

**МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ
УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ МЕТАЛЛООТХОДОВ АЭС, РАЗМЕЩЕННЫХ В
КОНТЕЙНЕРЕ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ МЭД.
(ТИПОВАЯ)**

МВК 4.3.2-12

1. РАЗРАБОТАНА ЗАО "ЭКОМЕТ-С".

2. Методика прошла метрологическую экспертизу и аттестацию в ФГУП «ВНИИФТРИ» с выдачей Свидетельства № 45090.2В401 и внесена в Реестр методик системы САРК под номером МВК 4.3.2-12.

3. АВТОРСКИЙ СОСТАВ.

Трошев А.В. - Заместитель генерального директора по радиационной безопасности и экологии (ЗАО «ЭКОМЕТ-С»)

Черемисин П.И. - Заместитель генерального директора по науке (ЗАО «ЭКОМЕТ-С»)

Герасименко А.А. - Начальник централизованной службы учёта и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов (ЗАО «ЭКОМЕТ-С»)

Толоконников А.Н. - Начальник отдела охраны окружающей среды и лицензирования (ЗАО «ЭКОМЕТ-С»)

Содержание

Введение.....
1. Область распространения	1
2. Нормативные ссылки.....	2
3. Термины и определения	3
4. Сокращения	5
5. Общие положения.....	5
6. Контролируемые и измеряемые величины.....	6
7. Объект контроля.....	6
8. Метод контроля.....	7
9. Требования к средствам измерений.....	8
10. Требования к измерению радионуклидного вектора.....	9
11. Подготовка к выполнению измерений.....	10
12. Выполнение измерений.....	11
13. Расчёт суммарной удельной и общей активности.....	13
14. Суммарная относительная неопределённость измерений удельной активности.....	14
15. Оформление результатов измерений.....	15
16. Процедура сопоставления результатов измерений.....	16
17. Требования к безопасности при проведении измерений.....	16
18. Требования к квалификации исполнителей.....	17
Приложение А (справочное). Характеристики контейнера УКТН-24000 для низкоактивных ТРО.....	18
Приложение Б (обязательное). Теоретическое обоснование и вывод формулы расчёта удельной активности МОЗРВ в контейнере	19
Приложение В (обязательное). Оценка оптимального количества точек измерения МЭД от контейнера и их расположение на гранях контейнера.....	24
Приложение Г (справочное). Средние значения весовых коэффициентов удельной активности основных радионуклидов МОЗРВ от некоторых филиалов ОАО “Концерн Росэнергоатом”.....	29
Библиография.....	30

Введение

Требования нормативных документов (ОСПОРБ-99, СПОРО-2002, СП АС-03) в части обращения с РАО предусматривают выполнение измерений радионуклидного состава и удельной активности металлических отходов на всех стадиях обращения с ними. Результаты измерений заносятся в сопроводительный документ на партию/упаковку ТРО (паспорт) и служат для дальнейшей идентификации партии/упаковки и выбора соответствующего способа хранения или захоронения с целью обеспечения радиационной безопасности персонала, окружающей среды и не распространения РВ.

В соответствии с требованиями НП-067-05 измерения характеристик РАО должны выполняться в соответствии с методиками, прошедшими метрологическую аттестацию.

**МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ
УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ МЕТАЛЛООТХОДОВ АЭС, РАЗМЕЩЕННЫХ В
КОНТЕЙНЕРЕ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ МЭД.
(ТИПОВАЯ)**

1 Область распространения

1.1 Настоящая методика предназначена для определения суммарной удельной активности металлоотходов АЭС, размещенных в контейнере УКТН, с целью паспортизации контейнера, направляемого с АЭС для дальнейшего обращения.

1.2 Разработанная методика обеспечивает определение суммарной удельной активности для энергии от 0,05 до 3 МэВ в диапазоне от $5,0 \cdot 10^2$ до $5,0 \cdot 10^{10}$ Бк/кг с расширенной суммарной неопределенностью не более 80 % ($P=0,95$), вычисляемой в процессе измерения.

1.3 Разработанная типовая методика основывается на непосредственном измерении МЭД, априорной информации о радионуклидном составе загрязнения и расчете связи МЭД с удельной активностью.

1.4 Настоящая методика устанавливает:

- порядок и правила проведения измерений средней МЭД от контейнеров, заполненных МОЗРВ;

- порядок и правила выполнения расчёта удельной активности гамма излучающих радионуклидов К-40, Со-60, Fe-59, Zn-65, Ag-110m, Mn-54, Nb-94, Nb-95, Zr-95, Eu-154, Eu-152, Cs-134, Cs-137 в контейнерах УКТН или подобных, содержащих МОЗРВ. Характеристики контейнера УКТН приведены в приложении А;

- правила расчёта суммарной активности;

- требования к средствам и условиям измерений;

- правила представления результатов измерений.

1.5 Данная методика применяется для контейнеров, заполненных МОЗРВ, имеющих произвольный линейный размер L любой грани не менее 110 см, толщину стальных стенок не более 0,3 см, плотность загрузки МОЗРВ ρ от $0,5 \text{ г/см}^3$ до $2,7 \text{ г/см}^3$, и создающих МЭД на поверхности грани от 10^{-7} до 10 Зв/ч .

2 Нормативные ссылки

В настоящей методике использованы ссылки на следующие нормативные документы:

НП-002-04 Правила безопасности при обращении с радиоактивными отходами атомных станций. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. [1]

НП-020-2000 Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности. Госатомнадзор России. [2]

НП-067-05 Основные правила учёта и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации. [3]

СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). [4]

СанПиН 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [5]

СанПиН 2.6.6.1168-02 Радиоактивные отходы. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002). [6]

СанПиН 2.6.1.24-03 Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). [7]

СТО 1.1.1.07.003.0823-2010 Нормы точности радиационных измерений. Нормирование точности дозиметрических измерений. [8]

СТО 1.1.1.07.003.0853-2011 Нормы точности радиационных измерений. Нормирование точности спектрометрических измерений. [9]

ГОСТ Р 8.594-2002 Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения. [10]

МВИ 74/98 Определение удельной активности гамма излучающих нуклидов, содержащихся в шихтовых слитках чёрных металлов. СПб, 1998. [11]

МВИ 15.1.7-10 Методика выполнения измерений активности счетных образцов на гамма-спектрометре (типовая). [12]

МВК 1.2.8-09 Методика выполнения контроля мощности дозы гамма-излучения (типовая). [13]

МВК 3.3.21-09 Типовая методика выполнения радиационного контроля твердых отходов АЭС ОАО «Концерн Энергоатом» при предварительной сортировке». [14]

МВК 3.3.22-09 Типовая методика выполнения контроля радионуклидного состава и активности твёрдых отходов АЭС ОАО «Концерн Росэнергоатом». [15]

МВК 3.3.27-11 Методика выполнения категоризации твердых и отвержденных отходов АЭС по результатам измерения мощности дозы (типовая). [16]

МВР 12.5-05 Методика определения операционных дозиметрических величин по показаниям штатной аппаратуры. [17]

МИ 2453-2000 Методики радиационного контроля. Общие требования. [18]

РМГ 43-2001 Применение Руководства по выражению неопределенности измерений. [19]

РМГ 91-2009 Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы. [20]

3 Термины и определения

В настоящей методике применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 активность (A): Мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени

$$A = dN/dt$$

где dN - ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени dt . Единицей активности является беккерель, Бк.

3.2 активность удельная (q): Отношение активности A радионуклида в веществе к массе m вещества

$$q = A/m$$

Единица удельной активности - беккерель на килограмм, Бк/кг.

3.3 вещество радиоактивное: Вещество в любом агрегатном состоянии, содержащее радионуклиды с активностью, на которые распространяются требования НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010.

3.4 гамма-постоянная: Мощность экспозиционной дозы, создаваемая не фильтрованным гамма-излучением точечного источника данного радиоактивного изотопа активностью в 1 мкюри на расстоянии 1 см; характеризует дозное поле, создаваемое данным изотопом.

3.5 загрязнение радиоактивное: Присутствие радиоактивных веществ на поверхности, внутри материала, в воздухе, в теле человека или в другом месте, в количестве, превышающем уровни, установленные НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010.

3.6 мощность амбиентного эквивалента дозы ($H^*(d)$): Мощность эквивалента дозы, который был создан в шаровом фантоме МКРЕ (международной комиссии по радиационным единицам) на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном, т. е. мощность амбиентного эквивалента дозы $H^*(d)$ – это мощность дозы, которую получил бы человек, если бы он находился на месте, где проводится измерение, в течение 1 часа. Единица мощности амбиентного эквивалента дозы - зиверт в час (Зв/ч).

3.7 обращение с радиоактивными отходами: Все виды деятельности, связанные со сбором, переработкой, транспортированием, хранением и (или) захоронением РАО.

3.8 объект радиационный (радиационно-опасный): Организация, где осуществляется обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения.

3.9 отходы радиоактивные: Не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные федеральными нормами и правилами.

3.10 персонал: Лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или работающие на радиационном объекте или на территории его санитарно-защитной зоны и находящиеся в сфере воздействия техногенных источников (группа Б).

3.11 парциальная активность: Активность одного из нуклидов, присутствующих в объекте контроля. Сумма парциальных активностей равна суммарной активности радионуклидов в объекте. Сумма удельных парциальных активностей равна суммарной удельной активности радионуклидов в объекте.

3.12 радионуклидный вектор: Значения относительных долей активности каждого из радионуклидов в суммарной активности объекта, установленные по результатам специальных представительных спектрометрических измерений, и обоснованно приписанные ряду объектов одного типа, объединенных общим материальным составом и источником образования, при этом

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1$$

где f_i - относительная доля активности i -го радионуклида в суммарной активности объекта.

3.13 упаковка радиационная: Контейнер (ёмкость), с помещенными в него радиоактивными отходами, подготовленными для транспортирования, хранения и захоронения.

3.14 хранение радиоактивных отходов: Временное безопасное размещение радиоактивных отходов.

4 Сокращения

АЭС – атомная электрическая станция

ЛРК – лаборатория радиационного контроля

МВИ – методика выполнения измерений

МВК – методика выполнения контроля

МОЗРВ – металлические отходы, загрязненные радиоактивными веществами

МЭД – мощность амбиентного эквивалента дозы

РВ – радиоактивные вещества

РК – радиационный контроль

РАО – радиоактивные отходы

САРК – система аккредитации лабораторий радиационного контроля Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

СИ – средство измерения

ТРО – твердые радиоактивные отходы

УКТН – универсальный крупнотоннажный транспортный контейнер для низкоактивных ТРО

5 Общие положения

5.1 Методика распространяется на измерение удельной активности гамма-излучающих нуклидов с применением дозиметрической аппаратуры и не предусматривает отбора проб. Методика не распространяется на измерения удельной активности бета- и альфа-излучающих нуклидов, требующих специальной пробоподготовки, методов и средств измерений.

5.2 Результатом измерений является установление с нормированной неопределённостью радиационных характеристик металлических отходов, размещённых в контейнере;

- средней мощности амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч;
- суммарной удельной активности отходов, Бк/кг.

5.3 Методика обеспечивает измерение суммарной удельной активности металлических отходов, размещённых в контейнере в диапазоне от $5,0 \cdot 10^2$ до $5,0 \cdot 10^{10}$ Бк/кг.

5.4 Методика аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ», внесена в реестр САРК и допускается к использованию на АЭС ОАО «Концерн Росэнергоатом» в качестве типовой методики.

6 Контролируемые и измеряемые величины

6.1 Основная контролируемая величина – суммарная удельная активность в диапазоне $5,0 \cdot 10^2$ до $5,0 \cdot 10^{10}$ Бк/кг с расширенной суммарной неопределенностью не более 80 % ($P=0,95$), вычисляемой в процессе измерения.

6.2 Непосредственно измеряемая величина - надфоновая мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в диапазоне 10^{-7} – 10 Зв/ч в контрольных точках с суммарной неопределенностью (20-60) % , вычисляемой в процессе измерения.

6.3 Вспомогательная измеряемая величина – масса нетто МОЗРВ в контейнере в диапазоне 5 – 30 т с погрешностью не более 10 %.

6.4 Вспомогательная контролируемая величина – суммарная активность МОЗРВ в контейнере в диапазоне $2,5 \cdot 10^6$ – $1,5 \cdot 10^{15}$ Бк с суммарной неопределенностью не более 80 % ($P=0,95$), вычисляемой в процессе измерения.

7 Объект контроля

7.1 Объектом контроля являются МОЗРВ - металлические отходы, загрязнённые радиоактивными веществами, размещённые в прямоугольном металлическом контейнере.

7.2 Металлический прямоугольный контейнер может быть любого типа, и должен удовлетворять условиям: произвольный линейный размер **L** любой грани не менее 110 см, толщина стальных стенок не более 0,3 см.

7.3 В случае, когда высота контейнера превышает величину **L** возможно частичное заполнение объёма контейнера при условии, что высота фрагментов МОЗРВ, загруженных в контейнер, будет не менее **L**. В этом случае при выполнении измерений МЭД и выборе количества точек измерения учитывается степень заполнения контейнера по высоте (приложение В).

7.4 Металлические отходы, загрязнённые радиоактивными веществами, могут состоять из: фрагментов оборудования, деталей машин, листовой стали, проволоки, труб, и пр. металлических отходов. Условием величины фрагментации оборудования являются габариты контейнера и плотность загрузки МОЗРВ в контейнер, которая должна быть не менее $0,5 \text{ г/см}^3$.

7.5 Металлические отходы могут быть загрязнены гамма излучающими радионуклидами К-40, Со-60, Fe-59, Zn-65, Ag-110m, Mn-54, Nb-94, Nb-95, Zr-95, Eu-154, Eu-152, Cs-134, Cs-137 или любыми другими гамма излучающими радионуклидами, имеющими эффективную энергию излучения более 0,1 МэВ.

7.6 Объект контроля должен иметь отметку о результатах первичного РК [14].

7.7 Представляемый на контроль объект в соответствии с разделом 10 должен сопровождаться полной информацией по радионуклидному вектору.

7.8 Уровень радиационного фона в месте измерения МЭД контейнера не должен превышать 0,2 мкЗв/ч. В месте измерения МЭД фона и МЭД контейнера должны быть созданы условия, исключающие возможность несанкционированного появления в этом месте техногенных источников излучения, способных изменить уровень фона и (или) повлиять на результаты измерений средней МЭД от контейнера с МОЗРВ.

8 Метод контроля

8.1 Определение суммарной удельной активности гамма излучающих радионуклидов в МОЗРВ, находящихся в контейнере, основывается на измерении МЭД гамма-излучения от поверхности контейнера с МОЗРВ и расчёте коэффициента корреляции между мощностью дозы и суммарной удельной активностью МОЗРВ. Принятый в настоящей методике способ, в случае известного радионуклидного вектора, позволяет по измеренной на поверхности контейнера МЭД рассчитать поле излучения внутри и на поверхности любых объёмных самопоглощающих и саморассеивающих источников, при условии однородности источника и равномерности распределения активности по объёму и при достаточно больших размерах источника. Теоретическое обоснование, выводы формул расчёта суммарной удельной и общей активности МОЗРВ в контейнере представлены в приложении Б.

8.2 Настоящая методика создана на основе гамма метода, получившего развитие в работах [21], [22], [23]. Металлические отходы – МОЗРВ характеризуются высокой степенью неоднородности распределения удельной активности по фрагментам металла в контейнере.

Уравнение связи удельной активности i -го нуклида и измеренной МЭД на поверхности контейнера от этого нуклида

$$q_i = D \cdot \mu(E_i, \rho) / 2\pi \cdot \Gamma_i \cdot \rho = D \cdot k_i / 2\pi \cdot \Gamma_i \quad (8.1)$$

(размерности и единицы будут указаны в основных расчетных формулах самой методики).

8.3 В отличие от многих аналогичных методик данная методика имеет следующие преимущества: предусмотренная измерительная процедура среднего МЭД позволяет учесть вклад неоднородностей по активности с заданной точностью, что, в свою очередь, позволяет более надежно определять искомую удельную активность содержимого контейнера в условиях большой неравномерности в распределении активности. Кроме того, методика позволяет выполнять контроль частично заполненных контейнеров.

8.4 В данной методике измерение МЭД от контейнера производится во многих точках по определённой схеме, затем вычисляется среднее значение МЭД, которое используется в расчётах суммарной удельной активности МОЗРВ.

8.5 Метод определения суммарной удельной активности МОЗРВ, применяемый в данной методике, основывается на выполнении следующих операций:

- подготовка к выполнению измерений в соответствии с разделом 11;
- измерение средней надфоновой МЭД в соответствии с разделом 12;
- расчёт суммарной удельной и общей активности в соответствии с разделом 13.

8.6 Выполнение данной методики предусматривает:

- контроль степени заполнения контейнера МОЗРВ;
- фиксацию схемы точек измерения МЭД;
- измерения МЭД по заданной схеме с учётом заполнения контейнера;
- расчёт средней МЭД;
- расчёт значения суммарной удельной и общей активности МОЗРВ в контейнере.

9 Требования к средствам измерений

9.1 Для измерения МЭД следует применять дозиметры и дозиметры-радиометры из состава средств измерений, внесенных в паспорт ЛРК АЭС (например, ДКС-96, ДРБП-03, МКС-01Р и др.), в сумме перекрывающих диапазон 10^{-7} - 10 Зв/ч.

9.2 Все применяемые приборы должны быть поверены в единицах мощности амбиентного эквивалента дозы, либо обеспечены соответствующими пересчетными коэффициентами по аттестованной типовой методике МВР 12.5-05 [17].

9.3 Все приборы должны иметь действующие свидетельства о поверке и полные комплекты эксплуатационной документации.

10 Требования к измерению радионуклидного вектора

10.1 Радионуклидный вектор f_i - это значения относительных долей активности каждого из радионуклидов в суммарной активности объекта, установленные по результатам специальных представительных спектрометрических измерений, и обоснованно приписанные ряду объектов одного типа, объединенных общим материальным составом и источником образования, при этом

$$f_i = \frac{A_i}{A} \quad (10.1)$$

где f_i - относительная доля активности i -го радионуклида в суммарной активности объекта;

A_i - парциальная активность i -ого радионуклида;

A - суммарная активность от всех радионуклидов.

Для радионуклидного вектора всегда выполняется условие (10.2)

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (10.2)$$

где $i - 1, 2, 3, \dots, n$ - количество радионуклидов

Суммарная расширенная неопределенность U_f радионуклидного вектора для $P=0,95$ - обычно не более 45%. Настоящее определение соответствует установленному в типовой методике МВК 3.3.27-11 [16]. Радионуклидный вектор может характеризовать конкретный контейнер или типичного представителя группы контейнеров.

10.2. Возможны 3 способа определения радионуклидного вектора (f_i).

10.2.1 Применяя дистанционную гамма спектрометрию по типовой методике Концерна МВК 3.3.22-09 [15] или другим аттестованным методикам того же назначения.

10.2.2 Лабораторным методом (представительный пробоотбор, СОБ, измерения на гамма спектрометре), используя типовую МВИ 15.1.7-10 [12], СТО1.1.1.07.003.0853-2011 [9] или аттестованные методики предприятий того же назначения.

10.2.3 Радионуклидный вектор может устанавливаться по результатам спектрометрических измерений лабораторным или дистанционным методом представительной выборки из множества объектов контроля, характеризующихся общим материальным составом и источником образования. Обоснованно установленный радионуклидный вектор распространяется на все объекты данного множества (однотипные объекты). Такой способ позволяет сэкономить ресурсы и оптимизировать процесс паспортизации в случае большого количества однотипных контейнеров, подлежащих контролю.

10.3 Представляемый на контроль объект должен сопровождаться информацией об f_i и U_f , оформленной в виде протокола определения величин f_i и U_f .

11 Подготовка к выполнению измерений

11.1 Формула (Б.8) (приложение Б) определения суммарной удельной активности Q выведена при условии однородности источника и равномерности распределения активности по объёму. В этом случае для определения МЭД от контейнера достаточно выполнить измерения в геометрических центрах всех боковых граней контейнера и вычислить среднее значение, которое и будет являться значением D из формулы (Б.8) (приложение Б). В реальных условиях загрузки МОЗРВ [23] в контейнер практически никогда не соблюдается условие однородности источника и равномерности распределения активности по объёму.

11.1.1 С целью учёта неоднородности распределения активности в контейнере увеличивается количество точек измерения МЭД на поверхности боковой грани.

11.1.2 Разметку точек измерения МЭД на каждой боковой (торцевой) грани контейнера произвести следующим образом: при условии полного заполнения объёма контейнера определить и отметить точку геометрического центра грани – контрольная точка КТ-0; при условии неполного заполнения контейнера за высоту боковой (торцевой) грани при определении КТ-0 принять высоту заполнения МОЗРВ в контейнере. От точки КТ-0, как от центральной, разметить горизонтально-вертикальную сетку с шагом по горизонтали - $L_{г.}$ и шагом по вертикали – $L_{в.}$. Точки пересечения вертикальных и горизонтальных линий являются точками измерений МЭД на боковой (торцевой) грани контейнера. Порядок нумерации точек не имеет значения. В соответствии с приложением В определяется оптимальное количество N_{\min} точек измерения МЭД и величина шага сетки - значения величин $L_{г.}$ и $L_{в.}$.

11.1.3 С целью унификации измерений МЭД и сопоставимости результатов измерений МЭД выполняемых отправителем и получателем разметку точек измерения МЭД на каждой боковой грани контейнера выполнять водостойким маркером или масляной краской.

11.2 Подготовить дозиметр к работе в соответствии с эксплуатационной документацией на дозиметр.

11.3 Место измерения МЭД контейнера выбрать в соответствии с 7.8. В месте проведения фоновых измерений МЭД размещается идентичный по конструкции контейнер, заполненный такой же массой металлических отходов, что и измеряемый, но заведомо чистых в радиационном отношении. Допускаются другие способы измерения фона на объекте в условиях самоэкранирования, установленные в аттестованных методиках.

12 Выполнение измерений

12.1 Определение средней надфоновой МЭД.

Способ и процедура измерения надфоновой МЭД в j -ой контрольной точке - D_j и вычисления ее суммарной стандартной неопределённости - u_j регламентируются типовой методикой МВК 1.2.8-09 [13]. В результате измерений надфоновых значений МЭД во всех контрольных точках имеем массив значений D_j и u_j , где D_j – значение надфоновой МЭД в j -ой контрольной точке, а u_j – стандартная суммарная неопределенность точечного результата.

Среднее значение надфоновой МЭД от контейнера D определяется как среднее арифметическое значение от всех надфоновых значений D_j , измеренных на всех боковых гранях контейнера. Общее число и расположение контрольных точек на боковых гранях контейнера определено в приложении В. Значение D вычисляется по формуле (12.1)

$$D = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_j \quad (12.1)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, N$ – число контрольных точек измерения МЭД.

12.2 Вычисление неопределенности средней надфоновой МЭД.

Суммарная неопределенность средней по контейнеру надфоновой МЭД (D) включает две составляющие:

- статистическую неопределенность (типа А) за счет разброса по контейнеру точечных значений (D_j), которая характеризуется стандартной статистической неопределенностью - σ_D ;
- суммарную неопределенность типа В за счёт точности средств измерений, влияющих факторов и других условий точечных измерений, которая характеризуется стандартной неопределенностью типа В - u_Σ .

Суммарную стандартную неопределенность средней МЭД u_D следует вычислять по формуле:

$$u_D = \sqrt{\sigma_D^2 + u_\Sigma^2} \quad (12.2)$$

где u_Σ - следует использовать наименьшее из массива u_j , которые регламентируются типовой методикой МВК 1.2.8-09 [13], (следуя консервативной оценке) (обычно не превышает (25-30) %)

Стандартную статистическую неопределенность σ_D следует вычислять по формуле:

$$\sigma_D = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{\sum_j^N (D - D_j)^2}{N(N-1)}} \quad (12.3)$$

где $j = 1, 2, 3 \dots N$ – номер измерения D_j . Значение σ_D обычно не превышает (12-15) %.

Таким образом, суммарная стандартная относительная неопределенность измерения средней надфоновой МЭД вычисляется непосредственно в процессе измерения МЭД. Оценка верхней границы u_D даёт значение около 30 %.

12.3 Для получения расширенной суммарной неопределенности результата измерения U_D следует использовать коэффициент расширения, равный 2, при этом полученные неопределенности будут соответствовать доверительной вероятности 0,95

$$U_D = 2 \cdot u_D \quad (12.4)$$

Соответственно, верхняя граница расширенной суммарной стандартной относительной неопределенности измерения МЭД гамма-излучения от объекта – U_D не превышает 60 %.

13 Расчёт суммарной удельной и общей активности

13.1 Вывод формулы расчёта суммарной удельной активности излагается в приложении Б. Расчёт суммарной удельной активности Q МОЗРВ, расположенных в контейнере, следует выполнять по формуле

$$Q = 44,2 \cdot 10^3 \cdot D / \left\{ \sum_{i=1}^n f_i \cdot (\Gamma_i / k_{iz}) \right\} \quad (13.1)$$

где Q – суммарная удельная активность по всем радионуклидам, Бк/кг;

D – среднее значение надфоновой МЭД от контейнера, мкЗв/ч;

f_i – относительная доля удельной активности i –ого радионуклида от суммарной удельной активности (весовой коэффициент удельной активности);

Γ_i – гамма постоянная i –ого радионуклида, фЗв·м²/(с·Бк);

k_{iz} – массовый коэффициент ослабления гамма излучения с учётом заряда Z вещества источника для эффективной энергии E_0 i –ого радионуклида, м²/кг.

13.1.1 Данные для расчёта суммарной удельной активности по формуле (13.1)

- значение D вычислить в соответствии с формулой (12.1) раздела 12, значение D в мкЗв/ч;

- значения f_i определить в соответствии с разделом 10, значения f_i безразмерные;

- значения (Γ_i / k_{iz}) приведены в графе 5 таблицы Б.2 приложения Б.

13.2 Суммарную активность A МОЗРВ, расположенных в контейнере, следует определять по формуле

$$A = Q \cdot M \quad (13.2)$$

где A – суммарная активность МОЗРВ, Бк;

Q – суммарная удельная активность по всем радионуклидам, Бк/кг;

M – масса нетто МОЗРВ, кг

13.2.1 Данные для расчёта суммарной активности по формуле (13.2)

- значение Q определяется формулой (13.1);

- для получения значения M (массы нетто) необходимо вначале произвести измерение массы контейнера с МОЗРВ (масса брутто) на технических весах или других устройствах, затем из полученного значения вычесть массу контейнера. Погрешность разностного измерения должна быть не более 10 % ($P=0,95$).

14 Суммарная относительная неопределённость измерений удельной активности

14.1 Суммарная относительная неопределённость u_Q вычисления значения удельной активности Q обусловлена, в соответствии с формулой (Б.8) приложения Б, неопределённостью u_D , связанной с измерением D , неопределённостью u_f , связанной с вычислением радионуклидного вектора и неопределённостью u_k , связанной с вычислением отношений (Γ_i/k_{iz}). Суммарная относительная неопределённость u_Q следует вычислять по формуле

$$u_Q = \sqrt{u_D^2 + U_f^2/3 + U_k^2/3} \quad (14.1)$$

где u_D вычисляется по формуле (12.5);

u_f - определяется разделом 10 (обычно не превышает 45%);

u_k – определяется в работе [22].

14.2 Оценка верхней границы u_Q даёт следующее значение:

- верхняя граница суммарной стандартной относительной неопределенности измерения МЭД гамма-излучения от объекта – u_D не превышает 30 % (12.2);
- значение неопределённости u_f , связанной с вычислением радионуклидного вектора не превышает 50 % (10.1);
- значение максимальной границы неопределённости u_k , связанной с вычислением отношений (Γ_i / k_{iz}) не превышает 15 % [22].

Соответственно, верхняя граница суммарной относительной неопределённости u_Q вычисления значения удельной активности Q согласно формуле (14.1) не превышает 40 %.

14.3 Для получения расширенной суммарной относительной неопределённости U_Q вычисления значения удельной активности следует использовать коэффициент расширения, равный 2, при этом полученные неопределённости будут соответствовать доверительной вероятности 0,95

$$U_Q = 2 \cdot u_Q \quad (14.2)$$

Соответственно, верхняя граница расширенной суммарной относительной неопределённости U_Q вычисления значения удельной активности Q согласно формуле (14.2) не превышает 80 %.

14.4 Относительную стандартную неопределённость полной активности отходов в контейнере Q_m следует вычислять по формуле:

$$u_{Q_m} = \sqrt{u_Q^2 + u_e^2} \quad (14.3)$$

где u_e – суммарная стандартная неопределённость взвешивания отходов, которая согласно 13.2.1 не должна превышать 10 %.

15 Оформление результатов измерений

Результаты измерений и расчетов должны быть представлены протоколом с указанием вычитаемого фона - D_ϕ ; надфоновой МЭД в контрольных точках - D_j с их неопределённостями U_j (для $P=0,95$), а так же среднее D с неопределённостью U_D .

Результаты измерений МЭД и расчёта средней надфоновой МЭД по формуле (12.1) следует фиксировать в журнале измерений по форме, утверждённой на АЭС. Суммарную удельную активность партии Q , рассчитанную по формуле (Б.8) приложения Б фиксировать в журнале измерений как полный результат измерений Q_0 в виде:

$$Q_0 = Q \pm U_Q \quad \text{при } P=0,95 \quad (15.1)$$

где P – доля ожидаемых значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны Q_0 ,
 U_Q – вычисляется в соответствии с (14.2).

16 Процедура сопоставления результатов измерений

16.1 Отправитель партии МОЗРВ вместе с контейнерами, содержащими МОЗРВ, представляет получателю пакет документов по списку согласованному отправителем и получателем. В числе документов, представляемых отправителем, обязательно должен быть протокол радиационного контроля (протокол РК) и Акт передачи МОЗРВ с Приложением расчёта суммарной удельной активности партии МОЗРВ.

В протоколе радиационного контроля должны быть указаны все данные по измерениям МЭД в соответствии с данной методикой. В Приложение к Акту передачи должен быть приведён расчёт суммарной удельной активности партии МОЗРВ, выполненный в соответствии с данной методикой.

16.2 Получатель партии МОЗРВ выполняет измерения МЭД в соответствии с данной методикой и сравнивает с данными отправителя.

16.3 Расхождение в измерениях средней надфоновой МЭД между отправителем и получателем не должно превышать 30 % .

16.4 В случае превышения допустимого расхождения в определении значения средней надфоновой МЭД получатель, не вскрывая опломбированный контейнер, инициирует проведение совместных с отправителем подтверждающих измерений с применением приборов и методик отправителя. При подтверждении расхождения результатов измерений на площадках отправителя и получателя выполняются действия, предписанные правилами НП-067-05 [3].

17 Требования к безопасности при проведении измерений

17.1 К выполнению измерений допускают персонал, прошедший инструктаж по технике безопасности, ознакомленный с настоящей методикой и правилами безопасности при работе с применяемыми средствами измерений и оборудованием.

17.2 При выполнении измерений мощности экспозиционной дозы должны соблюдаться Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010 и Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

17.3 Эксплуатация дозиметров должна проводиться в соответствии с действующими Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правилами технической безопасности при эксплуатации установок.

18 Требования к квалификации исполнителей

18.1 К выполнению измерений и обработке их результатов допускаются сотрудники, имеющие профессиональные навыки в области дозиметрических измерений и изучившие данную методику.

18.2 Выполнение работ по данной методике может проводиться одним оператором.

Квалификация оператора: техник, инженер службы по учёту и контролю РВ и РАО, дозиметрист ОРБ.

Приложение А (справочное)

Характеристики контейнера УКТН-24000 для низкоактивных ТРО

Т а б л и ц а А.1 – Характеристики контейнера УКТН-2400

Внешние габариты контейнера	мм	6058 x 2438 x 2591
Максимальная масса брутто	кг	24000
Масса порожнего контейнера	кг	2550
Вместимость	м ³	32,2
Транспортный индекс		10
Транспортная категория		III - желтая



Рисунок А.1 – Внешний вид контейнера УКТН

Приложение Б (обязательное)

Теоретическое обоснование и вывод формулы расчёта удельной активности МОЗРВ в контейнере

Основной вклад в радиоактивное загрязнение металлолома, образующегося в филиалах ОАО “Концерн Росэнергоатом” дают радионуклиды Cs-137 ($E = 0,662$ МэВ) и Co-60 ($E = 1,25$ МэВ). Линейные коэффициенты ослабления μ в железе для энергии 0,662 МэВ и 1,25 МэВ, соответственно, равны: $\mu_{Cs} = 0,570 \text{ см}^{-1}$; $\mu_{Co} = 0,422 \text{ см}^{-1}$.

Условием достаточности размеров источника является превышение трёх длин свободного пробега, т.е., выполнение условия $\mu(E) \cdot h > 3$, где $\mu(E)$ – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения с энергией E в материале источника, h – линейный размер источника. С учётом вышеизложенного это условие выполняется для источника ($\rho = 7,874 \text{ г/см}^3$), имеющего линейные размеры более 7,1 см.

При размерах источника $\mu(E) \cdot h > 23$ (десять максимальных размеров чувствительной области детектора) и при условии однородности источника и равномерности распределения активности по объёму МЭД от i –ого радионуклида, измеренная в центре боковой поверхности контейнера, как на границе полубесконечного пространства (с точностью до краевого эффекта) связана с q_i - удельной активностью от i –ого радионуклида соотношением

$$q_i = (D_i \cdot \mu_i(E_{oi}, \rho)) / (2\pi \cdot \rho \cdot \Gamma_i) \quad (\text{Б.1})$$

где D_i - МЭД в центре боковой поверхности контейнера от i –ого радионуклида Зв/с;

$\mu_i(E_{oi}, \rho)$ - коэффициент ослабления гамма излучения с эффективной энергией E_{oi} от i –ого радионуклида в материале источника плотностью ρ , м^{-1} ;

ρ - плотность источника, кг/м^3 ;

Γ_i - ионизационная гамма постоянная i –ого радионуклида, $\text{Зв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$;

Значения $\mu_i(E_{oi}, \rho)$ некоторых радионуклидов, наиболее часто встречающихся в МОЗРВ, рассчитаны по данным [25] и приведены в таблице Б.1.

Т а б л и ц а Б.1 - Значения $\mu_i(E_{oi},\rho)$ для различных плотностей ρ источников, см^{-1} .

Радио- нуклид	E_γ , МэВ	ρ , $\text{г}/\text{см}^3$											
		$\frac{0,5}{\text{Li}}$	$\frac{0,9}{\text{K}}$	$\frac{1,0}{\text{H}_2\text{O}}$	$\frac{1,5}{\text{Rb}}$	$\frac{1,8}{\text{P}}$	$\frac{2,0}{\text{C}}$	$\frac{2,3}{\text{B}}$	$\frac{2,6}{\text{Sr}}$	$\frac{2,7}{\text{Al}}$	$\frac{3,0}{\text{Br}}$	$\frac{3,6}{\text{Ba}}$	$\frac{7,874}{\text{Fe}}$
Co-60	1,25	0,0266	0,0486	0,0653	0,0787	0,1019	0,1153	0,1250	0,1356	0,1497	0,1698	0,1859	0,4274
Cs-137	0,66	0,0358	0,0656	0,0886	0,1094	0,1374	0,1547	0,1680	0,1898	0,2016	0,2236	0,2819	0,5809
Cs-134	0,76	0,0336	0,0613	0,0833	0,1012	0,1287	0,1451	0,1569	0,1749	0,1887	0,2069	0,2527	0,5419
K-40	1,46	0,0243	0,0445	0,0608	0,0718	0,0933	0,1052	0,1140	0,1237	0,1368	0,1628	0,1674	0,3906
Mn-54	0,83	0,0322	0,0587	0,0796	0,0962	0,1233	0,1392	0,1503	0,1661	0,1808	0,1969	0,2361	0,5180
Zn-65	1,12	0,0280	0,0511	0,0680	0,0829	0,1072	0,1215	0,1318	0,1430	0,1576	0,1741	0,1973	0,4501
Nb-94	0,79	0,0329	0,0600	0,0817	0,0987	0,1261	0,1423	0,1536	0,1704	0,1849	0,2019	0,440	0,5301
Nb-95	0,77	0,0333	0,0609	0,0827	0,1003	0,1278	0,1442	0,1558	0,1734	0,1874	0,2052	0,2498	0,5380
Eu-152	0,83	0,0322	0,0587	0,0796	0,0962	0,1233	0,1392	0,1503	0,1661	0,1808	0,1969	0,2361	0,5180
Eu-154	0,94	0,0303	0,0553	0,0738	0,0902	0,1161	0,1315	0,1424	0,1555	0,1706	0,1847	0,2179	0,4876
Zr-95	0,74	0,0340	0,0622	0,0843	0,1028	0,1304	0,1471	0,1591	0,1779	0,1913	0,2102	0,2585	0,5497

Реальные значения плотности ρ МОЗРВ, загружаемых в контейнеры, лежат в интервале значений от 0,5 до 2,0 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Графики зависимостей функции $\mu_i(E_{oi},\rho)$ от плотности ρ построенных на основе данных, приведённых в таблице Б.1, позволяют сделать вывод о том, что в интервале значений плотности от 0,5 $\text{кг}/\text{м}^3$ до 2,7 $\text{кг}/\text{м}^3$ функция $\mu_i(E_{oi},\rho) = f(\rho)$ хорошо аппроксимируется прямой линией. Для указанного интервала плотности $\mu_i(E_{oi},\rho)/\rho = k_i$, где $k_i = \text{const}(\rho)$ – массовый коэффициент ослабления для i -ого радионуклида с эффективной энергией E_{oi} .

Анализ отклонения расчётных значений $\mu_i(E_{oi},\rho)/\rho$ от истинных позволяет утверждать, что при заданных k_i погрешность в расчёте $\mu_i(E_{oi},\rho)/\rho$ в указанном интервале плотности не превышает 15 %.

Пример - для $k_1(\text{Co-60}, E_0=1,25 \text{ МэВ})$ погрешность составляет при: $\rho=0,5 \text{ г}/\text{см}^3$ – 6,6 %, $\rho=1,0 \text{ г}/\text{см}^3$ – 13,6 %, $\rho=1,8 \text{ г}/\text{см}^3$ – 1,2 %, $\rho=2,3 \text{ г}/\text{см}^3$ – 6,1 %, $\rho=2,7 \text{ г}/\text{см}^3$ – 1,8 % [22].

На основе вышеизложенного формулу (Б.1) преобразуем к виду

$$q_i = D_i \cdot k_i / (2\pi \cdot \Gamma_i) \quad (\text{Б.2})$$

Используя свойство аддитивности гамма полей и формулу (Б.2), можно записать суммарную МЭД – $D_{б.п.}$, измеренную на боковой поверхности контейнера от всех n нуклидов, содержащихся в МОЗРВ как

$$D_{б.п.} = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \{2\pi \cdot q_i \cdot \Gamma_i / k_i\} = 2\pi \{ \sum_{i=1}^n (q_i \cdot \Gamma_i) / k_i \} \quad (\text{Б.3})$$

Реальные измерения МЭД в различных точках на поверхностях граней контейнера с МОЗРВ позволяют утверждать, что всегда существуют неоднородности в расположении активности по объёму контейнера. Для учёта этих неоднородностей необходимо выполнить измерения МЭД в нескольких точках на поверхностях боковых граней контейнера с МОЗРВ и вычислить D - среднее значение МЭД от всех выполненных измерений. Количество и координаты точек измерения МЭД приведены в приложении В. Из формулы определения среднего и формулы (Б.3) следует, что

$$D = 2\pi \{ \sum_{i=1}^n (q_i \cdot \Gamma_i) / k_i \} \quad (\text{Б.4})$$

Очевидно, что удельная активность, так же, как и МЭД обладает свойством аддитивности, поэтому суммарная удельная активность Q для количества нуклидов равных n определяется как

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (\text{Б.5})$$

Относительная доля f_i - удельной активности i –ого радионуклида от суммарной удельной активности Q равна

$$f_i = q_i / Q \quad (\text{Б.6})$$

Выполнив преобразования формулы (Б.4) получаем формулу определения суммарной удельной активности Q металлических отходов, загрязнённых радиоактивными веществами, находящихся в контейнере

$$Q = D / \{2\pi \sum_{i=1}^n f_i \cdot (\Gamma_i / k_i)\} \quad (\text{Б.7})$$

где Q – суммарная удельная активность по всем радионуклидам, Бк/кг;

D – среднее значение МЭД от контейнера, Зв/с;

f_i – относительная доля удельной активности i –ого радионуклида от суммарной удельной активности (весовой коэффициент удельной активности);

Γ_i – гамма постоянная i –ого радионуклида, Зв·м²/(с·Бк);

k_i – массовый коэффициент ослабления гамма излучения в МОЗРВ для эффективной энергии E_0 i –ого радионуклида, м²/кг.

Теоретические посылки, применяемые при разработке данной методики, основываются на общих положениях зависимости линейного коэффициента ослабления гамма излучения μ от энергии гамма кванта E_0 и плотности вещества ρ , через которое проходит излучение. Известно, что на величину пробега гамма кванта в веществе, также, влияет и величина заряда атомного ядра этого вещества Z , и, тем сильнее, чем меньше энергия проходящего гамма кванта. Учёт зависимости величины пробега гамма кванта в веществе от величины заряда атомного ядра Z этого вещества позволяет уточнить значения отношений коэффициентов Γ_i/k_i в формуле (Б.7), что приводит к уточнению определения Q суммарной удельной активности МОЗРВ в контейнере [23]. Значения массового коэффициента ослабления k_i для различных энергий гамма квантов E , различных плотностей вещества ρ и зарядов Z , были рассчитаны на основе данных, представленных в работах [24,25,26]. Результаты расчётов массового коэффициента ослабления k для элементов с зарядом атомного ядра Z от 3 до 56 и для энергий гамма квантов E от 0,1 МэВ до 1,5 МэВ приведены в работе [23].

Анализ результатов расчётов показал, что значение величины k для фиксированной энергии увеличивается с ростом числа Z . Этот эффект значителен для энергий $E \leq 0,5$ МэВ и уменьшается с ростом E . Для фиксированного заряда Z , независимо от его числа, с ростом энергии E значение величины массового коэффициента ослабления быстро уменьшается. Начиная с энергий $E \geq 0,9$ МэВ влияние величины заряда Z на значения массового коэффициента ослабления практически исчезает. Таким образом, необходимость учёта зависимости массового коэффициента ослабления от заряда атомного ядра $k = k(E,Z)$ возникает для радионуклидов, имеющих эффективную энергию излучения гамма-квантов в диапазоне $0,1 \leq E < 0,9$ МэВ. К таким радионуклидам относятся: Mn-54, Nb-94, Nb-95, Zr-95, Eu-154, Eu-152, Cs-137, Cs-134 и др.

В случае, когда источник излучения является элементом однородным по Z , учёт зарядовой зависимости $k = k(E,Z)$ значительно упрощается. Металлические отходы, загрязнённые радиоактивными веществами, загружённые в контейнер, состоят в основной своей массе из железа. Расчётные значения отношения Γ_i/k_i для МОЗРВ без учёта Z и уточнённые отношения Γ_i/k_{iz} с

учётom Z получены на основе значений массового коэффициента k рассчитанного для железа ($Z=26$) и приведены в таблице Б.2.

Т а б л и ц а Б.2 - Расчётные значения отношения (Γ_i/k_{iz}) для МОЗРВ с учётом заряда атомного ядра Z для некоторых радионуклидов.

Радио- нуклид	$E_{\gamma\text{-эфф.}}$, МэВ	Γ_i , (аГр·м ²)/(с·Бк)	k_{iz} , ·10 ⁻³ , м ² /кг	Γ_i / k_{iz} (фГр·кг)/(с·Бк)
1	2	3	4	5
К-40	1,46	5,07	4,96	1,02
Со-60	1,25	84,23	5,43	15,5
Fe-59	1,15	40,48	5,65	7,17
Zn-65	1,12	20,02	5,72	3,50
Ag-110m	0,86	100,9	6,47	15,6
Mn-54	0,84	30,24	6,54	4,62
Nb-94	0,79	57,31	6,73	8,52
Nb-95	0,77	27,97	6,83	4,10
Zr-95	0,73	27,02	7,03	3,84
Eu-154	0,73	42,84	7,03	6,09
Eu-152	0,70	41,18	7,18	5,74
Cs-134	0,69	57,17	7,23	7,91
Cs-137	0,66	21,24	7,38	2,88

Формула определения суммарной удельной активности Q металлических отходов, загрязнённых радиоактивными веществами, находящихся в контейнере принимает вид

$$Q = D / \left\{ 2\pi \sum_{i=1}^n f_i \cdot (\Gamma_i / k_{iz}) \right\} \quad (\text{Б.8})$$

где Q – суммарная удельная активность по всем радионуклидам, Бк/кг;

D – среднее значение МЭД от контейнера, Зв/с;

f_i - относительная доля удельной активности i -ого радионуклида от суммарной удельной активности (весовой коэффициент удельной активности);

Γ_i – гамма постоянная i -ого радионуклида, Зв·м²/(с·Бк);

k_{iz} – массовый коэффициент ослабления гамма излучения с учётом заряда Z вещества источника для эффективной энергии E_0 i -ого радионуклида, м²/кг.

Приложение В (обязательное)

Оценка оптимального количества точек измерения МЭД от контейнера и их расположение на гранях контейнера

Анализ измерений МЭД в различных точках на поверхностях граней контейнера позволяет утверждать, что при наличии неоднородностей в расположении активности по объёму контейнера, результаты вычисления средней МЭД зависят от количества точек измерения и могут отличаться на порядок и более. Для протяжённых объектов гамма излучения характерна линейная зависимость значения МЭД в точке измерения от расстояния до объекта излучения. Малое количество точек измерения МЭД увеличивает вероятность того, что точка измерения МЭД оказывается на значительном расстоянии от точки расположения неоднородности активности, что, в свою очередь, приводит к увеличению погрешности измерения и, соответственно, увеличению погрешности вычисления среднего значения МЭД от контейнера. Увеличение количества точек измерения позволяет уменьшить эту погрешность, но увеличивает трудозатраты и время вычисления средней МЭД, таким образом, необходимо произвести оценку оптимального количества точек измерения МЭД от контейнера.

В соответствии с требованиями унификации и повторяемости результатов измерений отправителя и получателя партии МОЗРВ измерения МЭД следует проводить в точках пересечения вертикальных и горизонтальных линий, образующих сетку на боковой грани контейнера. Первоначально определяется центральная точка сетки (точка КТ-0, 11.1.2.) (на боковой или торцевой грани). Центральная точка сетки может не совпадать с геометрическим центром грани. В случае заполнения не всего объёма контейнера при определении центральной точки сетки за высоту грани следует принимать высоту заполненного объёма МОЗРВ в данном контейнере. Через центральную точку сетки проводятся вертикальная и горизонтальная линии. Вследствие неоднородности расположения активности возможны два варианта: первый – когда точка измерения МЭД располагается точно над точкой неоднородности активности, второй – когда точка измерения не совпадает с центром неоднородности активности. В этом случае возникает погрешность измерения, тем большая, чем больше шаг сетки, т.е., величин $L_{г.}$ и $L_{в.}$ (11.1.2).

Увеличение числа точек измерения, т.е., уменьшение шага сетки приводит как к увеличению точности измерения удельной активности, так и к увеличению времени и трудоёмкости измерений. Оценим оптимальный шаг сетки из условия не превышения 30 %-ной погрешности измерения, возникающей вследствие дискретности проводимых измерений.

Исходные параметры численного моделирования результатов измерений МЭД

- начальная геометрическая форма сетки – квадратная;
- количество точек измерения – 25;
- линейный параметр d – толщина слоя МОЗРВ, уменьшающая интенсивность гамма излучения вдвое (толщина половинного поглощения);
- n – кратность d (принимает значения: 1,2,3,...);
- энергия излучения – 1,25 МэВ (расчёт по Co-60);
- средняя плотность заполнения контейнера $\rho = 0,5 \text{ г/см}^3$;

$$- L_{\Gamma} = L_{\text{в}} = \sqrt{2} \cdot nd$$

По определению $d = 0,693/\mu$, где μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} . Из данных таблицы Б.2 приложения Б, и при указанных параметрах значение $d = 26,1 \text{ см}$.

Расчёт средней мощности излучения $P_{\text{ср}}$ выполнен для двух вариантов при наличии одной точки неоднородности активности. В первом варианте ($P_{\text{ср.1}}$) какая либо точка измерения МЭД и точка расположения неоднородности активности совпадали геометрически; во втором варианте ($P_{\text{ср.2}}$) рассматривался случай, когда точка неоднородности активности располагалась в центре квадрата, образованного точками измерения МЭД, т.е., была максимально равноудалена от точек измерения, что приводило к максимальной погрешности измерения.

В результате расчётов были получены формулы:

$$P_{\text{ср.1}} = P_0 + P_1 \cdot (0,04 + 0,195/n) \quad (\text{B.1})$$

$$P_{\text{ср.2}} = P_0 + P_1 \cdot (0,224/n) \quad (\text{B.2})$$

где P_0 – средняя мощность излучения от произвольной заданной равномерно распределённой активности;

P_1 – дополнительная мощность излучения, создаваемая в какой либо точке привнесённой дополнительной активностью (имитация неоднородности распределения активности).

Результаты расчётов погрешности измерения, возникающей вследствие дискретности проводимых измерений, представлены в таблицах В.1, В.2, В.3.

Т а б л и ц а В.1 - Значения Δ – погрешности измерения средней МЭД в процентах в зависимости от кратности n для случая $P_1 = 1 \cdot P_0$. За “истинное” принимается значение $P_{cp.I}$ при $n=1$.

	Δ (%)					
	n					
	1	2	3	5	7	10
$P_{cp.I}$	0,0	7,9	10,5	12,6	13,5	14,2
$P_{cp.II}$	0,9	10,0	13,0	15,4	16,4	17,2

Т а б л и ц а В.2 - Значения Δ – погрешности измерения средней МЭД в процентах в зависимости от кратности n для случая $P_1 = 3 \cdot P_0$. За “истинное” принимается значение $P_{cp.I}$ при $n=1$.

	Δ (%)					
	n					
	1	2	3	5	7	10
$P_{cp.I}$	0,0	17,2	22,9	27,4	29,4	30,9
$P_{cp.II}$	1,9	21,6	28,2	33,5	35,7	37,4

Т а б л и ц а В.3 - Значения Δ – погрешности измерения средней МЭД в процентах в зависимости от кратности n для случая $P_1 = 4 \cdot P_0$. За “истинное” принимается значение $P_{cp.I}$ при $n=1$.

	Δ (%)					
	n					
	1	2	3	5	7	10
$P_{cp.I}$	0,0	20,1	26,8	32,2	34,5	36,2
$P_{cp.II}$	2,3	25,4	33,0	39,2	41,9	43,8

Из анализа вышеприведённых данных видно, что для случаев малой неоднородности активности, когда дополнительная мощность излучения P_1 сравнима со средней мощностью от однородной активности (таблица В.1), кратность n , т.е., шаг сетки практически не играет роли до рассматриваемых максимальных значений $n = 10$

$$L_T = L_B = \sqrt{2} \cdot nd = 1,41 \cdot 10 \cdot 26 \approx 370 \text{ см } (\Delta = 17,2 \%).$$

С ростом величины неоднородности активности и увеличением кратности n быстро растёт погрешность измерения. Обработка многолетних статистических данных по измерениям МЭД от контейнеров с партиями МОЗРВ, получаемыми в ЗАО “Экомет-С” от филиалов ОАО “Концерн Росэнергоатом” – атомных станций, позволяет утверждать, что критерий $P_1 = 4 \cdot P_0$ является достаточным. Случаи превышения четырёхкратного среднего МЭД в точке расположения неоднородности активности составляют менее 20 % от всех случаев превышения среднего МЭД, и ужесточение этого условия не соразмерно увеличивает время и количество точек измерения.

Из результатов, приведённых в таблице В.3 следует, что условие не превышения 30 %-ной погрешности измерений средней МЭД, возникающей вследствие дискретности проводимых измерений, выполняется до значений шага сетки:

$$L_{\Gamma} = L_{\text{в}} = \sqrt{2} \cdot nd = 1,41 \cdot 2,61 \cdot 26,1 = 96 \text{ см } (\Delta = 30 \%).$$

Теоретические посылки, применённые для вывода формулы (Б.8) (приложение Б) определения суммарной удельной активности Q , основывались на том положении, что измерения МЭД на боковой поверхности контейнера источника идентичны измерениям МЭД на границе полубесконечного пространства (с точностью до краевого эффекта), что в свою очередь приводило к требованию на ограничение минимального линейного размера источника.

Существование краевого эффекта (уменьшение величины измеряемой мощности дозы гамма излучения по мере приближения к краю боковой грани контейнера, при условии однородного распределения активности) приводит к ограничению количества точек измерения.

При уменьшении расстояния Y до края боковой грани контейнера менее определённой величины Y_{\min} возникает погрешность измерения, связанная с краевым эффектом. С целью исключения возникновения такой дополнительной погрешности следует ограничивать расстояние от точек измерения МЭД до края боковой (торцевой) поверхности контейнера. Для заданного набора радионуклидов (таблица Б.2 приложение Б) $Y_{\min} = 50 \text{ см}$.

В таблице В.4 для контейнера УКТН-24000 при разных условиях загрузки приведены $L_{\Gamma, \max}$ и $L_{\text{в}, \max}$ - максимальные значения величин L_{Γ} и $L_{\text{в}}$ и N_{\min} - минимального значения величины N – количества точек измерения. Допускается уменьшение величин L_{Γ} и $L_{\text{в}}$ и увеличения N .

Т а б л и ц а В.4 - Значения $L_{г.маx}$, $L_{в.маx}$ и N_{min} для контейнера УКТН-24000 при разных условиях загрузки (высота загрузки – h , высота контейнера – $H = 260$ см – приложение А).

Высота загрузки	Боковая грань			Торцевая грань			Всего точек измерения	$Y_{min,с}$ М
	h , см	$L_{г.маx}$, см	$L_{в.маx}$, см	N_{min} , шт.	$L_{г.маx}$, см	$L_{в.маx}$, см		
260	80	80	21	70	80	9	60	50
240	80	70	21	70	70	9	60	50
220	80	60	21	70	60	9	60	50
200	80	50	21	70	50	9	60	50
180-*)	80	40	14	70	40	6	40	50
160-*)	80	30	14	70	30	6	40	50
140-*)	80	20	14	70	20	6	40	50
-*) – в точках, расположенных на горизонтальной линии, проходящей через точку КТ-0 (11.1.2), измерения не производятся.								

**Приложение Г
(справочное)**

**Средние значения весовых коэффициентов удельной активности
основных радионуклидов МОЗРВ от некоторых филиалов ОАО “Концерна
Росэнергоатом”.**

Данные по составу радионуклидного загрязнения МОЗРВ и средние весовые коэффициенты приведённые в таблице Г.1 были получены из актов на партии и спектрометрических протоколов, присылаемых в составе документов на партии МОЗРВ от некоторых филиалов ОАО “Концерна Росэнергоатом”.

Т а б л и ц а Г.1 - Средние значения весовых коэффициентов f_i удельной активности основных радионуклидов МОЗРВ от некоторых филиалов ОАО “Концерна Росэнергоатом”.

№	Филиал ОАО “Концерн Росэнергоатом”		Тип реактора	Основные радионуклиды							
				Co-60	Cs-137	Mn-54	Nb-95	Zn-65	Zr-95	Cs-134	Nb-94
1	Курская атомная станция	КАЭС	РБМК-1000	0,84	0,14	0,02	-	-	-	-	-
2	Ленинградская атомная станция	ЛАЭС	РБМК-1000	0,46	0,37	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01
3	Нововоронежская атомная станция	НВАЭС	ВВЭР-1000, ВВЭР-440	0,24	0,70	0,05	-	-	-	0,01	-
4	Смоленская атомная станция	СМАЭС	РБМК-1000	0,79	0,17	0,02	0,01	-	-	-	0,01

Библиография

[21] МВИ Определение удельной активности гамма излучающих нуклидов, содержащихся в шихтовых слитках чёрных металлов.СПб, 1996. Свидетельство об аттестации №22/96 от 08.05.96 г.

[22] А.Б.Гелбутовский, А.А.Герасименко, А.В.Трошев, П.И.Черемисин. Практическое применение гамма метода для определения удельной активности металлических отходов, загрязнённых радиоактивными веществами, в контейнере. III-й Международный ядерный форум. Секция 4. СПб, 22-26 сентября 2008 г.

[23] А.Б.Гелбутовский, А.А.Герасименко, А.В.Трошев, П.И.Черемисин. Уточнённая методика определения удельной активности металлических отходов, загрязнённых радиоактивными веществами, в контейнере. VI-й Международный ядерный форум. Секция 4. СПб, 26-30 сентября 2011 г.

[24] О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. Справочник по ядерной физике. Киев, 1975.

[25] Н.Г. Гусев, В.П. Машкович, А.П. Суворов. Защита от ионизирующих излучений. Физические основы защиты от излучений, т. 1, Москва, Атомиздат, 1980.

[26] Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы. – С.-Пб.: АНО НПО “Профессионал”, 2004, 2007. – 1142 с.