να παραλάβει το Ραδόνιο. Κατά τον Perlman (1990) αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί αν ο υγρός σπινθηριστής αραιωθεί με κάποιον ελαφρό οργανικό διαλύτη όπως η μεθανόλη (CH_4O) ή η αιθανόλη (C_2H_6O) με τρόπο ώστε το MB του διαλύματος που θα

προκύψει να γίνει περίπου 100. Πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας έδειξαν ότι:

(α) Επαληθεύεται ο ισχυρισμός του Perlman (1990) ότι ο σπινθηριστής Ultima Gold με μεγάλο MB δεν είναι κατάλληλος για να εισέλθει στους πόρους οποιουδήποτε από τα δοκιμαζόμενα προσροφητικά υλικά και να παραλάβει το Ραδόνιο.

(β) Φαίνεται ότι ο ισχυρισμός του Perlman (1990) ισχύει και για τον σπινθηριστή Insta Fluor Plus ειδικά για τα δοκιμαζόμενα προσροφητικά υλικά του ζεόλιθου και του silica gel, δηλ. και αυτός ο σπινθηριστής έχει μεγάλο MB και δεν είναι κατάλληλος για να εισέλθει στους πόρους αυτών των προσροφητικών υλικών και να παραλάβει το Ραδόνιο.

(γ) Ο οργανικός διαλύτης αιθανόλη αναμιγνύεται ικανοποιητικά ομογενώς με τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus και τον σπινθηριστή Ultima Gold, οπότε είναι κατάλληλος για την μείωση του MB των σπινθηριστών αυτών.

(δ) Ο οργανικός διαλύτης μεθανόλη δεν αναμιγνύεται απόλυτα ομογενώς με τους αναφερόμενους σπινθηριστές και ιδιαίτερα με τον Ultima Gold, οπότε δεν θεωρείται ο πλέον κατάλληλος για την μείωση του MB των σπινθηριστών.

Για να επιτευχθεί MB του αραιωμένου σπινθηριστή ίσο με ψ , τότε αν x είναι το ποσοστό του υγρού σπινθηριστή και $(1-x)$ είναι το ποσοστό του διαλύτη, θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση:

$$xMB_{\text{σπινθηριστή}} + (1-x)MB_{\text{οργανικούδιαλύτη}} = \psi$$

Ως MB του σπινθηριστή ορίζεται κατά προσέγγιση το MB του αντίστοιχου διαλύτη. Επομένως για τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus είναι:

$$MB_{\text{σπινθηριστή}} = MB_{\text{pseudocumene}} = 120,$$

ενώ για τον σπινθηριστή Ultima Gold είναι:

$$MB_{\text{σπινθηριστή}} = MB_{\text{DIPN}} = 212$$

Για το MB του οργανικού διαλύτη είναι:

για τη μεθανόλη 32

και για την αιθανόλη 46

Η εξίσωση δίνει

(i) για ένα ελάχιστο 10% κ.ο. μεθανόλη

$\psi = 111.2$ για τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus και $\psi = 194.00$ για τον Ultima Gold

(ii) για ένα μέγιστο 90% κ.ο. μεθανόλη

$\psi = 40.8$ για τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus και $\psi = 50.0$ για τον Ultima Gold

(iii) για ένα ελάχιστο 10% κ.ο. αιθανόλη

$\psi = 112.60$ για τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus και $\psi = 195.40$ για τον Ultima Gold

και τέλος

(iv) για ένα μέγιστο 90% κ.ο. αιθανόλη

$\psi = 53.40$ για τον σπινθηριστή Insta-Fluor Plus και $\psi = 62.60$ για τον Ultima Gold

Στις περιπτώσεις (ii) και (iv) το ποσοστό του σπινθηριστή στο αραιωμένο διάλυμα φαίνεται να είναι πολύ ελαττωμένο με συνέπειες στην απόδοση του αραιωμένου σπινθηριστή. Γι αυτό αποφασίσθηκε να διερευνηθεί ποια αναλογία μαζών ανάμιξης υγρών σπινθηριστών και αλκοόλης (μεθανόλης ή αιθανόλης) είναι η βέλτιστη από την άποψη της απόδοσης και πιθανής σβέσης. Δοκιμές με αραιωμένους σπινθηριστές και ενεργό άνθρακα έδειξαν ότι το Ραδόνιο παραλαμβάνεται από τους πόρους αυτού του προσροφητή με ικανοποιητικό τρόπο. Στο Διάγραμμα 5.1 δίνεται το φάσμα που προκύπτει από την μέτρηση 4g ενεργού άνθρακα με υγρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus (0% αλκοόλη) για έκθεση επί 48h σε 2.5 kBqm^{-3} Ραδονίου, στους 25° C , σε σχετική υγρασία 50%. Το σήμα που οφείλεται στο προσροφηθέν Ραδόνιο και τα θυγατρικά του είναι πολύ καθαρό και διακρίνεται ως κορυφή μεταξύ των καναλιών 400 και 800. Στο αριστερό μέρος του φάσματος διακρίνεται κορυφή που οφείλεται σε ηλεκτρονικό θόρυβο ή άλλη ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας. Στο Διάγραμμα 5.2 δίνεται το φάσμα που προκύπτει από την μέτρηση 4 g ενεργού άνθρακα με αραιωμένο υγρό σπινθηριστή 50% Ultima Gold και 50% αιθανόλη για όμοιες συνθήκες έκθεσης. Το σήμα που οφείλεται στο προσροφηθέν Ραδόνιο και τα θυγατρικά του είναι ικανοποιητικά καθαρό και διακρίνεται ως κορυφή μεταξύ των καναλιών 200 και 400. Ομοίως, στο αριστερό μέρος του φάσματος διακρίνεται κορυφή που οφείλεται σε ηλεκτρονικό θόρυβο ή άλλη ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας. Η μετακίνηση του ενεργειακού παραθύρου σε χαμηλότερες τιμές οφείλεται τόσο στους διαφορετικούς υγρούς σπινθηριστές, όσο και στο γεγονός ότι η

αιθανόλη είναι από παλαιά διαπιστωμένη αιτία σβέσης σε διαλύματα που μετρώνται με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού (βλ. πχ και Findeis, 1968).

5.3 Αβεβαιότητες και βέλτιστη οργάνωση των πειραμάτων έκθεσης

Στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007) σημειώνονται διάφορα πειραματικά προβλήματα που συμβάλλουν στην αβεβαιότητα της πειραματικής διαδικασίας, όταν γίνονται δοκιμές προσρόφησης Ραδονίου σε υλικά όπως ο ενεργός άνθρακας, ο συνθετικός ζεόλιθος κλπ. Επίσης η βιβλιογραφία αναφέρει και άλλες δυνατές αιτίες αβεβαιότητας εξαιτίας της φύσεως των πειραμάτων με προσροφητικά υλικά και υγρούς σπινθηριστές. Επιπλέον διαπιστώνονται και αβεβαιότητες που οφείλονται σε ασυμφωνία του ρυθμού απομείωσης του Ραδονίου στο θάλαμο βαθμονόμησης στον οποίο γίνονται τα πειράματα έκθεσης με τον ρυθμό διάσπασης του Ραδονίου, δηλ. ο ρυθμός απομείωσης είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό διάσπασης λόγω διαρροών και άλλων αιτίων. Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των κυριότερων από αυτές τις αβεβαιότητες:

1. Η αβεβαιότητα που προκύπτει από τον εκτεταμένο χρόνο ωρίμανσης του μίγματος προσροφητικού υλικού και υγρού σπινθηριστή, μεταξύ τέλους της έκθεσης και έναρξης της μέτρησης

Η αβεβαιότητα αυτή οφείλεται:

(α) σε πιθανή αποβολή Ραδονίου από το φιαλίδιο προς το περιβάλλον κατά τη διάρκεια του χρόνου ωρίμανσης.

(β) σε πιθανή πρόσληψη Ραδονίου από το φιαλίδιο προς το περιβάλλον

(γ) σε αργή διάλυση του προσροφηθέντος Ραδονίου στον προσροφητή προς τον υγρό σπινθηριστή, για λόγους που εξηγήθηκαν στην § 5.2, το οποίο σημαίνει αντίστοιχη καθυστέρηση στην ανάπτυξη θυγατρικών του Ραδονίου μέσα στον υγρό σπινθηριστή με αποτέλεσμα να μην είναι σαφώς ορισμένος ο χρόνος στον οποίο διαπιστώνεται ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του Ραδονίου και των θυγατρικών του. Όπως είναι γνωστό η υπόψιν ισορροπία είναι απαραίτητη για την ορθή μέτρηση της ποσότητας του προσροφηθέντος Ραδονίου.

Προφανώς, η κυριότερη από τις πιο πάνω αβεβαιότητες είναι η (γ) για αυτό και ο χρόνος αναμονής των φιαλιδίων -όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, ποικίλει από 3 έως και πολλές ώρες. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

αποφασίσθηκε για τον περιορισμό της αβεβαιότητας (γ) τα φιαλίδια να μετρώνται πάντα την επόμενη πειραματική ημέρα μετά το τέλος της έκθεσης και της ανάμιξής τους με υγρό σπινθηριστή. Στην αβεβαιότητα αυτή αποδόθηκε χωρίς πειραματική διερεύνηση, η τιμή 5% διότι γίνεται χωρίς εξακρίβωση δεκτή η αβεβαιότητα που προτείνει ο George (1984), παρόλο που η γεωμετρία δοχείων του George (1984), είναι πολύ μεγαλύτερη και διαφορετική, και η μέθοδος που χρησιμοποιείται άλλη. Αυτή η συνιστώσα αβεβαιότητας μπορεί να είναι εξίσου ψηλή δεδομένου ότι στη μέθοδο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας κατά το χρόνο ωρίμανσης ο υγρός σπινθηριστής καλείται να πάρει από τους πόρους του προσροφητικού υλικού το Ραδόνιο, χωρίς να υπάρχει βεβαιότητα για την ακριβή επαναληψιμότητα του φαινομένου.

2. Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ανάμιξη των προσροφητικών υλικών με τους υγρούς σπινθηριστές

Η αβεβαιότητα αυτή οφείλεται στην εξώθερμη και αναβράζουσα (outgassing) αντίδραση που παρατηρείται όταν αναμιγνύεται κυρίως ενεργός άνθρακας και Insta-Fluor Plus. Όταν γίνεται η ανάμιξη άλλων προσροφητικών υλικών με αυτόν ή άλλους υγρούς σπινθηριστές τα φαινόμενα αντίδρασης είναι μειωμένα. Ο Prichard (1983a) έχει εκτιμήσει ότι η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να φθάσει περίπου το 6.5% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 97.5% για υγρό σπινθηριστή με βάση το διαλύτη τολουένιο. Αυτή η τιμή υιοθετήθηκε και στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Για τον μηδενισμό της αβεβαιότητας αυτής ο Prichard (1983a) προτείνει συγκεκριμένη αλλά πολύπλοκη και ασύμφορη μέθοδο.

3. Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την πειραματική ασυμφωνία του ρυθμού απομείωσης του Ραδονίου με τον ρυθμό διάσπασής του

Σημειώνεται ότι ο ρυθμός "απομείωσης" λ' του Ραδονίου μέσα στον πειραματικό θάλαμο έκθεσης είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό διασπάσεως του λ , διότι αντιπροσωπεύει τη συνισταμένη κυρίως τριών συνιστωσών μείωσης ως εξής: (α) της διάσπασης, (β) τυχόν διαρροών και τέλος (γ) της απορρόφησης από τα προσροφητικά υλικά που εκτίθενται στον θάλαμο. Εκτιμάται ότι ο λ' μπορεί να φθάσει να είναι αρκετά μεγαλύτερος του λ . Επίσης εκτιμάται ότι ο λ' θα είναι τόσο μεγαλύτερος του λ , όσο ξηρότερη είναι η ατμόσφαιρα έκθεσης των προσροφητικών υλικών. Αυτό θα συμβαίνει διότι αν δεν υπάρχει υγρασία στην ατμόσφαιρα του θαλάμου, δεν θα

υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ υγρασίας - Ραδονίου στην διαδικασία προσρόφησής τους στα προσροφητικά υλικά. Το αποτέλεσμα θα είναι, τα προσροφητικά υλικά να απορροφούν (δηλ. στην ουσία να αφαιρούν) πολύ περισσότερο Ραδόνιο του θαλάμου σε ξηρές ατμόσφαιρες έκθεσης από ότι σε υγρότερες. Εκτιμήθηκε στις Διπλωματικές Εργασίες του Μαρινάκη (2007) και του Πασχαλίδη (2008) ότι η επίδραση του λ' στην μέση τιμή της συγκέντρωσης Ραδονίου κατά τη διάρκεια της έκθεσης, δεν θα είναι μεγαλύτερη από ~10% ακόμα και όταν $\lambda' \gg 2\lambda$. Αυτή η τιμή 10% υιοθετήθηκε και στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προηγούμενα αποφασίσθηκε στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ, η τυπική πειραματική ημέρα να οργανωθεί ως εξής:

Περί τις 9.00 μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία μηδενισμού της πηγής, περί τις 10.00 μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής Ραδονίου, και περί τις 11.00 ή 13.00 ή ακόμα αργότερα, ανάλογα με τα επίπεδα βαθμονομημένης συγκέντρωσης Ραδονίου που είναι επιθυμητό να δημιουργηθούν, μπορεί να ξεκινήσει η έκθεση των φιαλιδίων με τα 4g προσροφητικό υλικό. Το χρονικό διάστημα από τις 9.00 έως και τις 11.00 – 13.00 χρησιμοποιείται παράλληλα για την προετοιμασία των φιαλιδίων με το προσροφητικό υλικό και για την ακριβή ρύθμιση των συνθηκών υγρασίας μέσα στο θάλαμο όπου θα γίνει η έκθεση. Προετοιμάζονται φιαλίδια για τα δοκιμαζόμενα προσροφητικά υλικά. Δεδομένου ότι ο χρόνος έκθεσης των φιαλιδίων 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. Τη στιγμή εκείνη τα φιαλίδια γεμίζουν με την κατάλληλη αναλογία ελαφρού διαλύτη μεθανόλης ή αιθανόλης και υγρού σπινθηριστή, όπως αυτή προσδιορίσθηκε στην § 5.2. Συγκεκριμένα τα φιαλίδια πληρώνονται πρώτα με τον ελαφρό διαλύτη και έπειτα με τον αναλογούντα σπινθηριστή ώστε να φτιαχθεί το κατάλληλο μίγμα προς διερεύνηση. Τα φιαλίδια κλείνουν στεγανά με το πάμα τους και μπαίνουν σε αναμονή σε σκοτεινό χώρο μέχρι την επόμενη πειραματική ημέρα.

Περί τις 09:00 της επόμενης πειραματικής μέρας μπορεί να ξεκινήσει η μέτρηση των φιαλιδίων. Κάθε φιαλίδιο μετράται στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού για 60 min. Για τη σειρά της μέτρησης λαμβάνονται υπόψιν τα εξής:

(α) η διαθέσιμη συσκευή υγρού σπινθηρισμού μπορεί να μετράει ένα φιαλίδιο τη φορά

(β) τα δοκιμαζόμενα προσροφητικά υλικά κατατάσσονται ανάλογα με την ικανότητα προσρόφησης Ραδονίου κατά αύξουσα ικανότητα ως εξής: silica gel, συνθετικοί ζεόλιθοι 5A, συνθετικοί ζεόλιθοι 10A και ενεργός άνθρακας

(γ) οι υγροί σπινθηριστές που χρησιμοποιούνται κατατάσσονται ανάλογα με την ικανότητά τους να παραλαμβάνουν από τους προσροφητές το Ραδόνιο που έχει προσροφηθεί κατά αύξουσα ικανότητα ως εξής: Ultima Gold και Insta-Fluor Plus

Ως εκ τούτου αποφασίστηκε η ακόλουθη σειρά μέτρησης των φιαλιδίων, ανάλογα και με το πείραμα έκθεσης που έχει πραγματοποιηθεί:

1ο: φιαλίδιο με silica gel και Ultima Gold με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

2ο: φιαλίδιο με συνθετικό ζεόλιθο με πόρους 0.5 nm (5A) και Ultima Gold με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

3ο: φιαλίδιο με συνθετικό ζεόλιθο με πόρους 1 nm (10A) και Ultima Gold με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

4ο: φιαλίδιο με ενεργό άνθρακα και Ultima Gold με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

5ο: φιαλίδιο με silica gel και Insta-Fluor Plus με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

6ο: φιαλίδιο με συνθετικό ζεόλιθο με πόρους 0.5 nm (5A) και Insta-Fluor Plus με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

7ο: φιαλίδιο με συνθετικό ζεόλιθο με πόρους 1 nm (10A) και Insta-Fluor Plus με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

8ο: φιαλίδιο με ενεργό άνθρακα και Insta-Fluor Plus με προσθήκη ελαφρού διαλύτη

Αν υπάρχουν φιαλίδια με διαφορετικούς ελαφρούς διαλύτες μετρώνται πρώτα εκείνα που περιέχουν αιθανόλη και κατόπιν εκείνα που περιέχουν μεθανόλη, χωρίς να παραβιάζεται η πιο πάνω σειρά.

Αν υπάρχουν φιαλίδια με διαφορετικές αναλογίες του ίδιου ελαφρού διαλύτη μετρώνται πρώτα εκείνα που περιέχουν την μικρότερη αναλογία διαλύτη και

κατόπιν εκείνα με την αμέσως μεγαλύτερη κοκ, χωρίς να παραβιάζεται η πιο πάνω σειρά.

Κατά χονδρικούς εύλογους υπολογισμούς, με διαλείμματα μία μέτρηση διαρκεί περίπου 1:30 ώρες, χρονικό διάστημα στο οποίο περιλαμβάνονται, αλλαγές δειγμάτων, σώσιμο δεδομένων και άλλες καθυστερήσεις.

5.4 ROI φασμάτων υγρού σπινθηρισμού

Οι ποσότητες Counts/60 min που αφορούν τόσο στο υπόστρωμα όσο και στη μέτρηση προσροφηθέντος Ραδονίου σύμφωνα με τα παραπάνω πρέπει να μετρώνται για συγκεκριμένα Range-Of-Interest (ή ROI) στα φάσματα υγρού σπινθηρισμού. Το προσροφηθέν Ραδόνιο καταγράφεται στα φάσματα υγρού σπινθηρισμού στη συσκευή που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ ως μία πλατιά "κορυφή" που περιέχει τα καταγραφόμενα -α σωματίδια, τα οποία παράγονται από το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του και αλληλεπιδρούν με τα διαλύματα υγρού σπινθηριστή. Υπενθυμίζεται ότι ο πολυκαναλικός αναλυτής της συσκευής του ΕΠΤ-ΕΜΠ έχει μόλις 1024 κανάλια. Για την υπόψιν κορυφή ορίζεται "κανάλι αρχής" και "κανάλι τέλους". Το διάστημα "κανάλι αρχής" – "κανάλι τέλους" ορίζει το ROI στο οποίο μετράται η κορυφή αυτή. Η κορυφή αυτή δεν σχηματίζεται στο ίδιο ROI για όλους τους συνδυασμούς προσροφητικών υλικών και υγρών σπινθηριστών που δοκιμάζονται κυρίως για λόγους σβέσης και χημικών αντιδράσεων των υγρών σπινθηριστών που χρησιμοποιούνται με τα προσροφητικά υλικά. Επομένως, διακρίνονται πολλά ROI ανάλογα με το μίγμα προσροφητικού υλικού, ελαφρού διαλύτη και υγρού σπινθηριστή που δοκιμάζονται. Ενδεικτικά δίνονται κάποια ROI ως εξής:

- (1) ROI για ενεργό άνθρακα και Insta-Fluor Plus (η κορυφή φαίνεται στο Διάγραμμα 5.1)
- (2) ROI για ενεργό άνθρακα και 50% Ultima Gold + 50% Αιθανόλη (η κορυφή φαίνεται στο Διάγραμμα 5.2)

Τα ROI αυτά αποφασίζονται κατά την πειραματική διαδικασία από εκθέσεις σε Ραδόνιο που οδηγούν στον σχηματισμό ευκρινούς κορυφής για κάθε έναν από τους δοκιμαζόμενους συνδυασμούς..

5.5 Μέτρηση υποστρώματος

Σύμφωνα με τις προηγούμενες παραγράφους, γίνεται κατανοητό, ότι στην ουσία το πειραματικό μέρος της Διπλωματικής Εργασίας προβλέπει μετρήσεις διαφορετικών τύπων μιγμάτων προσροφητών και υγρών σπινθηριστών. Για κάθε ένα από αυτούς τους τύπους μιγμάτων πρέπει να προσδιορισθεί υπόστρωμα με τη συσκευή υγρού σπινθηρισμού. Μετά την έκθεση και τη μέτρηση κάθε τύπου δείγματος στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού και την πάροδο 20 ημερών, στα δείγματα αυτά δεν απομένει καμία ποσότητα Ραδονίου ή θυγατρικών διότι έχουν διασπασθεί λόγω μικρού χρόνου ημιζωής. Επομένως μετά την πάροδο 20 ημερών από τη μέτρησή τους τα δείγματα μπορούν να ξαναμετρηθούν στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού. Από τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων θα προκύψει κατά μέσο όρο το υπόστρωμα για κάθε τύπο μίγματος. Τα φάσματα υποστρώματος δεν έχουν, όπως είναι φυσικό, κορυφές Ραδονίου και θυγατρικών, αλλά το αντίστοιχο υπόστρωμα για κάθε συνδυασμό προσροφητικού υλικού και υγρού σπινθηριστή μετράται στο ίδιο ROI, στο οποίο σχηματίζεται η αντίστοιχη κορυφή όταν υπάρχει Ραδόνιο.

5.6 Ανασκόπηση πρωτοκόλλου βαθμονόμησης

5.6.1 Γενικά

Το πρωτόκολλο βαθμονόμησης βασίζεται σε σχέσεις και παραδοχές που δόθηκαν κυρίως από τον George (1984), τον Kim (1992) και τον Canoba (1999). Στη συνέχεια θα δοθεί ο τρόπος που χρησιμοποιούνται οι σχέσεις αυτές για την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων μετρήσεων, ώστε να υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης αλλά και τα MDA και LLD της δοκιμαζόμενης μεθόδου, καθώς και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

5.6.2 Λογιστικά φύλλα υπολογισμού βαθμού απόδοσης

Το τυπικό λογιστικό φύλλο MS Excel* (στο εξής "φύλλο Λ"), το οποίο προβαίνει αυτόματα στον υπολογισμό της απόδοσης της δοκιμαζόμενης μεθόδου, κάθε φορά που χρειάζεται να μετρηθεί ένα εκτεθέν φιαλίδιο με προσροφητικό υλικό και υγρό σπινθηριστή, διακρίνεται στο Διάγραμμα 5.3 (οι συμπληρωμένες τιμές που διακρίνονται είναι πλασματικές – ενδεικτικές). Για κάθε ένα από τα τέσσερα εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά χρησιμοποιείται διαφορετικό φύλλο μέσα στο ίδιο αρχείο. Στα τέσσερα διαφορετικά φύλλα δόθηκαν τα ακόλουθα αντίστοιχα ονόματα:

**"Ενεργός Άνθρακας", "Συνθετικός Ζεόλιθος 0.5 nm",
"Συνθετικός Ζεόλιθος 1 nm" και "Silica Gel Blue".**

Η **πρώτη** στήλη του τυπικού λογιστικού φύλλου αφορά προφανώς στην ημερομηνία της μέτρησης.

Η **δεύτερη** στήλη αφορά το είδος του ελαφρού διαλύτη και του χρησιμοποιούμενου σπινθηριστή (π.χ. METH – UG, για μεθανόλη και Ultima Gold ή ETH – IF για αιθανόλη και Insta-Fluor Plus).

Η **τρίτη** στήλη αφορά την αναλογία ελαφρού διαλύτη και σπινθηριστή (π.χ. 10-90 για 10% διαλύτη και 90% σπινθηριστή).

Η **τέταρτη** στήλη αφορά στο ROI, όπως εκτιμήθηκε με βάση αυτά που αναφέρονται στην §5.3. Στη στήλη δίνεται το κανάλι αρχής και το κανάλι τέλους (π.χ. 400-600).

Η **πέμπτη** στήλη αφορά στην αποδεκτή τιμή του υποστρώματος όπως μετρήθηκε με βάση αυτά που αναφέρονται στην §5.4 ("BKG σε Counts/60min").

Η **έκτη** στήλη καταγράφει την ονομαστική διάρκεια της έκθεσης των δοχείων σε ώρες, στο Ραδόνιο του θαλάμου Ραδονίου.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι διακρίνονται τρεις ονομαστικές διάρκειες έκθεσης: (α) 24 h, (β) 48 h και (γ) 72 h.

Η **έβδομη** στήλη καταγράφει την ονομαστική σχετική υγρασία στην οποία διεξήχθη το πείραμα έκθεσης.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι διακρίνονται τρεις ονομαστικές σχετικές υγρασίες: (α) 20%, (β) 50% και (γ) 80%, οι οποίες αντιστοιχούν ενδεικτικά στις εξής περιοχές σχετικών υγρασιών: τη "χαμηλή" 10 – 30%, τη "μεσαία" 30 – 70%, και την "υψηλή" 70 – 100%.

Η **όγδοη** στήλη αφορά την χρονική στιγμή έναρξης της παραγωγής Ραδονίου από την πηγή σε μορφή ΩΩ.λλ, όπου το ΩΩ παίρνει τιμές από 00 έως 24 και το λλ παίρνει τιμές από 00 έως 59. Η χρονική στιγμή αυτή δεν αναφέρεται στην ημερομηνία που αναγράφεται στην πρώτη στήλη αλλά στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης, η οποία μπορεί να είναι 1 ημέρα (24 h), 2 ημέρες (48 h), ή 3 ημέρες (72 h) μικρότερη. Υπενθυμίζεται ότι η ημερομηνία της πρώτης στήλης αφορά την ημέρα της μέτρησης των δοχείων αφού αυτά έχουν εκτεθεί.

Η **ένατη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή λήξης της μετάγγισης του Ραδονίου στο θάλαμο έκθεσης, με την ίδια μορφή μονάδων. Αυτή η χρονική στιγμή ανήκει επίσης στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης.

Η **δέκατη** στήλη υπολογίζει την διαφορά των δύο παραπάνω στηλών σε λεπτά της ώρας (min) και μετρά το χρονικό διάστημα T στο οποίο γίνεται η παραγωγή του Ραδονίου. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη σχέση:

$$T = ABS[AM(\Sigma T6)-AM(\Sigma T5)] * 60min \\ + 100 * \{MOD[\Sigma T6, AM(\Sigma T6)] - MOD[\Sigma T5, AM(\Sigma T5)]\}$$

η οποία επιτρέπει να μην χρησιμοποιούνται πράξεις συμμιγών που υπάρχουν στο MS Excel*. Στη σχέση αυτή είναι:

"ABS"= Απόλυτη Τιμή

"AM" = Ακέραιο Μέρος

"ΣΤi" = ΣΤήλη i

MOD(A,B) = το υπόλοιπο της διαίρεσης του αριθμού A, με τον ακέραιο αριθμό B

Η **ενδέκατη** στήλη υπολογίζει τη συγκέντρωση του Ραδονίου στην αρχή της έκθεσης των φιαλιδίων στο περιβάλλον Ραδονίου που δημιουργείται εντός του θαλάμου. Η συγκέντρωση αυτή υπολογίζεται ως Rn_o σε Bq m^{-3} από τον τύπο (βλ. και στο 4^ο Κεφάλαιο):

$$Rn_o = A_o (1 - e^{-\lambda T}) / V \quad (5.1)$$

όπου:

A_o είναι η ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδίου-226 της χρησιμοποιούμενης πηγής σε Bq ($A_o=274300$ Bq),

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

V είναι ο όγκος του θαλάμου Ραδονίου σε m^3 ($V=1.9 m^3$), και

T είναι η διάρκεια παραγωγής Ραδονίου σε min, όπως αυτή υπολογίστηκε στην όγδοη στήλη.

Η **δωδέκατη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή έναρξης της έκθεσης του δοχείου στο Ραδόνιο εντός του θαλάμου Ραδονίου με την ίδια μορφή μονάδων, όπως της έκτης και της έβδομης στήλης. Η τιμή αυτή πρέπει να ταυτίζεται με την τιμή που

καταγράφεται στην έβδομη στήλη. Και αυτή η χρονική στιγμή ανήκει στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης.

Η **δέκατη τρίτη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή λήξης της έκθεσης με την ίδια μορφή μονάδων, όπως της ένατης στήλης. Τονίζεται ότι αυτή η χρονική στιγμή ανήκει στην προηγούμενη ημέρα από την ημερομηνία της μέτρησης του δοχείου (όπως παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη).

Η **δέκατη τέταρτη** στήλη υπολογίζει την διαφορά των δύο παραπάνω στηλών σε λεπτά της ώρας (min) και μετρά το χρονικό διάστημα T_s , στο οποίο διαρκεί η έκθεση του δοχείου στο Ραδόνιο. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη σχέση:

$$T_s = ABS[AM(\Sigma T10)-AM(\Sigma T9)+\Sigma T3]*60min+ \\ +100*ABS\{MOD[\Sigma T10,AM(\Sigma T10)]-MOD[\Sigma T9,AM(\Sigma T9)]\}$$

Στη σχέση αυτή είναι: " $\Sigma T3$ " = τιμή από τη ΣΤήλη 3

Η **δέκατη πέμπτη** στήλη υπολογίζει τη μέση συγκέντρωση του Ραδονίου ως Rn σε Bqm^{-3} κατά το διάστημα T_s :

$$Rn = \frac{\int_0^{T_s} Rn_0 e^{-\lambda' t} dt}{T_s} = \frac{Rn_0}{T_s} \left[\frac{-e^{-\lambda' t}}{\lambda'} \right]_0^{T_s} \quad (5.2)$$

όπου:

λ' είναι ο ρυθμός απομείωσης του Ραδονίου σε min^{-1}

Πρόκειται για τη σχέση (4.4) του 4^{ου} Κεφαλαίου, στην οποία η σταθερά διασπάσεως λ του Ραδονίου έχει αντικατασταθεί από το ρυθμό απομείωσης λ' (βλ. και στην §5.3). Εκτιμήθηκε, όπως ήδη σημειώθηκε, στις Διπλωματικές Εργασίες του Μαρινάκη (2007) και του Πασχαλίδη (2008) ότι η επίδραση του λ' στην μέση τιμή της συγκέντρωσης Ραδονίου κατά τη διάρκεια της έκθεσης, όπως αυτή δίνεται από τη σχέση (5.2), δεν θα είναι μεγαλύτερη από ~10% ακόμα και όταν $\lambda' \gg 2\lambda$. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της εκθετικής μορφής του ολοκληρώματος του αριθμητή. Με άλλα λόγια η πραγματική διαφορά των ποσοτήτων

$\int_0^{T_1} Rn_o e^{-\lambda' t} dt$ και $\int_0^{T_2} Rn_o e^{-\lambda t} dt$ βρίσκεται μέσα στα εκτιμηθέντα από τον

Μαρινάκη (2007) όρια της αβεβαιότητας της πειραματικής διαδικασίας έκθεσης των υπόψιν προσροφητικών υλικών. Σημειώνεται ότι στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην Διπλωματική Εργασία του Μαρινάκη (2007) λήφθηκε πάντα $\lambda' = \lambda$. Το ίδιο γίνεται και στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Όπως, ήδη σημειώθηκε η προκύπτουσα αβεβαιότητα από αυτήν την παραδοχή εκτιμήθηκε στο 10%.

Η **δέκατη έκτη** στήλη υπολογίζει το χρόνο $T_2/2$ σε min που αντιστοιχεί στο μεσοδιάστημα της έκθεσης, ή όπως αναφέρεται από τον Gray (1987) στο "exposure midpoint".

Η **δέκατη έβδομη** στήλη καταγράφει το διάστημα που μεσολάβησε από την ημέρα προετοιμασίας με ανάμιξη με υγρό σπινθηριστή, ενός φιαλιδίου που έχει εκτεθεί, μέχρι τη μέτρηση με τη συσκευή υγρού σπινθηρισμού σε ακέραιες ημέρες. Για την πειραματική διαδικασία που ακολουθείται στην εδώ Διπλωματική Εργασία αυτό είναι συνήθως 1 ημέρα.

Η **δέκατη όγδοη** στήλη καταγράφει τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης ενός φιαλιδίου που έχει εκτεθεί, και έχει προετοιμασθεί με ανάμιξη με υγρό σπινθηριστή, με τη συσκευή υγρού σπινθηρισμού, με τη μορφή ΩΩ.λλ. Αυτή η χρονική στιγμή ανήκει στην ημερομηνία έναρξης του πειράματος έκθεσης.

Η **δέκατη ένατη** στήλη υπολογίζει το χρόνο t σε min που έχει παρέλθει από το μεσοδιάστημα έκθεσης ως την αρχή της μέτρησης του φιαλιδίου προσθέτοντας απλά στη διαφορά των στηλών δεκαπέντε και δέκα, την τιμή της δέκατης τρίτης στήλης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$[AM(\Sigma T15)-AM(\Sigma T10)*60min+ \\ +100*\{MOD[\Sigma T15,AM(\Sigma T15)]-MOD[\Sigma T10,AM(\Sigma T10)]\}+\Sigma T13$$

Η **εικοστή** στήλη υπολογίζει ένα συντελεστή διόρθωσης DF (George, 1984), ο οποίος είναι ίσος με το κλάσμα του Ραδονίου που έχει διασπασθεί μετρώντας το χρόνο t σε min, από το μεσοδιάστημα έκθεσης έως τη χρονική στιγμή έναρξης της μέτρησης. Δίνεται από τη σχέση:

$$DF = e^{-\lambda t} \tag{5.3}$$

Η **εικοστή πρώτη** στήλη καταγράφει τη μέτρηση που λαμβάνεται από φιαλίδιο με το εκτεθέν προσροφητικό υλικό με τον υγρό σπινθηριστή. Η μέτρηση διαρκεί 60min ("Counts/60min").

Η **εικοστή δεύτερη** στήλη υπολογίζει το συντελεστή βαθμονόμησης για το φιαλίδιο, AF , σε καθαρά Counts/60min ανά $Bq\text{m}^{-3}$, ο οποίος μπορεί να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$AF = \frac{\text{Counts}/60 \text{ min φιαλιδίου} - \text{Counts}/60 \text{ min BKG}}{T_s DF Rn} \quad (5.4)$$

όπου το μέγεθος T_s μετράται σε ώρες.

5.6.3 Minimum Detectable Activity (MDA) και Lower Limit of Detection (LLD)

Η **εικοστή τρίτη** στήλη υπολογίζει την ποσότητα MDA (Minimum Detectable Activity) σε Counts/60min, που αντιπροσωπεύει τον ελάχιστο ανιχνεύσιμο καθαρό ρυθμό κρούσεων που οφείλεται στο Ραδόνιο και τα θυγατρικά του Ραδονίου που υπάρχουν στο διάλυμα του υγρού σπινθηριστή στο φιαλίδιο και όχι στο υπόστρωμα. Είναι:

$$MDA = 3\sqrt{\text{Counts}/60 \text{ min BKG}} \quad (5.5)$$

Η **εικοστή τέταρτη** στήλη υπολογίζει την ποσότητα LLD (Lower Limit of Detection) για ένα φιαλίδιο, σε $Bq\text{m}^{-3}$, που αντιπροσωπεύει το κατώτερο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99.87%, ως εξής:

$$LLD = \frac{MDA}{T_s DF AF} \quad (5.6)$$

όπου το μέγεθος T_s μετράται σε ώρες.

Η **εικοστή πέμπτη** στήλη υπολογίζει την ποσότητα LLD_h (Lower Limit of Detection) για ένα φιαλίδιο, σε $Bq\text{m}^{-3}$, που αντιπροσωπεύει το κατώτερο όριο ανίχνευσης χρονοσυγκέντρωσης Ραδονίου σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99.87%, ως εξής:

$$LLD_h = \frac{MDA}{DF AF} \quad (5.7)$$

5.6.4 Αβεβαιότητες πρωτοκόλλου βαθμονόμησης

Η **εικοστή έκτη** στήλη υπολογίζει το % πιθανό σφάλμα $e_{BKG}(\%)$ της μέτρησης του υποστρώματος (δεύτερη στήλη) με βάση τη σχέση [Λεωνίδου (1990), Σιμόπουλος (1989)]:

$$e_{BKG}(\%) = 2 \times 100 \times \frac{\sqrt{BKG \text{ in Counts}/60 \text{ min}}}{BKG \text{ in Counts}/60 \text{ min}} \quad (5.8)$$

Η **εικοστή έβδομη** στήλη καταγράφει το πιθανό σφάλμα της μέτρησης που λαμβάνεται από φιαλίδιο με το εκτεθέν προσροφητικό υλικό με τον υγρό σπινθηριστή ("Counts/60min", βλ. Δέκατη όγδοη στήλη). Το % πιθανό σφάλμα του αποτελέσματος αυτού μπορεί να υπολογίζεται από την σχέση που προτείνεται στον Gray (1987):

$$e(\%) = 2 \times 100 \times \frac{\sqrt{\text{Counts}/60 \text{ min} + \text{Counts}/60 \text{ min BKG}}}{\text{Counts}/60 \text{ min} - \text{Counts}/60 \text{ min BKG}} \quad (5.9)$$

5.6.5 Αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας βαθμονόμησης

Για την αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας προτείνεται το εξής σχήμα συνιστωσών αβεβαιότητας (βλ. και Μαρινάκης, 2007):

- από την "πηγή 1 βαθμονόμησης και παραγωγής Ραδονίου": ~ 3%
- από τον "όγκου θαλάμου Ραδονίου A": ~ 5%
- από το "χρόνο παραγωγής Ραδονίου": ~ 3%
- από το "χρόνο ωρίμανσης": ~5%
- από τη "μέτρηση υποστρώματος": βλ. και σχέση 5.8
- από τη "μέτρηση": βλ. και σχέση 5.9
- από την παραδοχή ότι " $\lambda' = \lambda$ " ~10%

Ο συνδυασμός των συνιστωσών αβεβαιότητας γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_c = \sqrt{\sum_1^v e_i^2} \quad (5.10)$$

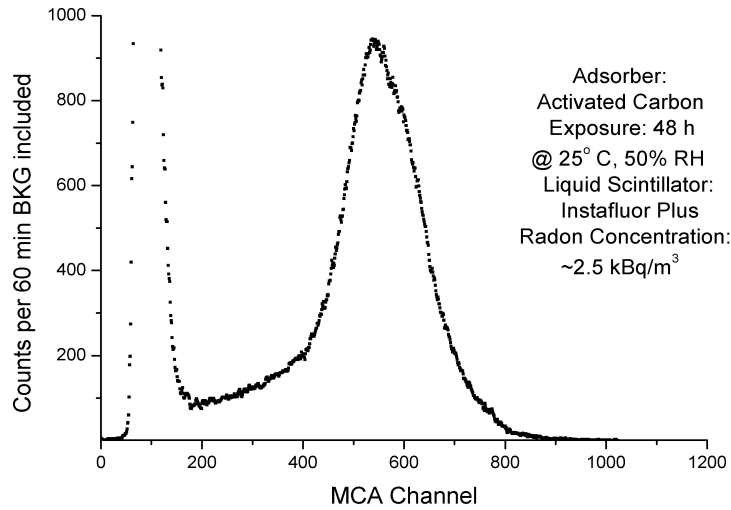
της οποίας το αποτέλεσμα καταγράφεται στην **εικοστή όγδοη** στήλη που δίνει την εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας της βαθμονόμησης

Οι τιμές που συγκεντρώνονται σε κάθε τέτοιο λογιστικό φύλλο χρησιμεύουν για τη δημιουργία του παραδειγματικού Διαγράμματος 5.4 με ενδεικτικές – πλασματικές τιμές συντελεστών βαθμονόμησης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για "χαμηλή", "μεσαία" και "υψηλή" σχετική υγρασία για κάθε προσροφητικό υλικό.

5.7 Συμπεράσματα

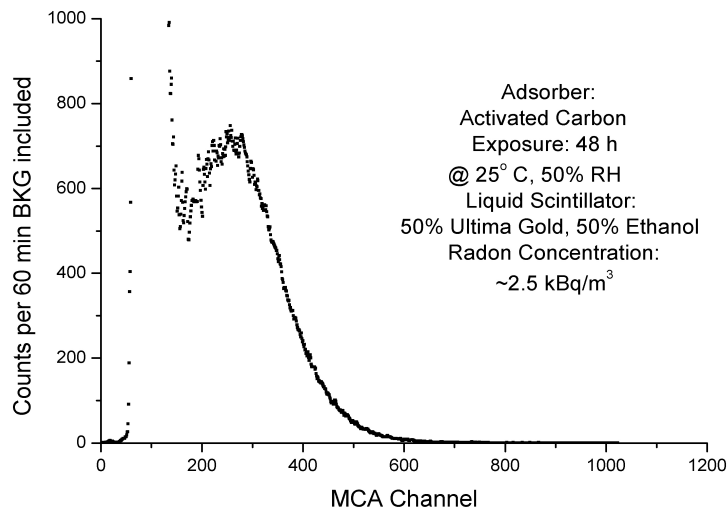
Στα προηγούμενα παρουσιάστηκαν επιχειρήματα για την επιλογή του καταλληλότερου υγρού σπινθηριστή, προτάθηκε ο τρόπος μέτρησης του υποστρώματος, και δόθηκαν οι σχέσεις που περιγράφουν το πρωτόκολλο βαθμονόμησης και υπολογίζουν το βαθμό απόδοσης της μεθόδου συμπεριλαμβανομένων των σχετικών σφαλμάτων. Στο επόμενο 6^ο Κεφάλαιο θα δοθούν τα πειραματικά αποτελέσματα και οι υπολογισμοί που προκύπτουν από αυτά και θα αναφερθούν και τα τελικά συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



Διάγραμμα 5.1

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μείγμα 4g ενεργού άνθρακα και Insta-Fluor Plus μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBq m⁻³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%



Διάγραμμα 5.2

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μείγμα 4g ενεργού άνθρακα και υγρό σπινθηριστή 50% Ultima Gold + 50% Ethanol, μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBq m⁻³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΛΑΦΡΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗΣ & ΥΓΡΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ	(%) ΕΛΑΦΡΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗΣ & (%) ΥΓΡΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ	ROI	Counts BKG per 60min	ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm)
09/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	27000	24	20	10.00	11.50
10/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	27000	24	20	10.00	11.50
12/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	27000	24	20	10.00	11.50
18/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	29300	24	50	10.00	11.40
19/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	29300	24	50	10.00	11.40
20/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	29300	24	50	10.00	11.40
25/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	31900	24	80	10.00	11.40
28/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	31900	24	80	10.00	11.40
29/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	31900	24	80	10.00	11.40
30/10/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	31400	48	20	10.00	11.40
01/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	31400	48	20	10.00	11.40
02/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	31400	48	20	10.00	11.40
03/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	26600	48	50	10.00	11.40
04/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	26600	48	50	10.00	11.40
05/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	26600	48	50	10.00	11.40
06/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	32500	48	80	10.00	11.40
07/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	32500	48	80	10.00	11.40
08/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	32500	48	80	10.00	11.40
09/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	30700	72	20	10.00	11.40
10/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	30700	72	20	10.00	11.40
11/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	30700	72	20	10.00	11.40
12/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	34800	72	50	10.00	11.40
13/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	34800	72	50	10.00	11.40
14/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	34800	72	50	10.00	11.40
15/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	34400	72	80	10.00	11.40
16/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	34400	72	80	10.00	11.40
18/11/2007	METH - UG	10 - 90	400-600	34400	72	80	10.00	11.40

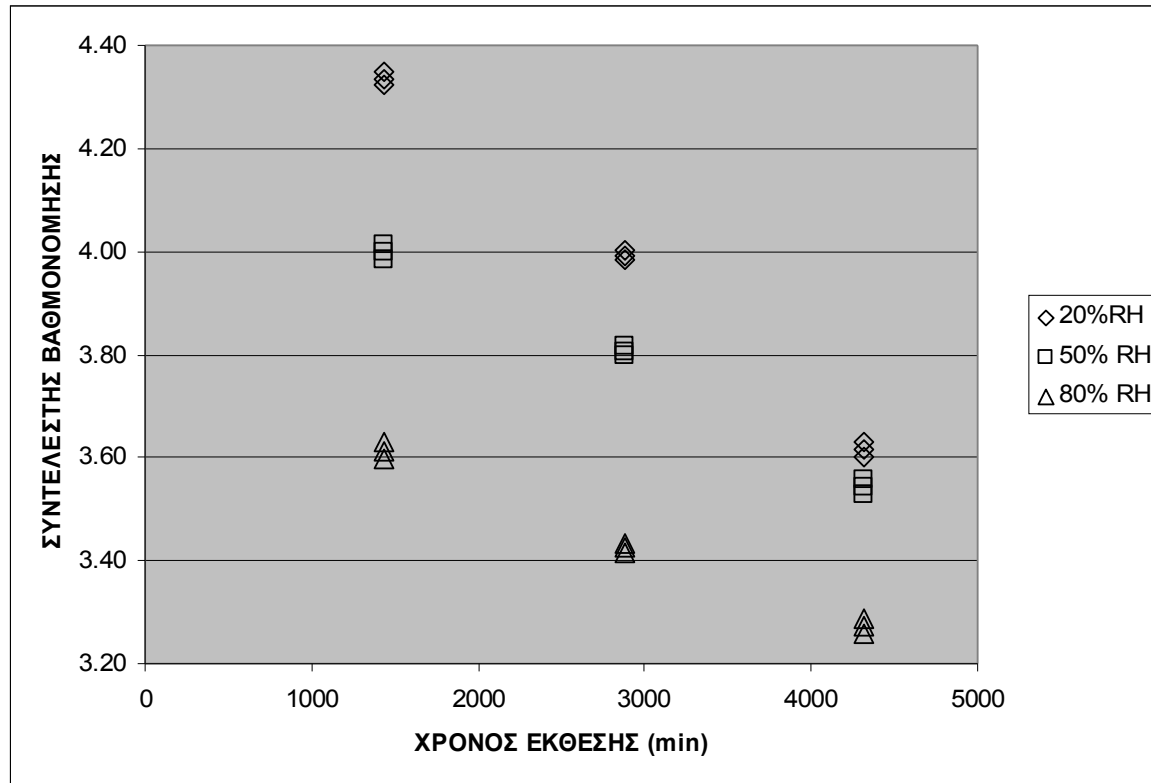
Διάγραμμα 5.3α

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης της μεθόδου (σχέση 5.4), του μεγέθους MDA (σχέση 5.5), του μεγέθους LLD (σχέση 5.6), του μεγέθους LLD_h (σχέση 5.7), των σφαλμάτων (σχέσεις 5.8 και 5.9) και της αβεβαιότητας (σχέση 5.10) – Μέρος Α

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
ΧΡΟΝΟΣ t (min)	DF	Counts per 60min	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ σε καθαρά Counts ανά 60 min ανά Βq/m ³	MDA	LLD Βq/m ³	LLD _h Βq/m ³	ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (%)	ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (%)	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (%)
2290	0.75	168700	4.34	492.95	6.32	151.73	1.22	0.62	14.56
2290	0.75	169100	4.35	492.95	6.30	151.30	1.22	0.62	14.56
2290	0.75	168300	4.32	492.95	6.34	152.16	1.22	0.63	14.56
2290	0.75	160000	4.00	513.52	7.14	171.36	1.17	0.67	14.56
2290	0.75	160500	4.01	513.52	7.11	170.71	1.17	0.66	14.56
2290	0.75	159500	3.98	513.52	7.17	172.02	1.17	0.67	14.56
2290	0.75	150000	3.61	535.82	8.25	197.88	1.12	0.72	14.56
2290	0.75	150500	3.63	535.82	8.21	197.05	1.12	0.72	14.56
2290	0.75	149500	3.60	535.82	8.28	198.72	1.12	0.72	14.56
3010	0.68	250000	3.99	531.60	4.05	194.53	1.13	0.49	14.55
3010	0.68	250500	4.00	531.60	4.04	194.09	1.13	0.48	14.55
3010	0.68	249500	3.98	531.60	4.06	194.98	1.13	0.49	14.55
3010	0.68	234500	3.80	489.29	3.92	188.26	1.23	0.49	14.56
3010	0.68	235500	3.82	489.29	3.90	187.36	1.23	0.49	14.56
3010	0.68	235000	3.81	489.29	3.91	187.81	1.23	0.49	14.56
3010	0.68	220000	3.42	540.83	4.81	230.74	1.11	0.54	14.55
3010	0.68	220450	3.43	540.83	4.80	230.18	1.11	0.54	14.55
3010	0.68	219500	3.42	540.83	4.82	231.35	1.11	0.54	14.55
3730	0.63	280000	3.62	525.64	3.23	232.64	1.14	0.45	14.55
3730	0.63	281000	3.63	525.64	3.22	231.71	1.14	0.45	14.55
3730	0.63	279000	3.60	525.64	3.24	233.57	1.14	0.45	14.55
3730	0.63	280000	3.56	559.64	3.50	251.83	1.07	0.46	14.55
3730	0.63	279000	3.54	559.64	3.51	252.86	1.07	0.46	14.55
3730	0.63	278000	3.53	559.64	3.53	253.90	1.07	0.46	14.55
3730	0.63	260000	3.27	556.42	3.78	272.13	1.08	0.48	14.55
3730	0.63	261000	3.29	556.42	3.76	270.93	1.08	0.48	14.55
3730	0.63	259000	3.26	556.42	3.80	273.34	1.08	0.48	14.55

Διάγραμμα 5.3γ

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης της μεθόδου (σχέση 5.4), του μεγέθους MDA (σχέση 5.5), του μεγέθους LLD (σχέση 5.6), του μεγέθους LLD_h (σχέση 5.7), των σφαλμάτων (σχέσεις 5.8 και 5.9) και της αβεβαιότητας (σχέση 5.10) – Μέρος Γ



Διάγραμμα 5.4

Συντελεστές βαθμονόμησης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για "χαμηλή" (20% RH), "μεσαία" (50% RH) και "υψηλή" σχετική υγρασία (παραδειγματικό διάγραμμα με ενδεικτικές -πλασματικές τιμές από το λογιστικό φύλλο "Λ")

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια, στο πειραματικό μέρος της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας δοκιμάστηκαν τρία προσροφητικά υλικά, προκειμένου να διαπιστωθεί, αν αυτά μπορούν να χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές Ραδονίου όταν μετρώνται με την μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Τα υλικά αυτά είναι: (α) Ενεργός άνθρακας εμπορίου, (β) Συνθετικός ζεόλιθος με μέγεθος πόρου 0.5 nm και 1nm, και (γ) Silica gel blue αφυγραντικό υλικό. Τα πειράματα έκθεσης πραγματοποιήθηκαν σε έναν από τους θαλάμους Ραδονίου του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, όγκου 1.9 m³, σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για δύο υγρούς σπινθηριστές τον Insta-Fluor Plus και τον Ultima Gold, αναμεμιγμένους με διάφορα ποσοστά μεθανόλης ή αιθανόλης. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν δείχνουν ότι όπως και αναμενόταν, ο ενεργός άνθρακας μπορεί να συγκροτήσει ανιχνευτές Ραδονίου, αν ικανή μάζα του τοποθετηθεί σε κατάλληλα φιαλίδια υγρού σπινθηρισμού και μετρηθούν με κατάλληλο σπινθηριστή με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Σχετικά πιο αυστηρές προϋποθέσεις διατυπώνονται για το ζεόλιθο με μέγεθος πόρων 1 nm και ακόμα πιο αυστηρές για τον ζεόλιθο με μέγεθος πόρων 0.5 nm και για τον αφυγραντή silica gel blue, οι οποίοι φαίνεται να παρουσιάζουν χαμηλό βαθμό απόδοσης και φυσικά υψηλό κατώτατο όριο ανίχνευσης. Όπως αναμένεται επαληθεύθηκε από τα πειράματα ότι η ποσότητα του Ραδονίου που προσροφάται στα προσροφητικά υλικά είναι ανάλογη με την μέση συγκέντρωση του Ραδονίου που επικρατούσε στο θάλαμο έκθεσης.

6.2 Η χαμηλή απόδοση του ζεολίθου με μέγεθος πόρου 0.5 nm

Στο Διάγραμμα 6.1 δίνεται το φάσμα που προκύπτει από δοκιμαστικό πείραμα από την μέτρηση 4g συνθετικού ζεολίθου 0.5 nm με υγρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus για έκθεση επί 48h σε 2.5 kBq m⁻³ Ραδονίου, στους 25° C, σε σχετική υγρασία 50%. Το σήμα που οφείλεται στο προσροφηθέν Ραδόνιο και τα θυγατρικά του δεν είναι καθαρό και διακρίνεται ως μικρή κορυφή δεξιά στο φάσμα. Η συνεπαγόμενη χαμηλή απόδοση του ζεολίθου 0.5 nm ως ανιχνευτή Ραδονίου με αυτή τη μέθοδο εκτιμάται ότι οφείλεται στο μικρό μέγεθος των πόρων, το οποίο δεν επιτρέπει στα μόρια του

υγρού σπινθηριστή να εισέλθουν στο εσωτερικό τους για να παραλάβουν το Ραδόνιο και να το οδηγήσουν έξω από το προσροφητικό υλικό. Έξω από το προσροφητικό υλικό το Ραδόνιο παράγει ως γνωστό θυγατρικά τα οποία αλληλεπιδρούν με το σπινθηριστή και το παραγόμενο φως μπορεί να φθάσει στον φωτοπολλαπλασιαστή της συσκευής υγρού σπινθηρισμού προς μέτρηση. Στο Διάγραμμα 6.2 διακρίνονται δενδρίτες μικρών πόρων, με μέγεθος που εμποδίζει τον υγρό σπινθηριστή που απεικονίζεται ως σφαίρες, να εισέλθει μέχρι το βάθος. Οι δοκιμές με συνθετικό ζεόλιθο με μέγεθος πόρου 1nm (βλ. πχ και το φάσμα στο Διάγραμμα 6.3), έδειξαν αντίθετα ότι υπάρχει υψηλότερη απόδοση αυτού του υλικού ως ανιχνευτή Ραδονίου με τη μέθοδο του υγρού σπινθηρισμού. Ο βαθμός απόδοσης όμως αυτός υπολείπεται κατά πολύ από εκείνον του ενεργού άνθρακα. Το φαινόμενο ερμηνεύεται διότι το μέγεθος πόρων του συνθετικού ζεολίθου 1 nm είναι σημαντικά μικρότερο από το μέγεθος πόρων του ενεργού άνθρακα, το οποίο, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία βρίσκεται στην περιοχή από περίπου 1.5 nm έως περίπου 3 nm (βλ. πχ και Nakayama, 1997). Με βάση τη χαμηλή απόδοση του ζεολίθου με μέγεθος πόρων 0.5nm, που βρέθηκε με τα δοκιμαστικά πειράματα, αποφασίστηκε ότι στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας συστηματικές δοκιμές έπρεπε να γίνουν μόνο με το ζεόλιθο με μέγεθος πόρων 1nm.

6.3 Η χαμηλή απόδοση του silica gel

Στο Διάγραμμα 6.4 δίνεται το φάσμα που προκύπτει δοκιμαστικό πείραμα από την μέτρηση 4g silica gel με υγρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus για έκθεση επί 48h σε 2.5 kBq^m-3 Ραδονίου, στους 25° C, σε σχετική υγρασία 50%. Το σήμα που οφείλεται στο προσροφηθέν Ραδόνιο και τα θυγατρικά του δεν είναι καθαρό και διακρίνεται ως μικρή κορυφή δεξιά στο φάσμα. Η συνεπαγόμενη χαμηλή απόδοση του silica gel ως ανιχνευτή Ραδονίου με αυτή τη μέθοδο εκτιμάται ότι επίσης οφείλεται στο μικρό μέγεθος των πόρων του. Με βάση τη χαμηλή απόδοση του silica gel με μέγεθος πόρων 0.5nm, που βρέθηκε με τα δοκιμαστικά πειράματα, αποφασίστηκε ότι στα πλαίσια της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας ήταν άσκοπο να γίνουν συστηματικές δοκιμές με αυτό το υλικό.

6.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Το τυπικό λογιστικό φύλλο MS Excel® "Α" (βλ. και την πλήρη περιγραφή του στο 5ο Κεφάλαιο), το οποίο προβαίνει αυτόματα στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης,

και του κατώτερου ορίου ανίχνευσης του εκτεθέντος προσροφητικού υλικού, συμπληρώθηκε κατά τη μετρητική διαδικασία για κάθε ένα από τα δύο συστηματικά εξεταζόμενα προσροφητικά υλικά. Προέκυψαν οι Πίνακες αποτελεσμάτων 6.1 (α,β,γ) και 6.2 (α,β,γ) για τα προσροφητικά υλικά "Ενεργός Άνθρακας" και "Συνθετικός Ζεόλιθος 1 nm", με χρήση διαφόρων αναλογιών υγρών σπινθηριστών με αιθανόλη και μεθανόλη. Σημειώνεται ότι:

- Η τέταρτη στήλη του λογιστικού φύλλου περιέχει εκτός από το ROI, σε παρένθεση, το εύρος των καναλιών στο οποίο διαπιστώνεται η κορυφή που οφείλεται στο Ραδόνιο και στα θυγατρικά του τα οποία μετρώνται στη συσκευή υγρού σπινθηρισμού και επίσης το κέντρο της κορυφής αυτής. Οι ποσότητες αυτές προέκυψαν από οπτική επεξεργασία των συλλεχθέντων φασμάτων.
- Σε περίπτωση που στην τέταρτη στήλη αναγράφεται ROI "0-1024" και στην 5η στήλη αναγράφεται υπόστρωμα "0", τότε στο φάσμα που συλλέχθηκε δεν αναγνωρίζεται κορυφή, με κύρια αιτία τη σβέση.
- Στην 5η στήλη (του υποστρώματος) οι τιμές με έντονους αριθμούς είναι κατ'εκτίμηση υπολογισμοί, οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν διότι τα τελευταία πειράματα της Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκαν λιγότερο από 20 ημέρες πριν την ημερομηνία εξέτασης, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ληφθούν καλά φάσματα υποστρώματος, τα φιαλίδια δηλαδή είχαν ακόμα παραμένον Ραδόνιο που δεν είχε πλήρως διασπασθεί. Τυχόν σφάλμα στη εκτίμηση αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση του εξεταζόμενου ζεολίθου διότι το υπόστρωμα είναι αρκετά κοντά ως μέγεθος στο μετρούμενο σήμα, ενώ δεν παίζει σχεδόν κανένα ρόλο στην περίπτωση του ενεργού άνθρακα διότι το υπόστρωμα είναι αμελητέο κλάσμα του μετρούμενου σήματος.

Διαπιστώνεται γενικά από τους πίνακες αυτούς ότι, όσο αφορά στο προσροφητικό μέσο συνθετικός ζεόλιθος 1 nm η απόδοση της μεθόδου είναι σχεδόν δύο τάξεις μεγέθους κάτω από αυτήν όταν χρησιμοποιείται προσροφητικό υλικό άνθρακας. (βλ. πχ τις στήλες των συντελεστών βαθμονόμησης και των κατώτερων ορίων ανίχνευσης).

6.5 Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας

Από τους πίνακες των Λογιστικών Φύλλων προέκυψαν τα ακόλουθα 8 Διαγράμματα 6.5 έως και 6.12. Τα πρώτα 4 Διαγράμματα (6.5 έως και 6.8) αφορούν στο προσροφητικό υλικό "Ενεργός Άνθρακας". Τα επόμενα 4 (6.9 έως 6.12) αφορούν στο προσροφητικό υλικό "Συνθετικός Ζεόλιθος με μέγεθος πόρων 1nm ή 10Å (Angstrom)". Από τα Διαγράμματα αυτά προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(1) Επαληθεύεται ότι ο ενεργός άνθρακας ως προσροφητικό υλικό σε συνδυασμό με κατάλληλο υγρό σπινθηριστή μπορεί να εκτιμήσει συγκεντρώσεις Ραδονίου στην ατμόσφαιρα με πολύ χαμηλό κατώτερο όριο ανίχνευσης κάτω από 5Bqm^{-3} , και αβεβαιότητα περίπου 15%, για τις συνθήκες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν.

(2) Διαπιστώθηκε ότι εκτός από τον ελαφρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus, ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως σε τέτοιες μεθόδους ανίχνευσης συγκέντρωσης Ραδονίου, σχεδόν εξίσου καλά μπορεί να χρησιμοποιείται και ο βαρύτερος σπινθηριστής Ultima Gold.

(3) Διαπιστώθηκε ότι ο ζεόλιθος που δοκιμάστηκε δεν ήταν εξίσου ή έστω συγκρίσιμα αποδοτικός. Παρόλαυτά, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί καταχρηστικά σε περιπτώσεις που η συγκέντρωση Ραδονίου είναι πάνω από 100Bqm^{-3} με αβεβαιότητα επίσης στην περιοχή του 15%.

(4) Επαληθεύθηκαν τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία από τον Prichard (1983b) ότι όταν οι υγροί σπινθηριστές έρθουν σε επαφή με προσροφητές δημιουργείται έντονη εξώθερμη αντίδραση και πολλές φυσαλίδες, οι οποίες συμβάλλουν στην αβεβαιότητα της μεθόδου. Κατά φθίνουσα σειρά έντασης αντίδρασης κατατάσσονται τα μίγματα

Insta-Fluor Plus + Ενεργός Άνθρακας

Ultima Gold + Ενεργός Άνθρακας

Insta-Fluor Plus + Συνθετικός Ζεόλιθος

Ultima Gold + Συνθετικός Ζεόλιθος

(5) Διαπιστώθηκε ότι αν οι σπινθηριστές αραιωθούν με αιθανόλη και κατά δεύτερο λόγο με μεθανόλη, σε αναλογία πάνω από 20-30%, τότε η αντίδρασή τους με τους προσροφητές μειώνεται σημαντικά. Η μεθανόλη πάντως δεν λειτουργεί τόσο καλά

διότι λόγω μεγάλης διαφοράς MB από τους σπινθηριστές δεν αναμιγνύεται άριστα με αυτούς. Η ανάμιξη γίνεται πολύ καλύτερα με την αιθανόλη.

(6) Αραιώνοντας τους σπινθηριστές με μεθανόλη ή αιθανόλη, αυτοί αποδίδουν ως εξής:

(6α) Με ενεργό άνθρακα μέχρι περίπου αναλογία 50-50%. Σε μεγαλύτερη αραιώση κατά κανόνα το σήμα χάνεται μέσα στη κορυφή του θορύβου.

(6β) Με ζεόλιθο μέχρι και πολύ χαμηλή αναλογία.

Το συμπέρασμα (6α) επαληθεύει αυτά που αναφέρονται στον Perlman (1990), όπου οι προτεινόμενες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη είναι από 5 έως 50%.

(7) Οι υψηλότερες αποδόσεις με αραιωμένους σπινθηριστές είναι στην περιοχή αναλογιών 10 – 50%.

(8) Το κανάλι στο οποίο καταγράφεται το κέντρο της αναζητούμενης κορυφής είναι τόσο μεγαλύτερο όσο η αραιώση είναι μικρότερη.

(9) Ως γενικός κανόνας το εύρος του ROI είναι τόσο μεγαλύτερο όσο η αραιώση είναι μικρότερη

(10) Στα Διαγράμματα 6.13 και 6.14 παρουσιάζονται τυπικά φάσματα από εκθέσεις ενεργού άνθρακα και συνθετικού ζεολίθου 1nm, σε περίπου ίδιες συνθήκες μετρημένα με υγρό σπινθηριστή Insta-Fluor Plus και αραιώση κατά 40% με αιθανόλη. Αν αυτά τα φάσματα συγκριθούν με τα Διαγράμματα 6.1 και 6.4, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όσο μικρότεροι οι πόροι του προσροφητικού υλικού τόσο λιγότερη σβέση παρουσιάζεται. Υπενθυμίζεται, ότι ο ενεργός άνθρακας έχει μέγεθος πόρων περίπου μέχρι 3nm, ενώ εκτιμάται ότι το silica gel έχει μέγεθος πόρων μικρότερο από 0.5nm.

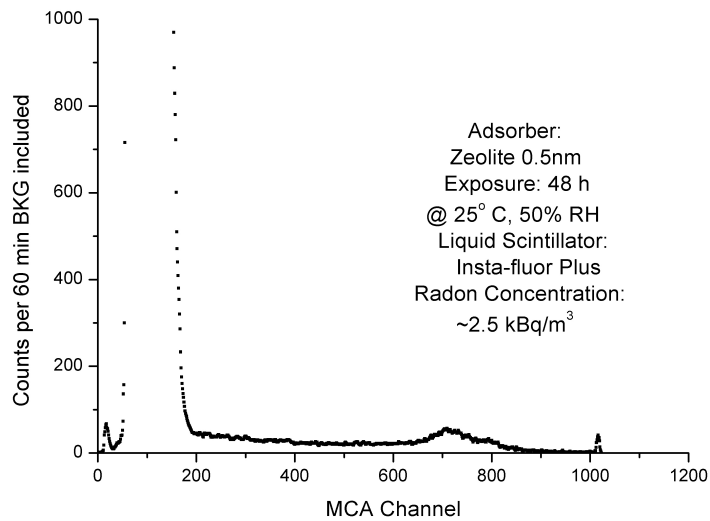
(11) Οι τιμές του υποστρώματος δεν μπορούν να διαπιστωθούν αν αφαιρεθεί η καθαρή επιφάνεια της κορυφής του φάσματος, από την επιφάνεια της κορυφής συμπεριλαμβανομένου του υποστρώματος του φάσματος. Αυτό συμβαίνει διότι το υπόστρωμα του φάσματος εξαρτάται από το αν γενικά γίνονται αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας με τον σπινθηριστή. Το πραγματικό υπόστρωμα είναι πολύ χαμηλότερο και διαπιστώνεται μόνο αν δεν γίνονται αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας με τον σπινθηριστή, δηλαδή όταν έχουν περάσει 20 ημέρες και το διαλυμένο Ραδόνιο έχει διασπασθεί.

6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία, προστέθηκε στο Εργαστήριο με πολύ επιτυχία μία ακόμα αναλυτική μέθοδος μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα με χρήση της μεθόδου του υγρού σπινθηρισμού και προσροφητικό υλικό τον ενεργό άνθρακα. Επίσης, διερευνήθηκε πόσο επηρεάζεται η απόδοση της μεθόδου από την αραίωση των υγρών σπινθηριστών με ελαφρούς διαλύτες και μέχρι ποια μέγιστη αναλογία είναι δυνατή αυτή αραίωση προκειμένου να μην υπάρχει σβέση και ο βαθμός απόδοσης να είναι βέλτιστος. Η αραίωση είναι επιθυμητή, διότι περιορίζει σημαντικά την εξώθερμη αντίδραση του υγρού σπινθηριστή με το προσροφητικό υλικό και την ταυτόχρονη δημιουργία φυσαλίδων που προσθέτουν αβεβαιότητα στη μέθοδο.

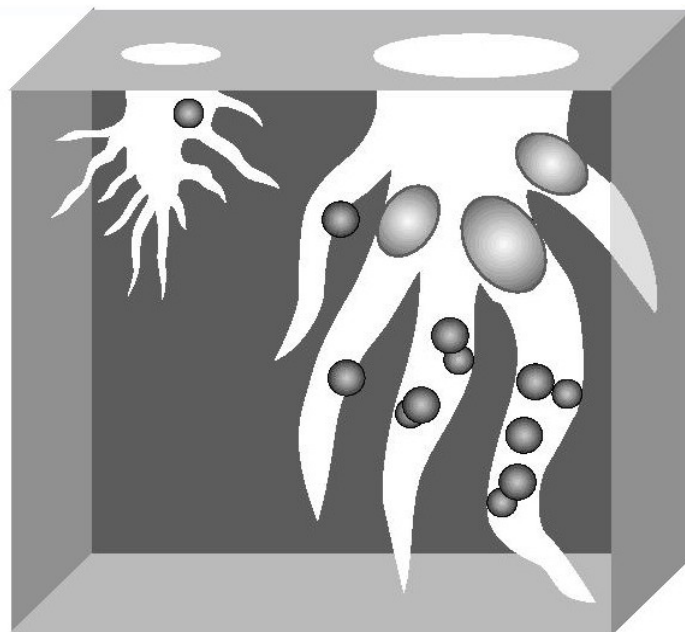
Παρόλο που στη Διπλωματική Εργασία του Πασχαλίδη (2008) προσδιορίστηκε ότι ο συνθετικός ζεόλιθος προσροφά Ραδόνιο με παρόμοιο τρόπο που το κάνει και ο ενεργός άνθρακας, στην παρούσα Εργασία, διαπιστώθηκε ότι ο υγρός σπινθηριστής δεν μπορεί να το παραλάβει εύκολα από τους πόρους του, τουλάχιστον για το μέγεθος πόρων που δοκιμάστηκε δηλ. μέχρι 1nm. Για μελλοντική έρευνα προτείνεται να δοκιμασθούν και άλλοι ζεόλιθοι με μεγαλύτερο μέγεθος πόρων με τους υγρούς σπινθηριστές που χρησιμοποιήθηκαν και εδώ και την κατάλληλη βέλτιστη αραίωση με αιθανόλη. Το πρόβλημα είναι ότι τέτοιοι ζεόλιθοι με μεγαλύτερο μέγεθος πόρων δεν κατασκευάζονται συνθετικά. Προτείνεται επομένως να δοκιμασθούν ορυκτοί ζεόλιθοι που χρησιμοποιούνται πχ στην κηπουρική και τον καθαρισμό υγρών και αερίων.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ 6ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ



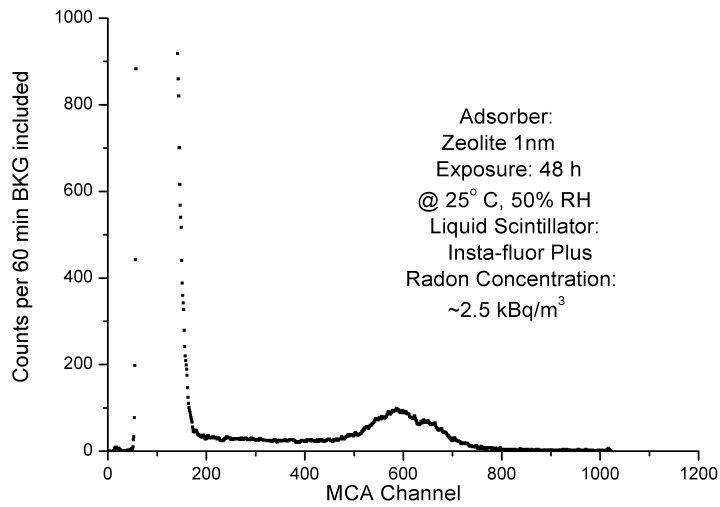
Διάγραμμα 6.1

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μείγμα 4g ζεόλιθο με πόρους 0.5nm και Insta-Fluor Plus μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBq m⁻³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%



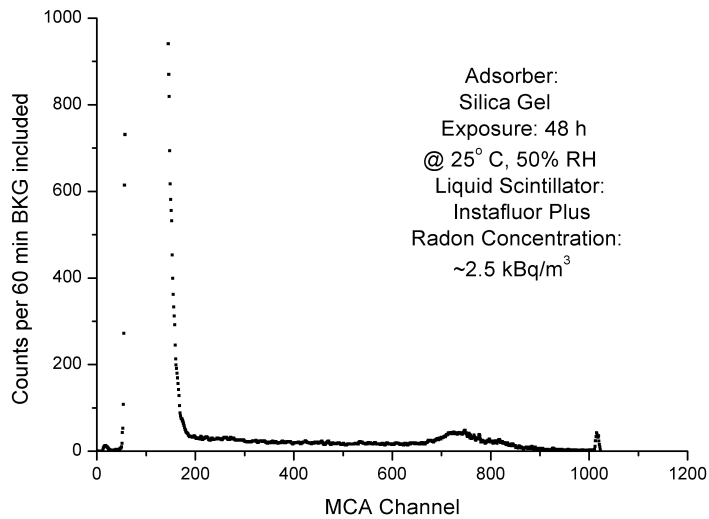
Διάγραμμα 6.2

Τα στερεά θυγατρικά του Ραδονίου πιθανόν εμποδίζουν την διέλευσή του μέσα από τους μικρούς πόρους των 0.5nm προς τον υγρό σπινθηριστή.



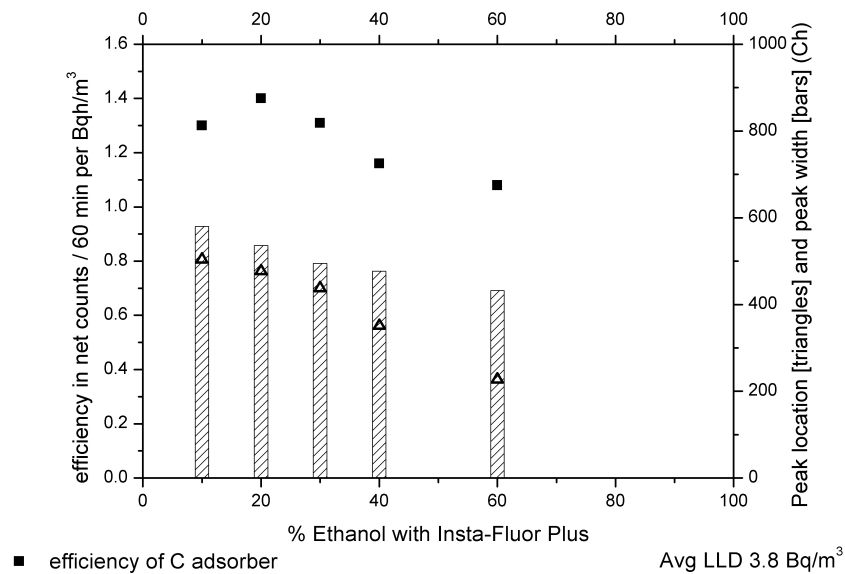
Διάγραμμα 6.3

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μείγμα 4g ζεόλιθο με πόρους 1nm και Insta-Fluor Plus μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBqm⁻³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%



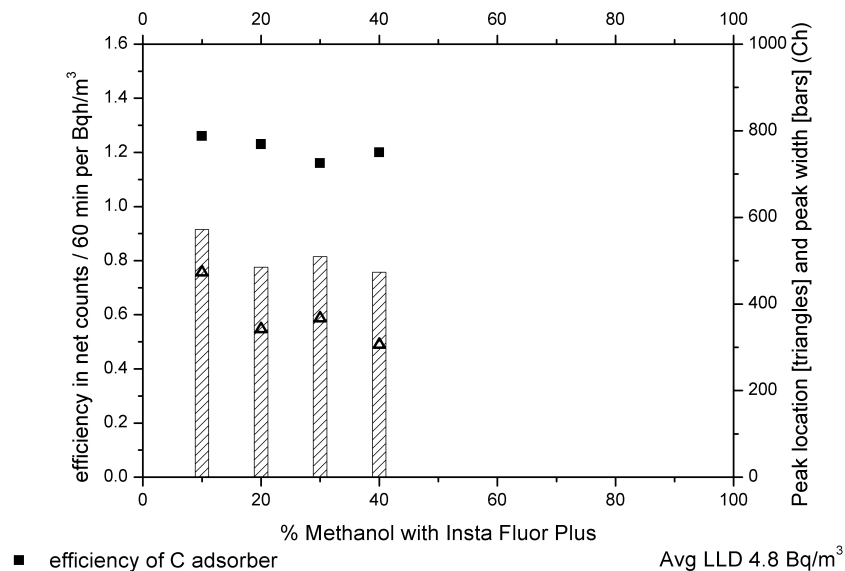
Διάγραμμα 6.4

Φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μείγμα 4g silica gel και Insta-Fluor Plus μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBqm⁻³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%



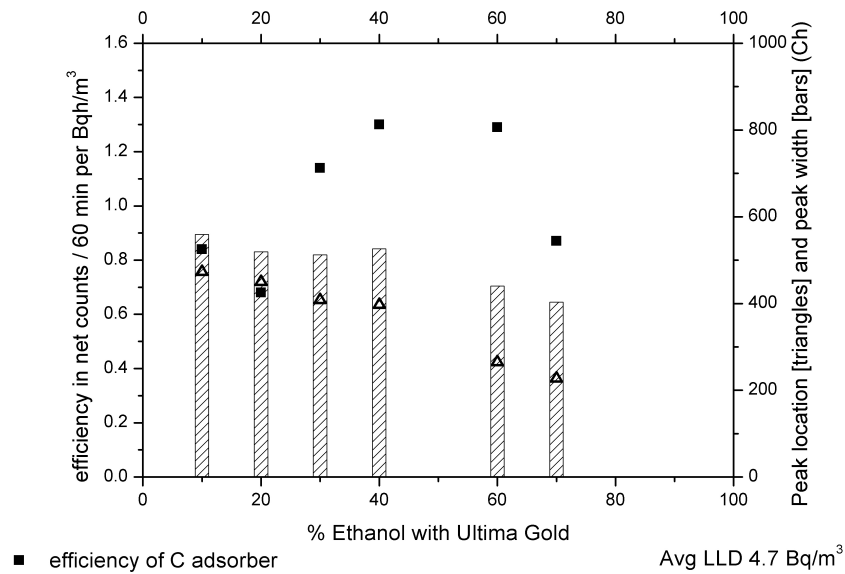
Διάγραμμα 6.5

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή ενεργού άνθρακα με σπινθηριστή Insta-Fluor Plus σε διάφορες αραιώσεις με αιθανόλη. Για μεγάλη αραιώση διαπιστώνεται απουσία σήματος λόγω σβέσης. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



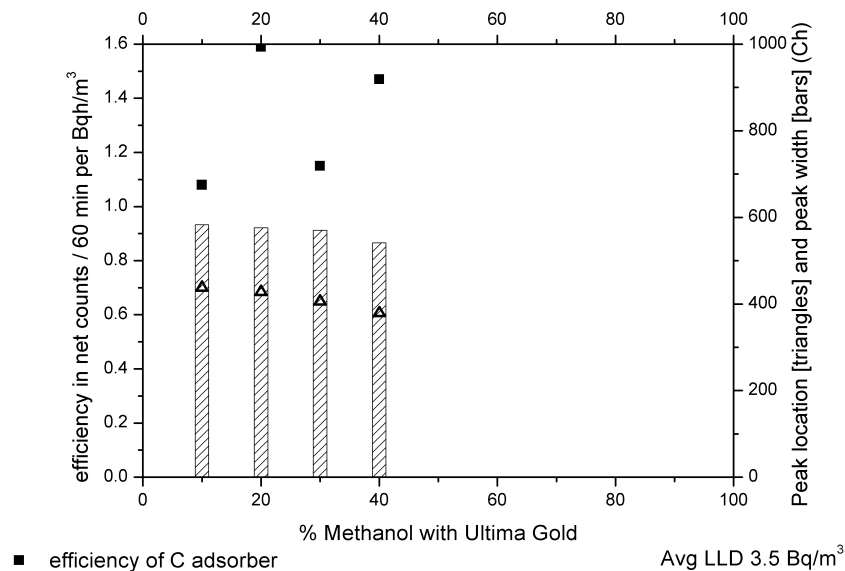
Διάγραμμα 6.6

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή ενεργού άνθρακα με σπινθηριστή Insta-Fluor Plus σε διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη. Για μεγάλη αραιώση διαπιστώνεται απουσία σήματος λόγω σβέσης. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



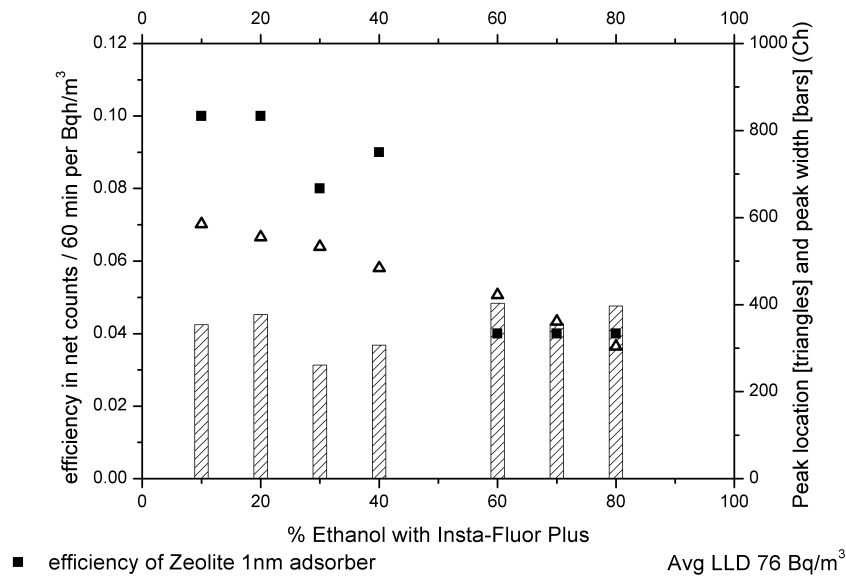
Διάγραμμα 6.7

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή ενεργού άνθρακα με σπινθηριστή Ultima Gold σε διάφορες αραιώσεις με αιθανόλη. Για μεγάλη αραιώση διαπιστώνεται απουσία σήματος λόγω σβέσης. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



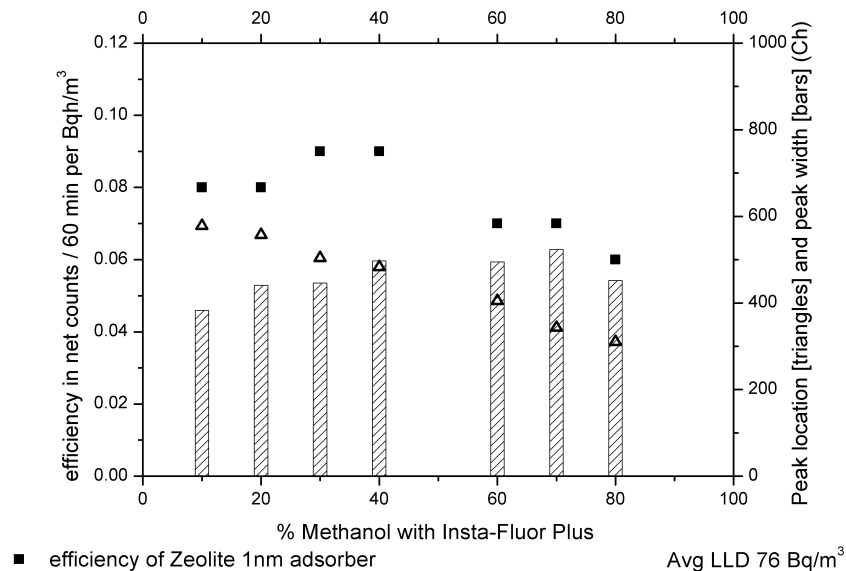
Διάγραμμα 6.8

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή ενεργού άνθρακα με σπινθηριστή Ultima Gold σε διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη. Για μεγάλη αραιώση διαπιστώνεται απουσία σήματος λόγω σβέσης. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



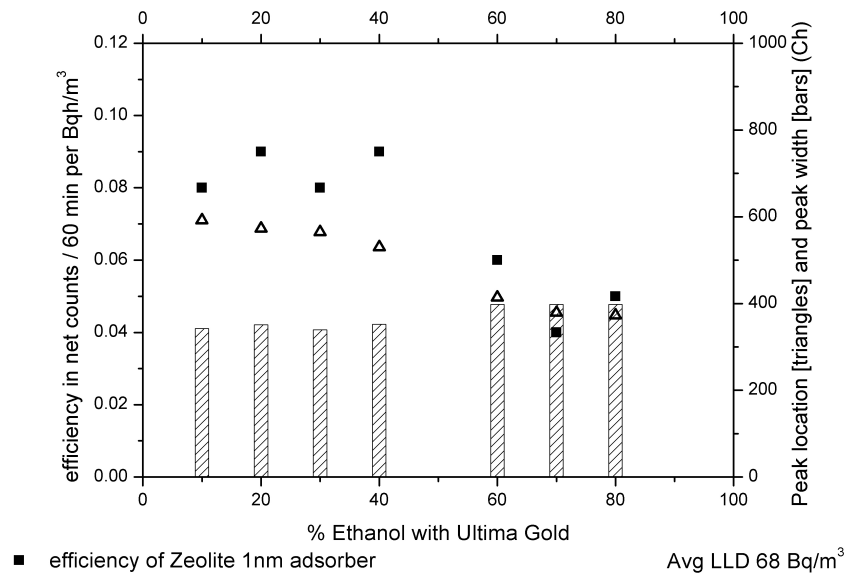
Διάγραμμα 6.9

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή συνθετικού ζεολίθου (1nm) με σπινθηριστή Insta-Fluor Plus σε διάφορες αραιώσεις με αιθανόλη. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



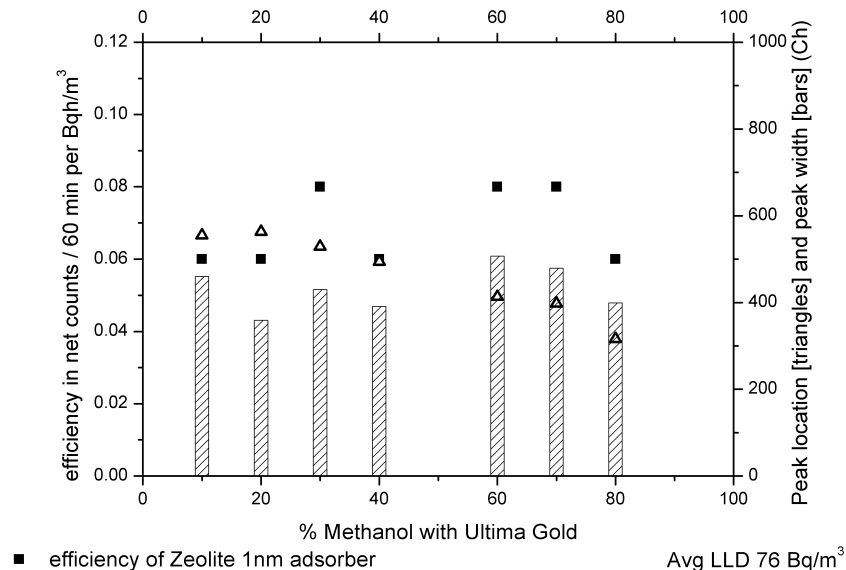
Διάγραμμα 6.10

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή συνθετικού ζεολίθου (1nm) με σπινθηριστή Insta-Fluor Plus σε διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



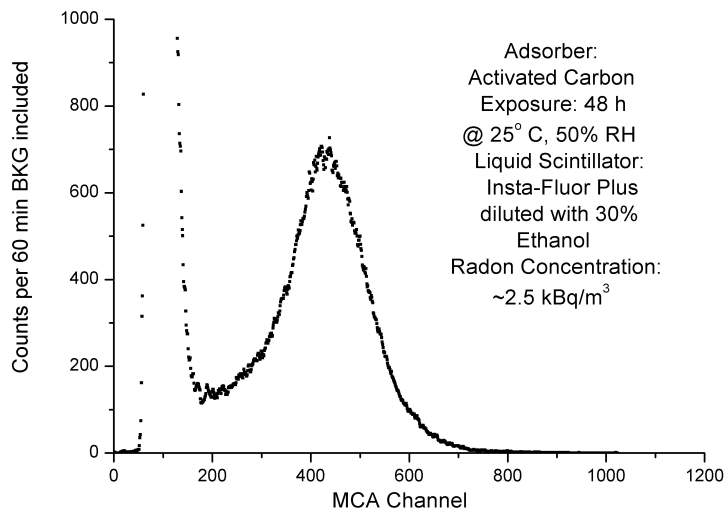
Διάγραμμα 6.11

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή συνθετικού ζεολίθου (1nm) με σπινθηριστή Ultima Gold σε διάφορες αραιώσεις με αιθανόλη. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



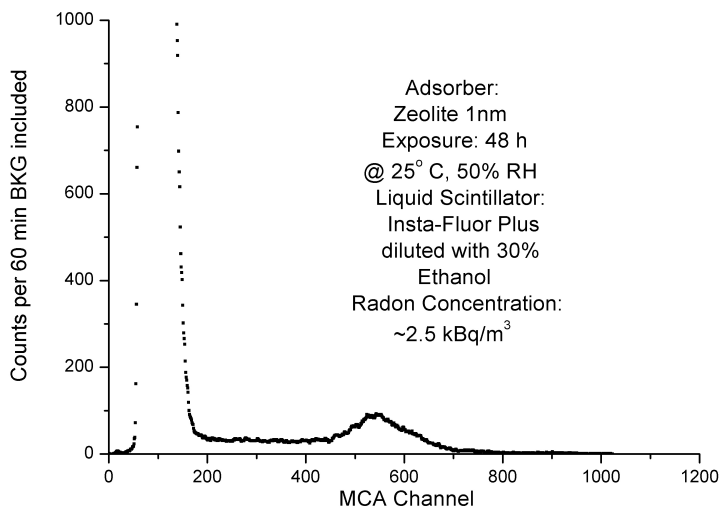
Διάγραμμα 6.12

Βαθμός απόδοσης (τετράγωνα) προσροφητή συνθετικού ζεολίθου (1nm) με σπινθηριστή Ultima Gold σε διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη. Δίνονται και οι θέσεις (τρίγωνα) και το εύρος της ανιχνευόμενης κορυφής (μπάρες) σε κανάλια.



Διάγραμμα 6.13

Τυπικό φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μίγμα 4g ενεργό άνθρακα και Insta-Fluor Plus αραιωμένο με 30% αιθανόλη, μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBq/m³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%



Διάγραμμα 6.14

Τυπικό φάσμα υγρού σπινθηρισμού από μίγμα 4g ενεργό άνθρακα και Insta-Fluor Plus αραιωμένο με 30% αιθανόλη, μετά από έκθεση 48 h σε συγκέντρωση Ραδονίου 2.5 kBq/m³ στους 25° C με σχετική υγρασία 50%

ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΟΥ 6ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1	2	3	4	5	6	8	9
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΛΑΦΡΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗΣ & ΥΓΡΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ	(%) ΕΛΑΦΡΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗΣ & (%) ΥΓΡΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ	ROI (WIDTH, PEAK)	Counts BKG per 60min	ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (HH.mm)
27/08/2012	ΕΤΗ-UG	60-40	160-600 (440, 265)	3293	48	15.42	20.05
27/08/2012	ΕΤΗ-UG	70-30	197-600 (403, 227)	2395	48	15.42	20.05
27/08/2012	ΕΤΗ-UG	80-20	0-1024	0	48	15.42	20.05
27/08/2012	ΕΤΗ-IF	60-40	168-600 (432, 227)	2959	48	15.42	20.05
27/08/2012	ΕΤΗ-IF	70-30	0-1024	0	48	15.42	20.05
27/08/2012	ΕΤΗ-IF	80-20	0-1024	0	48	15.42	20.05
27/08/2012	ΕΤΗ-IF	90-10	0-1024	0	48	15.42	20.05
06/09/2012	ΜΕΤΗ-UG	60-40	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-UG	70-30	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-UG	80-20	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-UG	90-10	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-IF	60-40	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-IF	70-30	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-IF	80-20	0-1024	0	48	16.14	21.57
06/09/2012	ΜΕΤΗ-IF	90-10	0-1024	0	48	16.14	21.57
04/10/2012	ΜΕΤΗ-UG	10-90	169-752 (583, 438)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-UG	20-80	176-752 (576, 428)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-UG	30-70	174-744 (570, 406)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-UG	40-60	163-704 (541, 379)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-IF	10-90	183-755 (572, 473)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-IF	20-80	154-639 (485, 342)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-IF	30-70	157-666 (509, 367)	2900	48	12.35	21.32
04/10/2012	ΜΕΤΗ-IF	40-60	148-621 (473, 306)	2900	48	12.35	21.32
14/10/2012	ΕΤΗ-UG	10-90	192-751 (559, 473)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-UG	20-80	187-706 (519, 450)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-UG	30-70	182-694 (512, 408)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-UG	40-60	182-708 (526, 397)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-IF	10-90	179-759 (580, 504)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-IF	20-80	200-736 (536, 477)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-IF	30-70	192-687 (495, 438)	2900	48	15.44	19.24
14/10/2012	ΕΤΗ-IF	40-60	163-640 (477, 351)	2900	48	15.44	19.24

Πίνακας 6.1α

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του ενεργού άνθρακα και άλλων σχετικών μεγεθών (βλ. και στο 5^ο Κεφάλαιο), για διάφορους υγρούς σπινθηριστές και διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη. Πειραματικά αποτελέσματα – Μέρος Α

10	11	12	13	14	15	16	17	18
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (min)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq·m ⁻³)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T _α (min)	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq·m ⁻³)	ΕΚΠΟΣΥΡΕ MIDPOINT (min)	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH.mm)
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	11.20
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	12.30
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	13.40
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	14.50
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	20.35
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	21.40
263	4705.68	20.05	20.44	2919	3937.33	1460	1	22.45
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	11.50
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	13.00
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	14.15
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	15.33
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	16.40
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	17.45
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	19.15
343	6106.41	21.57	20.48	2811	5142.13	1406	1	20.30
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	12.30
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	13.40
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	18.10
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	19.15
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	20.35
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	21.36
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	22.47
537	9445.12	21.32	22.14	2922	7901.51	1461	1	23.50
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	11.00
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	12.00
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	13.00
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	14.00
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	15.00
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	16.00
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	17.30
220	3946.94	19.24	19.24	2880	3310.11	1440	1	18.30

Πίνακας 6.1β

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του ενεργού άνθρακα και άλλων σχετικών μεγεθών (βλ. και στο 5^ο Κεφάλαιο), για διάφορους υγρούς σπινθηριστές και διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη.
Πειραματικά αποτελέσματα – Μέρος Β

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
ΧΡΟΝΟΣ t (min)	DF	Counts per 60min	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ σε καθαρά Counts ανά 60 min ανά Bqh/m ³	MDA	LLD Bqm ⁻³	LLD _h Bqhm ⁻³	ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (%)	ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (%)	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (%)
2336	0.75	187191	1.29	172.15	3.69	179.32	3.49	0.47	14.92
2406	0.74	125398	0.87	146.82	4.70	228.64	4.09	0.58	15.08
2476	0.73	N/A							
2546	0.73	152567	1.08	163.19	4.29	208.94	3.68	0.53	14.97
2891	0.69	N/A							
2956	0.69	N/A							
3021	0.68	N/A							
2308	0.75	N/A							
2378	0.74	N/A							
2453	0.73	N/A							
2531	0.73	N/A							
2598	0.72	N/A							
2663	0.71	N/A							
2753	0.71	N/A							
2828	0.70	N/A							
2317	0.75	313979	1.08	161.55	4.10	199.84	3.71	0.36	14.97
2387	0.74	455245	1.59	161.55	2.82	137.43	3.71	0.30	14.97
2657	0.72	319875	1.15	161.55	4.03	196.13	3.71	0.36	14.97
2722	0.71	403514	1.47	161.55	3.19	155.18	3.71	0.32	14.97
2802	0.70	344443	1.26	161.55	3.74	182.02	3.71	0.35	14.97
2863	0.70	332974	1.23	161.55	3.87	188.34	3.71	0.35	14.97
2934	0.69	310474	1.16	161.55	4.15	202.12	3.71	0.36	14.97
2997	0.69	319598	1.20	161.55	4.03	196.30	3.71	0.36	14.97
2376	0.74	102264	0.84	161.55	5.38	258.33	3.71	0.65	14.98
2436	0.74	82018	0.68	161.55	6.76	324.44	3.71	0.74	14.99
2496	0.73	134881	1.14	161.55	4.05	194.49	3.71	0.56	14.98
2556	0.72	152206	1.30	161.55	3.58	171.92	3.71	0.53	14.98
2616	0.72	151012	1.30	161.55	3.61	173.31	3.71	0.53	14.98
2676	0.71	162097	1.40	161.55	3.36	161.24	3.71	0.51	14.98
2766	0.71	150006	1.31	161.55	3.64	174.49	3.71	0.53	14.98
2826	0.70	132180	1.16	161.55	4.14	198.55	3.71	0.57	14.98

Πίνακας 6.1γ

Λογιστικό φύλλο "Λ" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του ενεργού άνθρακα και άλλων σχετικών μεγεθών (βλ. και στο 5^ο Κεφάλαιο), για διάφορους υγρούς σπινθηριστές και διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη.
Πειραματικά αποτελέσματα – Μέρος Γ

1	2	3	4	5	6	8	9	10
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΕΛΑΦΡΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗΣ & ΥΓΡΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ	(%) ΕΛΑΦΡΟΣ ΔΙΑΛΥΤΗΣ & (%) ΥΓΡΟΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ	ROI (WIDTH, PEAK)	Counts BKG per 60min	ΤΥΠΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (ΗΗ.μμ)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΜΕΤΑΓΓΙΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (ΗΗ.μμ)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (min)
22/08/2012	ΕΤΗ-UG	60-40	278-676 (398, 414)	3240	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-UG	70-30	278-676 (398, 379)	3004	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-UG	80-20	278-676 (398, 373)	2740	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-UG	90-10	0-1024	0	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-IF	60-40	332-735 (403, 422)	2491	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-IF	70-30	290-646 (356, 361)	2776	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-IF	80-20	243-640 (397, 304)	2978	48	11.32	14.53	201
22/08/2012	ΕΤΗ-IF	90-10	0-1024	0	48	11.32	14.53	201
01/09/2012	METH-UG	60-40	217-724 (507, 413)	4357	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-UG	70-30	233-712 (479, 398)	3648	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-UG	80-20	201-600 (399, 316)	3672	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-UG	90-10	0-1024	0	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-IF	60-40	240-735 (495, 405)	3916	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-IF	70-30	207-731 (524, 343)	4309	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-IF	80-20	208-660 (452, 310)	3399	48	15.24	21.55	391
01/09/2012	METH-IF	90-10	0-1024	0	48	15.24	21.55	391
15/09/2012	METH-UG	10-90	421-881 (460, 555)	3048	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-UG	20-80	441-800 (359, 563)	2604	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-UG	30-70	370-800 (430, 529)	2985	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-UG	40-60	364-755 (391, 494)	2829	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-IF	10-90	467-850 (383, 578)	1865	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-IF	20-80	398-839 (441, 557)	2510	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-IF	30-70	356-802 (446, 504)	2752	48	14.12	21.13	421
15/09/2012	METH-IF	40-60	293-790 (497, 483)	3359	48	14.12	21.13	421
10/10/2012	ΕΤΗ-UG	10-90	435-777 (342, 592)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-UG	20-80	444-795 (351, 573)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-UG	30-70	435-774 (339, 565)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-UG	40-60	386-738 (352, 530)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-IF	10-90	438-792 (354, 585)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-IF	20-80	393-770 (377, 555)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-IF	30-70	433-694 (261, 533)	2250	48	15.54	20.24	270
10/10/2012	ΕΤΗ-IF	40-60	355-662 (307, 484)	2250	48	15.54	20.24	270

Πίνακας 6.2α

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του συνθετικού ζεολίθου με μέγεθος πόρων 1nm και άλλων σχετικών μεγεθών (βλ. και στο 5^ο Κεφάλαιο), για διάφορους υγρούς σπινθηριστές και διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη.

Πειραματικά αποτελέσματα – Μέρος Α

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm ⁻³)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm)	ΧΡΟΝΟΣ ΛΗΞΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (HH.mm)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ T _s (min)	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bqm ⁻³)	ΕΧΠΟΣΥΡΕ ΜΙΔΠΟΙΝΤ (min)	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (HH.mm)	ΧΡΟΝΟΣ t (min)	DF
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	12.15	2630	0.72
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	13.25	2700	0.71
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	15.35	2830	0.70
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	16.10	2865	0.70
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	18.20	2995	0.69
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	19.25	3060	0.68
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	20.40	3135	0.67
3610.36	14.53	17.58	3065	2994.93	1533	1	21.45	3200	0.67
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	9.35	2138	0.76
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	12.05	2288	0.75
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	13.15	2358	0.74
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	14.30	2433	0.74
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	20.45	2808	0.70
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	21.50	2873	0.70
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	22.55	2938	0.69
6940.10	21.55	22.00	2885	5818.60	1443	1	23.55	2998	0.69
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	11.10	2346	0.74
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	12.15	2411	0.74
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	17.50	2746	0.71
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	19.15	2831	0.70
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	20.20	2896	0.69
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	21.30	2966	0.69
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	22.44	3040	0.68
7458.59	21.13	18.55	2742	6306.55	1371	1	23.50	3106	0.68
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	13.30	2449	0.73
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	14.30	2509	0.73
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	15.40	2579	0.72
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	16.45	2644	0.72
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	18.10	2729	0.71
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	19.20	2799	0.70
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	20.50	2889	0.69
4828.81	20.24	20.59	2915	4041.31	1458	1	21.55	2954	0.69

Πίνακας 6.2β

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του συνθετικού ζεολίθου με μέγεθος πόρων 1nm και άλλων σχετικών μεγεθών (βλ. και στο 5^ο Κεφάλαιο), για διάφορους υγρούς σπινθηριστές και διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη.
Πειραματικά Αποτελέσματα – Μέρος Β

21	22	23	24	25	26	27	28
Counts per 60min	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ σε καθαρά Counts ανά 60 min ανά Bq/m ³	MDA	LLD Bq/m ⁻³	LLD _h Bq/m ⁻³	ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (%)	ΠΙΘΑΝΟ ΣΦΑΛΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (%)	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (%)
9654	0.06	170.76	79.74	4073.15	3.51	3.54	15.33
7348	0.04	164.43	113.36	5790.91	3.65	4.68	15.67
8314	0.05	157.04	84.38	4310.18	3.82	3.77	15.46
N/A							
6408	0.04	149.73	114.48	5848.17	4.01	4.82	15.80
6968	0.04	158.06	112.93	5768.66	3.80	4.71	15.71
6752	0.04	163.71	129.92	6636.62	3.66	5.23	15.84
N/A							
20981	0.08	198.02	69.31	3332.67	3.03	1.92	14.94
19852	0.08	181.20	65.06	3128.53	3.31	1.89	14.99
17133	0.06	181.79	78.58	3778.41	3.30	2.14	15.02
N/A							
17753	0.07	187.73	78.94	3795.89	3.20	2.13	15.00
18722	0.07	196.93	79.50	3822.68	3.05	2.11	14.97
15688	0.06	174.90	82.81	3981.93	3.43	2.25	15.07
N/A							
16779	0.06	165.63	76.07	3476.44	3.62	2.05	15.09
15401	0.06	153.09	75.44	3447.80	3.92	2.10	15.17
19238	0.08	163.91	63.60	2906.49	3.66	1.83	15.07
14305	0.06	159.57	87.69	4007.33	3.76	2.28	15.15
17436	0.08	129.56	52.47	2398.02	4.63	1.78	15.33
18596	0.08	150.30	58.93	2692.89	3.99	1.81	15.15
20289	0.09	157.38	56.60	2586.42	3.81	1.73	15.09
20393	0.09	173.87	64.37	2941.83	3.45	1.81	15.01
13314	0.08	142.30	51.98	2525.28	4.22	2.26	15.27
14441	0.09	142.30	47.17	2291.83	4.22	2.12	15.25
13261	0.08	142.30	52.23	2537.44	4.22	2.26	15.27
15085	0.09	142.30	44.81	2176.84	4.22	2.05	15.24
16266	0.10	142.30	41.03	1993.42	4.22	1.94	15.22
15995	0.10	142.30	41.84	2032.72	4.22	1.97	15.23
13441	0.08	142.30	51.39	2496.63	4.22	2.24	15.27
15011	0.09	142.30	45.07	2189.46	4.22	2.06	15.24

Πίνακας 6.2γ

Λογιστικό φύλλο "Α" για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του συνθετικού ζεολίθου με μέγεθος πόρων 1nm και άλλων σχετικών μεγεθών (βλ. και στο 5^ο Κεφάλαιο), για διάφορους υγρούς σπινθηριστές και διάφορες αραιώσεις με μεθανόλη ή αιθανόλη.

Πειραματικά Αποτελέσματα – Μέρος Γ

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Burt B.P., Kurbatov J.D., "Mixed adsorption of radon and argon on silica gel", *Journal of the American Chemical Society*, 70(6): 2278-2282, 1948.
2. Canoba A.C., Lopez F.O., Oliveira A.A., "Radon determination by activated charcoal adsorption and liquid scintillation counting", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 240(1), 237-241, 1999
3. 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
4. Cooper A., Ngoc Le T., Iimoto T., Kosako T., "Temperature calibration formula for activated charcoal radon collectors", *Journal of Environmental radioactivity*, 102, 60-63, 2011
5. Δήμου – Σακελλαρίου Σ., "Κατασκευή και βαθμονόμηση απλού ενεργητικού ανιχνευτή συγκεντρώσεων Ραδονίου με βάση την αρχή του θαλάμου ιονισμού", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2010
6. Ευσταθόπουλος Α.Β., Δρ. Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, Προσωπική Επικοινωνία, 2004
7. Findeis A.F., Lubkowitz J.A, "A Study of the Quenching Properties of Alcohols in Liquid Scintillator Solutions", *Molecular Crystals*, 4, 385-401, 1968
8. Fox B.W., "Techniques of Sample Preparation of Liquid Scintillation Counting", Part I in "Laboratory Techniques in Biochemistry and Molecular Biology" (eds: Work T.S. and Work E.), North-Holland / American Elsevier, 1976
9. George A.C., "Passive, integrated measurement of indoor radon using activated carbon", *Health Physics*, 46(4): 867-872, 1984
10. 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.
11. Hidex DOC 410-001, "TRIATHLER 425-004 MULTILABEL TESTER, Owner's Handbook"
12. Hidex DOC 412-001, "Hidex Product Catalogue", <http://www.instrument.com.cn/show/Literature/C35337.pdf>

13. Hidex DOC 413-009, "Rn-222 in water with Hidex 300 SL and Triathler", Application note, Version 1.0, <http://www.hidex.com/media/10109/413-009%20rn-222%20in%20water%20with%20hidex%20300%20sl%20and%20triathler.pdf>
14. Homma Y., Murase Y., Takiue M., "Determination of ²²²Rn by air luminescence method", Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry Letters, 119, 458-465, 1987
15. Homma Y., Murase Y., Handa K., Koyama S., Suzuki N., Horiuchi K., "Rapid calibration of detectors for determining ²²²Rn using air luminescence counting", Liquid Scintillation Spectrometry, 111-116, 1994
16. IAEA (International Atomic Energy Agency), "The IAEA-CU-2010-03 World-wide open proficiency test on the determination of natural radionuclides in water and Ra-226 in soil", 2011
17. Imoto T., Tokonami S., Morishita Y., Kosako T., "Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments", Journal of Environmental Radioactivity, 78, 69-76, 2005
18. IRMM (JOINT RESEARCH CENTRE, Institute for Reference Materials and Measurements, Nuclear Physics), EUROPEAN COMMISSION, "Preliminary results of the EC interlaboratory comparison on natural radioactivity, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in soil" (2010)
19. Κατσανεβάκης Σ., "Μετρήσεις φυσικής ραδιενέργειας των ελληνικώντσιγάρων και μελέτη της επίδρασης του καπνού της ραδιενέργειας των εσωτερικών χώρων", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 1995
20. Kim T., "Development of a system for survey of radon concentration of the Dayton area using a liquid scintillation counter and analysis of the data", Thesis, School of Engineering of the Air Force Institute of Technology Air University, 1992
21. L'Annunziata, "Handbook of radioactivity analysis", Academic Press, San Diego, 1998.
22. Λεωνίδου Δ.Ι., "Μέθοδοι και Όργανα Ανιχνεύσεως Πυρηνικών Ακτινοβολιών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1990

23. Livingston R., Reyersson L.H., "The adsorption of radon by silica gel", *Journal of Physical Chemistry*, 37(4): 534-535, 1933
24. Μαρινάκης Γ., "Βαθμονόμηση δοχείων με ενεργό άνθρακα για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2007
25. Murase Y., Homma Y., Takiue M., "Effect of air luminescence counts on determination of ^{222}Rn by liquid scintillation counting", *Applied Radiation and Isotopes*, 40(4), 295-298, 1989
26. Murase Y., Homma Y., Murakami I., Handa K., Horiuchi K., "Indoor ^{222}Rn measurements using an activated charcoal detector", *Applied Radiation and Isotopes*, 50, 561-565, 1999
27. Nakayama Y., Wada H., Shiraishi K., Nagao H., Tanaka E., Abe I., "Radon adsorption in activated carbon by open system", *Proceedings of the American Carbon Society Carbon Conference*, 374-375, 1997
28. National Diagnostics Laboratory Staff, "Principles and applications of liquid scintillation counting: a primer for orientation (LSC concept – fundamentals of liquid scintillation counting)", National Diagnostics, Atlanta, 2004
29. NPL (National Physical Laboratory), NPL Report DQL-RN 002, "Environmental Radioactivity Comparison Exercise 2003 (Overseas Report)", October 2004.
30. NPL (National Physical Laboratory), NPL Report IR 8, "Environmental Radioactivity Proficiency Test Exercise 2007, April 2008
31. OHAUS Corporation, Analytical Standard Electronic Balances AS Series, Instruction Manual (<http://dmx.ohaus.com/WorkArea/downloadasset.aspx?id=23310>)
32. Ortega X, Novell M., Vargas A., Baixeras C., Font L., "Study of the variation of ^{222}Rn indoor concentration with several passive detectors and an active detection system", *Environment International*, 22(S1): S601-S606, 1996.
33. Παπαδάκος Γ., "Διαπίστευση Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2001
34. Πασχαλίδης Ι., "Βαθμονόμηση δοχείων με προσροφητικά υλικά για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου στην ατμόσφαιρα σε διάφορα επίπεδα σχετικής

- υγρασίας", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2008
35. Paschalides J.S., Marinakis G.S., Petropoulos N.P., "Passive, integrated measurement of radon using 5A synthetic zeolite and blue silica gel", *Applied Radiation Isotopes*, 68: 155-163, 2010.
 36. PerkinElmer, "Scintillation Cocktails & Consumables 2003", http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-73238BRO_ScintillationCocktailsAndConsumables.pdf
 37. Perkin Elmer, "Radiometric Reagents Guide 2010-2011", www.perkinelmer.com/RadiometricDetection
 38. Perlman D., "Liquid scintillation solution for measuring Rn-222 in charcoal", US Patent # 4920269, 1990
 39. Prichard H. , Marlen K., "Desorption of radon from activated carbon into a liquid scintillator" , *Analytical Chemistry*, 55(1), 155-157, 1983a
 40. Prichard H., "A solvent extraction technique for the measurement of ²²²Rn at ambient air concentrations", *Health Physics*, 45(2), 493-499, 1983b
 41. Ren T., Lin L., "A passive integrating indoor radon detector with activated carbon", *Radiation Protection Dosimetry*, 19(2), 121-124, 1987
 42. Schoenhofer F., Pock K., Friedmann F., "Radon surveys with charcoal and liquid scintillation counting field experience and comparison to other techniques", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 193(2), 337-346, 1995
 43. Schroeder M.C., Vanags U., Hess C.T., "An activated charcoal-based, liquid scintillation- analyzed airborne Rn detector", *Health Physics*, 57(1), 43-49, 1989
 44. Σιμόπουλος Σ.Ε., "Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1989
 45. Stawartz O., Karpinska M., Mamont-Ciesla K., "Investigation of the influence of high humidity and exposure duration on the measurement results of radon concentration by means of PicoRad system in the CLOR calibration chamber", *Nukleonika*, 51(2), 53-57, 2006