

РАБОТА № 2

ДОЗИМЕТРИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Цель работы: освоение методов и средств определения дозы естественного облучения короткоживущими дочерними продуктами распада (ДПР) радона, взвешенными в воздухе.

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных естественных факторов облучения человека в жилищах и на рабочих местах наибольший вклад в дозу (от 40 до 92%) формируется за счет вдыхания дочерних продуктов распада радона. При расчетах с использованием практически любой дозиметрической модели максимальный эквивалент дозы соответствует эпителию бронхов.

Основными источниками поступления радона в атмосферу являются природные радионуклиды, содержащиеся в почвах, горных породах и строительных материалах. ^{222}Rn образуется в природе как продукт радиоактивного распада в радиоактивной цепочке, основоположником которой является ^{238}U , ^{220}Rn – в ряду распада ^{232}Th , а ^{219}Rn – член актиноуранового ряда с материнским нуклидом ^{235}U (см. табл. 1).

С точки зрения радиационной безопасности основной интерес представляют ^{222}Rn (радон) и ^{220}Rn (торон). ^{219}Rn (актинон) может оказывать воздействие лишь в специфических случаях, связанных с загрязнением помещения продуктами переработки уранового сырья.

Сам радон не представляет опасности для человека, так как, являясь инертным газом, не вступает в активное взаимодействие с тканями организма. Радиационное воздействие при дыхании оказывают его короткоживущие α - и β -активные продукты распада. Все они являются тяжелыми металлами и после образования вступают в реакции с газовыми примесями и воздушными парами, образуя мелкие частицы с диаметром от 0.5 до 5 нм, называемые *кластерами* или *неприсоединенными* (свободными) продуктами распада. Кроме того, продукты распада присоединяются к существующим в атмосфере аэрозольным частицам, образуя радиоактивные аэрозоли (*присоединенные* продукты распада). Размеры аэрозольной фракции простираются от 10 нм до нескольких тысяч нм. Типичное распределение активности продуктов распада радона по размеру частиц представлено на рис. 1.

Воздушные частицы вдыхаются и отлагаются в респираторном тракте. Место и эффективность отложения частиц зависит от их размера. Большинство частиц крупнее нескольких мкм отлагается в области носа и рта и в бронхах, меньшие частицы проходят эту область без значительного отложения и эффективно отлагаются в альвеолах. Различным будет и радиационное воздействие от частиц разных размеров, поэтому для достоверной оценки дозы необходимо знать распределение активности ДПР радона по размеру.

Таблица 1
Радиоактивные ряды ^{238}U и ^{232}Th и свойства изотопов Rn и его ДПР

Радионуклид	Период полураспада	Тип распада	Энергия частиц, МэВ
^{238}U (UI)	$4.51 \cdot 10^9$ лет	α	
^{234}Th (UX ₁)	24.1 сут	β	
$^{234}\text{Pa}^m$ (UX ₂)	1.17 мин	β	
^{234}U (UII)	$2.47 \cdot 10^5$ лет	α	
^{230}Th (Io)	$8.0 \cdot 10^4$ лет	α	
^{226}Ra	1602 лет	α	
^{222}Rn (Rn)	3.825 сут	α	5.4897
^{218}Po (RaA)	3.05 мин	α	6.0025
^{214}Pb (RaB)	26.8 мин	β	0.672 (48)*
			0.729 (42.5)
^{214}Bi (RaC)	19.7 мин	β	1.505 (17.7)
			1.540 (17.9)
			3.270 (17.2)
^{214}Po (RaC')	$1.673 \cdot 10^{-4}$ с	α	7.6871
^{210}Pb (RaD)	22 года	β	0.0165 (80.2)
			0.063 (19.8)
^{210}Bi (RaE)	4.989 сут	β	1.161 (100)
^{210}Po (RaF)	138.4 сут	α	5.3045
^{206}Pb (RaG)	стабильный		
^{232}Th	$1.41 \cdot 10^{10}$ лет	α	
^{228}Ra (MsThI)	5.75 лет	β	
^{228}Ac (MsThII)	6.15 ч	β	
^{228}Th (RaTh)	1.910 лет	α	
^{224}Ra (ThX)	3.64 сут	α	
^{220}Rn (Tn)	55.6 с	α	6.288
^{216}Po (ThA)	0.146 с	α	6.7785
^{212}Pb (ThB)	10.64 ч	β	0.334 (85.1)
			0.573 (9.9)
^{212}Bi (ThC)	60.55 мин	α (35.93 %)	6.050 (25.2)
		β (64.07 %)	6.090 (9.6)
			1.519 (8.0)
			2.246 (48.4)
^{212}Po (ThC')	$2.98 \cdot 10^{-7}$ с	α	8.7849
^{208}Tl (ThC'')	3.053 мин	β	1.284 (23.2)
			1.517 (22.7)
			1.794 (49.3)
^{208}Pb (ThD)	стабильный		

* В скобках – выход излучения (для частиц с максимальным выходом), %

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Поскольку излучение отдельных продуктов распада радона дает различный вклад в суммарную дозу облучения, то для описания содержания продуктов распада в воздухе обычно используют не индивидуальные объемные активности (C_i), а так называемую *скрытую энергию* (C_p). Скрытая энергия – это суммарная энергия α -излучения, которая выделяется при распаде всех короткоживущих ДПР в единице объема.

Вследствие большого периода полураспада RaD (^{210}Pb) его объемная активность в воздухе никогда не достигает значимых величин, и рассмотрение цепочки распада ^{222}Rn ограничивают радионуклидами RaC-RaC' (^{214}Bi - ^{214}Po).

Единица измерения скрытой энергии – Дж/м³ или МэВ/л, внесистемная единица – WL (Working Level, 1 WL = $1.3 \cdot 10^5$ МэВ/л, что соответствует объемной активности радона 3700 Бк/м³ в полном равновесии с дочерними продуктами распада).

Скрытая энергия любой смеси ДПР в воздухе может быть выражена посредством так называемой *эквивалентной равновесной объемной активности* (ЭРОА) их материнского нуклида радона (C_{eq}). ЭРОА радона для некоторой неравновесной смеси короткоживущих дочерних продуктов распада в воздухе – это такая объемная активность радона в полном равновесии с ДПР, которая имеет такую же величину скрытой энергии, что и данная неравновесная смесь.

Распределение скрытой энергии ДПР радона по размеру частиц

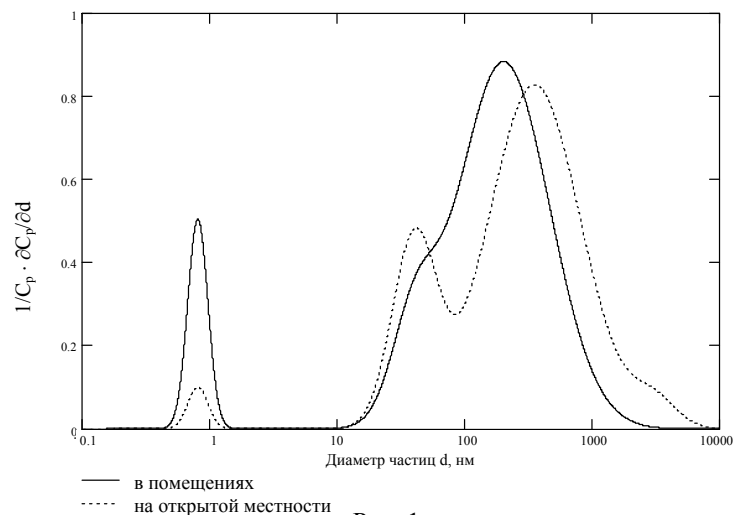


Рис. 1

ЭРОА радона связана с индивидуальными объемными активностями следующими соотношениями (C_1 – объемная активность RaA(ThA), C_2 – RaB(ThB), C_3 – RaC(ThC)):

$$\begin{aligned} C_{eq}^{Rn} &= 0.1046 \cdot C_1 + 0.5161 \cdot C_2 + 0.3793 \cdot C_3, \\ C_{eq}^{Tn} &= 7 \cdot 10^{-6} C_1 + 0.9133 \cdot C_2 + 0.0867 \cdot C_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициент равновесия F определяется как отношение эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе к реальной объемной активности радона ($F = C_{eq}/C_0$). На практике всегда $F < 1$.

Интеграл по времени от скрытой энергии называется *экспозицией*. Единицей экспозиции является Дж·ч/м³ или WLM (Working Level Month, 1 WLM соответствует 3.54 мДж·ч/м³).

Долей свободных атомов называется отношение скрытой энергии свободных атомов к суммарной скрытой энергии

$$f_p = \frac{C_p^f}{C_p} = \frac{C_p^f}{C_p^f + C_p^a}. \quad (2)$$

Расчет дозовых нагрузок на организм человека при ингаляции ДПР радона может производиться двумя способами. Один из них (дозиметрический) заключается в оценке поглощенной дозы в легочной ткани за счет осевших на ее стенки α -активных ДПР с использованием дозиметрических моделей поведения радионуклидов в легких. При этом необходимо учитывать целый ряд различных факторов: распределение активности ДПР радона по размеру частиц, соотношение между объемными активностями радона и торона, концентрацию аэрозолей в воздухе, сдвиг равновесия, возраст человека, его двигательную активность и т. д.

Другой подход (эпидемиологический) состоит в сопоставлении смертности от рака легких среди шахтеров урановых рудников со смертностью среди лиц, подвергшихся общему внешнему облучению (в первую очередь, жертв атомных бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки). При этом на основании равенства ущербов определена связь между экспозицией по скрытой энергии и эффективной дозой. Коэффициент дозового перехода для персонала составляет 1.43 Зв на Дж·ч/м³, для населения – 1.1 Зв на Дж·ч/м³. Такой переход называется *условным дозовым переходом*.

Использование эпидемиологического подхода достаточно оправдано при оценке доз облучения шахтеров, относительно которых имеются прямые экспериментальные данные. Однако, без применения дозиметрических моделей нельзя оценивать дозы облучения от ДПР торона. Кроме того, дозиметрические модели необходимы для оценки доз облучения разных возрастных групп населения при различных параметрах атмосферы, характере деятельности человека и т. д. Многочисленные исследования подчеркивают особую радиологическую значимость распределения активности ДПР по размеру частиц. Так, коэффициенты дозового перехода для взрослого чело-

века при средней скорости дыхания и средних параметрах модели респираторного тракта составляют 7.0 Зв на Дж·ч/м³ для свободной фракции и 0.85 Зв на Дж·ч/м³ для аэрозольной фракции.

Таким образом, более целесообразным является комплексный подход, сочетающий как эпидемиологический подход, так и использование дозиметрических моделей легких.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ДПР РАДОНА

В данной работе для измерения объемной активности ДПР радона используется аспирационный метод, заключающийся в концентрировании ДПР на специальных аэрозольных фильтрах из ацетатного волокна. В процессе прокачки известного объема воздуха в течение заданного промежутка времени через фильтр, на него оседает значительное количество аэрозольных частиц, суммарная активность которых измеряется обычными методами радиометрии (спектрометрии).

При прокачке воздуха наблюдаются два процесса:

- оседание нуклидов ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi (RaA–RaC) или ²¹⁶Po, ²¹²Pb, ²¹²Bi (ThA–ThC) на фильтре и рост их активности в процессе прокачки;
- распад радиоактивных аэрозолей и накопление продуктов их распада (при распаде осевшего на фильтр RaA образуется RaB, и далее – RaC).

При прокачке воздуха со скоростью v число атомов N_j дочернего продукта распада j , собранных на фильтре, подчиняется временным зависимостям, получаемым из следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = \lambda_{j-1} N_{j-1} + v n_j - \lambda_j N_j, \quad (3)$$

где λ_j – постоянная распада дочернего продукта j , n_j – концентрация атомов в атмосфере.

Решение этой системы дифференциальных уравнений является последовательным. Оценивая константы интегрирования из начальных условий (при $t = 0$, $N_j = 0$), получаем следующие уравнения, справедливые в период пробоотбора:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{n_1 v}{\lambda_1} F_{11}, \\ N_2 &= \frac{n_1 v}{\lambda_2} F_{21} + \frac{n_2 v}{\lambda_2} F_{22}, \\ N_3 &= \frac{n_1 v}{\lambda_3} F_{31} + \frac{n_2 v}{\lambda_3} F_{32} + \frac{n_3 v}{\lambda_3} F_{33}, \end{aligned} \quad (4)$$

где F_{ij} являются функциями времени и периодов полураспада.

В период пробоотбора должны выполняться два условия: а) концентрации радионуклидов в воздухе не должны изменяться (или их можно описать

средними значениями); б) объемная скорость прокачки должна быть постоянной в течение всего периода пробоотбора.

В момент времени t_s прокачка завершается. Система дифференциальных уравнений, описывающих число атомов N'_j на фильтре, похожа на предыдущую за исключением того, что $v = 0$. Решением системы с учетом условий, что в момент окончания прокачки $N'_j = N_j(t_s)$, являются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} N'_1 &= N_1(t_s) F'_{11}, \\ N'_2 &= N_1(t_s) F'_{21} + N_2(t_s) F'_{22}, \\ N'_3 &= N_1(t_s) F'_{31} + N_2(t_s) F'_{32} + N_3(t_s) F'_{33}. \end{aligned} \quad (5)$$

Имеем три неизвестных концентрации продуктов распада n_j , для вычисления которых необходимы результаты трех независимых измерений количества импульсов (распадов на фильтре) за некоторые определенные интервалы времени. Так, в модифицированном *методе Томаса* время прокачки составляет 5 минут, число импульсов N_1 регистрируется в период времени от 0.5 до 3 минут, N_2 – от 6 до 20 минут, N_3 – от 28 до 38 минут. Объемные активности ДПР радона (Бк/м³) получают по формулам:

$$\begin{aligned} C_1 &= 37(0.114 N_1 - 0.0438 N_2 + 0.0392 N_3) / \varepsilon \eta v \\ C_2 &= 37(-4.65 \cdot 10^{-3} N_1 - 0.0104 N_2 + 0.033 N_3) / \varepsilon \eta v \\ C_3 &= 37(-0.0121 N_1 + 0.0224 N_2 - 0.0237 N_3) / \varepsilon \eta v \end{aligned} \quad (6)$$

где ε – эффективность регистрации α -излучения; η – эффективность аэрозольного фильтра (эффективность задержки аэрозолей и учет самопоглощения α -излучения в фильтре); v – скорость прокачки воздуха через фильтр, л/мин.

На практике часто ограничиваются нахождением суммарной скрытой энергии (или ЭРОА радона), для чего достаточно одного измерения. Но при этом появляется дополнительная погрешность, связанная с неизвестным сдвигом равновесия между ДПР.

Наиболее простой метод определения ЭРОА дочерних продуктов распада радона – *метод Кузнецова*. Если число импульсов, зарегистрированных детектором за интервал времени с T_1 по T_2 после окончания прокачки при времени прокачки T_s , составляет $N(T_s, T_1, T_2)$, то величина ЭРОА радона (Бк/м³) определяется по формуле

$$C_{eq}^{Rn} = \frac{3700 N(T_s, T_1, T_2)}{\varepsilon \eta v \cdot K}, \quad (7)$$

значения коэффициента K для различных условий измерения приведены в таблице 2.

Если в воздухе находятся также дочерние продукты распада торона, это приводит к дополнительным погрешностям. Модифицированный метод

двух точек Кузнецца позволяет совместно определять объемные активности радона и торона. Если время прокачки составляет 10 минут, первое измерение проводится в интервале от 40 до 50 минут после прокачки, а второе измерение в интервале от 300 до 330 минут, ЭРОА радона и торона определяются по формулам:

$$C_{eq}^{Rn} = \frac{0.280}{\varepsilon \eta v} (N_1 - 0.305 N_2)$$

$$C_{eq}^{Tn} = \frac{0.0704}{\varepsilon \eta v} N_2$$
(8)

Таблица 2

Значения коэффициента пересчета К для метода Кузнецца

Отбор пробы t_0 , мин	Начало измерения T_1 , мин	Окончание измерения T_2 , мин	Коэффициент пересчета К
5	40	45	3700
5	40	50	7150
5	40	100	29200
5	60	65	2700
5	60	70	5200
5	60	120	20100
10	40	45	7150
10	40	70	35500
10	40	100	55900
10	60	65	5200
10	60	90	24900
10	60	120	38400
10	40	50	13800
10	50	60	11930
10	60	70	10100
10	70	80	8420
10	80	90	6950
10	90	100	5580

СВОБОДНАЯ ФРАКЦИЯ

Для измерения объемной активности свободных атомов используются методы, основанные на их диффузионных свойствах. Из-за своего малого размера неприсоединенные продукты распада обладают большей диффузивностью по сравнению с продуктами распада, осевшими на аэрозолях, и в большей степени диффундируют к поверхностям. Поэтому кластер может быть отделен от аэрозольной фракции.

В настоящее время для f_p -измерений все больше используются экранные диффузионные батареи, благодаря их портативности и простоте пробоотбора. Экраном этого устройства является проволочная сетка с известными параметрами, которую устанавливают перед собирающим фильтром. При прокачке воздуха через систему «экран–фильтр» значительная часть свободных атомов собирается на экране, в то время как аэрозольные частицы проходят сквозь экран, осаждааясь на фильтре. На рис. 2 представлены функции проницаемости для трех различных экранов диффузионных батарей.



Рис. 2

ТРЕБОВАНИЯ НОРМ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (НРБ-99)

Пункт 4.1. Эффективная доза облучения природными источниками излучения всех работников, включая персонал, не должна превышать 5 мЗв в год в производственных условиях (любые профессии и производства).

Пункт 4.2. Средние значения радиационных факторов в течение года, соответствующие при монофакторном воздействии эффективной дозе 5 мЗв за год при продолжительности работы 2000 ч/год, средней скорости дыхания 1.2 м³/ч и радиоактивном равновесии радионуклидов уранового и ториевого рядов в производственной пыли, составляют:

- мощность эффективной дозы γ -излучения на рабочем месте – 2.5 мкЗв/ч;
- ЭРОА_{Rn} в воздухе зоны дыхания – 310 Бк/м³;
- ЭРОА_{Tn} в воздухе зоны дыхания – 68 Бк/м³.

Пункт 5.3.1. Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем ус-

тановления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения.

Пункт 5.3.2. При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних изотопов радона и торона в воздухе помещений $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} + 4.6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$ не превышала 100 Бк/м^3 , а мощность эффективной дозы γ -излучения не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на 0.3 мкЗв/ч .

Пункт 5.3.3. В эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних изотопов радона и торона в воздухе жилых помещений не должна превышать 200 Бк/м^3 . При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений. Защитные мероприятия должны проводиться также, если мощность эффективной дозы γ -излучения в помещениях превышает мощность дозы на открытой местности более чем на 0.2 мкЗв/ч .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из измерительного пульта радиометра РКБ4-1eM с выносным α -сцинтилляционным блоком детектирования (ZnS(Ag)); источника питания блока детектирования, всасывающего ручного воздушного насоса, снабженного клапаном, аэрозольных фильтров АФА-РМП-20 и проволочного латунного экрана. Для градуировки α -блока детектирования используется образцовый α -источник ^{239}Pu ($E_{\alpha} = 5.14 \text{ МэВ}$). Эффективность фильтра $\eta_f = 0.95$, эффективность экрана по отношению к свободным продуктам распада $\eta_{sc} = 0.80$.

ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с прибором и подготовить его к работе. Проверить правильность подключения блока детектирования к измерительному пулту. Включить источник питания ($V_{\text{раб}} = 800 \text{ В}$).
2. Определить при помощи образцового α -источника абсолютную эффективность регистрации излучения ε . Для этого необходимо отклонить от себя α -датчик и в гнездо держателя поместить источник. Провести пять десятисекундных измерений. Сравнивая среднюю скорость счета прибора с паспортной активностью источника найти эффективность регистрации (в единицах импульс на распад). Полученное значение использовать при анализе излучения фильтров, для экрана необходимо умножить эффективность на коэффициент 0.55 (поскольку частицы оседают не толь-

ко на фронтальную поверхность, но и на боковые участки проволоки).

3. Измерить фоновый счет от двух фильтров и экрана. Время каждого замера 10 минут.
4. Определить ЭРОА радона и долю свободных атомов по методу Кузнецова в помещении, указанном преподавателем. Для этого закрепить в воронке насоса фильтр марлевой стороной вовнутрь, а перед ним с помощью дополнительной насадки установить проволочный экран. Прокачку воздуха производить в течение 10 минут. Скорость прокачки поддерживать равной 10 л/мин при объеме насоса 0.3 л. Через 40 минут после окончания прокачки последовательно измерить число импульсов от экрана и фильтра в течение 10 минут.
5. Определить объемные активности RaA, RaB, RaC и ЭРОА радона по модифицированному методу Томаса во втором помещении.
6. По результатам измерений рассчитать величину скрытой энергии и мощность эффективной дозы от воздействия радона. Оценить вклад свободных атомов в эффективную дозу. Проанализировать соотношение между объемными активностями RaA, RaB и RaC.
7. Измерить при помощи дозиметра мощность дозы от внешнего излучения в местах отбора воздуха. Сравнить полученное значение с ингаляционной дозой облучения радоном.
8. Дать анализ радиационной обстановки в соответствии с нормами радиационной безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург. УрО РАН, 1997.
2. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах (Публикация 65 МКРЗ). Доклад международной комиссии по радиологической защите. Москва. Энергоатомиздат, 1995.
3. Нормы радиационной безопасности НРБ-99. Москва. Энергоатомиздат, 1999.
4. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСПОРБ-99. Москва. Энергоатомиздат, 1999.