

УДК 621.039.58

## АНАЛИЗ ВНЕШНЕГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ С РАО

С.А. Письменецкий<sup>1</sup>, В.Г. Рудычев<sup>1</sup>, Е.В. Рудычев<sup>2</sup>, О.К.Тютюник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, пл. Свободы, 4, Украина

<sup>2</sup>Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, ул. Академическая, 1, Украина

E-mail: rud@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 25 мая 2008 г.

Интегрированием по объему источника и моделированием методом Монте-Карло выполнены расчеты полей внешнего гамма-излучения цилиндрических объемных источников. Предложена формула для модификации значений фактора накопления, используемого для учета самопоглощения и рассеяния в источнике. Отличие результатов расчета двумя методами, при этом, не превышает 10%. Определено, что на заданной дистанции от поверхности источника в радиальном и аксиальном направлениях, мощность дозы минимальна при выполнении условия  $2R/h \approx 0,9-1,0$  ( $R$  – радиус,  $h$  – высота цилиндра). Оптимальное отношение диаметра к высоте слабо зависит от объема цилиндра и плотности вещества внутри него. Показано, что за счет изменения высоты и диаметра стандартной цилиндрической бочки (объем 200 л, широкое использование для хранения РАО), внешнее излучение РАО в боковом направлении может быть снижено на 15% и более. Эффект снижения дозы увеличивается с удалением от бочки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цилиндрический источник, рассеянное излучение, факторы накопления, бочка с РАО, внешнее излучение, оптимизация формы.

При эксплуатации АЭС образуется значительное количество радиоактивных отходов (РАО) высокой, средней (ОСУА) и низкой (ОНУА) удельной активности. В зависимости от типа реактора количества накапливающихся РАО заметно отличаются: жидкие РАО (или ЖРО) – от 0,15 до 0,35 м<sup>3</sup>/(МВт·год), твердые РАО (или ТРО) – от 0,1 до 0,3 м<sup>3</sup>/(МВт·год). Для реакторов ВВЭР-1000, которыми в основном оснащены украинские АЭС, эта величина составляет сотни кубометров в год.

Дальнейшее хранение РАО осуществляют как правило на территории промплощадки АЭС. Твердые отходы сортируют и максимально уменьшают их объем. Для этого ТРО подвергают сжиганию и прессованию, влажные отходы предварительно сушат. ЖРО переводят в форму более безопасную для дальнейшего хранения с уменьшением их объема, в основном, методами упаривания.

Значительная часть переработанных РАО упаковывается в стандартные бочки объемом 170 и 200л. Очень часто в такой же таре РАО цементируют или битумируют с последующей передачей на хранение. Следует отметить, что после уменьшения объема РАО, особенно ЖРО, прошедших стадию упаривания, их удельная активность существенно повышается. Они могут оставаться ОСУА, но вблизи верхней границы своего диапазона. Обращение с такими отходами – перегрузка, транспортировка и т.д.,- требует дополнительных мер по обеспечению норм безопасности и не превышения дозовых нагрузок на обслуживающий персонал. В первую очередь, к таким мерам относятся применение защитных экранов, приспособлений для дистанционного выполнения операций, введение жесткого регламента времени работы с затаренными РАО и т.д.

Целью настоящей работы является уменьшение радиационного воздействия РАО, помещенных в цилиндрические емкости, например, в бочки объемом 200л. Известно [1], что при проектировании реакторных установок одним из методов оптимизации биологической защиты цилиндрического реактора является определение отношения его диаметра к высоте. Руководствуясь аналогичными соображениями, рассмотрим, как влияют геометрические параметры цилиндрической емкости с РАО (отношение диаметра к высоте цилиндра) на распределение мощности дозы гамма-излучения снаружи емкости, и при какой геометрии дозу на выбранном удалении от емкости можно считать оптимальной.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В настоящее время существует ряд признанных программных пакетов, использующих метод Монте-Карло (М-К), позволяющих надежно рассчитать характеристики излучения объемных источников различной формы с заданным элементарным и радионуклидным наполнением. Это, в первую очередь, пакеты PENELOPE [2], GEANT [3], MCNP [4] и др. Общим недостатком пакетов, использующих метод М-К, являются значительные затраты времени при моделировании объектов больших размеров, что делает практически невозможной оптимизацию с их помощью параметров источников или биологической защиты.

Хорошо известно [5], что во многих случаях удовлетворительные практические результаты дает представление протяженных источников в виде совокупности точечных изотропных источников (при не особенно высоких коэффициентах ослабления гамма-квантов). При этом предполагается, что в бесконечной однородной изотропной среде интенсивность излучения точечного изотропного источника является функцией

расстояния его от точки наблюдения. В этом случае, с учетом рассеянного излучения, плотность потока гамма-квантов в точке наблюдения пропорциональна числовому фактору накопления  $B$  и определяется соотношением:

$$N_{\gamma}(r, E) = \frac{S_V B [\mu(E)r] \exp[-\mu(E)r]}{4\pi r^2}, \tag{1}$$

где  $r$  - расстояние от источника до точки наблюдения,  $\mu(E)$ - линейный коэффициент ослабления в среде,  $E$ - энергия гамма-квантов,  $B$  – числовой фактор накопления излучения точечного источника в бесконечной среде,  $S_V$  – объемная мощность источника,  $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ (используются обозначения из [5]). Поток излучения объемного источника в точке наблюдения в таком подходе определяется интегрированием по его объему и суммированием по группам гамма-квантов с разными энергиями с учетом самопоглощения и числового фактора накопления потока рассеянного излучения. При этом число гамма-квантов от элемента  $dV$  объемного источника в точке наблюдения определяется соотношением:

$$dN_{\gamma}(r, r_s, E) = \frac{S_V B [\mu(E)r_s] \exp[-\mu(E)r_s] dV}{4\pi r^2}, \tag{2}$$

$r$ - расстояние от  $dV$  до точки наблюдения,  $r_s$  – часть расстояния  $r$ , ограниченная объемом источника. Предполагается, что путь  $(r - r_s)$  гамма-кванты проходят без рассеяния и поглощения.

Характерный вид распределения доз вокруг цилиндрического объемного однородного источника представлен на рис.1 (наш расчет в пакете MCNP). Как видно, изодозные линии в осевой плоскости цилиндра образуют симметричные максимумы на оси цилиндра и на половине высоты цилиндра в радиальном направлении.

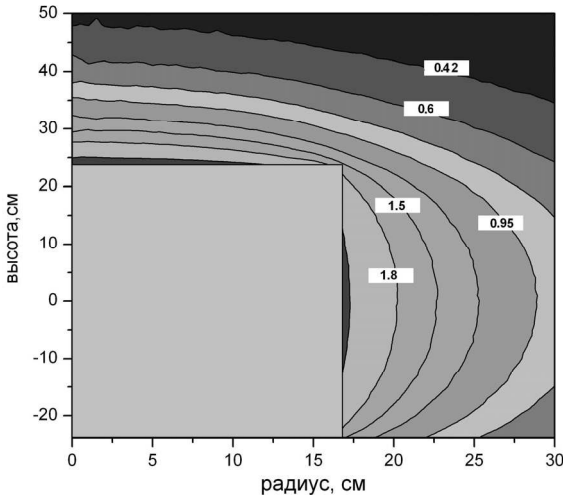


Рис.1. Дозовое распределение вокруг цилиндрического источника.

С учетом (2) максимальное значение потока гамма-квантов от цилиндрического источника на расстоянии  $b$  от оси и на половине высоты определяется соотношением:

$$N_R(b, E) = \frac{S_V}{\pi} \int_0^{h/2} dz \int_0^R r dr \int_0^{\pi} \frac{e^{-\mu(E)r_s} B[\mu(E)r_s] d\varphi}{r_V^2}, \tag{3}$$

где  $r_V^2 = r^2 + b^2 + z^2 - 2dr \cos \varphi$ ,

$$r_s = [r^2 - br \cos \varphi + \sqrt{(r_V^2 - z)^2 R^2 - b^2 r^2 \sin^2 \varphi}] \cdot \frac{r_V}{r_V^2 - z^2}$$

,  $R$  - радиус цилиндра,  $h$  - высота цилиндра.

На оси цилиндра в торцевом направлении максимальное значение потока гамма-квантов на расстоянии  $a$  от поверхности цилиндра определяется из выражения:

$$N_a(a, E) = \frac{S_V}{2} \int_0^h dz \int_0^R \frac{\exp[-\mu(E) \cdot z \cdot \sec \theta] B[\mu(E) \cdot z \cdot \sec \theta] r dr}{r^2 + (z+a)^2}, \tag{4}$$

где  $\sec \theta = \sqrt{r^2 + (z+a)^2} / (z+a)$ . Отметим, что соотношение (3) справедливо при  $b/R \geq 1,15$ .

При наличии нескольких групп гамма-квантов с энергиями  $E_i$  дозы в радиальном направлении на расстоянии  $b$  и в торцевом направлении на расстоянии  $a$  от источника суммируются:

$$D_R(b) = \sum_i g_i N_R(b, E_i), \tag{5a}$$

$$D_a(a) = \sum_i g_i N_a(a, E_i), \tag{5б}$$

где  $g_i$  – коэффициенты связи плотности потока с мощностью дозы при данной  $E_i$ . Соответственно, в размерных единицах для дозы в биологической ткани соотношения (5) дают:

$$D_R(b) = 4R \times 1,09 \times \sum_i A_V^i \Gamma_{Cl}^i G_R(b, E_i),$$

$$D_a(a) = 2\pi \times 1,09 \times \sum_i \frac{A_V^i \Gamma_{Cl}^i}{\mu(E_i)} \times G_a(a, E_i),$$

где обозначено  $A_V^i$  – удельная объемная активность  $i$ -го изотопа,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ ,  $\Gamma_{Cl}^i$  – гамма-постоянная для этого изотопа,  $\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$ ,  $R$  и  $\mu(E)$  в метрах и  $\text{м}^{-1}$  соответственно, а  $G_R$  и  $G_a$  равны:

$$G_R(b, E) = \int_0^{h/2} dz \int_0^R r dr \int_0^F \frac{e^{-\mu(E)r_s} B[\mu(E)r_s] d\varphi}{r_V^2},$$

$$G_a(a, E) = \int_0^h dz \int_0^R \frac{\exp[-\mu(E) \cdot z \cdot \sec \theta] B[\mu(E) \cdot z \cdot \sec \theta] r dr}{r^2 + (z+a)^2}.$$

Соотношения (5) позволяют рассчитать дозу, как на оси, так и в радиальном направлении от цилиндрических источников с разными размерами, заполненных РАО с различным радионуклидным и элементным составом.

### ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ

**Радионуклидный состав.** Как правило РАО, предназначенные для длительного хранения, проходят предварительную выдержку на территории АЭС. При достаточно большом времени выдержки в радионуклидном составе доминируют относительно долгоживущие изотопы:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  и т.д. Для проведения расчетов в реальных условиях хранения РАО в качестве основных гамма-излучателей следует брать радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ .

**Элементный состав.** При хранении жидких РАО одним из наиболее простых и дешевых методов кондиционирования является цементирование. Значительную долю твердых РАО, предназначенных для длительного хранения, представляет строительный мусор, основу которого составляет бетон с металлическими включениями. Таким образом, для проведения расчетов, элементный состав РАО, заполняющих цилиндрические емкости, целесообразно моделировать бетоном различной плотности с добавкой железа.

Эффективность методики объемного интегрирования с учетом рассеянного излучения в задачах оптимизации, будет определяться выигрышем времени при одинаковой достоверности результатов расчета для разных объемов цилиндрических источников и плотностей РАО.

Были рассчитаны распределения мощности дозы цилиндрических источников с различными объемом, элементным и радионуклидным составом в зависимости от расстояния в радиальном и аксиальном направлениях. На рис. 2 представлены относительные изменения дозы в зависимости от расстояния от поверхности источника объемом 1000л в радиальном направлении. Плотность заполнения принята 0,01; 1 и 2,5 г/см<sup>3</sup>, элементный состав соответствует бетону, радионуклид -  $^{137}\text{Cs}$ , отношение  $2R/h = 1,45$ .

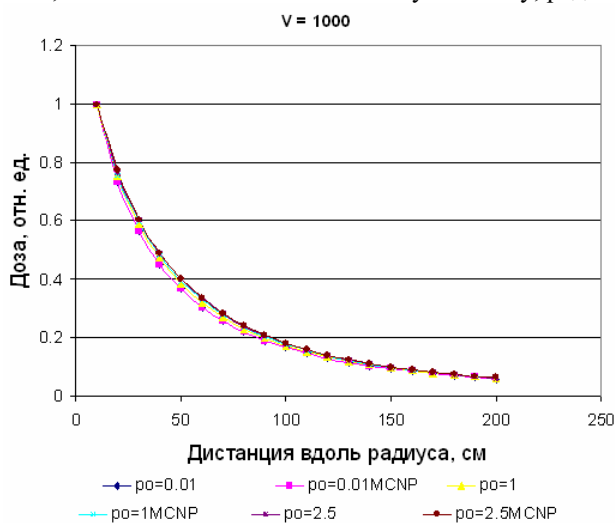


Рис.2. Дозовые распределения вдоль радиуса, рассчитанные методами объемного интегрирования и Монте-Карло (нормировка кривых на расстоянии 10 см от поверхности).

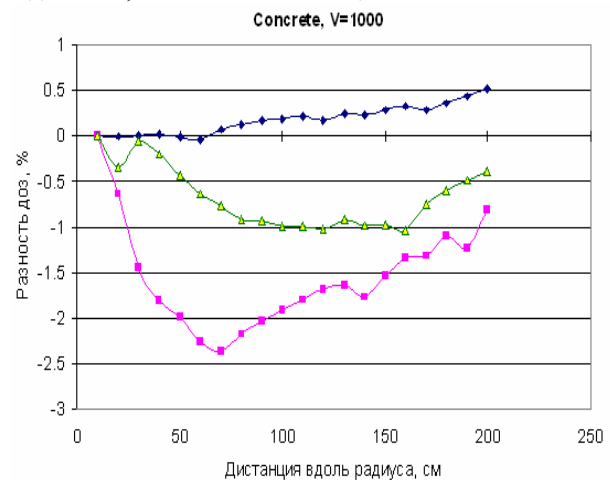


Рис.3. Относительная разность доз, рассчитанных методами объемного интегрирования и Монте-Карло.

Видно, что приведенные зависимости, рассчитанные как с использованием соотношения (5а) (обозначенных как  $DV_R(X)$ ), так и в пакете MCNP (обозначенных как  $DMC_R(X)$ ) мало отличаются друг от друга при удалении от поверхности на  $X > 10$  см. Оба семейства кривых нормированы на максимум. Подобие дозовых зависимостей, рассчитанных как методом интегрирования точечных источников, так и методом Монте-Карло подтверждает их корректность в диапазоне плотностей от 0,1 до 2,5 г/см<sup>3</sup>. На рис.3 представлены зависимости разностей доз из рис.2 в соответствии с соотношением доз для различных значений плотности РАО:

$$\Delta_c(X) = [DV_R(X) - DMC_R(X)] / DMC_R(X). \quad (6)$$

Относительная разность доз вдоль радиального направления, рассчитанная методами объемного интегрирования и Монте-Карло, в пределах от 10 до 200 см для источника объемом 1000 л не превышает 2,5%. При уменьшении объема источника до 100 л, разность доз снижается до 2%. Если основным радионуклидом

выбран  $^{60}\text{Co}$ , то для указанных значений плотности бетона и диапазона объемов источников от 100 до 1000л разность доз не превышает 2%. Аналогичные распределения доз в аксиальном направлении показывают, что их отклонение также не превышает 2%.

Таким образом, вид дозовых распределений, как для радиального, так и для аксиального направлений практически одинаков при вычислении методом объемного интегрирования и моделированием с помощью метода Монте-Карло.

Кроме относительного изменения зависимостей доз от расстояния, представляет интерес изменение дозы на фиксированной дистанции для разных плотностей источника. Выполнены исследования изменения разности доз в зависимости от плотности заполняющих материалов (бетона и железа) для различных объемов источников. Разность доз вычислялась по соотношению, аналогичному (6):

$$\Delta_X(\rho) = [DV_R(X, \rho) - DMC_R(X, \rho)] / DMC_R(X, \rho). \quad (7)$$

На рис. 4 показаны изменения  $\Delta_X(\rho)$  для заполнения источника бетоном и железом в зависимости от плотности на расстоянии 10 см от поверхности источника объемом 1000л (аналогичный вид зависимости имеют при меньших объемах). Для железа превышение дозы  $DV$  над  $DMC$  достигает 15%, а для бетона 32%. Это, по-видимому, связано с тем, что мы используем в соотношениях (3) и (4) фактор накопления для бесконечной среды, а источник имеет вполне конечные размеры. Модификация фактора накопления в виде следующего соотношения:

$$B_M = 1 + \frac{B_\infty - 1}{K}, \quad (8)$$

где  $K$  – подгоночный параметр, позволяет уменьшить отклонение  $DV$  от  $DMC$ . Это иллюстрируют кривые, приведенные на рис.4. При  $K = 1,6$  расхождение результатов расчета  $\Delta_X(\rho) < 10\%$  как для бетона, так и для железа.

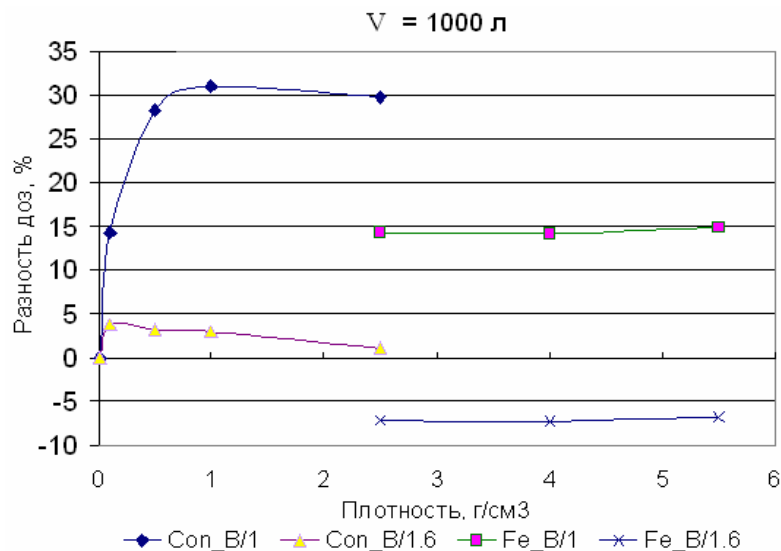


Рис.4. Эффект вариации факторов накопления при расчете дозы объемного цилиндрического источника, заполненного плотной средой.

Таким образом, использование корректирующего множителя (8) в соотношении (5) позволяет повысить точность описания дозовых распределений от цилиндрического источника, рассчитанных методом объемного интегрирования.

### ВЛИЯНИЕ ОТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА К ЕГО ВЫСОТЕ НА МОЩНОСТЬ ДОЗЫ ВНЕШНЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследуем влияние формы цилиндрического источника с заданным объемом на величину дозы на фиксированном расстоянии от его поверхности в радиальном и аксиальном направлениях. Используем метод объемного интегрирования, верифицированный в предыдущем разделе. Для определенности возьмем источник объемом 200л, расстояния от поверхности зададим равными 50, 100 и 200см (50см и 100см – типичные дистанции, на которых указывается мощность дозы источника). Для указанного источника с плотностями наполнителя  $0,01 \text{ г/см}^3$  и  $2 \text{ г/см}^3$ , элементарным составом бетона и излучающим радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  показано изменение дозы в зависимости от радиуса (см. рис. 5а и 5б).  $Dr50$  и  $Da50$  – дозы на расстоянии 50см от поверхности в радиальном и аксиальном направлениях соответственно. Данные, приведенные на рисунках 5, показывают, что при малом радиусе источника доза на высоте половины цилиндра больше дозы на оси при одинаковом удалении. С ростом радиуса, т.е. уплощением цилиндра как радиальная, так и аксиальная дозы растут, достигают максимума, а затем спадают. Отметим, что при некотором значении радиуса, доза в

аксиальном направлении сравнивается с дозой в радиальном направлении, а при дальнейшем увеличении радиуса ее превосходит.

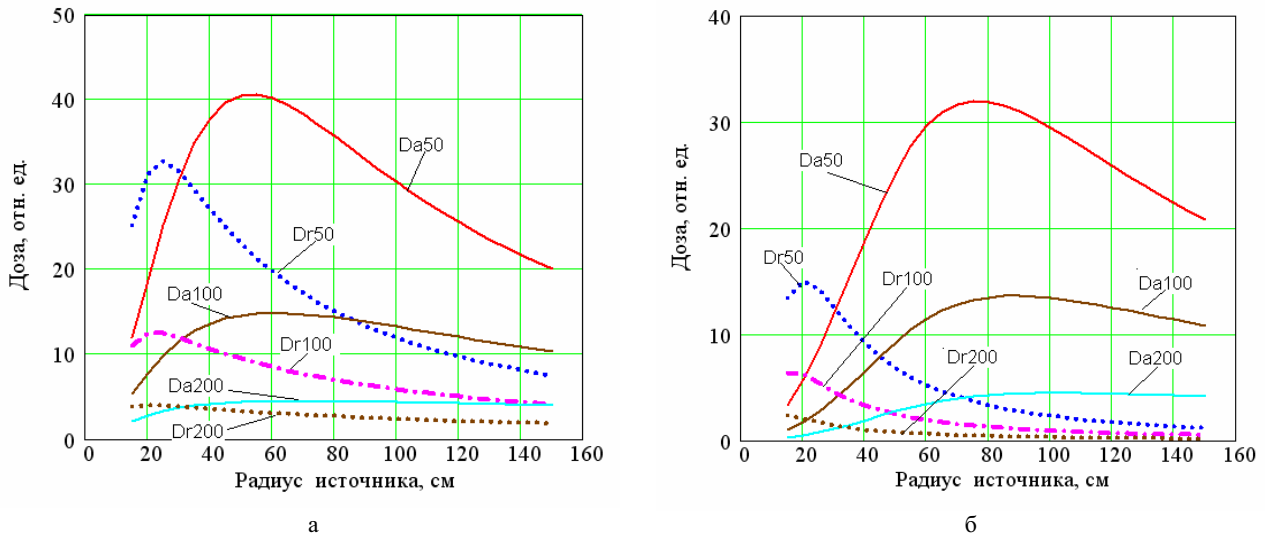


Рис.5. Зависимость доз от радиуса источника в радиальном и аксиальном направлениях: а-плотность вещества в источнике равна  $0,01 \text{ г/см}^3$ ; б - плотность вещества в источнике равна  $2 \text{ г/см}^3$

На рис.6 показаны зависимости дозы от геометрического параметра  $\chi$  ( $\chi=2R/h$  -отношение диаметра источника к его высоте) для объемов источника 200л и 1000л на расстоянии 50 см от поверхности. Рис.6 показывает, что дозы на половине высоты цилиндра и на его оси над основанием в зависимости от геометрического параметра  $\chi$  для разных объемов источников ведут себя одинаково. Доза от источника с большим объемом соответственно больше, увеличение плотности заполнения для источника с большим объемом несколько изменяет величину  $\chi_{eq}$ , при которой  $D_R(\chi_{eq})=D_a(\chi_{eq})$ .

Характер изменения доз в радиальном и аксиальном направлениях, подобный приведенному на рис. 5 и 6, сохраняется в диапазоне объемов от 40л до 1000л и плотностей РАО от  $0,01$  до  $2,5 \text{ г/см}^3$  для бетона и от  $0,01$  до  $5,5 \text{ г/см}^3$  для железа.

Таким образом, из приведенных выше данных следует, что для заданного объема цилиндрического источника существует определенное соотношение между диаметром и высотой  $\chi_{eq}$ , при котором максимальная мощность дозы на фиксированном расстоянии от поверхности в радиальном направлении равна максимальной мощности дозы в аксиальном направлении и определяется из уравнения:

$$D_{MIN} = DV_R(\chi_{eq}) = DV_a(\chi_{eq}). \quad (9)$$

Изменение размеров цилиндра, т.е. уменьшение или увеличение  $\chi$  относительно  $\chi_{eq}$  приводит к росту дозы либо в радиальном, либо в аксиальном направлениях.

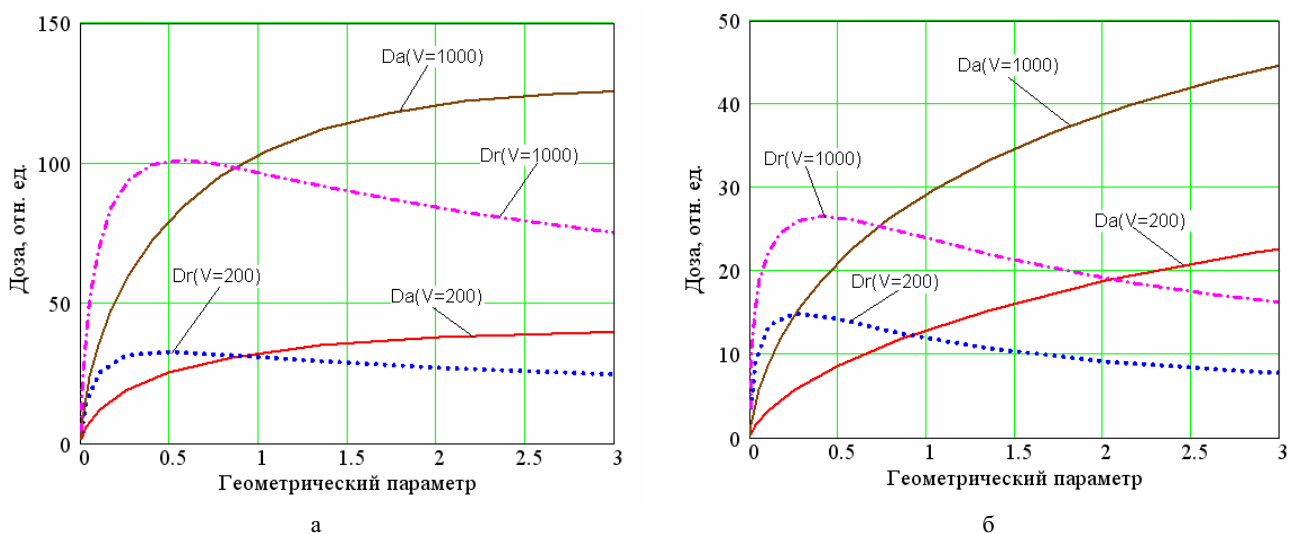


Рис.6. Зависимость доз в радиальном и аксиальном направлениях от геометрического параметра источника  $\chi$ : а-плотность равна  $0,01 \text{ г/см}^3$ , б-плотность равна  $2 \text{ г/см}^3$ .

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С ФИКСИРОВАННЫМ ОБЪЕМОМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОПТИМАЛЬНУЮ ДОЗУ НА ЗАДАННОМ РАССТОЯНИИ

Для источника с заданным объемом  $V$  высота определяется величиной радиуса  $h=V/\pi R^2$ . Тогда, с учетом соотношений (3-5), дозы на фиксированном расстоянии  $X$  от поверхности источника в радиальном и аксиальном направлениях будут равны при некотором радиусе  $R_{opt}$ , который определяется из уравнения:

$$DV_R(R_{opt}, V, X) = DV_a(R_{opt}, V, X). \quad (10)$$

Отметим, что значение дозы как в радиальном, так и в аксиальном направлениях зависит от элементного и радионуклидного состава, а также плотности РАО в источнике. Отношение диаметра к высоте для  $R_{opt}$  определяется как

$$\chi_{opt} = \frac{2R_{opt}}{h} = \frac{2\pi R_{opt}^3}{V}. \quad (11)$$

На рис. 7а показаны зависимости оптимального параметра формы (элементный состав - бетон,  $^{137}\text{Cs}$  – основной радионуклид)  $\chi_{opt}$  от плотности РАО для различных объемов  $V$  источника. Расстояние от поверхности в этом случае  $X = 50\text{см}$ . Данные, приведенные на рис. 7а, показывают, что на расстояниях, сравнимых с размерами источников или меньших, параметр  $\chi_{opt}$  уменьшается с ростом объема источника даже при малых плотностях. При больших плотностях увеличение объема приводит к более резкому спаду параметра формы. В диапазоне объемов источников, больших 100л, параметр формы меньше 1 практически для всех объемов. При больших плотностях ( $\sim 2,5\text{ г/см}^3$ ) и для объема 1000л  $\chi_{opt}$  меньше на 30% по сравнению с оптимальным для объема 40л. Это связано с существенным отличием геометрических условий формирования излучения цилиндрическим источником в аксиальном и в радиальном направлениях. Увеличение расстояния, на котором сравниваются дозы (см. рис. 7а и 7б), приводит к росту параметра формы в зависимости от плотности практически для всего диапазона объемов источников. При этом, разброс значений параметра формы  $\chi_{opt}$  уменьшается. Отметим, что значение  $\chi_{opt} = 1$  соответствует минимальной площади поверхности цилиндрического источника при заданном объеме.

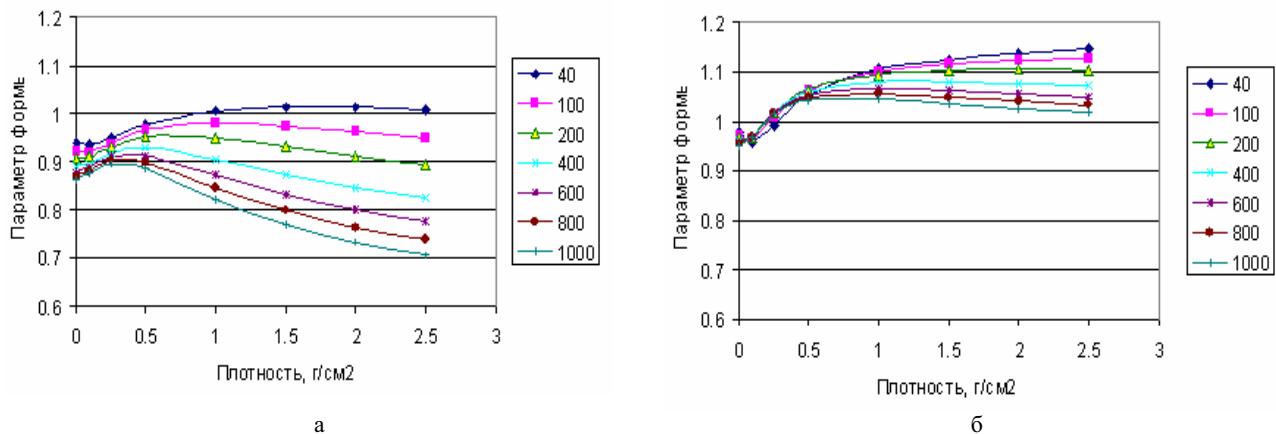


Рис.7. Зависимости оптимального параметра формы  $\chi_{opt}$  от плотности РАО (элементный состав - бетон,  $^{137}\text{Cs}$  – основной радионуклид) для различных объемов источника:  
а-расстояние от поверхности  $X = 50\text{ см}$ ; б-расстояние от поверхности  $X = 200\text{ см}$ .

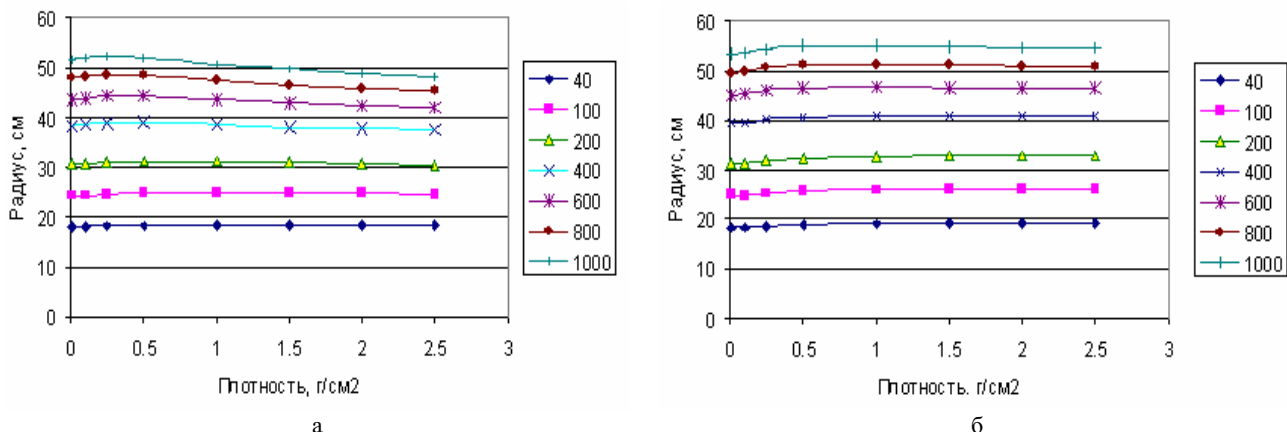


Рис.8. Зависимости оптимального радиуса от плотности РАО (элементный состав - бетон,  $^{137}\text{Cs}$  – основной радионуклид) для различных объемов источника:  
а-расстояние от поверхности  $X = 50\text{ см}$ ; б-расстояние от поверхности  $X = 200\text{ см}$ .

На рис.8 показаны зависимости оптимальных радиусов от плотности РАО для источников различных объемов при  $X = 50$  и  $200$  см. Для  $X = 50$  приведенные данные показывают, что радиусы слабо зависят от плотности для объемов источников вплоть до  $400$  л. Для объемов, больших  $400$  л, оптимальный радиус уменьшается более существенно. Для  $X = 200$  см появляется тенденция к росту оптимального радиуса с увеличением плотности РАО.

### ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ОБЪЕМОМ 200 ЛИТРОВ

На примере стандартной бочки объемом  $200$  л рассмотрим возможность оптимизации ее размеров для уменьшения излучения от заполняющих ее РАО. Стандартные размеры бочек объемом  $200$  л, выпускаемых промышленностью для потребителей,  $R = 28$  см,  $h = 81,2$  см.

Используя процедуру, описанную в предыдущем разделе, получены оптимальные значения радиусов двухсотлитровой бочки в зависимости от плотности РАО. Данные, приведенные на рис.9, показывают, что для РАО с элементарным составом бетона, радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  либо  $^{60}\text{Co}$ , поведение зависимости  $R_{opt}$  от плотности РАО мало отличается. Величина  $R_{opt}$  зависит как от плотности РАО, так и от расстояния  $X$ , на котором, в соответствии с соотношением (8), сравниваются дозы в радиальном и аксиальном направлениях. Плотности реальных РАО (бетон) находятся в диапазоне от  $0,5$  до  $2,5$  г/см<sup>3</sup>, соответствующие значения  $R_{opt}$  от  $32$  см до  $32,8$  см.

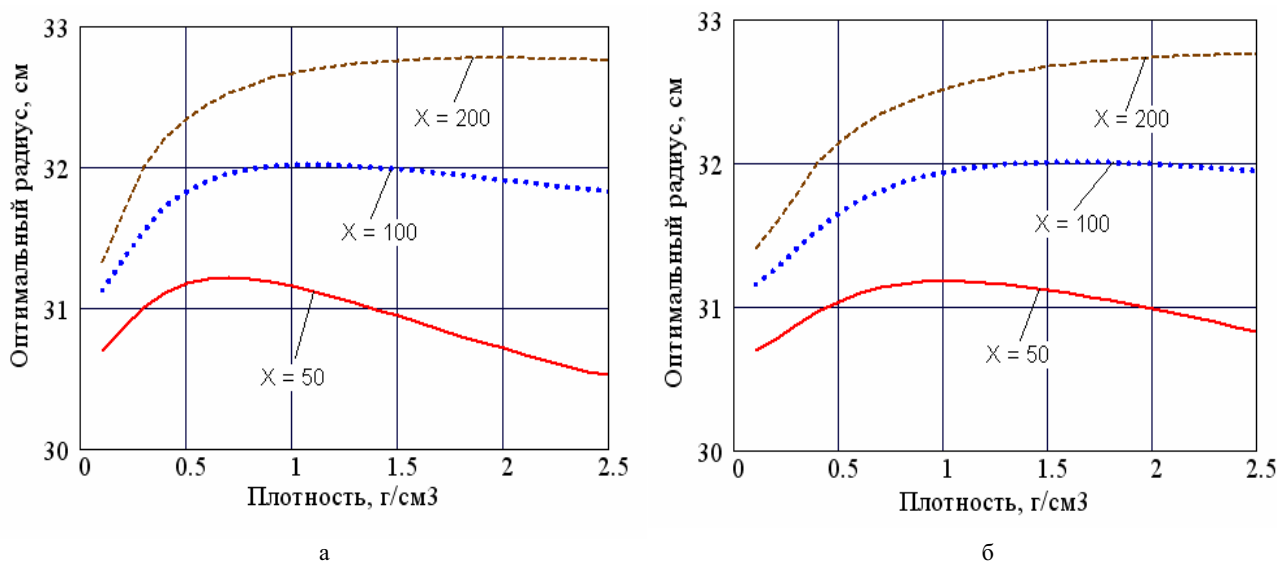


Рис.9. Зависимости оптимального радиуса от плотности РАО для объема источника  $200$  л:  
а- элементарный состав - бетон, радионуклид –  $^{137}\text{Cs}$ ; б- элементарный состав - бетон, радионуклид –  $^{60}\text{Co}$ .

Отметим, что радиус бочки  $R_s$ , при котором минимальна ее поверхность при данном объеме, т.е. минимальны расходы конструкционного материала, определяется из условия  $\chi = 1$ , и тогда  $R_s = (V/2\pi)^{1/3}$ . Величине  $R_s = 31,7$  соответствует площадь  $S_{serf} = 189,3$  дм<sup>2</sup>. Поверхность же стандартной бочки с  $R = 28$  см приблизительно на  $1,5\%$  больше. Поверхность же бочки с  $R_{opt}$  практически совпадает с  $S_{serf}$ .

Доза, создаваемая РАО, которые загружены в бочку с  $R_{opt}$ , на дистанции, превышающей  $1$  м от поверхности как в аксиальном так, так и в радиальном направлениях, меньше, чем для стандартной. На рис.10 показаны зависимости отношения радиальной дозы от плотности РАО в бочке с  $R_{opt} = 32,7$  см, к дозе, создаваемой таким же РАО (бетон,  $^{137}\text{Cs}$ ) от бочки  $R = 28$  см. Данные, приведенные на рис.10, показывают, что доза на расстоянии свыше  $1$  м от поверхности источника для бочки с  $R_{opt}$  на  $15\%$  меньше, чем для стандартной. На рис.11 приведены отношения радиального и аксиального отношения доз источника с  $R_{opt} = 32,5$  см, создаваемых РАО (железо,  $^{137}\text{Cs}$ ) к радиальной дозе от таких же РАО источника с  $R = 28$  см в зависимости от расстояния от поверхности. Данные, приведенные на рис.11 показывают, что для плотностей РАО порядка и более  $2,5$  г/см<sup>3</sup>, помещенных в бочку с  $R_{opt}$ , радиальная компонента дозы, начиная с  $1$  м, на  $15\%$  меньше по сравнению с обычной бочкой. Аналогичные результаты получаются на источниках с более жесткими гамма-квантами.

То есть согласно расчетам, чем больше расстояние до точки наблюдения, тем больше эффект от оптимизации формы бочки. В пределе  $X \gg R$  сокращение дозы вокруг бочки составляет  $15-20\%$  по сравнению с обычной тарой.

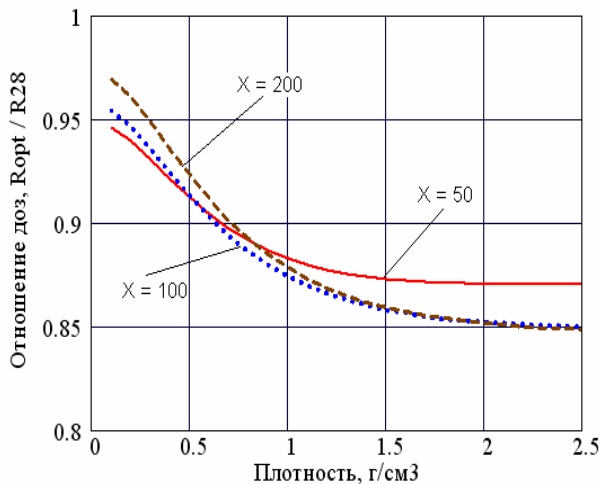


Рис.10. Зависимости отношения радиальной дозы от плотности РАО в бочке с  $R_{opt} = 32,7$  см к дозе, создаваемой такими же РАО (бетон,  $^{137}\text{Cs}$ ) от бочки с  $R = 28$  см.

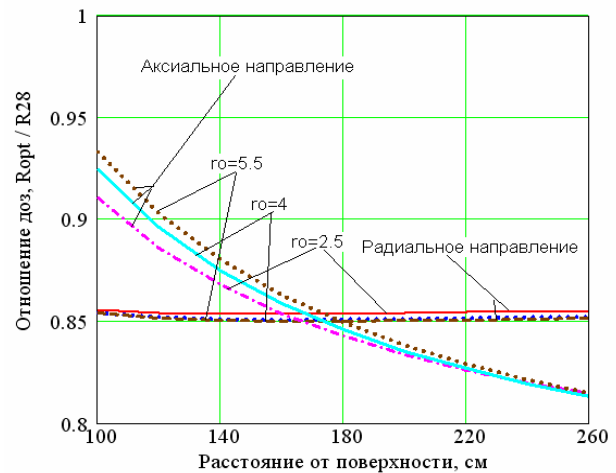


Рис.11. Зависимости радиального и аксиального отношения доз источника с  $R_{opt} = 32,7$  см, создаваемых РАО (железо,  $^{137}\text{Cs}$ ) к радиальной дозе от таких же РАО источника с  $R = 28$  см от расстояния от поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет характеристик внешнего гамма-излучения объемного цилиндрического источника с самопоглощением, выполненный методом объемного интегрирования с использованием факторов накопления для бесконечной среды, приводит к завышению величины дозы до 30% по сравнению с более реалистичными результатами моделирования методами Монте-Карло. Указания на возможность такого расхождения высказывались ранее в [6], что сдерживало распространение данного метода учета рассеянного излучения. Для цилиндра с почти равносторонним сечением ( $2R \approx h$ ) авторами предложена модификация фактора накопления бесконечной среды, которая позволяет улучшить согласие результата расчета дозы методом интегрирования по объему источника с истинным ее значением (расхождение менее 10%). Изучение влияния соотношения размеров цилиндрического контейнера (бочки с РАО) на формирование оптимального (изотропного) поля внешнего излучения при разных плотностях заполнения и объеме источника на разных расстояниях от источника показало, что оптимальным соотношением для большинства рассмотренных условий является равенство:  $2R/h = 0,9-1,0$ , при выполнении которого доза в боковом направлении снижается на 15% и более по сравнению с традиционно используемой тарой ( $R = 28$  см,  $h = 81,2$  см).

Обнаруженный эффект уменьшения боковой дозы растет при удалении точки наблюдения от источника и при увеличении плотности заполнения контейнера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.И. Кирюшин, Е.А. Шлокин Основы проектирования защиты реакторных установок. - М.: Энергоатомиздат, 1991.- 264с.
2. PENELOPE 2003, PACKAGE-ID: NEA-1525/008.
3. GEANT4 Collaboration, in GEANT4 Physics Reference Manual, Application Software Group, CERN, Geneva, 2005.
4. Briesmeister G F 1997 MCNP—a General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport version 4B (Los Alamos, NM).
5. Руководство по радиационной защите для инженеров /Под ред. Д.Л. Бродера и др. - Т.2. -М.: Атомиздат, 1973.-288с.
6. Н.Г. Гусев, Е.Е. Ковалев, Д.П. Осанов, В.И. Попов Защита от излучения протяженных источников. - М.: Атомиздат, 1961.-287с.

### ANALYSIS OF EXTERNAL GAMMA-RAY FROM A CYLINDER TANK FILLED WITH RADIOACTIVE WASTE

S.A. Pismenetskiy<sup>1</sup>, V.G. Rudychev<sup>1</sup>, E.V. Rudychev<sup>2</sup>, O.K. Tutunik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.N. Karazin Kharkov National University

<sup>2</sup>National Scientific Center, Kharkov Institute of Physics and Technology

Dose field outside of a volume cylindrical source has been investigated both Monte-Carlo and volume-integration numerical methods. It was shown the exceeding of calculated dose from a cylindrical source with approximately equilateral cross-section ( $2R \approx h$ ) can be reduced within 10% at the expense of adding an adjust multiplier to the buildup factor. Shaping of dose rate spatial distribution which is the nearest to isotropic takes place under the condition  $2R/h \approx 0.9-1.0$ . Those effect is depended weakly on the cylinder volume and on the material density inside the source. The effect of a lateral dose reduction is near 15% compared to 200 liter conventional barrel if radius to altitude ratio is optimized and grows if one steps back from the barrel.

**KEY WORDS:** cylindrical source, scattered radiation, buildup factors, barrel filled with radioactive waste, external radiation, shape optimization.