



Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2022-02

Preprint IBRAE-2022-02

П.А. Блохин, Ю.Е. Ванеев, П.А. Кизуб, В.М. Сошников, Е.В. Катаев

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
МОЩНОСТИ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
ОКОЛО ТИПОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ С
РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ**

Москва
2022

Moscow
2022

Блохин, П.А. Результаты расчетов пространственных распределений мощности дозы гамма-излучения около типовых контейнеров с радиоактивными отходами / П.А. Блохин, Ю.Е. Ванеев, П.А. Кизуб, В.М. Сошников, Е.В. Катаев, — (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № ИБРАЭ-2022-02). — М. : ИБРАЭ РАН, 2022. — 30 с. — Библиогр.: 32 экз. — ISBN 978-5-907 375-05-5

Аннотация

Представлены выполненные с использованием программы TDMCC результаты расчетов пространственных распределений мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения вблизи типовых контейнеров ("биг-бэг", "бочка", КМЗ, НЗК), наиболее часто используемых для перевозки или хранения радиоактивных отходов (РАО). Рассмотрены варианты загрузки контейнеров различными РАО (легкий бетон, пористый бетон, грунт и грунт навалом), содержащими радионуклиды ^{137}Cs и ^{60}Co .

Значения МЭД, представленные в табличном и графическом видах, соответствуют точкам на поверхности контейнеров и на расстояниях до двух метров в радиальном и аксиальном направлениях при нормировках на удельную и интегральную активности радионуклидов. Приведены примеры использования этих нормированных величин для определения МЭД на различных расстояниях от поверхности контейнеров при вариациях входных данных.

©ИБРАЭ РАН, 2022

ISBN 978-5-907 375-05-5

Blokhin, P.A. Calculations of the spatial distributions of gamma dose rates for typical containers with radioactive waste, P.A. Blokhin, Yu.E. Vaneyev, P.A. Kizub, V.M. Soshnikov, E.V. Kataev. Preprint IBRAE-2022-02. — Moscow: Nuclear Safety Institute, 2022. — 30 p. — Bibliogr.: 32 items. — ISBN 978-5-907 375-05-5

Abstract

In this work calculations of the spatial distributions of gamma dose rate near typical radioactive waste containers are performed. Calculations are carried out using TDMCC. Transport and storage containers are considered with different waste containing ^{137}Cs and ^{60}Co (light concrete, porous concrete, soil).

Dose rate values presented in tabular and graphical forms correspond to the points at the container surface and at distances up to 2 meters in radial and axial directions and are normalized to unit and integral activity. Examples of using these normalized values to determine dose rates at different distances from container surface for different input data are given.

©Nuclear Safety Institute, 2022

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОКОЛО ТИПОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

П.А. Блохин, Ю.Е. Ванеев, П.А. Кизуб, В.М. Сошников, Е.В. Катаев

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
115191, Москва, ул. Б. Туйльская, 52
тел.: (495) 955-22-02, факс: (495) 955-20-29, эл. почта: blokhin@ibrae.ac.ru

Содержание

Введение	3
1. Исходные данные и расчетные модели	4
1.1 Типовые контейнеры РАО	4
1.2 Расчетные модели	5
2. Результаты расчетов мощности дозы	8
2.1 Контейнер "биг-бэг"	8
2.2 Контейнер "бочка"	10
2.3 Контейнер КМЗ	11
2.4 Контейнер НЗК	13
2.5 Контейнер НЗК с "бочками"	14
3. Сравнительный анализ результатов	16
4. Применение полученных результатов для решения практических задач	20
Заключение	21
Литература	22
Приложение	23

Введение

Анализ возможных вариантов размещения радиоактивных отходов (РАО) в контейнерах при их хранении и транспортировке требует оценки соответствия нормативным требованиям, где один из основных критериев – радиационная безопасность персонала [1, 2]. Для выполнения таких оценок проводят расчеты мощности эквивалентной или эффективной дозы (МЭД) гамма- и нейтронного излучений в окружающем контейнер пространстве и сопоставляют получаемые результаты с регламентируемыми значениями. Распространенная практика при решении подобных задач – использование программ инженерного класса, например, БРИЗ [3], Microshield [4] и др. Поскольку эти программы отсутствуют в перечне программ для ЭВМ [5], аттестованных Ростехнадзором, их использование не гарантирует получение надежных результатов с подтвержденной погрешностью.

Наиболее точно задачи с расчетами мощности дозы и обоснованием радиационной защиты решают с применением прецизионных монте-карловских программ (MCNP [6], MCU [7], TDMCC [8] и др.), которые обеспечивают получение результатов со статистической погрешностью. Недостатком таких программ является то, что для снижения величины этой погрешности необходимо увеличивать время счета задачи (иногда существенно при оптически толстых защитах), а с учетом времени на подготовку расчетной модели в определенных форматах задания параметров геометрии, материалов, источников излучения достичь оперативности расчетов (без автоматизации подготовительного процесса), как правило, не удается.

В связи с этим, для проведения экспресс-оценок МЭД от гамма-излучения различных контейнеров с различными типами РАО необходима предварительная наработка расчетных моделей и результатов расчетов с применением аттестованных прецизионных программ.

Для определения объема расчетных исследований необходимо принимать во внимание особенности парка контейнеров в России и составов РАО. В настоящее время среди множества контейнеров для размещения РАО наибольшее распространение получили контейнеры типа: "биг-бэг" [9], "бочка" [10], КМЗ [11] и НЗК-150-1,5П [12].

В данной работе с использованием аттестованной программы TDMCC выполнены вариантные расчеты и получены пространственные распределения МЭД от гамма-излучения контейнеров, заполненных твердыми РАО (грунт и бетон с различной плотностью) с гамма-излучающими радионуклидами ^{137}Cs и ^{60}Co , охватывающими интервал энергий 0,662 – 1,33 МэВ.

Полученные пространственные распределения планируется объединить в базу данных, на основе которой будет реализован алгоритм параметрической выборки (с использованием линейной интерполяции) значений МЭД для заданного контейнера с фиксированными параметрами РАО и координатами точек регистрации, что позволит проводить экспресс-оценки мощности дозы.

1. Исходные данные и расчетные модели

1.1 Типовые контейнеры РАО

Технические характеристики (материалы, размеры, массы и объемы) контейнеров, которые наиболее часто используют для перевозки или хранения РАО, приведены в таблице 1.1, а их внешний вид – в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Характеристики контейнеров

Контейнер	Материал корпуса	Габаритные размеры, см	Толщина стенки, см	Максимальная грузоподъемность, кг	Полезный объем, м ³
"биг-бэг"	полипропилен	95×95×115	0,02	1500	1,04
"бочка"	сталь	87,80 (высота), 29,25 (радиус)	0,08	430	0,20
КМЗ	сталь	166 ×166×138	0,50	8845	3,80
НЗК	армированный бетон	165×165×137,50	15	3100	1,50

Мягкие специализированные контейнеры "биг-бэг" (от англ. big bag) применяют в качестве транспортной тары в различных отраслях промышленности, строительной индустрии, сельского хозяйства для перевозки и временного хранения порошкообразных, гранулированных, фракционированных сыпучих материалов. Конструктивно контейнер "биг-бэг" представляет собой прочный мешок из полипропилена или капрона с грузоподъемными элементами в виде строп [9].

Под контейнером типа "бочка" в данной работе подразумевается группа бочкообразных контейнеров, незначительно различающихся габаритными характеристиками. Такие контейнеры используются, в основном, в качестве первичной упаковки РАО с последующим размещением в других контейнерах (например, в НЗК), однако могут применяться и как самостоятельные упаковки; конструктивно представляют из себя сварные цилиндрические емкости из металлических листов толщиной 0,08 – 0,16 см [10].

Контейнер КМЗ предназначен для размещения, транспортирования и длительного хранения твердых низкоактивных (НАО) и очень низкоактивных (ОНАО) удаляемых РАО четвертого класса (в соответствии с [13]). Конструктивно контейнер КМЗ представляет собой сварную емкость из металлических листов толщиной 0,5 см; толщина крышки 1,0 см, дна – 0,8 см [11].

Контейнер НЗК предназначен для размещения, транспортирования, длительного хранения и захоронения твердых низкоактивных и среднеактивных (САО) удаляемых РАО третьего класса. Данный

контейнер используется также для размещения "бочек" РАО. Конструктивно контейнер представляет собой железобетонную ёмкость, закрываемую крышкой. Толщина корпуса и крышки 15 см [12].

Для исследования дозовых полей от излучения контейнеров РАО различных классов выбраны наиболее значимые радионуклиды: ^{137}Cs и ^{60}Co .

Таблица 1.2 – Внешний вид контейнеров для размещения РАО

Название	Вид контейнера
"Биг-бэг"	
"Бочка"	
КМЗ	
НЗК	

1.2 Расчетные модели

Контейнеры "биг-бэг", КМЗ и НЗК моделировали в виде внешнего параллелепипеда с габаритными размерами и внутреннего параллелепипеда с размерами, определяющими толщины корпуса, основания и крышки (см. табл. 1.1).

Аналогично моделировали контейнер "бочка" в виде двух коаксиальных цилиндров.

Помимо описанных выше конфигураций, рассматривали вариант с размещением четырех "бочек" РАО внутри НЗК.

Модели всех контейнеров РАО размещали на прямоугольной призме с размерами 1000 x 1000 x 20 см, имитирующей грунт плотностью 1,6 г/см³.

В качестве материалов РАО в контейнерах КМЗ, НЗК и "бочка" рассматривали легкий бетон, пористый бетон, грунт (уплотненный) и грунт навалом (фрагментарный), а для контейнера типа "биг-бэг" – только грунт и грунт навалом, поскольку данный контейнер не используется для хранения бетона. Значения плотности материалов РАО приведены в табл.1.3.

Таблица 1.3 – Плотности моделируемых РАО

Материал	Легкий бетон	Пористый бетон	Грунт	Грунт навалом
Плотность, г/см ³	2,2	1,0	1,6	1,0

Характеристики всех материалов, задаваемых в расчетных моделях, приведены в таблице П1 приложения.

Массу загружаемых РАО рассчитывали с учетом грузоподъемности контейнеров. Если грузоподъемность не ограничивала загрузку РАО, то заполняли контейнер полностью. Данные о загрузке контейнеров приведены в таблице П2 приложения.

Источник излучения моделировали равномерно-распределенным по объему РАО в контейнере.

Расчеты МЭД выполняли отдельно для каждого дозообразующего радионуклида.

При вычислениях МЭД использовали коэффициенты перевода плотности потока гамма-излучения в мощность эквивалентной дозы для кожи человека из НРБ-99/2009 [14].

Для формирования регистрационных зон использовали два вида расчетных сеток: прямоугольную и цилиндрическую.

Прямоугольная расчетная сетка образована системой параллельных плоскостей, перпендикулярных трем осям (X, Y, Z) декартовой системы координат. Пересечения этих плоскостей образовывали набор регистрационных зон, в объеме которых вычислялись значения МЭД (рисунок 1.1).

Цилиндрическая расчетная сетка представляла собой набор коаксиальных цилиндрических поверхностей, которые разбивались по высоте плоскостями, перпендикулярными оси Z. Пересечения указанных поверхностей образовывали набор регистрационных зон, в объеме которых вычислялись значения МЭД (рисунок 1.2).

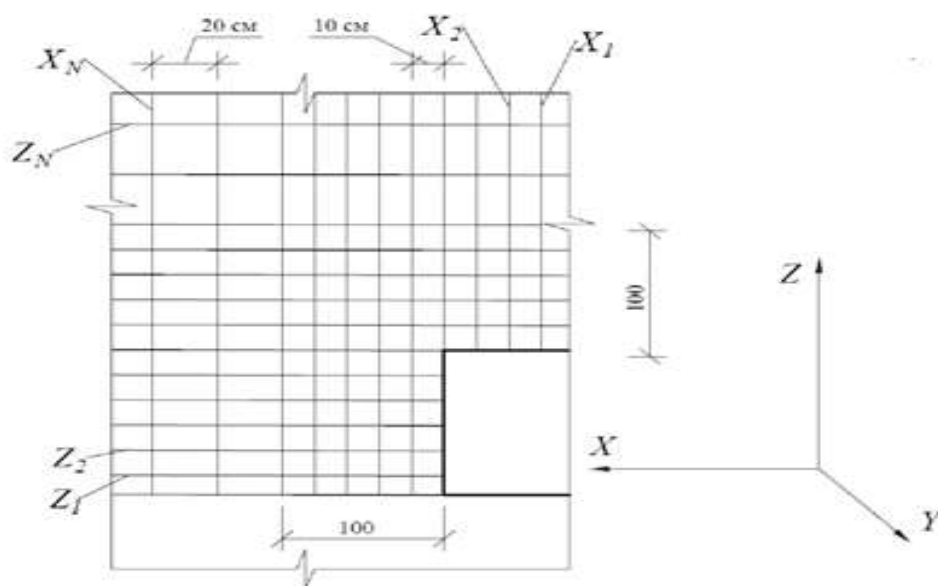


Рис. 1.1 – Вид прямоугольной расчетной сетки

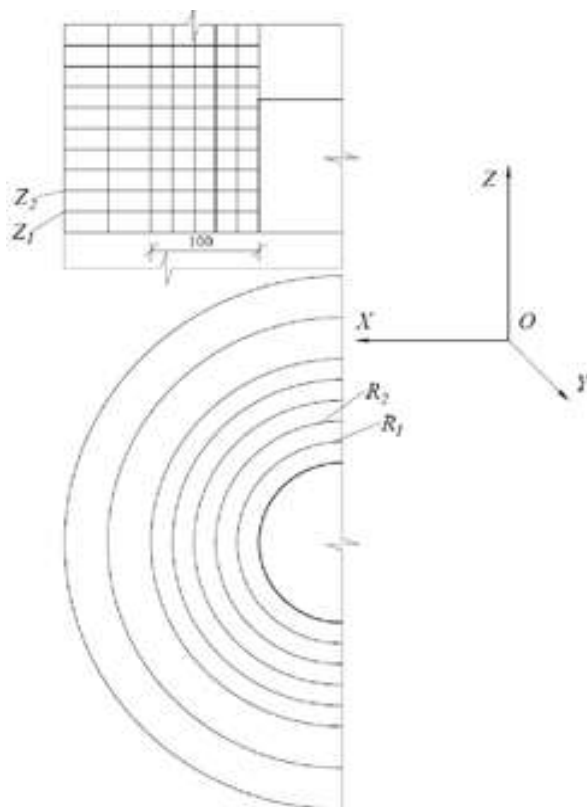


Рис. 1.2 – Вид цилиндрической расчетной сетки

Процесс определения МЭД от контейнеров РАО состоял из следующих этапов:

- 1) формирование расчетной модели (задание геометрии системы, параметров материалов и источника гамма-излучения, зон регистрации; заказ вычисляемых величин в заданных регистрационных зонах) и ее тестирование на соответствие форматам исходных данных для программы TDMCC;
- 2) проведение расчетов с использованием программы TDMCC и получение значений $MЭД_{1\gamma}$ (мкЗв/ч) в зонах регистрации при нормировке на 1 гамма-квант, рожденный в источнике с энергией, соответствующей заданному радионуклиду (статистическая погрешность значений $MЭД_{1\gamma}$ не превышала 1%);
- 3) определение значений МЭД в зонах регистрации при единичной активности (А) РАО :

$$MЭД/A = MЭД_{1\gamma} \cdot n_{\gamma} \quad [мкЗв/ч \cdot Бк^{-1}],$$

- 4) определение значений МЭД на поверхности контейнеров и на расстояниях 1 и 2 метра от поверхности при единичной удельной активности (УА) РАО:

$$MЭД/УА = MЭД_{1\gamma} \cdot n_{\gamma} \cdot M \quad [мкЗв/ч \cdot (Бк/г)^{-1}],$$

где М – масса РАО, г ;

n_{γ} – выход фотонов на распад, $Бк^{-1}$.

Далее выполнялся сравнительный анализ полученных значений МЭД (см. главу 3).
Примеры применения полученных в работе результатов приведены в главе 4.

2. Результаты расчетов мощности дозы

В качестве результатов расчетов для каждого из контейнеров в данной работе представлены:

- графики зависимости МЭД/А от расстояния от контейнера для высотного и радиального направлений (см. разделы 2.1-2.5 для ^{60}Co и рисунки П1-П10 для ^{137}Cs);
- таблицы со значениями МЭД/УА на поверхности контейнера и на расстояниях 1 и 2 метра от поверхности в радиальном и высотном направлениях (см. таблицу 4.2);
- результаты визуализации распределения МЭД_{1γ} в пространстве вокруг контейнера в виде цветовой "дозовой" карты (см. рисунки П11-П17 в приложении).

Значения МЭД в высотном направлении приведены для точек, расположенных на центральной Z-оси контейнеров, а в радиальном (в плоскости XY) – для точек, расположенных на уровне центра контейнеров, что соответствует максимальным значениям МЭД при их полной загрузке. Но даже при рассмотренных неполных загрузках при выбранном масштабе расчетных сеток максимальные значения МЭД находятся именно на этом уровне.

2.1 Контейнер "биг-бэг"

Схема расчетной модели контейнера "биг-бэг" представлена на рисунке 2.1. Для формирования регистрационных зон использовали прямоугольную расчетную сетку.

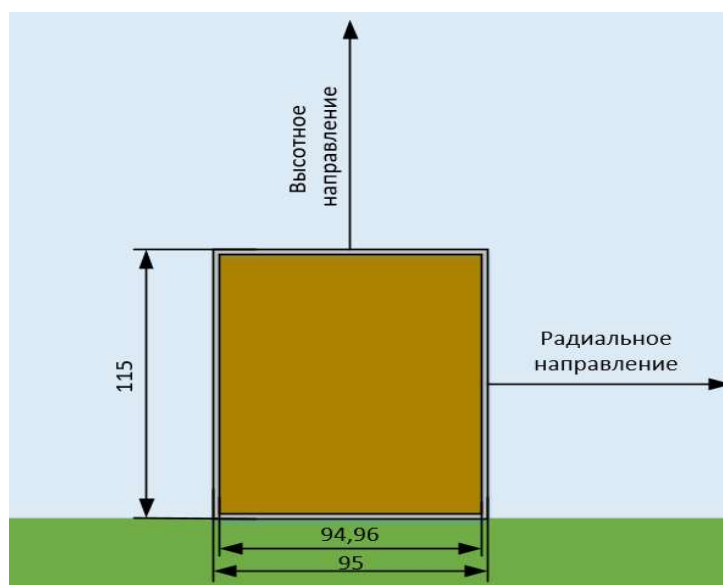


Рис. 2.1 – Схема расчетной модели контейнера "биг-бэг" (расстояния указаны в сантиметрах)

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены графики зависимостей МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера "биг-бэг" в высотном и радиальном направлениях соответственно.

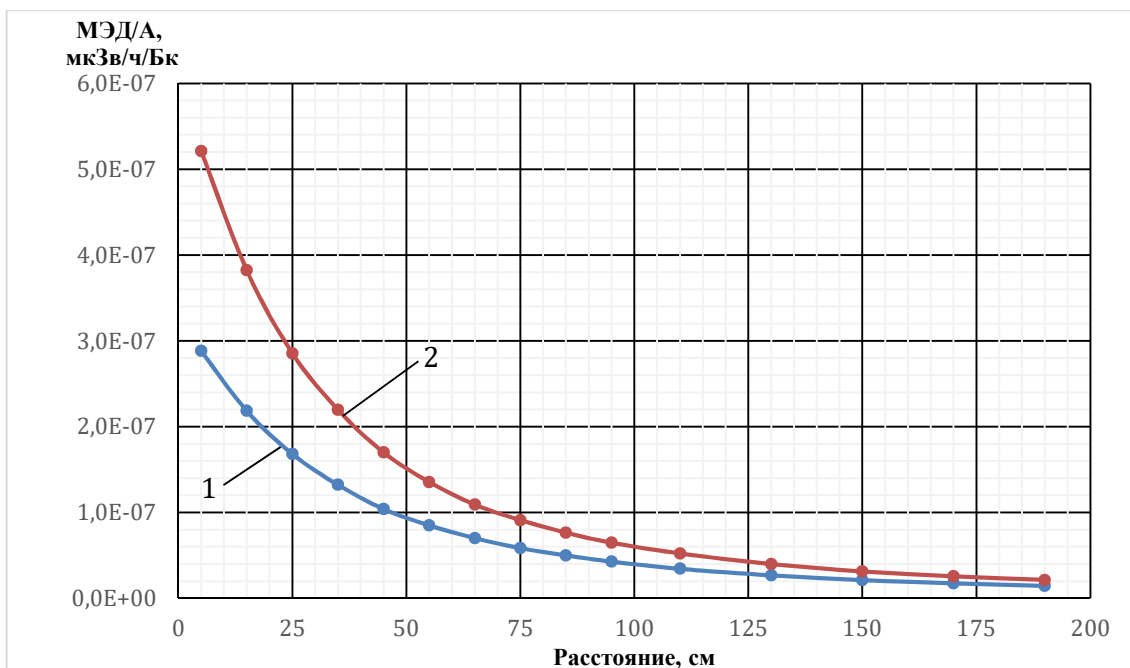


Рис. 2.2 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера "биг-бэг" в высотном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – грунт; 2 – грунт навалом

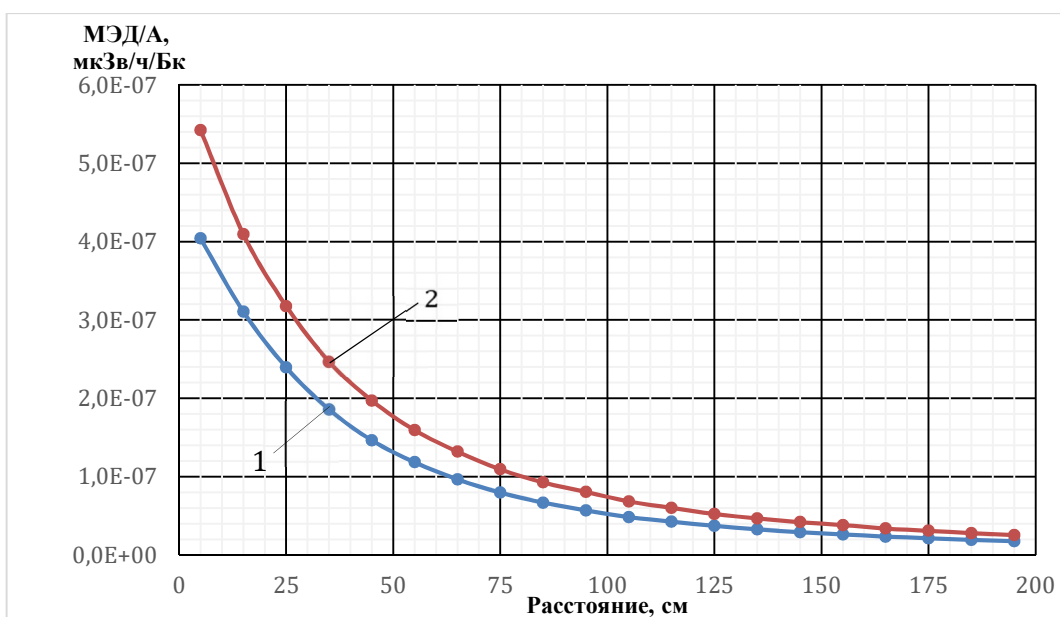


Рис. 2.3 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера "биг-бэг" в радиальном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – грунт; 2 – грунт навалом

Из представленных графиков видно, что мощность дозы от грунта в радиальном направлении несколько больше мощности дозы в высотном направлении. Это объясняется неполной загруженностью контейнера "биг-бэг" из-за ограничений по грузоподъемности. Для грунта навалом такого рода различия несутельственны.

2.2 Контейнер "бочка"

Схема расчетной модели "бочки" представлена на рисунке 2.4. Для формирования регистрационных зон использовали цилиндрическую расчетную сетку.

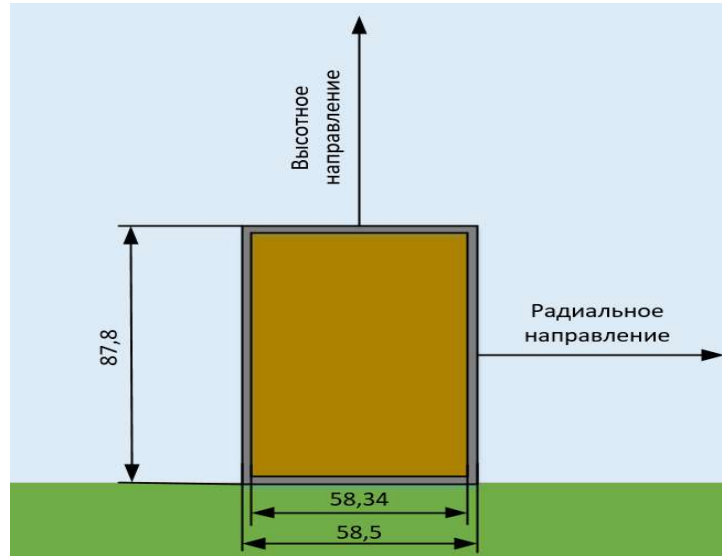


Рис. 2.4– Схема расчетной модели контейнера "бочка" (расстояния указаны в сантиметрах)

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены графики зависимостей МЭД/А от расстояния от крышки и боковой поверхности контейнера "бочка" в высотном и радиальном направлениях соответственно.

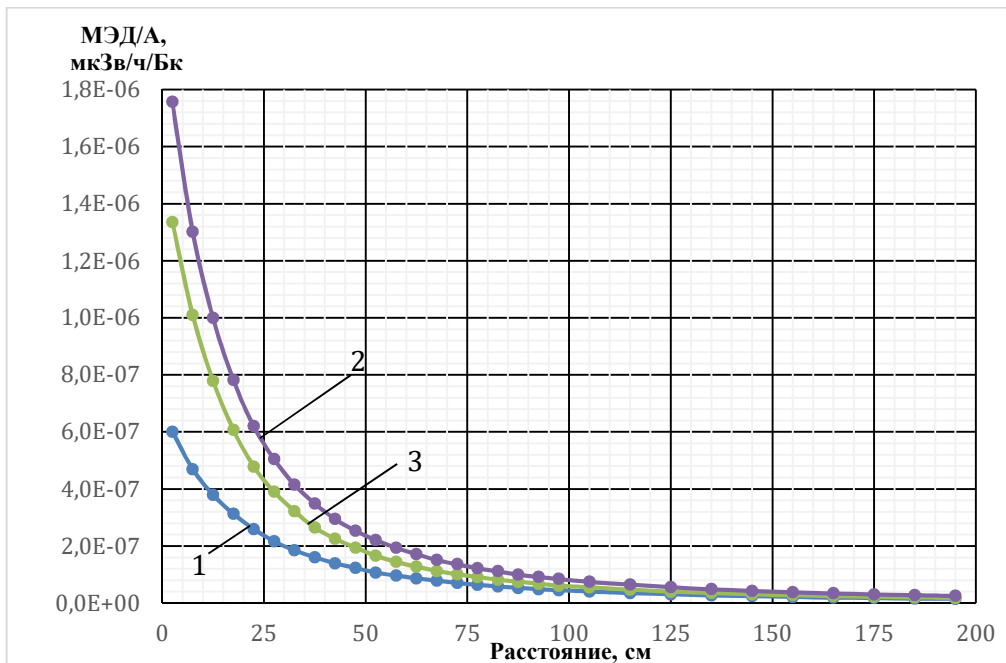


Рис. 2.5– Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера "бочка" в высотном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

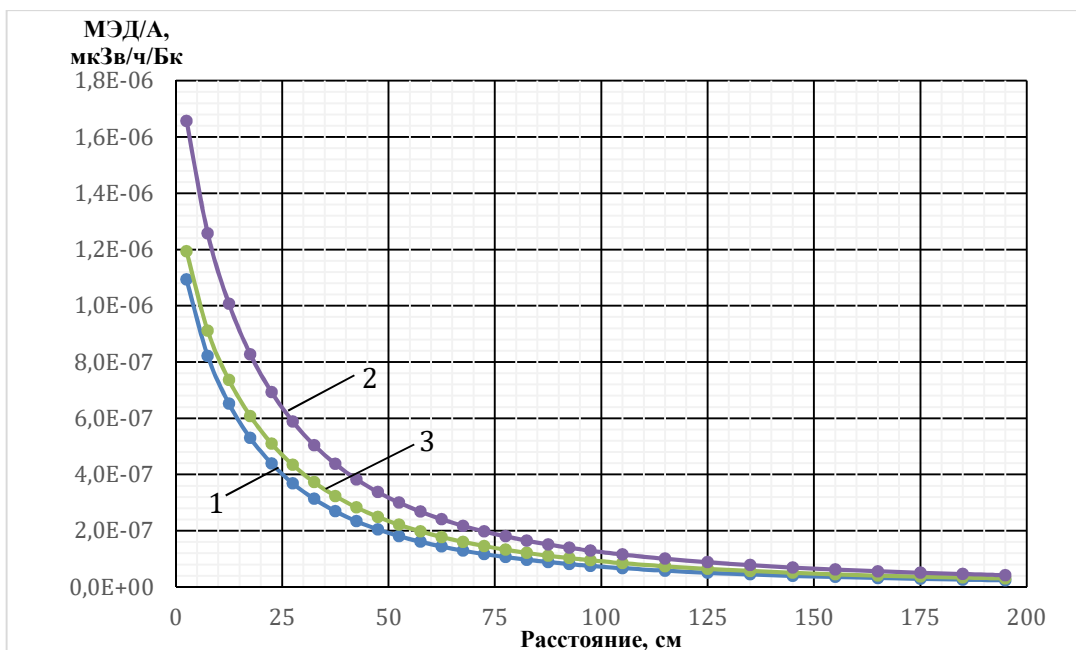


Рис. 2.6 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера "бочка" в радиальном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

Для данного контейнера различия между МЭД/А в радиальном и высотном направлениях обусловлены как существенной разницей в площади боковой поверхности и крышки, так и незаполненностью РАО (для грунта и легкого бетона).

2.3 Контейнер КМЗ

Схема расчетной модели контейнера КМЗ представлена на рисунке 2.7. Для формирования регистрационных зон использовали прямоугольную расчетную сетку.

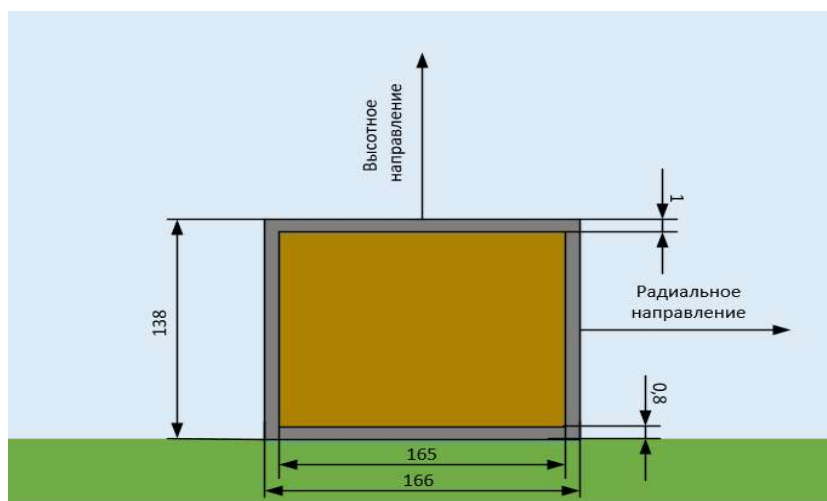


Рисунок 2.7– Схема расчетной модели КМЗ (расстояния указаны в сантиметрах)

На рисунках 2.8 и 2.9 представлены графики зависимостей МЭД/А от расстояния от центра крышки и внешней боковой поверхности контейнера КМЗ в высотном и радиальном направлениях соответственно.

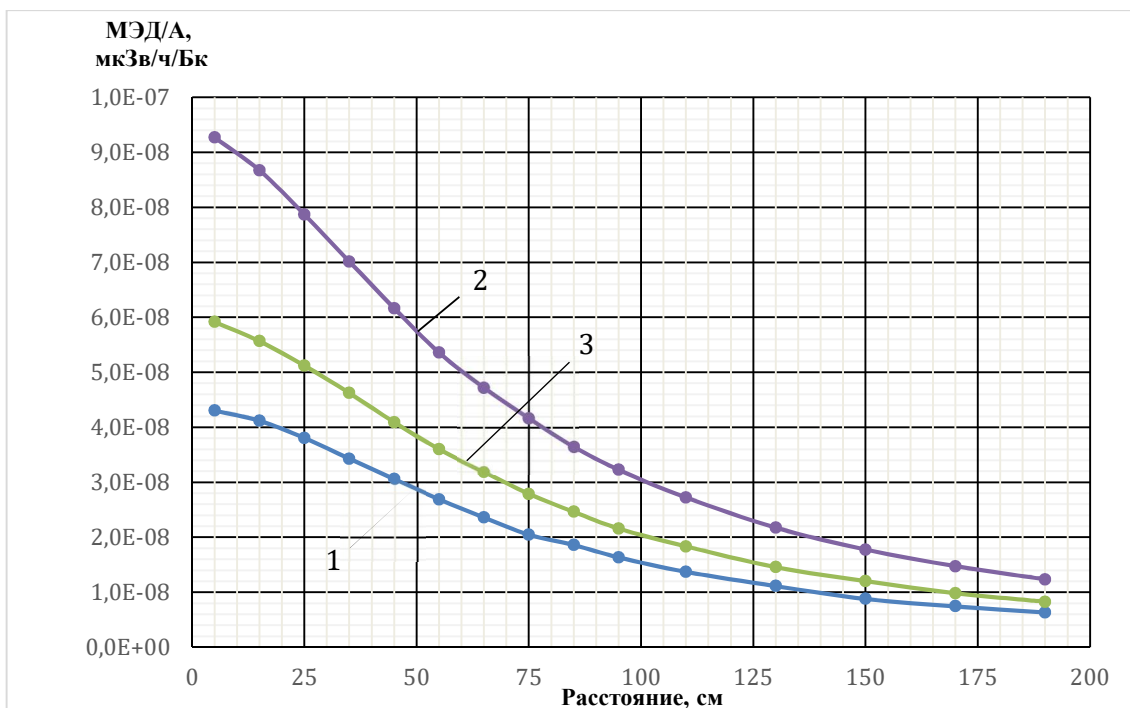


Рис. 2.8 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера КМЗ в высотном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

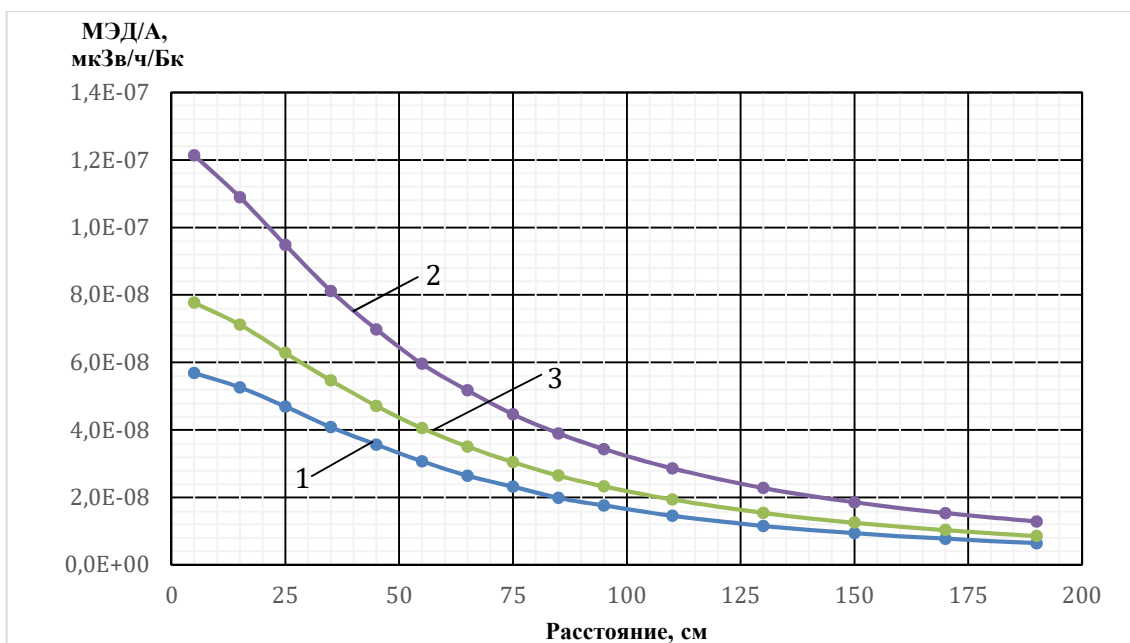


Рис. 2.9 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера КМЗ в радиальном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

Значения МЭД/А в высотном направлении заметно меньше значений МЭД/А в радиальном направлении, что объясняется большей толщиной крышки по сравнению с толщиной боковой стенки.

2.4 Контейнер НЗК

Схема расчетной модели НЗК представлена на рисунке 2.10. Для формирования регистрационных зон использовали прямоугольную расчетную сетку.

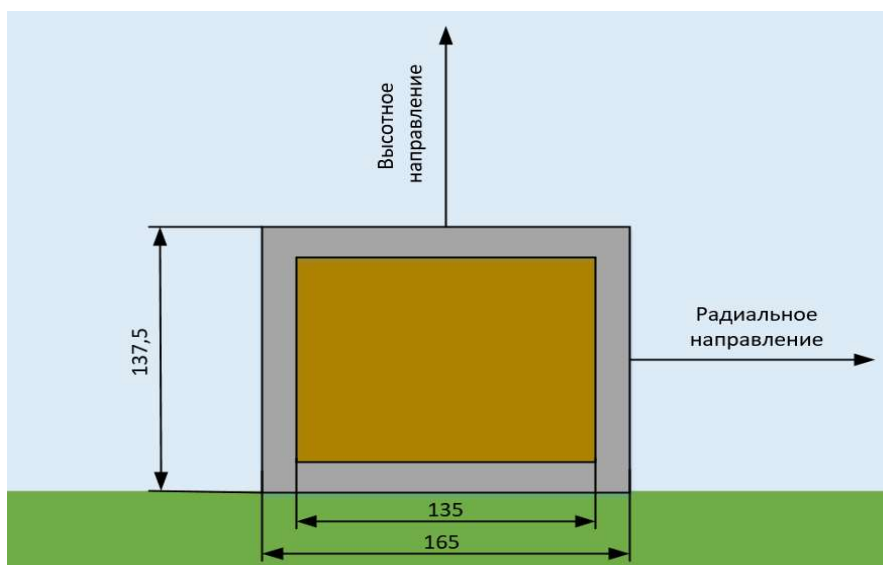


Рис. 2.10– Схема расчетной модели контейнера НЗК (расстояния указаны в сантиметрах)

На рисунках 2.11 и 2.12 представлены графики зависимостей МЭД/А от расстояния от центра крышки и внешней боковой поверхности контейнера НЗК в высотном и радиальном направлениях соответственно.

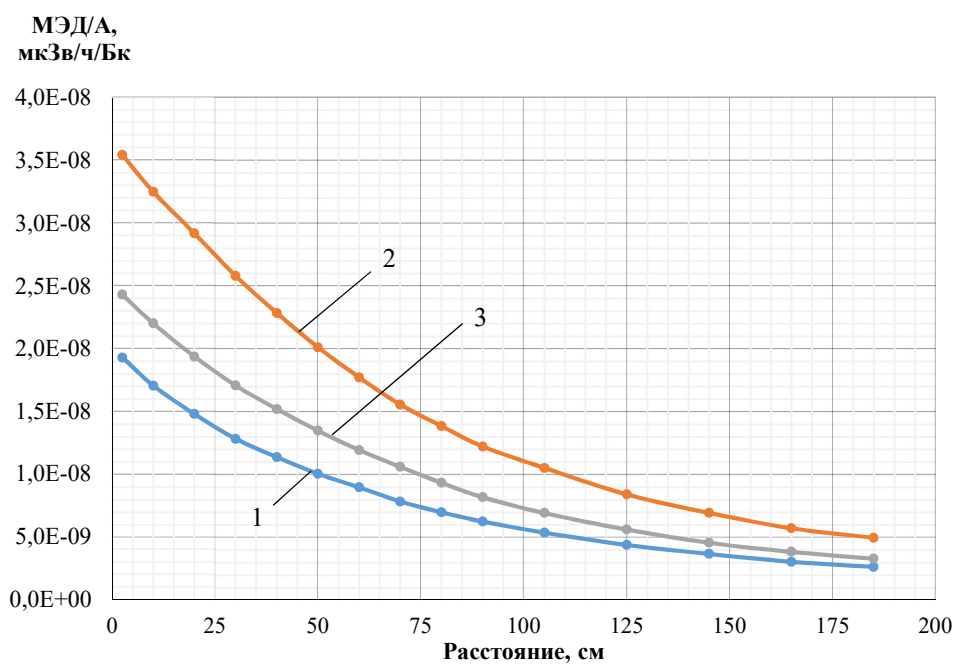


Рис. 2.11 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера НЗК в высотном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

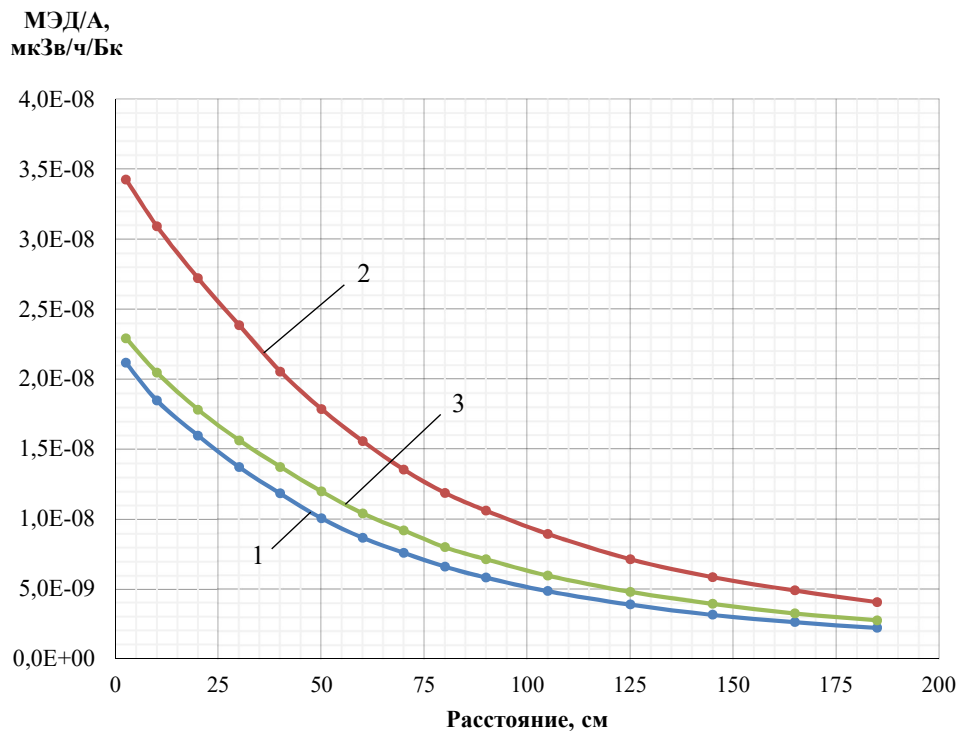


Рис. 2.12 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера НЗК в радиальном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

Для контейнера НЗК ограничения по грузоподъемности возникли только для легкого бетона, поэтому для этого РАО значения МЭД/А в высотном и радиальном направлениях несколько различаются; для остальных РАО эти различия несущественны.

2.5 Контейнер НЗК с "бочками"

Схема расчетной модели НЗК, в котором размещены четыре "бочки" РАО, представлена на рисунке 2.13. "Бочки" расположены симметрично и равноудаленно друг от друга.

Для формирования регистрационных зон использовали прямоугольную расчетную сетку.

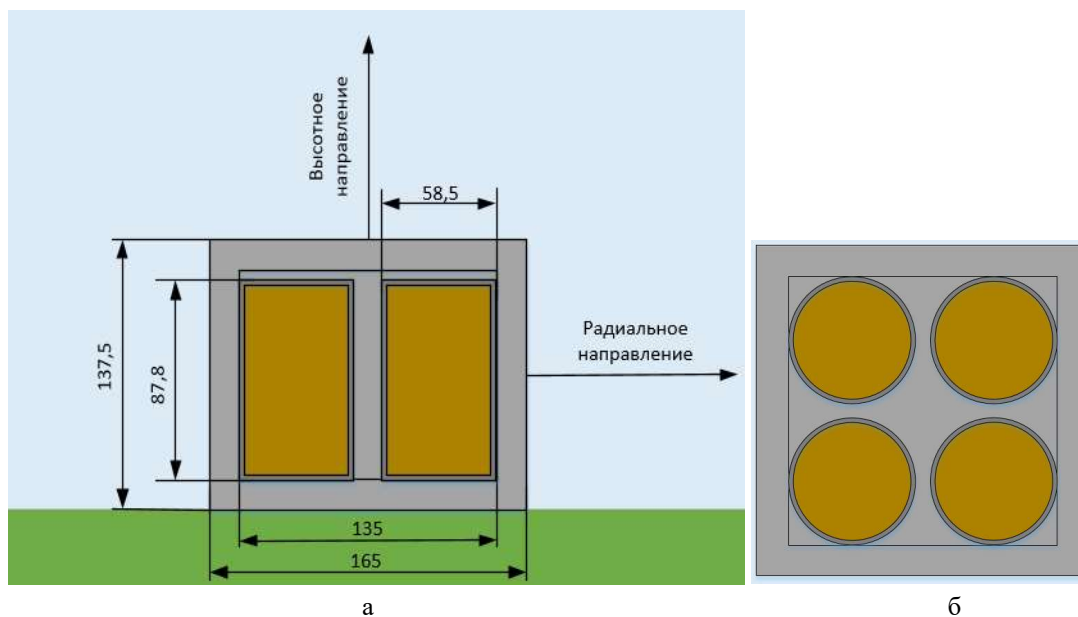


Рисунок 2.13– Схема расчетной модели контейнера НЗК с "бочками" (4 шт.): а) продольное сечение, б) поперечное сечение (расстояния указаны в сантиметрах).

На рисунках 2.14 и 2.15 представлены графики зависимостей МЭД/А от расстояния от центра крышки и внешней боковой поверхности контейнера НЗК с "бочками" в высотном и радиальном направлениях соответственно.

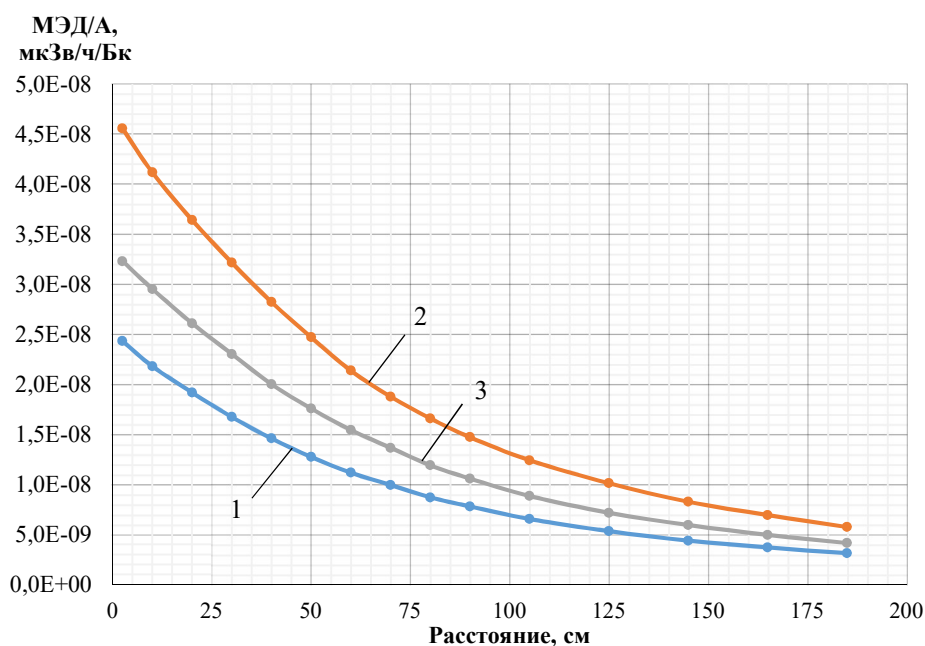


Рис. 2.14 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера НЗК с четырьмя "бочками" в высотном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

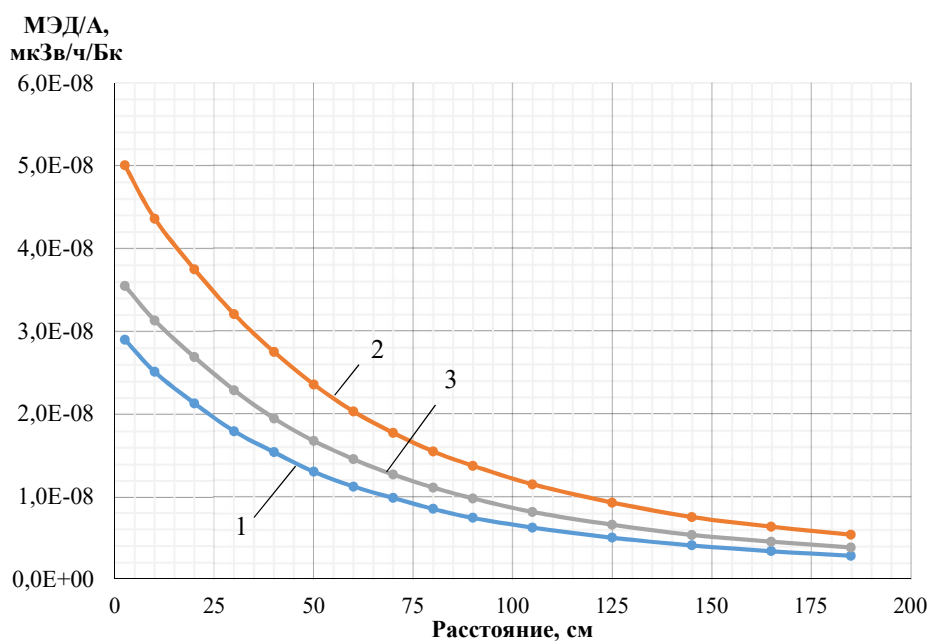


Рис. 2.15 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней поверхности контейнера НЗК с четырьмя "бочками" в радиальном направлении: радионуклид ^{60}Co ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

3. Сравнительный анализ результатов

Сравнительный анализ полученных значений МЭД/А вблизи контейнеров РАО (табл.3.1-3.2) позволяет сделать следующие выводы:

- значения МЭД/А от радионуклида ^{60}Co превышают соответствующие значения МЭД от радионуклида ^{137}Cs в 3,5 – 7 раз в зависимости от контейнера и материала РАО (табл. 3.1);
- для всех рассмотренных вариантов значения МЭД/А в радиальном направлении больше значений МЭД/А в высотном направлении (на одинаковых расстояниях от соответствующих поверхностей);
- степень ослабления МЭД корпусом контейнера НЗК больше, чем корпусом контейнера КМЗ в 5-9 раз для ^{137}Cs и в 4-8 раз для ^{60}Co при загрузке одних и тех же РАО с одинаковой удельной активностью.

Таблица 3.1 – Отношения МЭД/А от ^{60}Co и ^{137}Cs для контейнеров РАО

Контейнер	Грунт	Легкий бетон	Пористый бетон/грунт навалом
"биг-бэг"	4,5	-	4,3
КМЗ	5,0	5,0	4,9
"бочка"	4,6	4,4	4,3
НЗК	7,1	6,4	6,6
НЗК с четырьмя "бочками"	3,6	3,7	3,6

Согласно данным таблицы 3.2, от контейнеров с меньшими линейными размерами (таких как "биг-бэг" и "бочка") значения МЭД/А с расстоянием убывают сильнее по сравнению с другими контейнерами. Учитывая нормы для транспортировки и хранения контейнеров РАО [1-2], а именно требования к МЭД не выше 2 мЗв/час на поверхности контейнера и 0,1 мЗв/час на расстоянии 2 м, можно сделать вывод о том, что основным ограничивающим фактором для использования "биг-бэга" и "бочки" является МЭД на поверхности, а для КМЗ, НЗК и варианта загрузки НЗК "бочками" – МЭД на расстоянии 2 м.

Таблица 3.2 – Значения МЭД/УА, мкЗв/ч·(Бк/г)⁻¹

Контейнер	Нуклид	Материал РАО	Расстояние от контейнера в радиальном направлении, м			Расстояние от контейнера в высотном направлении, м		
			0,0	1,0	2,0	0,0	1,0	2,0
"Биг-бэг"	¹³⁷ Cs	грунт	1,49E-01	2,00E-02	6,13E-03	1,01E-01	1,45E-02	5,06E-03
		грунт навалом	1,45E-01	1,98E-02	6,22E-03	1,39E-01	1,58E-02	5,10E-03
	⁶⁰ Co	грунт	6,80E-01	8,58E-02	2,65E-02	4,82E-01	6,44E-02	2,17E-02
		грунт навалом	6,39E-01	8,40E-02	2,66E-02	6,08E-01	6,74E-02	2,23E-02
КМЗ	¹³⁷ Cs	бетон	8,03E-02	2,61E-02	9,66E-03	5,51E-02	2,25E-02	8,56E-03
		пористый бетон	8,01E-02	2,38E-02	8,84E-03	5,53E-02	2,06E-02	7,98E-03
		грунт	8,05E-02	2,53E-02	9,39E-03	5,16E-02	2,04E-02	8,05E-03
		грунт навалом	7,99E-02	2,39E-02	8,87E-03	5,45E-02	2,03E-02	7,97E-03
	⁶⁰ Co	бетон	4,02E-01	1,20E-01	4,39E-02	3,00E-01	1,12E-01	4,32E-02
		пористый бетон	3,98E-01	1,07E-01	3,98E-02	2,99E-01	1,01E-01	3,90E-02
		грунт	4,02E-01	1,16E-01	4,67E-02	3,02E-01	1,07E-01	4,11E-02
		грунт навалом	3,97E-01	1,06E-01	3,99E-02	2,96E-01	1,00E-01	3,83E-02

Контейнер	Нуклид	Материал РАО	Расстояние от контейнера в радиальном направлении, м			Расстояние от контейнера в высотном направлении, м		
			0,0	1,0	2,0	0,0	1,0	2,0
"Бочка"	¹³⁷ Cs	бетон	1,15E-01	7,40E-03	2,35E-03	6,64E-02	4,38E-03	1,47E-03
		пористый бетон	9,28E-02	6,76E-03	2,20E-03	1,01E-01	4,45E-03	1,32E-03
		грунт	1,01E-01	7,54E-03	2,45E-03	1,17E-01	4,94E-03	1,46E-03
		грунт навалом	9,23E-02	6,71E-03	2,19E-03	1,01E-01	4,26E-03	1,31E-03
	⁶⁰ Co	бетон	5,3E-01	3,24E-02	1,04E-02	2,86E-01	1,95E-02	6,41E-03
		пористый бетон	4,02E-01	2,80E-02	9,14E-03	4,30E-01	1,83E-02	5,68E-03
		грунт	4,61E-01	3,29E-02	1,06E-02	5,17E-01	2,11E-02	6,28E-03
		грунт навалом	4,01E-01	2,79E-02	9,12E-03	4,29E-01	1,84E-02	5,56E-03
НЗК	¹³⁷ Cs	бетон	8,86E-03	2,12E-03	9,73E-04	8,10E-03	2,24E-03	1,08E-03
		пористый бетон	9,08E-03	2,47E-03	1,13E-03	9,16E-03	2,86E-03	1,31E-03
		грунт	9,19E-03	2,54E-03	1,15E-03	9,37E-03	2,97E-03	1,37E-03
		грунт навалом	9,08E-03	2,47E-03	1,13E-03	9,16E-03	2,86E-03	1,31E-03

Контейнер	Нуклид	Материал РАО	Расстояние от контейнера в радиальном направлении, м			Расстояние от контейнера в высотном направлении, м		
			0,0	1,0	2,0	0,0	1,0	2,0
НЗК	⁶⁰ Co	бетон	6,56E-02	1,49E-02	6,76E-03	5,97E-02	1,65E-02	8,04E-03
		пористый бетон	6,69E-02	1,74E-02	7,88E-03	6,92E-02	2,05E-02	9,59E-03
		грунт	6,96E-02	1,84E-02	8,45E-03	7,05E-02	2,14E-02	1,00E-02
		грунт навалом	6,69E-02	1,74E-02	7,88E-03	6,92E-02	2,05E-02	9,59E-03
НЗК с 4 "бочками"	¹³⁷ Cs	бетон	1,37E-03	3,03E-04	1,38E-04	1,12E-03	3,15E-04	1,49E-04
		пористый бетон	1,33E-03	3,14E-04	1,45E-04	1,16E-03	3,41E-04	1,58E-04
		грунт	1,51E-03	3,58E-04	1,65E-04	1,32E-03	3,84E-04	1,77E-04
		грунт навалом	1,33E-03	3,14E-04	1,45E-04	1,16E-04	3,41E-04	1,58E-04
	⁶⁰ Co	бетон	5,05E-03	1,08E-03	4,87E-04	4,19E-03	1,13E-03	5,39E-04
		пористый бетон	4,69E-03	1,08E-03	5,03E-04	4,27E-03	1,17E-03	5,39E-04
		грунт	5,37E-03	1,22E-03	5,73E-04	4,84E-03	1,33E-03	6,23E-04
		грунт навалом	4,69E-03	1,08E-03	5,03E-04	4,27E-03	1,17E-03	5,39E-04

4. Применение полученных результатов для решения практических задач

Для решения рассмотренных ниже задач должны быть известны следующие исходные данные:

- тип контейнера (из списка: "биг-бег", "бочка"; НЗК, КМЗ);
- материал РАО (грунт и бетон с рассмотренными плотностями);
- радионуклиды в РАО (^{60}Co , ^{137}Cs) и их активность;
- расстояние от поверхности контейнера в радиальном или аксиальном направлениях.

Требуется определить значения МЭД на заданных расстояниях от поверхности контейнера.

Задача 1. Определить значение МЭД на боковой поверхности контейнера НЗК при загрузке в него максимально возможной массы грунта, содержащего изотоп ^{60}Co активностью $5,58 \cdot 10^8$ Бк.

Определим значение удельной активности $УА$, исходя из заданной активности $A = 5,58 \cdot 10^8$ Бк и максимально возможной массы грунта $M = 3,1 \cdot 10^8$ г в контейнере НЗК из табл. П2 (см. приложение):

$$УА = \frac{A}{M} = \frac{5,58 \cdot 10^8}{3,10 \cdot 10^6} = 1,80 \cdot 10^2 \text{ Бк / г}$$

Далее берем из таблицы 3.2 значение $МЭД/УА = 6,96 \cdot 10^{-2} \text{ мкЗв/час} \cdot (\text{Бк/г})^{-1}$ на поверхности контейнера НЗК для радиального направления и определяем искомое значение МЭД:

$$МЭД = (МЭД / УА) \cdot УА = 6,96 \cdot 10^{-2} \cdot 1,80 \cdot 10^2 = 12,5 \text{ мкЗв / час}$$

Задача 2. Определить значение МЭД на расстоянии 75 см от поверхности контейнера КМЗ в высотном направлении при загрузке в него максимально возможной массы легкого бетона, содержащего изотоп ^{137}Cs удельной активностью 1500 Бк/г.

Определим значение активности A , исходя из заданной удельной активности $УА = 1500$ Бк/г и максимально возможной массы грунта $M = 6,82 \cdot 10^6$ г для контейнера КМЗ из табл. П2 (см. приложение):

$$A = УА \cdot M = 1500 \cdot 6,82 \cdot 10^6 = 1,02 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

Определяем значение $МЭД/А$ из рис. П12, график 1 (см. приложение) на расстоянии 75 см от поверхности контейнера КМЗ для высотного направления и находим искомое значение МЭД:

$$МЭД = (МЭД / А) \cdot А = 4,1 \cdot 10^{-9} \cdot 1,02 \cdot 10^{10} = 41,8 \text{ мкЗв / час}$$

Заключение

В данной работе представлены результаты расчетов, выполненных с использованием программы TDMCC, пространственных распределений мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения для кожи человека вблизи различных контейнеров, наиболее часто использующихся для перевозки или хранения РАО ("биг-бэг", "бочка", КМЗ, НЗК). Рассмотрены различные матрицы РАО (легкий бетон, пористый бетон, грунт и грунт навалом), содержащие дозобразующие радионуклиды ^{137}Cs и ^{60}Co .

Приведены значения МЭД на поверхности контейнеров с различными РАО и на расстояниях от нее до двух метров в радиальном и аксиальном направлениях. Эти значения представлены в табличном виде при единичной удельной активности и в виде графиков при единичной активности источников гамма-излучения. Приведены примеры их использования для определения мощности дозы на различных расстояниях от поверхности контейнеров при вариациях входных данных.

В дальнейшем планируется создание базы данных, содержащей результаты расчетов пространственных распределений мощности дозы (эквивалентной, эффективной и поглощенной) от гамма-излучения различных контейнеров, заполненных РАО различного состава и плотности с несколькими дозобразующими радионуклидами. Для работы с этой базой данных планируется создание программного обеспечения, позволяющего на основе введенных исходных данных оперативно вычислять мощность дозы на заданных расстояниях от поверхности контейнеров.

Результаты этой работы могут быть использованы при планировании работ по транспортировке и хранению контейнеров с радиоактивными отходами на предприятиях ядерного топливного цикла.

Литература

1. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572. Ростехнадзор, 2014.
2. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-16. Утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 04.10.2004 № 5. М., Ростехнадзор, 2004.
3. ПК БРИЗ // URL: <http://ibrae.ac.ru/contents/956/> (дата обращения: 10.05.2022).
4. ПК Microshield // URL: <https://radiationsoftware.com/microshield> (дата обращения: 10.05.2022).
5. База аттестационных паспортов (декабрь 2021) // НТИЦ ЯРБ URL: https://www.secnrs.ru/expertise/software-review/%D0%91%D0%B0%D0%B7%D0%B0_%D0%B0%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%BE%D0%B2_%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%8C_2021.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
6. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", version 5, April 2003. Radiation Software / Grove Software.
7. Гуревич М.И., Калугин М.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. Характерные особенности MCU-FR // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 5, стр. 17-21.
8. Программа TDMCC (Time dependent Monte Carlo Code). Житник А.К., Рослов В.И., Семенова Т.В. и др. Свидетельство о государственной регистрации №2010614412 ФГУП "РФЯЦ ВНИИЭФ".
9. "Биг-бэг" // URL: <https://v-u-k.ru/mkr-big-bag/chetyrehstopyj-big-bag/> (дата обращения: 10.05.2022).
10. "Бочка" // URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=136914> (дата обращения: 10.05.2022).
11. КМЗ // URL: <https://345mz.ru/kontejneryi-dlya-rao/metallicheskie-kontejneryi/kmz-m> (дата обращения: 10.05.2022).
12. НЗК // URL: [https://345mz.ru/kontejneryi-dlya-rao/zhelezobetonyie-kontejneryi/nzk-150-15p-\(v\)](https://345mz.ru/kontejneryi-dlya-rao/zhelezobetonyie-kontejneryi/nzk-150-15p-(v)) (дата обращения: 10.05.2022).
13. Постановление Правительства РФ №69 от 19 октября 2012 г. "О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов".
14. "СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)"" от 14.08.2009 № 14534.

Приложение

Таблица П1 – Массовые доли химических элементов в составе материалов в моделях контейнеров РАО

Элемент	Материал (плотность в г/см ³)				
	Легкий и пористый бетон (2,2; 1,6)	Грунт и грунт навалом (1,6; 1,0)	Воздух (0,001)	Полипропилен (0,92)	Сталь (7,8)
Ar	–	–	0,013	–	–
Al	0,046	0,144	–	–	–
As	-	-	-	–	0,001
Ca	0,083	–	–	–	–
Cr	–	–	–	–	0,003
Fe	0,012	0,092	–	–	0,980
Si	0,316	0,202	–	–	0,004
S	0,001	–	–	–	–
O	0,498	0,432	0,232	–	–
Mg	0,002	0,002	–	–	–
Mn	–	–	–	–	0,005
N	–	–	0,755	–	–
Ni	-	-	-	–	0,003
C	–	0,106	–	0,856	0,002
Cu	–	–	–	–	0,003
H	0,060	0,015	–	0,144	–
Ti	–	0,007	–	–	–

Таблица П2 – Варианты исходных данных для расчетов

Контейнер	Материал РАО	Объем РАО, м ³	Масса РАО, кг
"Биг-бэг"	грунт	0,93*	1495
	грунт навалом	1,04	1038
"Бочка"	легкий бетон	0,19*	430
	пористый бетон	0,20	200
	грунт	0,20	320
	грунт навалом	0,20	200
КМЗ	легкий бетон	3,10	6820
	пористый бетон	3,10	3100
	грунт	3,10	4960
	грунт навалом	3,10	3100
НЗК	легкий бетон	1,20*	3100
	пористый бетон	1,50	1954
	грунт	1,50	3100
	грунт навалом	1,50	1954
НЗК с четырьмя "бочками"	"бочки" с легким бетоном	4 x 0,19*	1720
	"бочки" с пористым бетоном	4 x 0,20	936
	"бочки" с грунтом	4 x 0,20	1497
	"бочки" с грунтом навалом	4 x 0,20	936

* Предельно допустимый объем РАО с учетом грузоподъемности контейнера

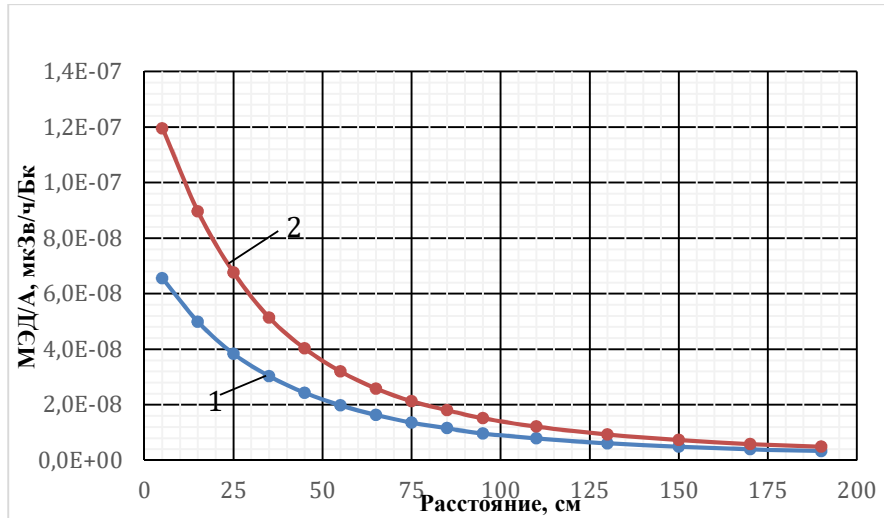


Рис. П1 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера "биг-бэг" в высотном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1 – грунт; 2 – грунт навалом

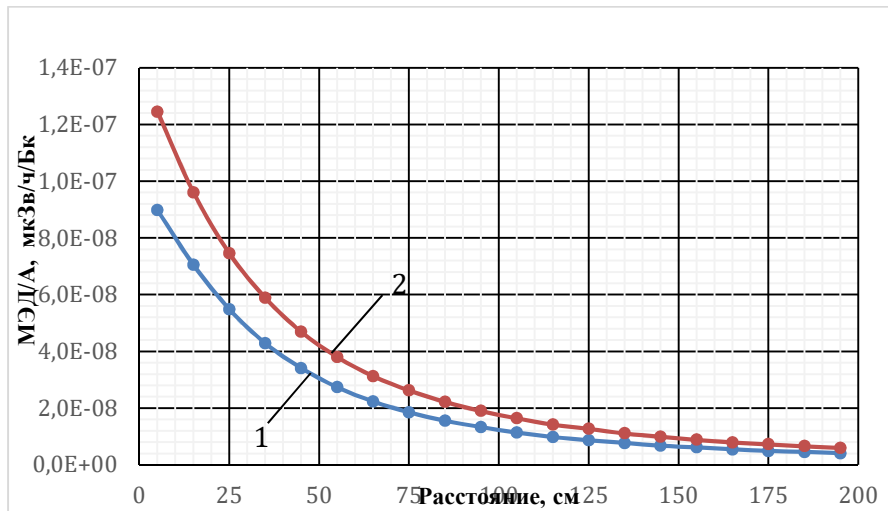


Рис. П2 – Графики зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера "биг-бэг" в радиальном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1 – грунт; 2 – грунт навалом

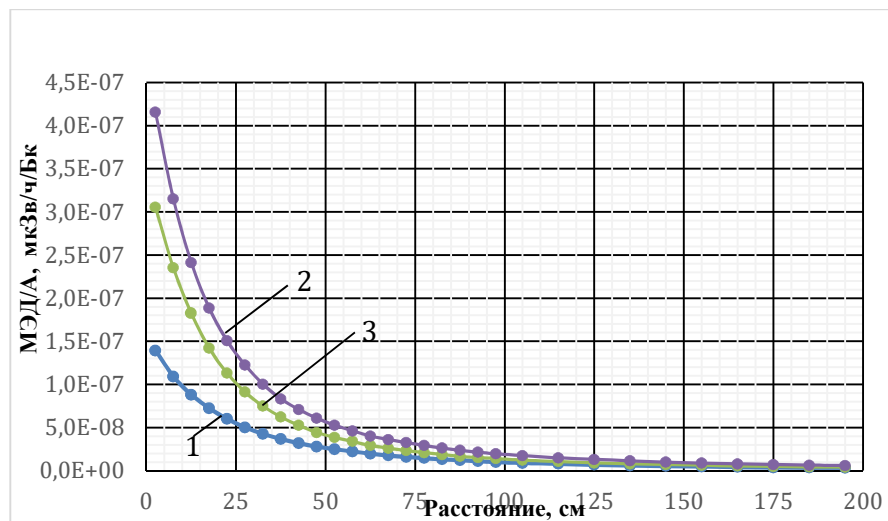


Рис. П3 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера "бочка" в высотном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

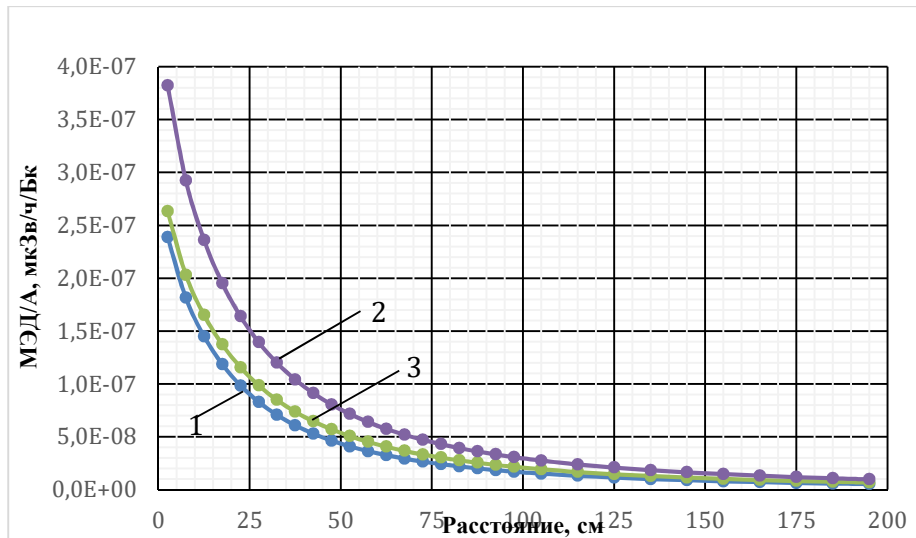


Рис. П4 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера "бочка" в рад. направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1–легкий бетон; 2–пористый бетон; 3–грунт

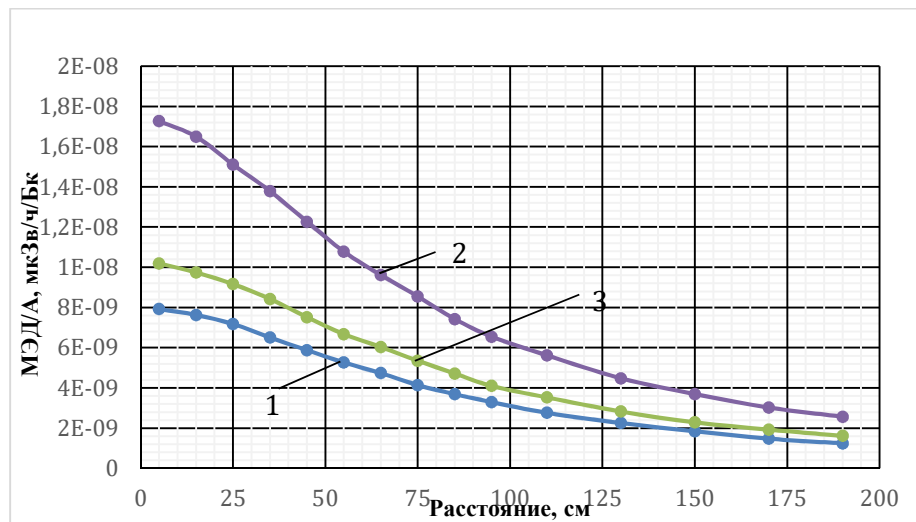


Рис. П5 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера КМЗ в высотном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1–легкий бетон; 2–пористый бетон; 3–грунт

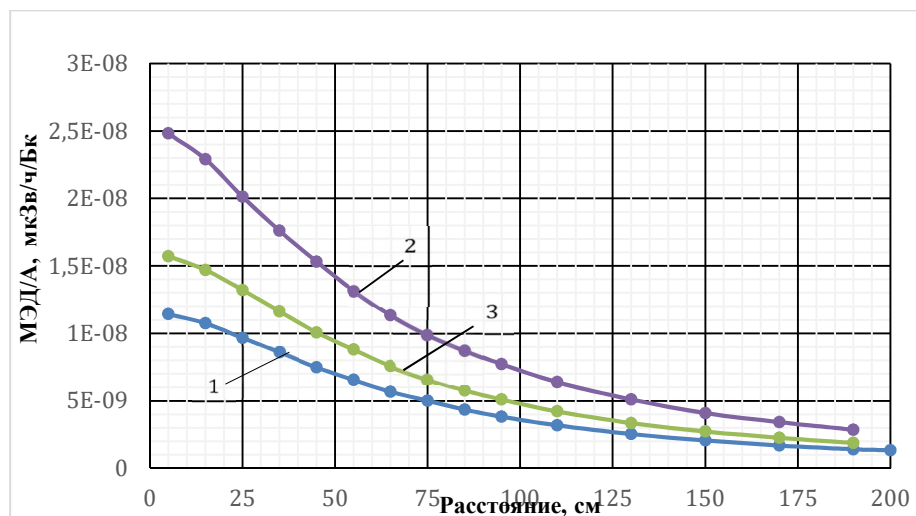


Рис. П6 – Зависимости МЭД/А от внешней пов. контейнера КМЗ в радиальном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

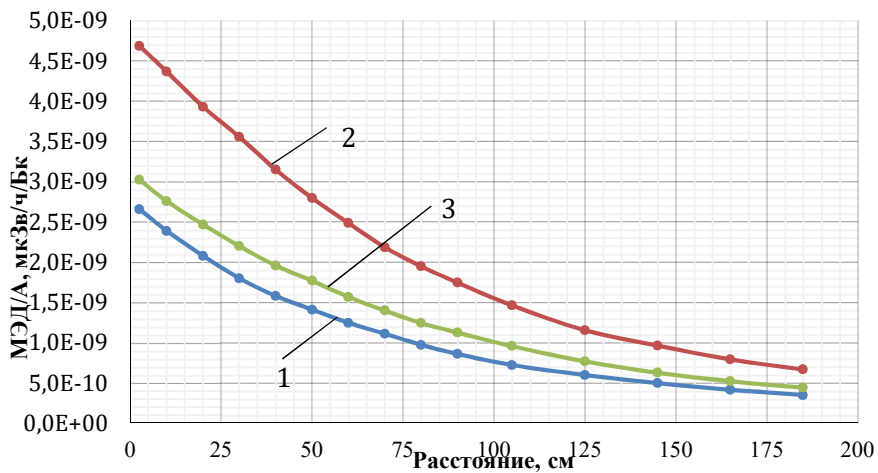


Рис. П7 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера НЗК в высотном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1–легкий бетон; 2–пористый бетон; 3–грунт

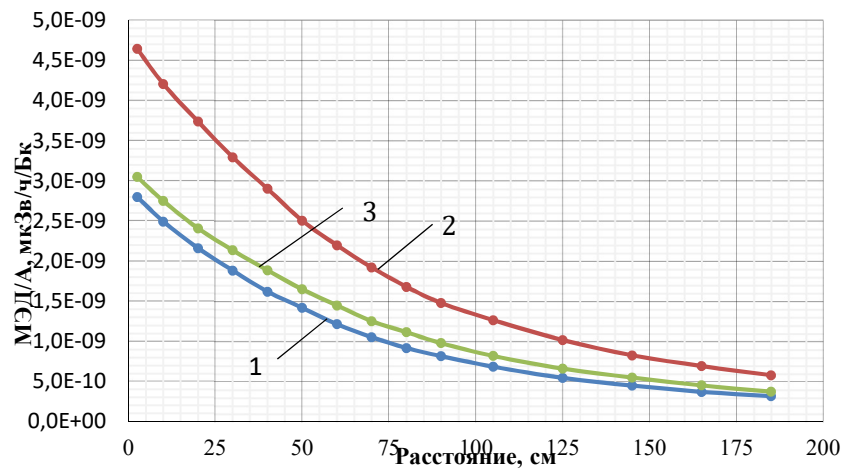


Рис. П8 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера НЗК в рад. направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1–легкий бетон; 2–пористый бетон; 3–грунт

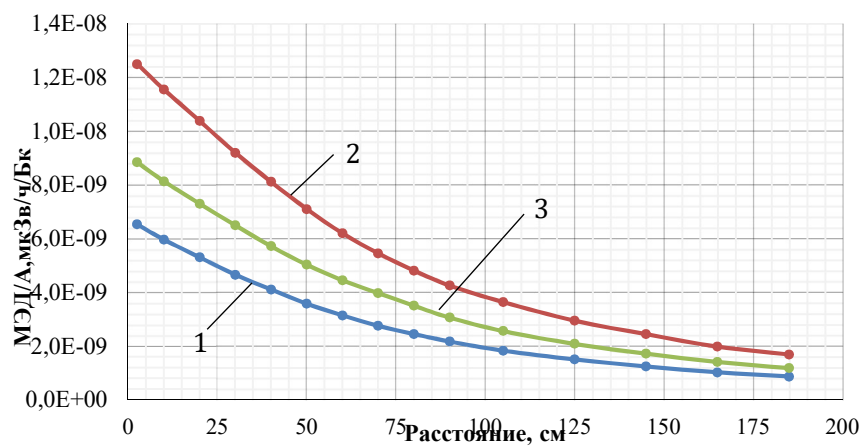


Рис. П9 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера НЗК с четырьмя "бочками" в высотном направлении: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1 – легкий бетон; 2 – пористый бетон; 3 – грунт

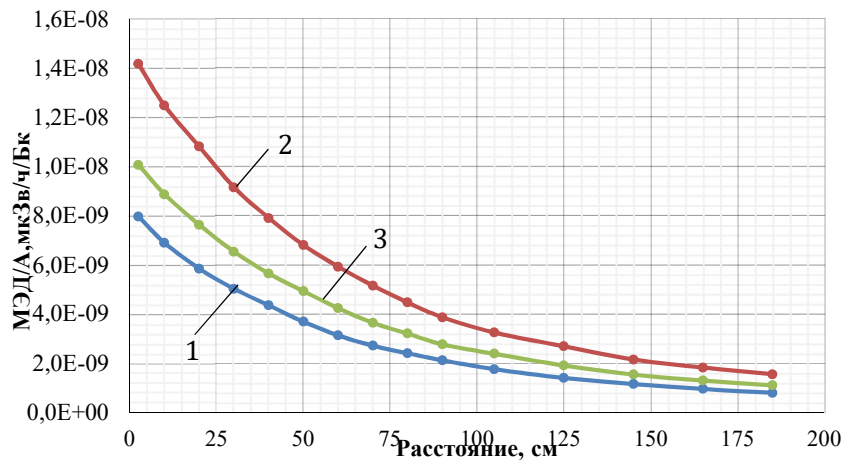


Рис. III0 – Зависимости МЭД/А от расстояния от внешней пов. контейнера НЗК с 4 "бочками" в рад. напр.: радионуклид ^{137}Cs ; материалы РАО: 1–легкий бетон; 2–пористый бетон; 3–грунт

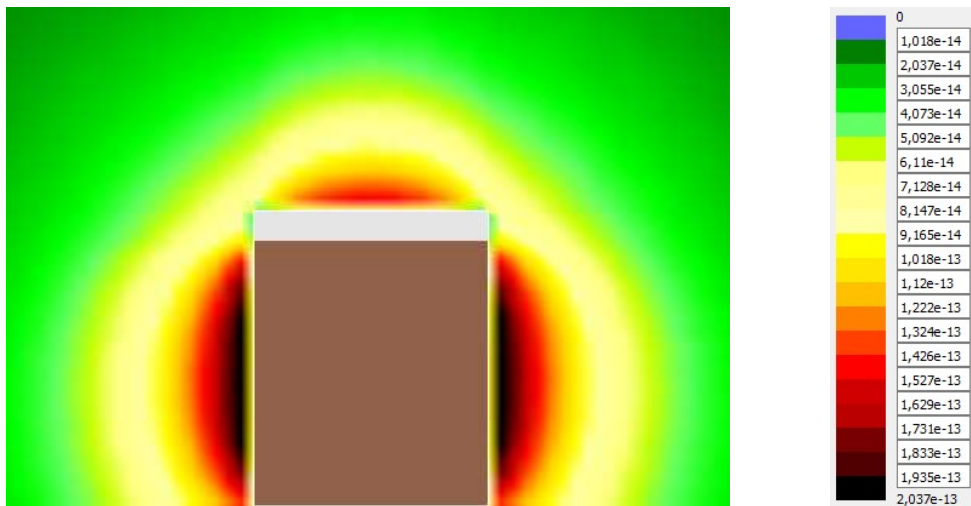


Рис. III1 – Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг "биг-бэга", контейнер заполнен грунтом на 90%. Нормировка на один фотон, рожденный в об. источника.

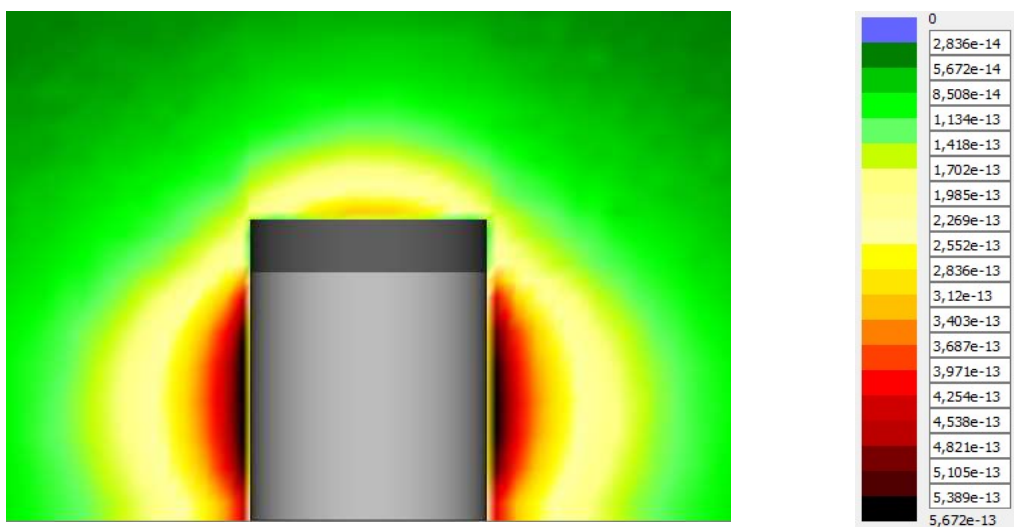


Рис. III2 – Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг "бочки", контейнер заполнен легким бетоном на 80%. Нормировка на один фотон, рожденный в объеме источника.

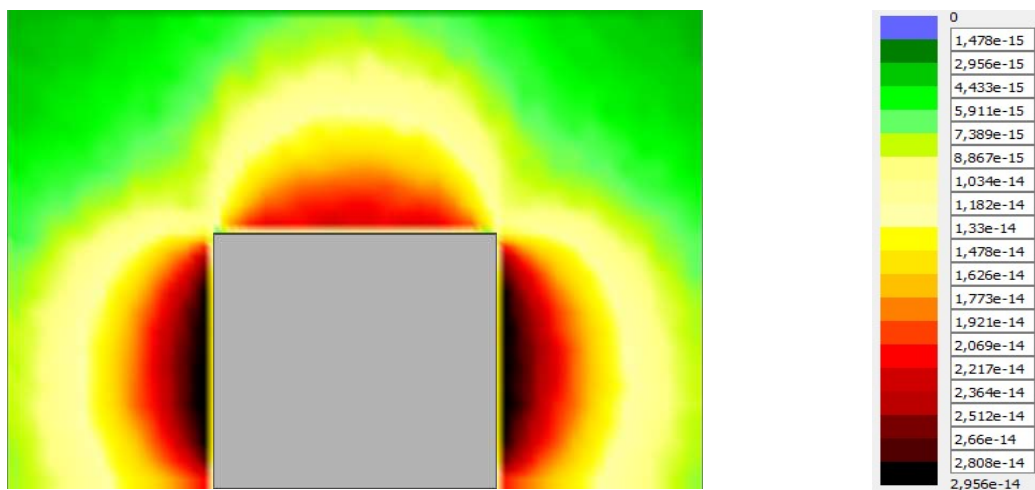


Рис. П13 – Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг КМЗ, контейнер заполнен легким бетоном полностью. Нормировка на один фотон, рожденный в об. источника

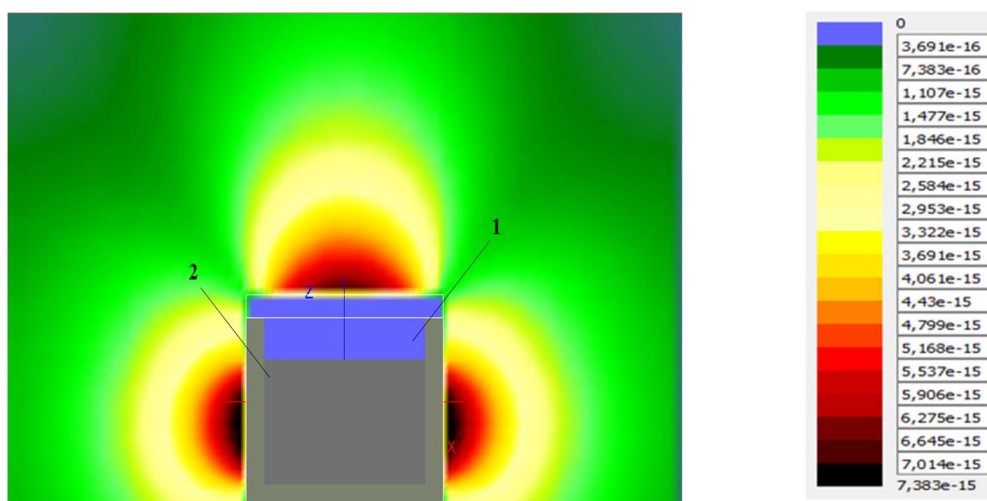


Рис. П14 – Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг контейнера НЗК. 1-воздушная прослойка, 2-участок контейнера, заполненный бетоном. Контейнер заполнен на 80%. Нормировка на один фотон, рожденный в объеме источника.

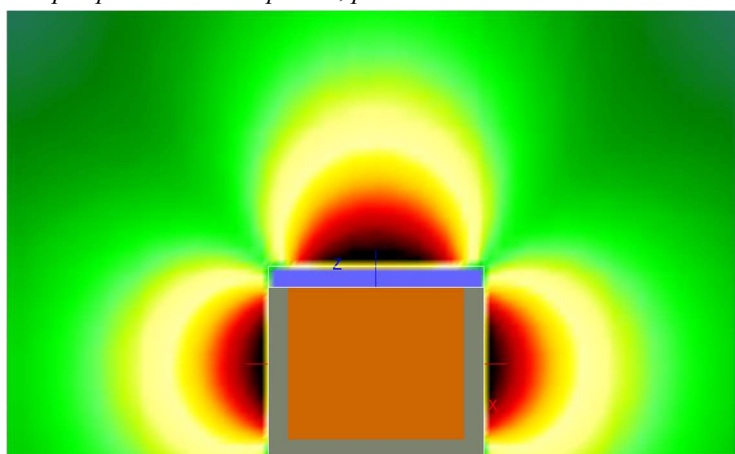


Рис. П15 – Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг контейнера НЗК, заполненного грунтом. Контейнер заполнен полностью. Нормировка на один фотон, рожденный в об. источника.

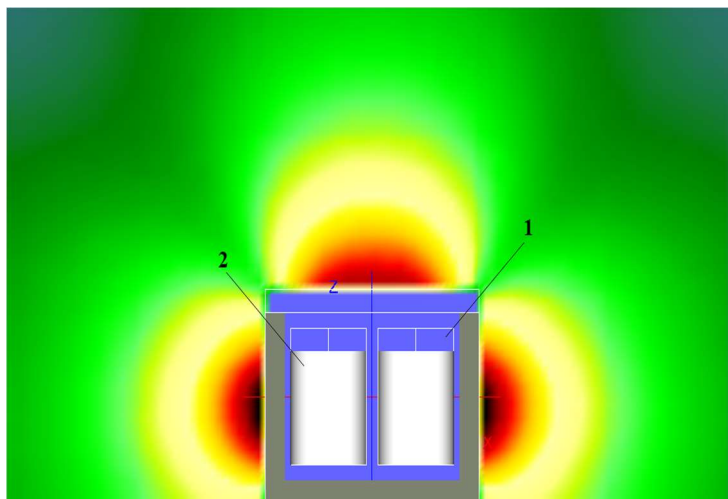


Рис. П16 –Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг контейнера НЗК с четырьмя "бочками": 1-воздушная прослойка, 2-"бочка", заполненная бетоном. "Бочки" заполнены на 90%. Нормировка на один фотон, рожденный в объеме источника.

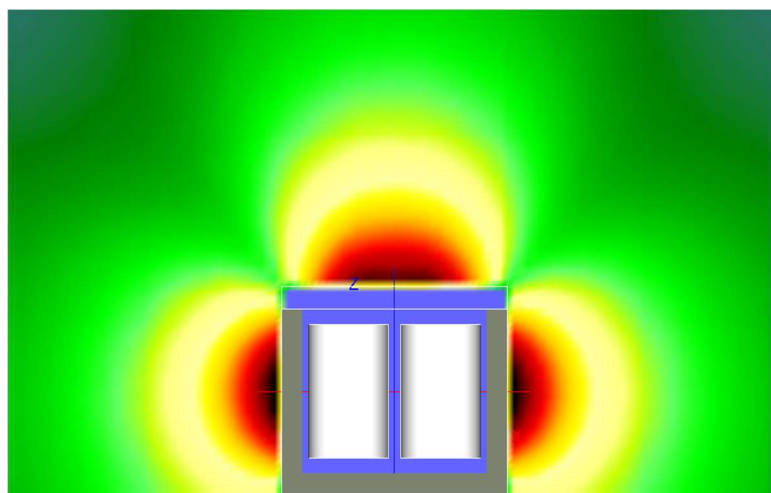


Рис. П17 –Визуализация распределения МЭД (Зв/час) в пространстве вокруг контейнера НЗК с четырьмя "бочками" заполненными пористым бетоном. "Бочки" заполнены полностью. Нормировка на один фотон, рожденный в объеме источник