

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ РАДИОАКТИВНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРУНТОВ ^{137}Cs** **А. К. Калиновский¹, И. А. Малюк²**¹ Межотраслевой научно-технический центр "Укрытие" НАН Украины, Чернобыль² Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Методами математического моделирования определен коэффициент преобразования (КП) мощности экспозиционной дозы, измеренной в центре модели скважины, в удельную активность грунта. Рассчитанный коэффициент может использоваться как коэффициент для бесконечной среды при оценке радиоактивного загрязнения грунтов в результате аварии на ЧАЭС. Расчеты выполнялись двумя методами (аналитическим и пакетом программ MicroShield, версия 5.05) для модели скважины, представляющей собой цилиндр, ось симметрии которого совпадает с осью скважины. В качестве материала тела цилиндра выбран бетон, а источником гамма-излучения - ^{137}Cs . Результаты расчета сравнивались между собой и с данными, полученными экспериментально на модели скважины. Сравнение показало, что отличие значений КП, определенных методами математического моделирования и экспериментальным методом, не превышает 10 %.

Осуществление планов по преобразованию объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему и строительство нового конфаймента предполагает большой объем земляных работ. В результате на поверхности промплощадки, вероятно, окажутся грунты, содержащие радиоактивные материалы (РМ). Это может привести к увеличению доз облучения персонала, выполняющего эти работы и обслуживающего объект "Укрытие", а также к дополнительному радиоактивному загрязнению окружающей среды.

Для принятия оптимальных проектных решений по строительству конфаймента и планов по удалению РМ необходимо наличие объективных данных об их удельных активностях и пространственном расположении в грунтах вокруг аварийного блока.

Постановка задачи

Одним из методов по изучению пород грунта по гамма-излучению радионуклидов, содержащихся в нем, является гамма-каротаж. Теория гамма-каротажа для естественных условий достаточно хорошо разработана и описана в специальной литературе [1].

Ситуация, которая сложилась в грунтах, слагающих геологический разрез вокруг ЧАЭС и на промплощадке объекта "Укрытие", отличается от природных условий. Известно, что на данное время спектр гамма-излучения грунтов более чем на 98 % обусловлен ^{137}Cs . Предварительный анализ данных гамма-каротажа скважин, расположенных на территории промплощадки, показал наличие высоких уровней гамма-поля (более 1 Р/ч) при небольшой мощности радиоактивного слоя до 1 м.

Хотя с момента аварии и строительства объекта "Укрытие" прошло более 17 лет, авторы не нашли в доступной им литературе общепринятого значения коэффициента бесконечной среды, которое можно было бы использовать при интерпретации данных гамма-каротажа для определения удельной активности ^{137}Cs в грунте. Так, в работе [2] дано значение для "теоретической оценки" пересчетного коэффициента, равное $17,3 \text{ мкР} \cdot \text{г}/(\text{ч} \cdot \text{Бк})$, и для сравнения приведено значение $5 \text{ мкР} \cdot \text{г}/(\text{ч} \cdot \text{Бк})$ из другой работы [3].

В работах [4] и [5] рассчитаны значения коэффициента для полубесконечной гомогенной среды при определении удельного содержания ^{137}Cs в твердых радиоактивных отходах, которые практически совпадают. Значения получены независимыми методами: в работе [4] использован гамма-метод ($18 \text{ мкР} \cdot \text{г}/(\text{ч} \cdot \text{Бк})$), а в [5] - метод последовательного рассеяния ($17 \text{ мкР} \cdot \text{г}/(\text{ч} \cdot \text{Бк})$). Используя эти данные, можно определить значения коэффициента для

бесконечной среды (без учета влияния барьерной геометрии), которые будут равны 36 и 34 мкР · г/(ч · Бк) соответственно.

Для оценки удельного содержания ^{137}Cs в грунте авторы настоящей работы использовали КП, связывающий мощность экспозиционной дозы (МЭД) внутри скважины с удельной активностью однородной бесконечной излучающей среды выражением

$$\dot{X} = K_{\text{преоб}} \cdot A_{\text{уд}}, \quad (1)$$

где \dot{X} - МЭД внутри скважины, мкР/ч; $K_{\text{преоб}}$ - КП, мкР · г/(ч · Бк); $A_{\text{уд}}$ - удельная активность грунта, Бк/г. Для расчета КП применили методы, проверенные при расчете пересчетного коэффициента бесконечной среды для определения содержания урана (^{238}U) в руде [6].

Модель скважины для расчетов

Для определения КП предлагается модель скважины, представляющая собой цилиндр высотой 200 см, внешний диаметр которого равен 200 см, а внутренний – 10 см (рис. 1).

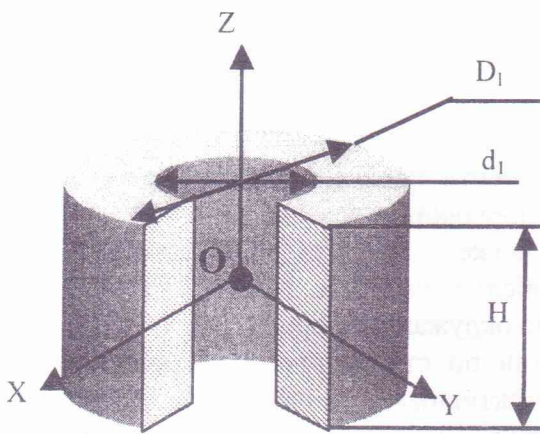


Рис. 1. Схема модели скважины.

Материал тела цилиндра гомогенен по составу, и при его выборе отдано предпочтение бетону с плотностью $2,35 \text{ г/см}^3$. Такой выбор сделан из следующих соображений. Бетон - это универсальный материал, у которого хорошо изучены радиационные свойства, и в справочных таблицах для широкого диапазона энергий гамма-квантов приведены данные по линейному коэффициенту ослабления и дозовому фактору накопления.

Источником гамма-излучения является ^{137}Cs , равномерно распределенный по всему объему тела цилиндра с удельной активностью, равной 1 Бк/г. МЭД определяли в точке О (см. рис. 1), расположенной в геометрическом центре цилиндра.

Далее будут использованы термины, применяемые в теории и практике гамма-каротажа: мощность и ширина радиоактивного пласта, что в нашем случае соответствует высоте цилиндра (H) и разнице внешнего и внутреннего диаметров ($D_1 - d_1$).

Расчеты

Расчеты проводились двумя методами: аналитическим и с использованием пакета программ (ПП) MicroShield, версия 5.05 компании Grove Engineering на компьютере Pentium 200MMX. Для расчета аналитическим методом применялся ПП Mathcad 8.

Аналитический метод

Для расчета величины МЭД в центре модели скважины (точка О) аналитическим методом используем следующие формулы.

МЭД, создаваемая излучающим элементарным объемом, находящимся на расстоянии d от детектора, равна

$$d\dot{X} = \frac{K \cdot A_{\text{уд}} \cdot dm}{d^2} \cdot \exp(-\mu_0 \cdot (d - d_0)) \cdot B_D(\mu_0 \cdot (d - d_0), E, Z), \quad (2)$$

где A_{y0} - удельная активность радиоактивного вещества, Бк/г; K - константа гамма-излучения, мкР · см²/(ч · Бк); $dm = \rho \cdot dV$ - масса радиоактивного вещества в объеме dV ; ρ - плотность радиоактивного вещества, г/см³; d - расстояние между источником и детектором, см; d_0 - расстояние, проходимое гамма-квантами в воздухе; μ_0 - линейный коэффициент ослабления гамма-квантов с энергией E в поглощающей среде, см⁻¹; B_D - дозовый фактор накопления - дополнительный множитель, учитывающий вклад в МЭД рассеянных гамма-квантов; E - энергия гамма-квантов, кэВ; Z - атомный номер.

Гамма-поле, создаваемое в центре объемного источника, можно рассматривать как суперпозицию гамма-полей от элементарных излучающих объемов:

$$\dot{X}_V = \int_V d\dot{X}, \quad (3)$$

где \dot{X}_V - МЭД, создаваемая радиоактивным объемным источником; $d\dot{X}$ - МЭД от элементарного объема; V - объем радиоактивного источника.

В выражении (3) заменим $d\dot{X}$ выражением (2) и получим следующую формулу:

$$\dot{X}_V = \int_V \frac{K \cdot A_{y0} \cdot \rho}{d^2} \cdot \exp(-\mu_0 \cdot (d - d_0)) \cdot B_D(\mu_0 \cdot (d - d_0), E, Z) dV. \quad (4)$$

Затем преобразуем выражение (4), перейдя к цилиндрической системе координат, подставив $dV = r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot dh$, где h - координата, направление которой совпадает с осью z ; φ - угол в плоскости, перпендикулярной оси скважины; r - координата в плоскости xOy равна $r^2 = x^2 + y^2$.

$$\dot{X}_V = 2 \cdot K \cdot A_{y0} \cdot \rho \cdot \int_0^{H/2} \int_0^{D_1/2} \int_0^{D_2/2} \frac{\exp(-\mu_0 \cdot (d - d_0))}{d^2} \cdot B_D(\mu_0 \cdot (d - d_0), E, Z) \cdot r dr dh d\varphi, \quad (5)$$

Дозовый фактор накопления вычисляем по формуле приближенного значения для изотропного источника в бесконечной среде, представляющей собой сумму двух экспонент

$$B_D(\mu_0 \cdot (d - d_0), E, Z) = A_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot \mu_0 \cdot (d - d_0)) + (1 - A_1) \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot \mu_0 \cdot (d - d_0)), \quad (6)$$

где A_1 , α_1 , α_2 - коэффициенты аппроксимирующей функции.

При расчетах по формуле (5) пренебрегаем поглощением и рассеянием гамма-квантов в воздухе. Значения справочных коэффициентов, входящих в формулу (5), K , μ_0 выбраны для гамма-квантов с энергией 661 кэВ, а A_1 , α_1 , α_2 - для гамма-квантов с энергией 500 кэВ [7].

В результате расчетов для данной геометрии модели получены следующие значения МЭД в точке O : с учетом фактора накопления 36,9 мкР/ч; без учета фактора накопления 14,1 мкР/ч.

Метод расчета с использованием ПП MicroShield 5.05

ПП MicroShield широко применяется при расчете величины МЭД, создаваемой источниками гамма-излучения различных геометрических форм и размеров, различного радионуклидного состава в заданной точке пространства с учетом рассеяния гамма-квантов [8].

При проведении расчетов ПП MicroShield учитывает полный спектр гамма-излучения, сопровождающий распад ¹³⁷Cs, поэтому использовалось 6-групповое разбиение шкалы

энергий гамма-излучения источника. Значение энергий гамма-источника для каждого диапазона суммировалось и вычислялась МЭД, создаваемая гамма-квантами этого диапазона, а затем определялась суммарная МЭД. Излучающий объем разбивался на 10000 элементарных ячеек.

Справочные данные о радионуклидах, коэффициентах поглощения, факторах накопления, используемые ПП при расчетах, взяты из стандартных таблиц данных RSICC, ANS и ICRP [9].

В результате расчетов по алгоритмам, заложенным в ПП MicroShield для геометрии модели, описанной ранее, получены следующие значения величины МЭД в точке О: с учетом фактора накопления 32,9 мкР/ч; без учета фактора накопления 14,1 мкР/ч.

Анализ полученных результатов

В таблице приведены значения коэффициентов, которые можно использовать при оценке радиоактивного загрязнения грунтов ¹³⁷Cs. По результатам анализа данных отмечено, что значения КП без учета фактора накопления совпадают, а с учетом фактора накопления отличаются менее чем на 10 %. Кроме того, значения КП с учетом фактора накопления практически совпадают с оценками коэффициентов для бесконечных сред, рассчитанных по данным, приведенным в работах [4] и [5]. Авторы обращают внимание на важность фактора накопления: неучет рассеянных гамма-квантов в расчетной геометрии приводит к занижению значения КП приблизительно в 2,5 раза.

Метод расчета	КП с фактором накопления, мкР · г/(ч · Бк)	КП без фактора накопления, мкР · г/(ч · Бк)
Аналитический	37	14
ПП MicroShield	33	14
Гамма-метод [4]	36	—
Последовательного рассеяния [5]	34	—

На рис. 2 представлены результаты расчетов МЭД в центре модели скважины от высоты и ширины излучающего слоя. Анализируя полученные зависимости, можно сделать следующие выводы:

98 % вклада в МЭД в центре модели скважины дает прилегающий к скважине слой высотой 80 см, а 50 % вклада – слой высотой 14 см;

98 % вклада в МЭД дает слой шириной 60 см, а 50 % - слой шириной 11 см.

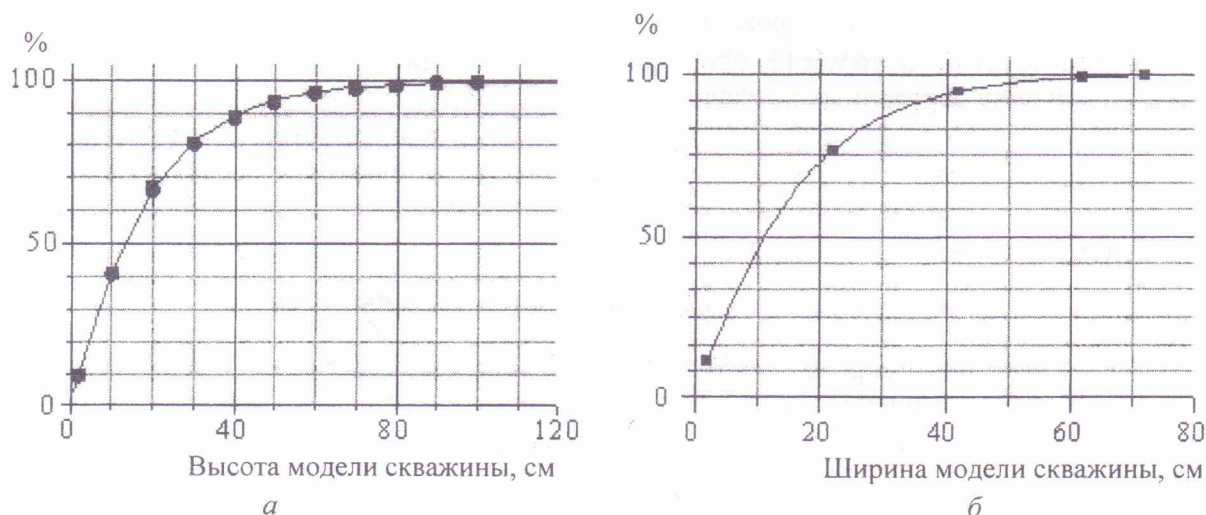


Рис. 2. Зависимость вклада в МЭД в центре модели скважины от высоты (а) и ширины (б).

Выбранные размеры модели скважины обеспечивают насыщение МЭД в центре модели. Следовательно, рассчитанный КП может использоваться при определении удельной активности грунта, равномерно загрязненного ^{137}Cs , когда скважина проходит через изотропный радиоактивный пласт, бесконечный по высоте и ширине.

Экспериментальная модель скважины для калибровки каротажных радиометров при диаметре скважины 10 см должна иметь следующие размеры активного слоя: высота и ширина не менее 80 и 60 см соответственно, чтобы найденное значение КП составило величину порядка 98 % от КП для бесконечной среды.

Результаты расчетов согласуются с данными, полученными на экспериментальной модели скважины методом, предложенным в работе [10]. Измерения проводились с использованием геологоразведочного сцинтилляционного прибора СРП-68-02. Пределы допускаемой основной погрешности измерений прибора не превышали $\pm 10\%$. Блок детектирования прибора собран на базе кристалла NaJ(Tl) диаметром 18 и высотой 30 мм, помещенного в свинцовый экран. Полученная величина КП равна $36 \text{ мкР} \cdot \text{г}/(\text{ч} \cdot \text{Бк})$.

Выбранная для расчетов модель скважины и предложенные методы расчета позволяют также определять дополнительные коэффициенты, учитывающие особенности конструкций скважин (толщину стенок и диаметр обсадных труб) и расположения РМ в грунтах. Например, используя зависимости, представленные на рис. 2, *a* можно определить поправочный коэффициент, учитывающий мощность (высоту) радиоактивного слоя. Это особенно актуально для условий промплощадки объекта "Укрытие", где по данным гамма-каротажа на отдельных участках мощности радиоактивного слоя различны.

Выводы

Хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений КП доказывает правильность как теоретических расчетов, так и постановки экспериментов на моделях.

При оценке результатов авторы считают, что методы расчета (аналитический и с использованием ПП MicroShield) равнозначны и могут использоваться независимо друг от друга.

Применение предложенных методов расчета позволит в дальнейшем частично исключить необходимость изготовления громоздких экспериментальных моделей и сократить время определения дополнительных коэффициентов, которые сложно получить экспериментально, но они необходимы при анализе данных гамма-каротажа.

Рассчитанное значение КП можно использовать в качестве коэффициента бесконечной среды при оценке радиоактивного загрязнения грунтов ^{137}Cs . Это позволит значительно повысить достоверность оценки количества РМ, выброшенных на окружающую территорию во время аварии и захороненных в грунтах промплощадки объекта "Укрытие" и временных хранилищах.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Н. И. Панасюку, П. Н. Дубенко, А. А. Правдивому за помощь при организации и проведении экспериментальных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пруткина М.И., Шашкин В.Л. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Панасюк Н.И., Скорбун А.Д., Павлюченко Н.И. и др. Определение пересчетного коэффициента для гамма-каротажа скважин в условиях зоны объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2002. - Вип. 9. - С. 105 - 109.
3. Обзор и анализ твердых долгоживущих и высокоактивных отходов в Чернобыльской зоне отчуждения: (Отчет по проекту Генерального директората Европейской комиссии по охране окружающей среды № В7-5350/99/51983/MAR/C2). - Февраль 2001.

4. Сухоручкин А.К., Брагин Ф.В. Практическое применение гамма-метода для определения активности отходов в зоне отчуждения // Проблемы Чернобиля. - 1998. - Вып. 2. - С. 103 - 106.
5. Мац Н.А., Соколов А.К., Хайкович И.М. и др. Сцинтилляционный дозиметр в системе автоматизированного радиационного контроля // Экологические системы и приборы. - 2000. - № 6. - С. 6 - 9.
6. Калиновский А.К., Павлюченко Н.И., Панасюк Н.И. Определение пересчетного коэффициента бесконечных сред методами математического моделирования // Міжнар. наук. сем. "Радіоекологія Чорнобильської зони", 18 - 19 сент. 2002 г.: Тез. докл. - Славутич, 2002. - С. 33 - 34.
7. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - М.: Атомиздат, 1977.
8. Боровой А.А., Горбачев Б.И., Карпов А.А. Эффективность защиты от излучений топливосодержащих материалов объекта "Укрытие". - Чернобыль, 1999.
9. *MicroShield 5 User's Manual*. Grove Engineering (A FTI Co.), 1996.
10. Калиновский А.К., Малюк И.А., Панасюк Н.И. и др. Метод оценки радиоактивного загрязнения грунтов локальной зоны объекта "Укрытие" и промплощадки ЧАЭС с использованием гамма-каротажа // Проблемы Чернобиля. - 2001. - Вып. 8. - С. 21 - 34.

**ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ПЕРЕРАХУНКОВОГО КОЕФІЦІЄНТА ПРИ ОЦІНЦІ РАДІОАКТИВНОГО
ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТІВ ¹³⁷Cs**

О. К. Калиновський, І. А. Малюк

Методами математичного моделювання визначено коефіцієнт перерахунку потужності експозиційної дози, виміряної в центрі моделі свердловини, у питому активність ґрунтів. Визначений перерахунковий коефіцієнт може використовуватись як коефіцієнт для нескінченних середовищ при оцінці радіоактивного забруднення ґрунтів у результаті аварії на ЧАЕС. Розрахунки виконувались двома методами (аналітичним і пакетом програм MicroShield, версія 5.05) для моделі свердловини, що являє собою циліндр, вісь симетрії якого збігається з віссю свердловини. Матеріалом тіла циліндра є бетон, а джерелом гамма-випромінювання - ¹³⁷Cs. Результати розрахунку порівнювалися між собою та з даними, отриманими експериментально на моделі свердловини. Порівняння показало, що відмінність значень перерахункових коефіцієнтів, визначених методами математичного моделювання та експериментальним, не перевищує 10 %.

**DEFINITION BY METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION
OF THE CONVERSION COEFFICIENT FOR THE ESTIMATION
OF THE RADIOACTIVE CONTAMINATION OF SOILS BY ¹³⁷Cs**

O. K. Kalynovsky, I. A. Malyuk

The coefficient of conversion the doze rate at the centre of boreholes model to specific activity of soil by methods of the mathematical modelling is determined. This conversion coefficient can be used as coefficient of infinite environments for the estimation of radioactive contamination of soils as a result of accident on Chornobyl NPP. The calculation is carried out by two methods (analytical and software MicroShield, version 5.05) for the borehole model which represents the annular cylinder. The concrete is chosen as material of the cylinder's body. The source of gamma-radiation is ¹³⁷Cs, which evenly is distributed in total volume of the cylinder. The calculation results were compared among themselves and to the data received experimentally on the borehole model. The outcome analysis has shown that the distinction of conversion coefficients determined by methods of mathematical modelling and the experimental method do not exceed 10 %.

Поступила в редакцію 12.03.03,
после доработки – 24.09.03.