

УДК 621.039.546: 543.52

ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ АКТИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Котов В.М., Бакланова Ю.Ю., Ерыгина Л.А., Супрунов В.И.

Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Работа посвящена определению распределения активности гамма-излучающих радионуклидов в линейном источнике неразрушающим методом. Вклады излучения различных участков рассчитаны аналитически для источника простой геометрии. В качестве источника гамма-излучения использовался корпус хлоратора с отложениями радионуклидов на его внутренней стенке.

Были получены расчетные значения коэффициентов вкладов, распределение активности по участкам хлоратора и абсолютное значение суммарной активности отложений.

ВВЕДЕНИЕ

Определение активности точечного источника гамма-излучения возможно путем измерения потока гамма-квантов в точке на известном расстоянии от источника с использованием следующего соотношения:

$$A = \Phi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2, \quad (1)$$

где Φ – поток квантов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$;

R – расстояние между источником и детектором, см;

A – активность источника, Бк.

Несколько сложнее задача, если источник и детектор являются объемными телами. В этом случае возможны различные варианты.

В простейшем случае, при равномерном распределении активности в теле источника, равномерной чувствительности в объеме детектора, малом уровне самопоглощения в источнике и достаточно большом расстоянии между детектором и источником можно использовать выражение (1), принимая R равным расстоянию между центрами источника и детектора.

Такая постановка на практике возможна очень редко. В объемных источниках, чаще всего, самопоглощение велико. Измерение интенсивности на больших расстояниях зачастую невозможно из-за сравнительно малой активности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе рассматривается задача, в которой источником является протяженный объект и, помимо, общей активности нужно знать её распределение по длине этого объекта.

В работе [1] рассматривался вариант измерения относительного распределения активности по длине цилиндрического источника (или иного объемного источника с сечением постоянной геометрии) с учетом вкладов излучения различных участков источника в сигнал детектора с коллиматором. Схема таких измерений представлена на рисунке 1.

Вклады различных участков определяются экспериментально. Для этого используется источник с заведомо постоянной по длине активностью на длине близкой к той, при которой вклад от конечного

участка близок к нулю и имитатор с аналогичным содержанием материалов и нулевой активностью.

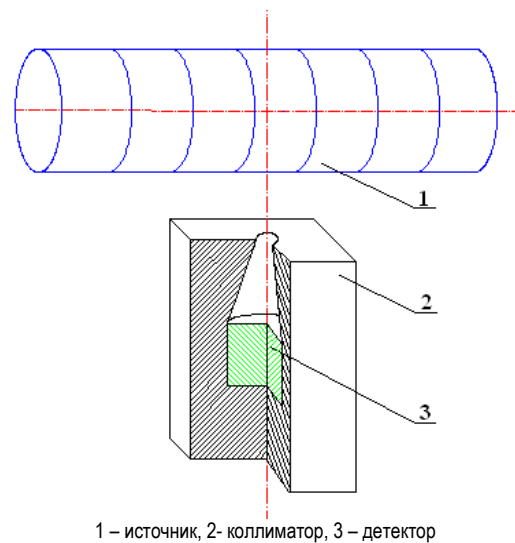


Рисунок 1. Схема измерения активности излучения цилиндрического источника

Связь активности линейного источника и регистрируемой интенсивности можно представить интегральным уравнением Фредгольма первого рода

$$I(z) = \int_0^H K(z, z') A(z') dz', \quad (2)$$

где $I(z)$ – регистрируемая интенсивность излучения в точке z , имп/с;

H – высота источника, см;

$A(z')$ – активность участка с координатой центра источника z' , Бк;

$K(z, z')$ – эффективность регистрации γ -квантов, рожденных в точке z' , детектором, установленным в точке z .

Интеграл (2) можно представить в виде

$$I_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} A_j, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $A_j = \int_{(j-1)h}^{jh} A(z') dz'$ – активность j -го участка при разбиении источника на n частей, $h = \frac{H}{n}$;

$K_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{(j-1)h}^{jh} A(z') K(z, z') dz'$ – коэффициент

вклада, представляющий собой эффективность регистрации γ -излучения j -го участка при измерении детектором интенсивности излучения в i -той точке вблизи источника. В рациональном случае точка i находится в центре участка j .

Решением системы уравнений (3) будет распределение активности по источнику. В общем случае система уравнений (3) имеет n^2 коэффициентов K_{ij} . При симметричном относительно оси коллиматора, установленном перпендикулярно к оси источника, и однородном материале источника, число коэффициентов вклада уменьшается до n .

ЛИНЕЙНЫЙ ИСТОЧНИК С МАЛЫМ САМОПОГЛОЩЕНИЕМ

Более простым является вариант, в котором источник является линейным с малым самопоглощением и в измерении не используется коллиматор. В этом случае вклады излучения от соседних участков можно рассчитать аналитически.

Относительная эффективность регистрации отдельной точки источника ε точечным детектором рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = R^2 \cdot (R^2 + L^2)^{-1}, \quad (4)$$

где R – расстояние между детектором и осью источника;

L – расстояние от оси детектора (рисунок 1) к точкам источника.

Коэффициент вклада от участка конечной длины в этом случае является средним значением эффективности счета в диапазоне расстояний L_1 - L_2 источника, ограничивающими дискретный участок измерений.

На рисунке 2 приведена зависимость эффективности счета от места расположения источника и коэффициенты вкладов для участков с заданным шагом, при расположении детектора в ходе измерений над серединой этих участков.

При шаге равном 10 см, расстоянии между осью источника и центром детектора 5,5 см коэффициенты вкладов будут равны:

$$K_0 = 0,78; \quad K_1 = 0,29; \quad K_2 = 0,075; \\ K_3 = 0,04; \quad K_4 = 0,02; \quad K_5 = 0,015.$$

Остальными вкладами можно пренебречь.

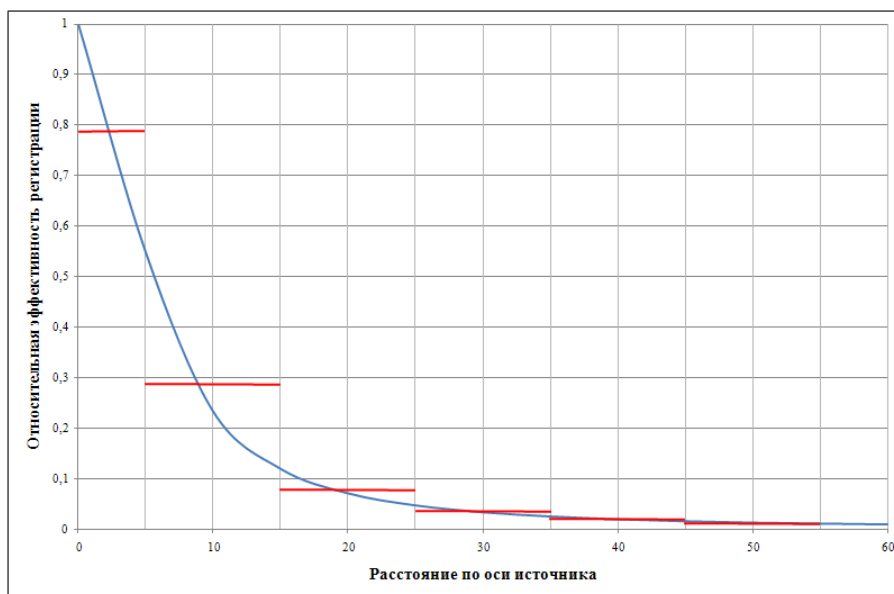


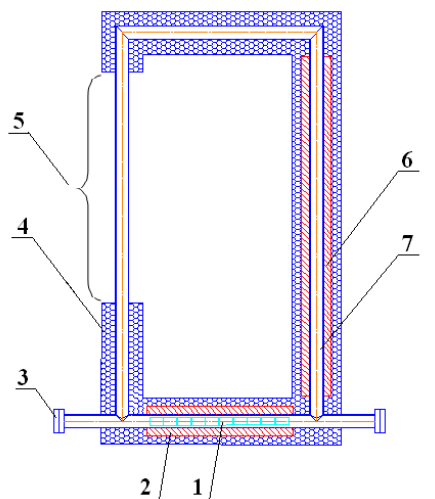
Рисунок 2. Зависимость эффективности регистрации точечных участков (синяя линия) и коэффициентов вклада (красные линии) при измерении источника без самопоглощения с $R=5,5$ см и шагом 10 см

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ ХЛОРАТОРА

Одной из практических задач было определение распределения активности отложений в полости хлоратора после взаимодействия находившегося в нем облученного бериллия с хлором. Схема хлоратора представлена на рисунке 3. Хлоратор выполнен сварным из труб диаметром $57 \times 3,5$ мм из стали 12Х18Н10Т. В нижнем участке хлоратора установлен ложемент с образцами бериллия. На одной из

вертикальных секций хлоратора расположен холодильник, на другой – нагреватель.

В ходе эксперимента происходило взаимодействие хлора с бериллием. Образовавшийся хлорид бериллия отложился на внутренних стенках хлоратора. Радиоактивный хлорид кобальта из прореагировавшего бериллия растворялся в хлориде бериллия. Одной из задач исследований было определить количество прореагировавшего бериллия и распределение хлоридов по длине участков хлоратора.



1 – образцы бериллия, 2, 6 – нагреватели, 3 – фланец, 4 – теплоизоляция, 5 – холодильник, 7 – контур хлоратора

Рисунок 3. Схема хлоратора

Измерения интенсивности гамма-излучения вблизи стенок хлоратора проводились с шагом 10 см радиометром РКС-СОЛЮ-01. Детектор устанавли-

вался на расстоянии 1,5 см от поверхности стенок хлоратора, что соответствовало расстоянию между центром детектора и осью корпуса хлоратора 5,5 см. В каждой точке проводилось по 6 измерений интенсивности излучения. На рисунке 4 представлены распределения измеренных значений интенсивности излучения в точках отсчета и расположение нагревателя на нижнем участке. Значения интенсивности по горизонтальным участкам представлены от места входа хлора в хлоратор, а по вертикальным участкам снизу вверх.

Характер изменения распределения интенсивности в вертикальных участках хлоратора различен. Интенсивность участка с нагревателем меньше интенсивности участка с холодильником. В участке с нагревателем интенсивность увеличивается с высотой, а в участке с холодильником – падает. Эти различия можно объяснить так. Первое, меньшая температура корпуса участка с холодильником вызывает большую интенсивность осаджений. Второе, конвекционный ток в полости хлоратора направлен снизу вверх на горячем участке и сверху вниз на холодном. Осаждение убывает по ходу тока газа.

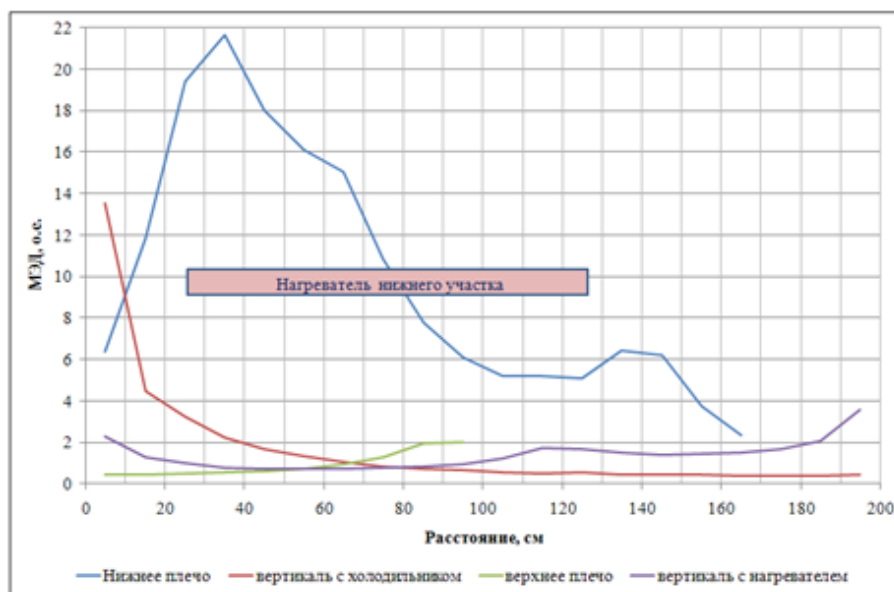


Рисунок 4. Измеренные интенсивности отложений на стенках хлоратора

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ

Для нахождения распределения активности по длине отдельных участков решались системы уравнений (3):

$$K_{11} \cdot A_1 + K_{12} \cdot A_2 + K_{13} \cdot A_3 + \dots + K_{1n} \cdot A_n = P_1 \cdot R \cdot L / \Gamma \quad (5)$$

$$K_{n1} \cdot A_1 + K_{n2} \cdot A_2 + K_{n3} \cdot A_3 + \dots + K_{nn} \cdot A_n = P_n \cdot R \cdot L / \Gamma$$

где K_{ij} – коэффициент вкладов активности интервала j на измерение МЭД интервала i ;

A_j – активность интервала j , Бк;

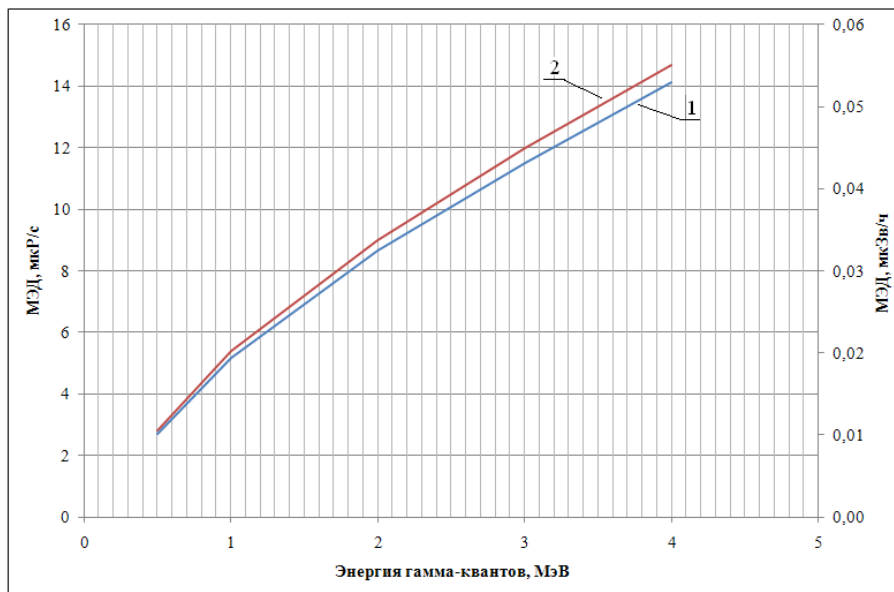
P_i – мощность дозы интервала i , Зв/ч;

Γ – гамма-постоянная, Зв·см²/ч·Бк [2, стр.40],

R – расстояние между источником и детектором, м;

L – длина интервала, м.

При определении соответствия между измеряемой мощностью дозы и потоком гамма-квантов использовались данные [2], которые для удобства трансформированы в графический вид, представленный на рисунке 5. На графике показана зависимость мощности дозы от энергии гамма-квантов при потоке гамма-квантов, равном 10⁴ см⁻²с⁻¹. Данные представлены для случаев измерения мощности дозы в мкР/с и в мкЗв/ч.



1 – в мкЗв/ч, 2 – в мкР/с

Рисунок 5. Зависимость мощности дозы от различной энергии гамма-квантов при потоке $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Решения системы уравнений (3) проще всего найти матричным методом. Рассматриваемая система уравнений может быть записана в виде

$$A \cdot X = B \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} 0,78 & 0,29 & 0,075 & 0,04 & 0,02 & 0,015 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,29 & 0,78 & 0,29 & 0,075 & 0,04 & 0,02 & 0,015 & 0 & 0 & 0 \\ 0,075 & 0,29 & 0,78 & 0,29 & 0,075 & 0,04 & 0,02 & 0,015 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,015 & 0,02 & 0,04 & 0,075 & 0,29 & 0,78 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Элемент измеряемой части матрица с номером 1 имеет вид:

$$B1 = \frac{0,445}{G \cdot R \cdot L}$$

где $R = 5,5 \text{ см}$, $L = 10 \text{ см}$.

Тогда матрица B будет представлена в виде

$$(3,375; 3,386; 3,583; 4,03; 4,583; 5,568; 7,083; 9,53; 14,98; 15,33) \cdot 10^5 \quad (8)$$

Так как детерминант матрицы $A \neq 0$, то существует обратная матрица A^{-1} , позволяющая найти решение в виде:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (9)$$

Алгоритм решения системы уравнений (3) был реализован при помощи математического пакета MathCAD 2001. Для этого вводилась матрица коэффициентов вклада A размером 10×10 и правая часть системы – вектор B . Затем проверяли условие единственности решения системы уравнений (3) $\det A \neq 0$. Если условие выполнялось, то вычислялся вектор решений X системы уравнений (3). Фрагмент программы вычислений на экране компьютера пред-

ставлен на рисунке 6. Основная матрица системы, симметричная относительно главной диагонали ($k_{ij}=k_{ji}$), состоит из коэффициентов вкладов. Запишем ее с учетом следующего: при $|j-i| > 5$ $k_{ij}=k_{ji}=0$.

Тогда для измерения десяти точек имеем:

ставлен на рисунке 6.

После решения для X получены следующие значения:

$$(3,19; 1,85; 2,17; 2,32; 2,34; 2,94; 4,01; 4,57; 11,42; 14,64) \cdot 10^5$$

На рисунке 7 представлены результаты распределений активности отложений на стенках хлоратора, рассчитанные с помощью метода вкладов. Изменения активности по длине участков стали более резкими, а значения активностей различных участков на их стыке более близкими друг к другу.

Суммирование активностей участков хлоратора дает активность отложений, которая равна $2,28 \cdot 10^7 \text{ Бк}$. В состав гамма-излучающих радионуклидов облученного бериллия входят ^{60}Co ($2,7 \cdot 10^8 \text{ Бк/кг}$), $^{108\text{m}}\text{Ag}$ ($2,4 \cdot 10^7 \text{ Бк/кг}$) [3], ^{137}Cs ($1,8 \cdot 10^7 \text{ Бк/кг}$) [4]. В соответствии с полученными экспериментальными данными [4] при взаимодействии хлора с бериллием серебро оставалось в теле бериллия и не выходило в хлорид бериллия. По данным [2] эффективность регистрации линий ^{137}Cs в ~ 2 раза выше, чем эффективность регистрации ли-

ний ^{60}Co . Соответственно, вклад в регистрируемый сигнал ^{137}Cs будет составлять 13,3%. Т.е. активность ^{60}Co в отложениях составляет $1,97 \cdot 10^7$ Бк.

По данным экспериментов [4] доля прореагиро-

вавшего бериллия составляет 6,1%, и находящаяся в хлориде бериллия активность ^{60}Co составляет $1,8 \cdot 10^7$ Бк.

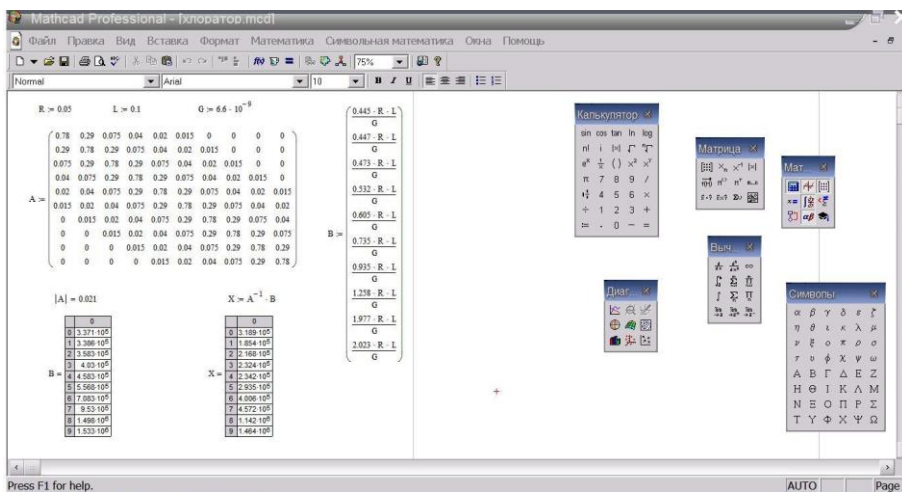


Рисунок 6. Фрагмент программы MathCAD решения системы уравнений

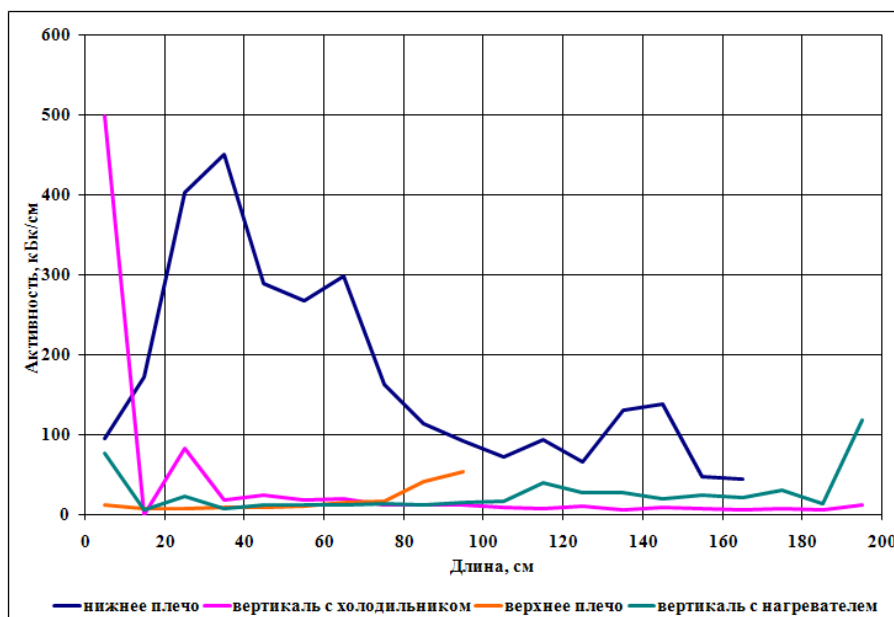


Рисунок 7. Распределения значений активности отложений на стенках хлоратора, рассчитанные по методу вкладов

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Расчет погрешностей измерений проводился по [5]. Для доверительного интервала 0,95 относительная погрешность измерений активности отдельного участка составляет ~10%. Большой вклад в погрешность этих измерений вносит азимутально неравномерное распределение отложений внутри хлоратора.

Как видно из предыдущих данных, рассчитанная величина общей активности также не превышает 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика измерения и расчета распределения и суммарной активности в протяженных источниках относится к технологии неразрушающих измерений.

Проведены измерения активности отложений хлоридов, содержащих ^{60}Co , ^{137}Cs после работ по хлорированию облученного бериллия. Определены аналитические коэффициенты вкладов для объемного источника без самопоглощения.

В ходе расчетов получены распределения активности по участкам хлоратора и суммарная активность отложений, которые хорошо согласуются с другими данными, полученными независимыми измерениями.

Предлагаемый способ расчета активности протяженных источников достаточно прост и легко реализуется с помощью современных технических средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грознов В.Н., Котов В.М., Парамонов В.В. [и др.] Измерения распределения активности источников неразрушающим методом // Атомная энергия.– 1979.– Т. 47, вып. 2.– С.118-119.
2. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене.– Москва: Атомиздат.– 1974.– 386 с.
3. Transportation of Irradiated Beryllium Samples for Scientific Investigation. Specification of Beryllium Samples and Packaging in Containers // Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Marubeni Utility Services, Ltd.– 2009.
4. Бакланова Ю.Ю., Котов В.М., Тажибаева И.Л. [и др.] Отработка технологии получения хлорида из облученного бериллия // Ядерная и радиационная физика: материалы 9-ой междунар. конф.– Алматы.– 2013.– С.68-69.
5. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки наблюдений.– Введ. 1977-01-01.–М.: Стандартиформ, 2008

ҰЗЫН-КӨЗДЕРІНІҢ БЕЛСЕНДІЛІГІН ӨЛШЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ

Котов В.М., Бакланова Ю.Ю., Ерыгина Л.А., Супрунов В.И.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыс бұзбайтын әдіспен желілік көздерде гамма-сәулеленуші радионуклидтердің белсенділігін анықтауға арналған. Әртүрлі учаскелердің сәулелену үлесі қарапайым геометрияның көздері үшін аналитикалық есептелген. Гамма-сәулелену көзі ретінде, оның ішкі қабырғаларында радионуклидтерді бөлумен хлоратор корпусы пайдаланылды.

Үлес коэффициенттерінің есептік мағыналары, хлоратор учаскесі бойынша белсенділіктің таралуы және бөлінудің жиынтықты белсенділігінің абсолютті мағынасы алынған болатын.

MEASUREMENT AND ACTIVITY CALCULATION OF GAMMA-EMITTING LINEAR SOURCES

V.M. Kotov, Yu.Yu. Baklanova, L.A. Erygina, V.I. Suprunov

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The work is devoted to determination of the distribution of gamma-emitting radionuclides in the linear source by the nondestructive method. Contributions of radiation from different sites are calculated analytically for the source of simple geometry. As a source of gamma radiation a chlorinator body with deposits of radionuclides on its inner wall is used.

Calculated values of contribution coefficients, the distribution of activity on the chlorinator sites and the absolute value of the total activity of deposits were obtained.