ФЕДЕРАЛЬНОЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр Российской Федерации -
Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»

На правах рукописи

Карев Андрей Евгеньевич

АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНГАЛЯЦИОННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗО-АЭРОЗОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Специальность 05.26.02

«Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(ядерный топливно-энергетический комплекс)»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук

Шинкарев Сергей Михайлович

МОСКВА-2018

Оглавление

Условные обозначения 7

Введение 8

Глава 1 Физика аэрозолей и газо-аэрозольных смесей 17

1.1 Нуклидный состав радиоактивных аэрозолей на предприятиях ЯТЦ 18

1.2 Методы и устройства для оценки дисперсного состава аэрозолей 18

1.3 Обзор характеристик существующих устройств, моделирующих осаждение аэрозолей в респираторном тракте человека 21

1.4 Обзор работ в области вычислительной гидрогазодинамики 22

1.5 Физико-химические свойства радиоактивных газо-аэрозольных смесей и анализ их фазового состава 24

1.6 Обзор существующих методов улавливания радиоактивного рутения из газовой фазы 26

1.7 Задачи диссертационного исследования 27

Глава 2 Разработка метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора. 29

2.1 Постановка задачи 29

2.2 Каскадный импактор Андерсена 30

2.3 Модель осаждения аэрозолей в респираторном тракте Публикации 66 МКРЗ 35

2.4 Описание метода оценки осаждения частиц радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека 42

2.5 Расчет долей осаждения для одномодальных и полимодальных распределений 47

2.6 Расчет ожидаемых эквивалентных доз облучения торакального и экстраторакального отделов 49

2.7 Выводы по главе 2 50

Глава 3 Разработка импактора для реализации метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта 52

3.1 Расчет параметров конструкции импактора-фантома 52

3.1.1 Пример расчета D_{50} каскада импактора-фантома. ... 56

3.2 Численное моделирование осаждения аэрозольных частиц на каскадах импактора-фантома ... 58

3.2.1 Построение геометрической модели ... 58

3.2.2 Построение расчетной сетки ... 58

3.2.3 Математическая и физическая модель ... 59

3.2.4 Задание граничных условий ... 60

3.2.5 Результаты расчета поля скоростей и перепада давления через устройство ... 60

3.2.6 Моделирование и расчет эффективности осаждения частиц в импакторе-фантоме с помощью Лагранжевой модели ... 62

3.3 Разработка конструкции импактора-фантома ... 64

3.4 Экспериментальное исследование характеристик импактора-фантома ... 66

3.5 Оценка МДА по различным радионуклидам ... 74

3.6 Оценка неопределенности при расчете АМАД ... 76

3.7 Применение импактора-фантома для анализа дисперсного состава воздуха производственной среды ... 77

3.7.1 ФГУП «ПО «Маяк», завод 45 ... 77

3.7.2 Химико-металлургический завод АО «СХК» ... 83

3.7.3 Сублиматный завод АО «СХК» ... 89

Выводы по главе 3 ... 101

Глава 4 Разработка способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси ... 104

4.1 Постановка задачи ... 104

4.2 Описание способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси ... 104

4.3 Подбор реагента, для преобразования газовой составляющей газо-аэрозольных смесей в аэрозольную фракцию. ... 106

4.4 Расчет необходимого объема реагента 107

4.4.1 Расчет необходимого количества реагента в случае пробоотбора газо-аэрозольных смесей рутения 108

4.5 Расчет длины реакционной камеры 109

4.6 Минимизация осаждения аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора 109

4.7 Параметры реакционной камеры 110

4.8 Выводы по главе 4 110

Глава 5 Численное моделирование и разработка устройства для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси. 112

5.1 Численное моделирование течения воздушного потока в реакционной камере с помощью программного комплекса STAR-CCM+. 112

5.1.1 Построение геометрической модели 112

5.1.2 Построение расчетной сетки 112

5.1.3 Математическая и физическая модель 112

5.1.4 Задание граничных условий 113

5.1.5 Результаты расчета поля скоростей и перепада давления через устройство 113

5.1.6 Исследование влияния угла расширения диффузора реакционной камеры на осаждение аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора 115

5.2 Разработка конструкции устройства для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси. 116

5.3 Экспериментальные исследования характеристик устройства 120

5.3.1 Измерение объемной скорости потока через устройство 120

5.3.2 Исследование зависимости скорости расхода реагента от различных параметров 121

5.4 Применение устройства на СЗ и ЗРИ АО «СХК» для оценки доли газообразной фракции ГФУ 122

5.5 Выводы по главе 5 126

Заключение..... 128

Приложение 1 Пат. 2480730. РФ. Устройство для измерения дисперсности и контроля объемной активности газовой и аэрозольной фракции радиоактивного рутения 130

Приложение 2 Пат. РФ 2509375. Импактор-фантом респираторного тракта человека 131

Приложение 3 Акт внедрения результатов диссертационной работы на ХМЗ «СХК» 132

Приложение 4 Акт внедрения результатов диссертационной работы на ФГУП ПО «Маяк» 133

Список литературы..... 134

Список сокращений

CFD – computational fluid dynamics, вычислительная гидродинамика

ECAD – Effective cut-off diameter, эффективный каскадный аэродинамический диаметр разделения D_{50}

EPA – Environmental Protection Agency, агентство по охране окружающей среды (США)

PM – particle matter, взвешенная частица

АМАД – медианный по активности аэродинамический диаметр

АМТД – медианный по активности термодинамический диаметр

ГФУ – гексафторид урана

ДОА – допустимая объемная активность

ЗРИ – завод разделения изотопов

ЛНР – логарифмически-нормальное распределение

МДА – минимальная детектируемая активность

ММАД – массовый медианный аэродинамический диаметр

ОА – объемная активность

ОЭД – ожидаемая эффективная доза

ПГП – предел годового поступления

СЗ – сублиматный завод

ПК – программный комплекс

РБГ – радиоактивные благородные газы

СЗЗ – санитарно-защитная зона

СИЗ – средства индивидуальной защиты

ФРТЧ – фантом респираторного тракта человека

ХМЗ - химико-металлургический завод

ЯТЦ – ядерный топливный цикл

Условные обозначения

D_{50} – эффективный каскадный аэродинамический диаметр разделения

H_T – ожидаемая эквивалентная доза внутреннего облучения

H_{TH} – ожидаемая эквивалентная доза облучения легких (торакального отдела органов дыхания как целого)

H_{ET} – ожидаемая эквивалентная доза облучения экстраторакального отдела органов дыхания как целого

$h_T(\tau)_U^{inh}$ – ожидаемая эквивалентная доза облучения ткани T органа дыхания при ингаляционном поступлении 1 Бк радионуклида U за время τ, прошедшее после поступления радиоактивных веществ в организм, Зв/Бк

A_T – взвешивающий коэффициент для тканей T органов дыхания

Обозначения органов дыхания в модели Публикации 66 МКРЗ

Экстраторакальный отдел:

ET_1 - ткани передней части носа

ET_2 - задняя часть носового хода, носовая часть глотки, ротовая часть глотки и гортань

LN_{ET} - лимфатические узлы экстраторакального отдела

Торакальный отдел:

BB_{bas} - базальные клетки стенок бронхов

BB_{sec} - секреторные клетки стенок бронхов

bb - бронхиолы

AI – ткани альвеолярной области

LN_{TH} - лимфатические узлы торакального отдела

Введение

Актуальность темы

Оперативное получение информации для корректного расчета дозы внутреннего облучения является важной составляющей в комплексе мер обеспечения радиационной безопасности персонала радиационно-опасных объектов при штатных условиях работы, а также для оценки радиационного воздействия на персонал и население в случае радиационных аварий. На отдельных производствах предприятий ЯТЦ внутреннее облучение лиц из персонала вследствие ингаляционного поступления радионуклидов может играть ведущую роль по сравнению с внешним облучением.

Внутреннее облучение, обусловленное ингаляционным поступлением, может выходить на первый план и в случае радиационной аварии, как показал опыт изучения последствий аварии на АЭС «Фукусима-1», произошедшей 11 марта 2011 года. Установлено, что наиболее высокие дозы облучения лиц, участвовавших в ликвидации последствий данной аварии, были получены за счет ингаляционного поступления радиоактивных изотопов йода [32]. В первые месяцы после аварии основные дозы внутреннего облучения населения, проживающего в Фукусиме и соседних префектурах Японии, были получены за счет ингаляционного поступления радиоактивных изотопов йода и цезия, как следствие эффективного применения контрмер, направленных на предотвращение их поступления с пищей и питьевой водой [83]. Следует подчеркнуть, что в первые месяцы после Чернобыльской аварии 26 апреля 1986 года ведущий вклад (в среднем, более 90%) в дозу внутреннего облучения населения от радиоактивных изотопов йода и цезия обусловил пероральный путь, поскольку соответствующие контрмеры не были приняты вовремя.

Как правило, оценка дозы внутреннего облучения вследствие ингаляционного поступления радионуклидов сопровождается существенными неопределенностями и вызывает большие трудности, чем оценка дозы внешнего облучения.

В рамках действующей системы радиационной защиты, когда применяются стандартизованные значения массы органов и тканей, а также параметров метаболизма условного человека доза внутреннего облучения определяется такими характеристиками вдыхаемых аэрозолей, как радионуклидный состав, дисперсность, тип химического соединения при ингаляции, а в случае радиоактивных газо-аэрозольных смесей – фазовым составом (соотношение газ-аэрозоль).

К газо-аэрозольным смесям относятся летучие соединения радиоактивных изотопов различных химических элементов, в том числе йода, рутения, урана. Для оценки

ингаляционного поступления данных смесей необходимо раздельное определение активности газовой и аэрозольной фракций.

Ряд технологических операций при регенерации оксидного и нитридного топлива сопровождается интенсивным выделением газовой и аэрозольной фракций рутения. По расчетам в 1 кг отработавшего нитридного топлива содержание всех изотопов рутения составит 3,6 г/кг при выгорании 4,5% и 10,2 г/кг при выгорании 13,6% и выдержке 1 год [15] (при этом для создания активности $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк требуется 0,3 мг ^{106}Ru). Таким образом, для обеспечения радиационной безопасности персонала, а также для соблюдения требований по ограничению выбросов в атмосферу необходим радиационный контроль объемной активности газовой и аэрозольной составляющих газо-аэрозольной смеси рутения, как в рабочих помещениях, так и после систем газоочистки радиохимических заводов.

Изотопы рутения (^{103}Ru, ^{106}Ru), также как изотопы йода, способны проникать через дефекты в защитных оболочках ядерно-энергетических установок, при этом в выбросах находятся в аэрозольном и газообразном состоянии [12]. Таким образом, изучение поведения изотопов рутения в воздушной среде, оценка их ингаляционного поступления представляют отдельную исследовательскую задачу в области радиационной безопасности.

Важным фактором, определяющим дозу внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радионуклидов, является дисперсный состав аэрозолей. В случае альфа-излучающих радионуклидов экспериментальная оценка активности аэрозольных частиц, осевших в различных отделах дыхательных путей, практически невозможна, поэтому для этой цели используют фантомы, в той или иной степени имитирующие дыхательный тракт, либо расчетные модели, позволяющие на основании предварительно полученных экспериментальных данных о дисперсности аэрозолей рассчитать дозу внутреннего облучения.

Применение существующих устройств, моделирующих осаждение аэрозольных частиц в респираторном тракте, ввиду их технической сложности представляется весьма трудоемким для проведения оперативной оценки ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей в организм лиц из персонала в штатных условиях работы предприятия, а также персонала и населения в случае радиационной аварии.

До сих пор при анализе последствий радиационных аварий и ретроспективной оценке доз внутреннего облучения персонала и населения исследователи вынуждены использовать предположения о дисперсности аэрозольной фракции и соотношении между газовой и аэрозольной составляющими, поскольку отсутствуют мобильные устройства, позволяющие получать экспериментальные данные об основных характеристиках ингаляционного

поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей. Велика востребованность данных устройств и для контроля ингаляционного поступления на предприятиях ядерного топливно-энергетического цикла в условиях их штатной работы.

Таким образом, изложенное выше определяет актуальность решения важной научной задачи: повышение достоверности оценки дозы внутреннего облучения лиц из персонала и населения при ингаляционном поступлении радиоактивных газо-аэрозольных смесей в различных ситуациях облучения (в том числе – аварийных) путем экспериментального определения дисперсности аэрозольных частиц и активности газовой и аэрозольной составляющих с помощью специально разработанных аппаратурно-методических комплексов.

ЦЕЛЬЮ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ является разработка аппаратурно-методического комплекса для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе экспериментального определения объемной активности:

- аэрозольной фракции с учетом распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта и
- газовой фракции путем ее преобразования в аэрозольную фракцию.

В соответствии со сформулированной целью диссертации основными

ЗАДАЧАМИ РАБОТЫ являются:

1. Разработка метода оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта человека, на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора.
2. Разработка импактора для реализации метода оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта человека.
3. Разработка способа оценки ингаляционного поступления на основе анализа фазового и дисперсного состава радиоактивных газо-аэрозольных смесей.
4. Разработка устройства, состоящего из размещенных последовательно импактора и химического реактора, для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей.

Научная новизна

1. Разработан метод оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью

импактора. Предложенный метод позволяет оценить активность аэрозольных частиц, осажденных в различных отделах дыхательного тракта согласно дозиметрической модели Публикации 66 МКРЗ, независимо от типа распределения активности аэрозолей по размерам частиц.

2. Разработана конструкция импактора-фантома респираторного тракта человека для реализации метода оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта. В результате численного моделирования и экспериментальных исследований получены зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра аэрозольных частиц на каскадах данного устройства. Новизна подтверждена патентом (RU 2509375 от 10.03.14).
3. Разработано устройство, состоящее из размещенных последовательно импактора и химического реактора, позволяющее повысить точность оценки дозы внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радиоактивных газо-аэрозольных смесей за счет получения экспериментальных данных о дисперсном составе, о распределении активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта, о фазовом составе (соотношение объемных активностей газ/аэрозоль) газо-аэрозольной смеси. Новизна подтверждена патентом (RU 2480730 от 27.04.13).

<u>Практическая значимость диссертационной работы</u>

1. В результате применения ФРТЧ на технологической цепочке Н (производство ^{241}Am-Be нейтронных источников) ФГУП «ПО «Маяк» установлены следующие характеристики распределения активности аэрозольных частиц по аэродинамическим диаметрам в операторской:

   Фракция 1: АМАД = 0,8 мкм, βg = 3,0, вклад в суммарную активность - 43%

   Фракция 2: АМАД = 9,2 мкм, βg = 1,7, вклад в суммарную активность - 57%

   Полученные характеристики могут быть использованы а) для расчета ожидаемых эквивалентных доз отделов респираторного тракта при штатном режиме работы б) для расчета дозовых коэффициентов для перехода от объемной активности радиоактивных аэрозолей к ожидаемой эффективной дозе внутреннего облучения.
2. Рассчитанные значения ожидаемых эквивалентных доз облучения в год экстраторакального H_{ET} и торакального H_{TH} отделов респираторного тракта при среднегодовой объемной активности $9{,}3\cdot10^{-4}$ Бк/м^3 и установленных характеристиках распределения активности по аэродинамическим диаметрам аэрозольных частиц на ФГУП «ПО «Маяк» (п.1) составили 21 мкЗв и 1,7 мкЗв соответственно.

3. Дозовые коэффициенты, установленные в результате применения ФРТЧ на ФГУП «ПО «Маяк» (для операторской: $1{,}8\cdot10^{-5}$ Зв/Бк; для ремонтной зоны: $1{,}7\cdot10^{-5}$ Зв/Бк), позволяют устранить возможное систематическое завышение ОЭД для лиц из персонала в 2 раза. Результаты работ подтверждены актом о внедрении результатов диссертационной работы на ФГУП «ПО «Маяк» (№ 193-5-5.5/3297 от 9.12.2015)
4. Установлено, что распределение активности по аэродинамическим диаметрам аэрозольных частиц в операторской на участке металлургии ХМЗ АО «СХК» носит бимодальный характер со значительным вкладом грубодисперсных аэрозолей в суммарную активность. Значение АМАД первой фракции (по данным, полученным с помощью ФРТЧ) составило 8,6 мкм (β_g = 3,7, вклад в суммарную активность 22%), среднее значение АМАД грубодисперсной фракции: 36 мкм (β_g = 1,4, вклад в суммарную активность 78%). Рассчитанные значения ожидаемых эквивалентных доз облучения в год экстраторакального H_{ET} и торакального H_{TH} отделов респираторного тракта при среднегодовой объемной активности 0,05 Бк/м^3 и установленном дисперсном составе радиоактивных аэрозолей составили 510 мкЗв и 4,8 мкЗв соответственно.
5. Значение дозового коэффициента для операторской и ремонтной зоны ($3{,}0\cdot10^{-5}$ Зв/Бк), установленное в результате применения ФРТЧ на участке металлургии ХМЗ АО «СХК» позволяет устранить систематическое завышение оценки ОЭД для лиц из персонала в 1,6 раз. Результаты работ подтверждены актом о внедрении результатов диссертационной работы на АО "СХК" (№ 106-08/470 от 3.04.2015)
6. Доля газообразного ГФУ, определенная с помощью разработанного устройства, состоящего из размещенных последовательно импактора и химического реактора, на СЗ и ЗРИ АО «СХК» варьируется от 0,52% до 5,2%. Рассчитанный вклад газообразной фракции ГФУ в годовое значение ОЭД оказался незначителен и составляет в среднем 1,1% для СЗ и 0,03% для ЗРИ.
7. Разработана методика измерений «Определение характеристик распределения радиоактивного аэрозоля по размерам с помощью импактора-фантома респираторного тракта человека», свидетельство об аттестации № 7-4/25.01.00087-2015 от 7.10.2015, зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений под номером ФР.1.31.2016.23130.
8. Разработанный аппаратурно-методический комплекс может применяться для контроля объемной активности радиоактивных газо-аэрозольных смесей на предприятиях ЯТЦ при штатном режиме работы, а также для верификации

параметров моделей по оценке доз персонала и населения при ингаляционном поступлении газо-аэрозольных смесей в результате радиационных аварий.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод оценки распределения активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта согласно дозиметрической модели Публикации 66 МКРЗ, на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора, независимо от типа распределения активности аэрозолей по размерам частиц.
2. Конструкция импактора для реализации метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта.
3. Устройство, состоящее из размещенных последовательно импактора и химического реактора, позволяющее повысить точность оценки дозы внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радиоактивных газо-аэрозольных смесей за счет получения экспериментальных данных о дисперсном составе, о распределении активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта, о фазовом составе газо-аэрозольной смеси.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и четырех приложений. Работа изложена на 141 странице машинописного текста и содержит 65 рисунков и 47 таблиц. Список литературы включает 87 библиографических ссылок, в том числе 51 - в отечественных изданиях и 36 – в зарубежных.

Публикации

1. Моделирование и разработка импактора-фантома респираторного тракта человека / А.Г. Цовьянов, Е.А. Крамер-Агеев, Д.Е. Фертман, А.И. Ризин, А.Е. Карев, Ю.Н. Мартынюк // АНРИ. -2013.- №3 (74). - С. 52 – 60. (РИНЦ).

2. Радиационный контроль аэрозолей в субмикронном диапазоне, включая наноаэрозоли. Прогноз развития / А.И. Ризин, Д.Е. Фертман, А.Г. Цовьянов, А.Е. Карев // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2013. - №2 (46). - С.44 – 55. (РИНЦ).

3. Метод и устройство для измерения объемной активности газовой и аэрозольной фракций радиоактивных аэродисперсных систем / А.Г. Цовьянов, А.Е. Карев // Саратовский научно-медицинский журнал.- 2013. - Т. 9. - № 4. - С. 821–824.

4. Применение соглашения о вдыхаемой, торакальной и респирабельной фракциях (ГОСТ Р ИСО 7708-2006) для стационарного и индивидуального контроля объемной

активности радиоактивных аэрозолей на предприятиях атомной отрасли / Карев А.Е., Шинкарев С.М., Цовьянов А.Г. // АНРИ. -2015.- №4 (83). - С. 43 – 50. (РИНЦ).

5. Решение задач практической дозиметрии сложных радиоактивных газоаэрозольных смесей в контексте аварийного реагирования/ Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М.// АНРИ. -2016.- №1 (84). - С. 55 – 59. (РИНЦ).

6. Метод определения дисперсного состава радиоактивных аэрозолей на основе инерционных разделителей / Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Припачкин Д.А., Будыка А.К., Юзеф Хусейн Надиль // АНРИ. -2016.- №3 (86). - С. 57 – 63 (РИНЦ).

7. Метод оценки осаждения частиц радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека / Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Кухта Б.А., Шинкарев С.М., Припачкин Д.А. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций -2016.- №5. – С. 23-31 (РИНЦ).

8. Пат. 2480730. Рос. Федерация: Устройство для измерения дисперсности и контроля объемной активности газовой и аэрозольной фракции радиоактивного рутения: МПК G01N 1/22, G01N 15/00 / Цовьянов А.Г., Ризин А.И., Фертман Д.Е., Карев А.Е., Камарицкая О.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение "Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна". - 2011147487/05; заявл. 23.11.2011, опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12 – 13 стр., 6 илл.

9. Пат. 2509375. Рос. Федерация: Импактор-фантом респираторного тракта человека: МПК G09B23/28 / Цовьянов А.Г., Кухта Б.А., Карев А.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный научный центр Российской Федерации Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна". - 2012121978/14; заявл. 29.05.2012, опубл. 10.03.2014, Бюл. № 34 – 17 стр., 6 илл.

10. Методика измерений «Определение характеристик распределения радиоактивного аэрозоля по размерам с помощью импактора-фантома респираторного тракта человека», свидетельство об аттестации № 7-4/25.01.00087-2015 от 7.10.2015, зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений под номером ФР.1.31.2016.23130.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

Научная сессия НИЯУ МИФИ (г. Москва, 2012, 2013), IV Научно-практическая конференция «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на современном этапе» (г.

Санкт-Петербург, 2012), восьмая Всероссийская конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму» (г. Санкт-Петербург, 2013), конференция «Девятые Петряновские чтения» (НИФХИ им. Карпова, г. Москва, 2013), Международная конференция и выставка технологий фильтрации и сепарации FILTECH (г. Висбаден, Германия, 2013; г. Кельн, Германия, 2015), 60-я конференция Общества физики здоровья (Health Physics Society), г. Индианаполис, Индиана, США (2015), Европейская Аэрозольная Конференция EAC (г. Милан, Италия, 2015; г. Цюрих Швейцария, 2017), 10-я Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» (г. Обнинск, 2015).

В материалах и трудах научных конференций опубликовано 8 работ:

1. Karev A., Tsovianov A., Shinkarev S. Estimation of inhalation intake of complex radioactive gas-aerosol mixtures in case of emergency response // Supplement to Health Physics vol.109, № 1, July 2015 p.110, 60th Annual meeting of the Health Physics Society, Indianapolis, Indiana, USA, 14 – 18 July 2015.
2. A.G. Tsovyanov, A.E. Karev «Method and device for inhalation intake assessment of radioactive gas-aerosol mixtures // FILTECH 2015p.50, Cologne, Germany, 24-26 February 2015.
3. А.Г. Цовьянов, А.Е. Карев «Разработка аппаратурно-методического комплекса для контроля ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей» // Сборник тезисов докладов девятой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», с.170 (Москва, 21–23 мая 2014 года).
4. А.Г. Цовьянов, А.Е. Карев, А.И. Ризин, Д.Е. Фертман «Разработка метода преобразования радиоактивных газоаэрозольных смесей в дисперсную фазу и устройство для его реализации» // Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму. Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции / Научные редакторы В.А. Петров, М.В. Сильников. СПб.: Любавич, 2013. с.120
5. A.G. Tsovyanov, A.E. Karev, E.A. Kramer-Ageev «Instrumental and methodological complex for monitoring inhalation intake radioactive aerosols» // FILTECH 2013 p.61, Wiesbaden, Germany, 22-24 October 2013.
6. Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Моделирование осаждения аэрозольных частиц в импакторной модели фантома респираторного тракта человека // Научная сессия НИЯУ МИФИ- 2012, Аннотация докладов Т.1 (г. Москва).

7. Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Ризин А.И., Фертман Д.Е. Устройство для измерения дисперсности и объемной активности аэрозольной и газовой фракций радиоактивного рутения // Научная сессия НИЯУ МИФИ- 2012, Аннотация докладов Т.1 (г. Москва).

Личное участие автора в получении результатов исследований, изложенных в диссертации, выразилось в следующем:

1. Разработан метод оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора.
2. Рассчитаны параметры каскадов ФРТЧ, создана трехмерная модель внутреннего объема импактора, проведено численное моделирование осаждения аэрозольных частиц на каскадах с помощью программного комплекса STAR-CCM+, получены численные и экспериментальные зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра частиц.
3. Проведена апробация ФРТЧ в производственных помещениях предприятий ФГУП «ПО «Маяк» (завод 45, цепочка Н, 2013), ХМЗ АО «СХК» (участок металлургии, 2014), СЗ АО «СХК» (производство сырьевого ГФУ, 2017).
4. Рассчитаны параметры, проведено численное моделирование и экспериментальное исследование конструкции устройства, состоящего из размещенных последовательно импактора и химического реактора, для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава. В 2017 году проведена апробация данного устройства на СЗ и ЗРИ АО «СХК».

Достоверность научных положений и выводов обеспечена использованием современных экспериментальных методов исследований, а также обеспечена подтверждением ряда полученных результатов данными, известными из литературы.

Глава 1 Физика аэрозолей и газо-аэрозольных смесей

Для оценки дозы внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радиоактивных аэрозолей широко применяются косвенные методы. Данные методы основаны на предварительном отборе проб аэрозолей и последующем расчете дозы. При этом корректность дозовых оценок во многом зависит от наличия информации о физико-химических характеристиках аэрозолей, и в частности - дисперсности частиц. Это обусловлено тем, что в зависимости от распределения размеров частиц радиоактивного аэрозоля изменяется доля активности, которая задерживается в различных отделах дыхательного тракта, что, в свою очередь, влияет на значение формируемой дозы внутреннего облучения.

Исследование дисперсного состава аэрозолей может быть осуществлено с помощью импакторов – пробоотборных устройств, использующих проявление инерционных свойств частиц в неоднородном поле скоростей газа. Типичный импактор представляет собой прибор, в корпусе которого последовательно расположены сопла с установленными напротив них плоскими поверхностями (коллекторными пластинами). Частицы, обладающие достаточной инерцией, сепарируются за счет соударения (импакции) с поверхностью коллекторной пластины. Диаметр сопел уменьшается по ходу потока аэрозоля, линейная скорость струи увеличивается, в результате на каждом последующем каскаде улавливаются все более мелкие частицы. Значения измеренной массы или активности (в случае радиоактивных аэрозолей) позволяют построить гистограммы и восстановить соответствующие распределения аэрозольных частиц по размерам.

Теоретические и экспериментальные исследования импакторов имеют многолетнюю историю [66, 69, 72]. Теоретические исследования в основном сводятся к моделированию течения несущей среды и нахождению предельной траектории, разделяющей потоки импактируемых и проходящих на следующий каскад частиц [54, 68, 75]. При этом множество различных факторов, влияющих на эффективность осаждения частиц (расстояние между срезом сопла и коллекторной плоскостью, формой сопла (круглое/щелевое), числа Рейнольдса для сопла и частицы), сильно затрудняет расчеты. Выходом из этой ситуации может быть применение методов вычислительной гидродинамики (CFD), которые основаны на численном решении уравнений гидрогазодинамики. Данные уравнения являются системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка и имеют аналитическое решение лишь в очень простых случаях. Хотя численные методы решения

дифференциальных уравнений в частных производных разрабатывались ещё в начале XX века, интенсивное развитие CFD-технологий началось с появлением высокопроизводительных компьютеров, которые стали доступны большинству пользователей в 70-х годах, в это время началось бурное развитие коммерческих программ вычислительной гидродинамики. Эти программы используются для моделирования полей течений сплошных сред и позволяют оценить эффективность улавливания аэрозольных частиц на инерционных каскадах импактора с учетом вклада различных факторов.

1.1 Нуклидный состав радиоактивных аэрозолей на предприятиях ЯТЦ

Нуклидный состав радиоактивных аэрозолей сильно зависит от свойств потенциального источника и от условий их образования. В рамках данного раздела не представляется возможным представить все многообразие радионуклидного состава аэрозолей на предприятиях ЯТЦ.

В составе аэрозолей, выбрасываемых из АЭС с реактором ВВЭР, идентифицируют несколько десятков радионуклидов. Наиболее типичные из них: ^{131}I, ^{89,90,91}Sr, ^{103}Ru, ^{137}Cs, ^{141,144}Ce, ^{51}Cr, ^{54,55}Mn, ^{59}Fe, ^{58,60}Co, ^{95}Zr, ^{110m}Ag, ^{22,24}Na, ^{88}Rb, ^{99}Mo и др [19].

На АЭС с реактором РБМК-1000 определен нуклидный состав в вентсистемах, где идентифицированы радионуклиды ^{24}Na, ^{51}Cr, ^{58}Mn, ^{59}Fe, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{97}Zr, ^{97}Nb, ^{131}I, ^{134,137}Cs, а в окрестности АЭС - ^{51}Cr, ^{65}Zn, ^{131}I, ^{134}Cs [12 - 14].

Основные долгоживущие альфа-излучающие радионуклиды на радиохимических заводах: ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{241}Am. Для проведения консервативных оценок внутреннего облучения персонала принимается, что аэрозоли плутония находятся в соединениях с промежуточной скоростью растворения.

Основная роль в формировании доз облучения на химико-металлургических заводах (входные технологические продукты – двуокись плутония и закись-окись урана, обогащенного по ^{235}U) принадлежит ^{239}Pu и ^{241}Am [3].

1.2 Методы и устройства для оценки дисперсного состава аэрозолей

В зависимости от размеров частиц, их формы, фазового состояния, концентрации и других характеристик в настоящее время используется ряд методов анализа дисперсного состава аэрозолей. Все эти методы можно разделить на следующие группы [6, 17].

- Измерение размеров индивидуальных частиц (микроскопический анализ).
- Механическое разделение частиц (ситовой анализ).
- Методы седиментации (седиментометрия), основанные на осаждении частиц под действием силы тяжести или в поле центробежных сил.

- Косвенные методы, основанные, на измерении зависящих от размера частиц оптических, электрических и других характеристик аэрозольных систем (фотометрия, кондуктометрия и т.д.).
- Методы определения удельной поверхности частиц.

Известны методы, основанные на искусственной зарядке частиц и измерении их подвижности в электрическом поле [79]. Фотоэлектрические методы основаны на регистрации излучения, отраженного от частицы. Их недостаток состоит в том, что функция отклика зависит нетолько от размера частицы, но и от показателя преломления (состоящего из рассеивающей и поглощающей компонент) и угла наблюдения. Поэтому при измерении одинаковых размерных спектров аэрозолей латекса и сажи будут получены разные результаты. Измеренный с помощью фотоэлектрических методов размер частицы называется оптическим эквивалентным диаметром [11, 26-27], и часто в силу вышеуказанных причин не соответствует другим характеристикам размеров. Общий недостаток таких методов состоит в том, что при измерениях невозможно разделить интересующие радиоактивные частицы и аэрозольный фон. В связи с этим представляется логичным такое проведение измерений, когда разделение на размерные фракции происходит непосредственно в пробоотборном устройстве, после чего можно определить химический (радионуклидный) состав каждой фракции. Этот принцип присущ методам, основанным на диффузионном и аэродинамическом разделении частиц вследствие их седиментации или инерционном осаждении на препятствии. Наиболее распространенным инерционным осадителем является импактор [46, 73].

Импакторы состоят из последовательно расположенных каскадов, на каждом из которых происходит осаждение той или иной размерной фракции аэрозолей. В качестве препятствий используют плоские поверхности (коллекторные пластины), а в качестве заключительного каскада устанавливают аэрозольный фильтр. Отбирая пробы аэрозолей с помощью этих устройств и измеряя активность проб на коллекторных пластинах, получают гистограммы распределения активности по аэродинамическим диаметрам частиц, а также параметры этого распределения. Если распределение активности по размерам частиц дисперсной фазы аэрозоля является логарифмически нормальным, то основными параметрами распределения являются активностный медианный аэродинамический диаметр (АМАД) и геометрическое стандартное отклонение β_g. АМАД – значение аэродинамического диаметра частиц дисперсной фазы радиоактивного аэрозоля, указывающее, что 50% активности указанного аэрозоля приходится на частицы, имеющие аэродинамический диаметр меньше, чем АМАД, а 50% - на частицы, имеющие аэродинамический диаметр

больше, чем АМАД [31]. Геометрическое стандартное отклонение β_g – мера разброса значений аэродинамических диаметров частиц относительно значения АМАД. Зная эти параметры (АМАД и β_g), можно оценить распределение осаждающихся аэрозольных частиц по отделам респираторного тракта человека (и соответственно – провести оценку распределения дозы внутреннего облучения по органам и тканям). Если распределение активности по размерам частиц дисперсной фазы аэрозоля не является логарифмически нормальным, при этом требуется оценить доли осаждения активности аэрозольных частиц (и ожидаемые эквивалентные дозы) в различных отделах дыхательных путей, тогда возникает необходимость применения устройства, позволяющего смоделировать фракционное осаждение аэрозольных частиц в каждом из отделов дыхательного тракта.

Описания различных типов импакторов и основы их расчета приведены в работах Н.А. Фукса [47, 56] и Марпла [65, 67]. Обычные каскадные импакторы эффективны для исследований в диапазоне аэродинамических диаметров до 0,25 мкм, в импакторах низкого давления возможен анализ частиц в диапазоне 0,03-0,7 мкм [70, 85].

Для разделения аэрозоля по размерным фракциям объемная скорость воздуха в импакторе должна быть фиксированной. Как правило, она составляет несколько десятков л/мин. Для отборов проб с низким содержанием дисперсных примесей используют импакторы с гораздо большей производительностью (сотни л/мин), при этом вес и габариты таких моделей существенно возрастают, а для обеспечения представительности пробы применяют мощные побудители расхода. После окончания отбора пробы импактор разбирают, и осадок, задержанный на каждом каскаде, анализируют. Использование импакторов для выполнения задач аэрозольного мониторинга требует высокой квалификации экспериментаторов.

При исследовании атмосферных аэрозолей часто требуется использовать два различных типа импакторов: один импактор, работающий при нормальном давлении и импактор низкого давления, чтобы измерять массовое распределение частиц в широком диапазоне. В статье Sanjay Singh и др. [77] представлена модель комбинированного импактора, который включает 7 каскадов, работающих при нормальном давлении и 4 каскада – при низком. В первом рабочем режиме устройство работает как импактор низкого давления при объемном расходе 10 л/мин и отбирает частицы от 0,1 до 21 мкм на 11 каскадах. Во втором рабочем режиме устройство работает как обычный импактор и отбирает частицы от 0,53 до 10 мкм на семи каскадах при объемном расходе 45 л/мин. В работе Minsoo Son и др. [71] представлена конструкция импактора с кольцевидным соплом. Устройство работает при объемном расходе 1500 л/мин и предназначено для пробоотбора

биоаэрозолей. Значение D_{50} составляет 16,4 мкм. Схема данного импактора представлена на рисунке 1.1.

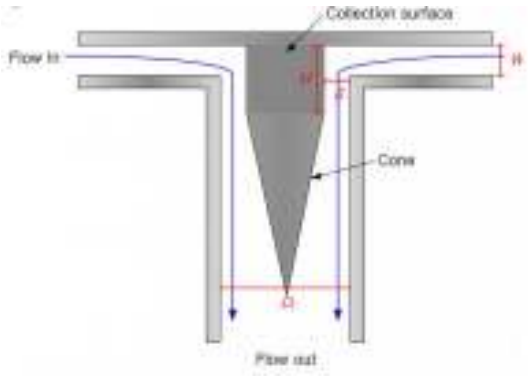
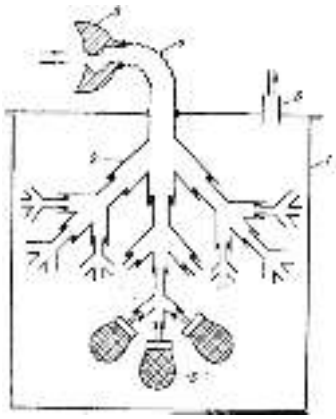


Рисунок 1.1 Импактор с кольцевидным соплом [71].

Воздушный поток с аэрозольными частицами поступает через сопло, толщиной W, образованное двумя дисками, где резко меняет свое направление, в результате крупные частицы с достаточной инерцией осаждаются на цилиндрической поверхности длинной M, а мелкие частицы продолжают двигаться по линиям тока. Параметры импактора были расчитаны исходя из числа Стокса Stk_{50} для импактора с прямоугольным соплом.

1.3 Обзор характеристик существующих устройств, моделирующих осаждение аэрозолей в респираторном тракте человека

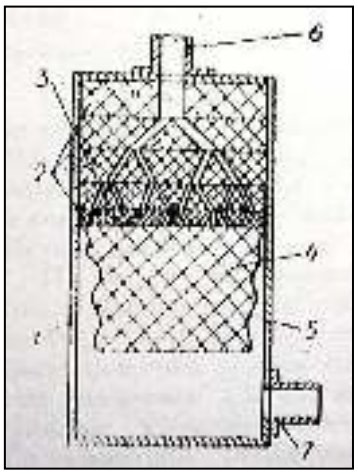
Известна модель трахеобронхиального дерева, предложенная С. Глуховым и соавторами [16], состоящая из 150 сочленяющихся между собой латунных трубок, различных по длине и диаметру (рисунок 1.2). На концы самых мелких трубочек, диаметр которых 2 мм, надеваются мешочки из эластичного материала, заполненные поролоном. Модель помещается в герметичный кожух с двумя штуцерами, один из которых моделирует трахею. Второй штуцер соединяется с циклическим насосом – устройством, создающим в корпусе модели попеременно положительное и отрицательное давление (имитация выдоха и вдоха соответственно). После окончания отбора пробы модель разбирается и осевшие аэрозольные частицы вымываются дистиллированной водой из всех трубочек. С помощью химических методов (титрование и др.) можно определить количество вещества, задержанное каждой ступенью трахео-бронхиального дерева.



1 – корпус, 2 – трубки,
3 – резиновые мешочки,
4 – трубка, имитирующая трахею ,
5 – насадка, 6 –штуцер

Рисунок 1.2 Модель трахео-бронхиальвеолярного дерева [16]

В статье Ю.Е. Залмазонова и др.[20] описаны конструкция и принцип действия модели дыхательной системы человека, состоящей из герметичного корпуса, в который помещен набор дисков, диаметром 140 мм каждый, сочлененных плоскими сторонами. В дисках выполнена система сообщающихся отверстий четырех различных длин и диаметров (от одного отверстия диаметром 12 мм в верхнем диске до 343 отверстий диаметром 1,5 мм в нижнем). Таким образом, система отверстий в четырех дисках моделирует половину трахео-бронхиального дерева от главного бронха до бронхов третьего порядка включительно (рисунок 1.3). Перед экспериментом внутренняя поверхность отверстий покрывается тонким слоем смазки (имитация слизи в дыхательной системе). Последний диск сочленяется с пластиной поропласта, моделирующей легкие, которая помещена в резиновый сильфон. На крышке и корпусе модели имеются два штуцера для отбора проб аэрозолей и подключения к циклическому насосу. Применение дисков из сцинтиллирующих материалов позволяет по окончании пробоотбора измерять количество осажденной активности на каждой ступени трахеобронхиального дерева при измерении скорости счета на радиометрической сцинтилляционной установке.



1 – корпус,
2 – набор дисков, 3 – система сообщающихся отверстий, 4 – поропласт, 5 – сильфон, 6,7 – штуцера.

Рисунок 1.3 Устройство модели дыхательной системы [20].

1.4 Обзор работ в области вычислительной гидрогазодинамики

Для создания и модернизации конструкций средств пробоотбора аэрозолей, моделирования распространения газо-аэрозольных выбросов в различных геометриях и ряда других задач необходимо исследовать динамику двухфазных дисперсных потоков. Современная гидрогазодинамика широко использует разнообразные численные методы и алгоритмы, реализация эффективного решения которых связана с развитием компьютерных технологий. Появилась относительно новая область науки - вычислительная гидродинамика (CFD) [49, 51, 87]. Для решения задач CFD в настоящее время существует множество

компьютерных программ, из которых наиболее известны FLOW-3D, FlowVision, ANSYS, Fluent, STAR-CCM+.

В работе [76] проводилось CFD моделирование осаждения аэрозольных частиц в модели импактора типа jet-in-well, в котором импакция частиц происходит не только на коллекторной плоскости, но и на стенках пробоотборной корзины. Импактор является односопельным. При моделировании варьировалось отношение диаметра пробоотборной корзины Dw к диаметру разгонного сопла Di в диапазоне от 3 до 15 (рисунок 1.4).

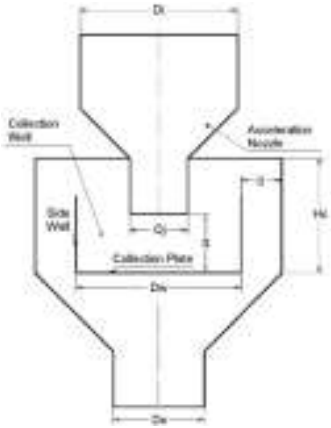


Рисунок 1.4 Принципиальная схема импактора типа jet-in-well.

Моделировалось пропускание через устройство монодисперсных аэрозолей с аэродинамическим диаметром частиц от 5 мкм до 15 мкм. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса CFX 5.7.1. В результате было установлено, что импакция на стенке пробоотборной корзины начиналась при отношении диаметра пробоотборной корзины к диаметру сопла, равном 8, и возрастала с уменьшением данного отношения. Результаты моделирования были подтверждены экспериментальными данными.

В работе G. Kulkarni и др. [58] было проведено CFD моделирование и экспериментальное исследование характеристик виртуального импактора. Определенные в результате эксперимента значения D_{50} варьировались от 2,2 мкм до 4,8 мкм и оказались в хорошем соответствии с результатами CFD моделирования с погрешностью ±0,4 мкм. CFD-моделирование проводилось с помощью программного комплекса Fluent.

В работе С. Полякова [44] с помощью программного пакета ANSYS CFX анализировалась эффективность пылеулавливания вихревого аппарата ВЗП-М 200 (аппарат со встречно-закрученными потоками). Целью расчета являлось определение относительной эффективности улавливания частиц дисперсной фазы. В первом варианте расчета рассматривалась эффективность аппарата по улавливанию частиц с аэродинамическим диаметром 10 мкм, во втором случае рассматривалась эффективность по улавливанию частиц с диаметром 30 мкм. Для описания движения частиц дисперсной фазы была выбрана модель Эйлера. Для анализа эффективности осаждения использовался профиль объемной концентрации частиц на выходном патрубке аппарата, при этом ядро потока характеризовалось низкой концентрацией частиц, а периферийная часть — высокой, что

было подтверждено экспериментально. Сделан вывод о том, что основным показателем, влияющим на эффективность улавливания частиц, является диаметр аппарата.

В работе Flynn и др. [57] проводилось CFD-исследование осаждения аэрозольных частиц в модели каскадного импактора Андерсена. Траектории и осаждение частиц оценивались с помощью Лагранжевой модели. Моделирование выполнялось посредством программного пакета ANSYS. Модель была верифицирована сравнением результатов моделирования с данными производителя и литературными источниками. Исследовалась работоспособность импактора при значениях объемного расхода 28,3 и 60 л/мин. Результаты показывают, что пробоотбор при высоких значениях объемного расхода снижает эффективность работы импактора, что обусловлено образованием вихрей и осаждением аэрозольных частиц на стенках. Наибольшие потери на стенках были зафиксированы на втором и третьем каскадах, что, по мнению авторов, статьи связано с рециркуляционными (тороидальными) вихрями.

В другой статье [86], также посвященной каскадному импактору Андерсена (Vinchurkar S. и др.), исследовалось влияние заряда аэрозольных частиц на эффективность осаждения. Проводилось сравнение полученных в результате моделирования значений D_{50}, которые с 10% погрешностью совпали со значениями, заявленными производителем. В исследовании рассматривались уровни заряда частиц в диапазоне размеров 0,3 – 12 мкм от ингалятора сухого порошка (DPI – dry powder inhaler) и дозирующего аэрозольного ингалятора (MDI – metered dose inhaler). Моделирование выполнялось с помощью программного комплекса Fluent 6. Результаты исследования показывают, что заряд на аэрозолях DPI и MDI приводит к снижению значения D_{50} на каскадах № 0 – 3 примерно на 10% и менее. Для каскадов 4 и 5 происходит занижение величины D_{50} на 200 и 60% соответственно. Результаты исследования могут быть использованы для получения информации о фактических аэродинамических диаметрах заряженных фармацевтических аэрозолей, основываясь на применении стандартного каскадного импактора Андерсена (посредством ввода поправки).

1.5 Физико-химические свойства радиоактивных газо-аэрозольных смесей и анализ их фазового состава

Многие аэрозоли сопровождаются газообразными веществами, которые находятся в определенном равновесии с веществами, содержащимися в аэрозольных частицах, и количество их зависит в основном от летучести вещества (показатель, характеризующий скорость, с которой жидкость превращается в пар) и температуры окружающей среды.

Среди аэрозольных систем альфа-излучающих радионуклидов следует выделить аэрозоли, содержащие гексафториды урана и плутония, а также полоний [12, 42]. Гексафторидные соединения, встречаются в промышленных выбросах и представляют собой сложные аэрозольные системы, в которых под воздействием газовой среды и температуры протекают процессы взаимного перехода α-активного вещества из частиц в газообразное состояние. При обычных условиях гексафторид урана UF_6 представляет собой бесцветное кристаллическое вещество, возгоняющееся при атмосферном давлении без плавления. Температура возгонки UF_6 при 760 мм.рт.ст. составляет 56,5 ^{o}C. При более высоких давлениях UF_6 плавится с образованием прозрачной, тяжелой и подвижной жидкости. Плотность твердого гексафторида урана равна 5,06 г/см^3, жидкого – 3,6 г/см^3. Минимальное давление, при котором UF_6 существует в жидком состоянии – 1134 мм.рт.ст., минимальная температура +64 ^{o}C. Гексафторид урана является одним из наиболее химически активных соединений урана, он является сильнейшим окислителем, превосходя по своей окислительной способности даже элементный фтор [28].

Аэрозоли, образующиеся при производстве препаратов ^{210}Po и при эксплуатации облученных свинцово-висмутовых и свинцово-литиевой с примесью висмута эвтектик, могут сопровождаться газообразной фазой полония [7]. Проведенные исследования аэрозолей ^{210}Po, образующихся из препаратов металлического ^{210}Po, высаженного на медном порошке, показали, что во влажном воздухе содержится газообразная фракция ^{210}Po.

В случае β-излучающих радионуклидов список таких аэрозольных систем значительно расширяется. Большое значение приобретают органические соединения, обладающие высокой летучестью. К таким аэрозолям относятся содержащие радиоактивный йод, рутений, ртуть, теллур и др.

Радионуклиды йода являются одними из основных компонентов в продуктах деления ядерного топлива и содержатся в выбросах ядерных реакторов и предприятий атомной промышленности. Газообразный йод может находиться в воздухе в виде паров молекулярного иода (I_2), иодистого водорода (HI), гипоиодной (иодоводородной) кислоты (HOI) и органических соединений, таких как CH_3I и др. [9, 25].

Известно, что радионуклиды рутения (^{103}Ru, ^{106}Ru) способны проникать через дефекты в защитных оболочках ядерно-энергетических установок и в выбросах находятся в аэрозольном и газообразном состоянии. В атмосферном воздухе аэрозоли радиоактивного рутения могут сопровождаться газообразной четырехокисью рутения RuO_4, так как температура плавления RuO_4 равна 25,4 °C [12]. В воздух производственных помещений и

окружающую среду радиоактивный рутений может попадать как в виде RuO_2, так и в виде RuO_4.

Двуокись рутения RuO_2 является твердым веществом, и ее обычно улавливают посредством фильтрации. Четырехокись рутения RuO_4 может присутствовать в воздушной среде в виде газовой и аэрозольной фракций, находящихся в нестабильном равновесии. При исследовании загрязненности атмосферы после Чернобыльской аварии в воздухе были обнаружены газообразные продукты ^{103}Ru, ^{106}Ru. Однако доля летучего соединения рутения была значительно меньше, чем у иода, и не превышала 13 % в период 8-19 мая 1986 года [9].

1.6 Обзор существующих методов улавливания радиоактивного рутения из газовой фазы

Известен способ улавливания рутения, содержащегося в газовых выбросах, и устройство для его осуществления, запатентованный французской фирмой «Компани женераль де матьер нюклеэр» [41]. Согласно этому способу четырехокись рутения улавливается за счет ее химического восстановления до двуокиси рутения при взаимодействии с раствором или водной пастой, содержащими, по меньшей мере, один полимер алкиленгликоля и/или, по меньшей мере, один сополимер алкиленгликоля, в котором алкилен или алкилены содержат от 2 до 6 атомов углерода. Способ согласно изобретению может применяться либо в установке для промывки газов, либо для изготовления патрона для улавливания рутения. Такой патрон может содержать подложку, образованную волокнами, или стекловатой, или стальным волокнистым материалом, на которую наносят раствор или пасту. Способ и устройство изначально предназначены для использования в стационарных вентиляционных очистительных комплексах. Кроме того, этот способ не позволяет количественно оценить соотношение аэрозольной и газовой составляющих радиоактивного рутения в воздухе.

Известен способ измерения количества летучего рутения, согласно которому газ, содержащий RuO_2 и RuO_4, из основного трубопровода отводится в пробоотборную трубу, газовая проба под действием вакуумного насоса направляется на 1-й фильтр для осаждения, содержащегося в ней RuO_2, затем к пробе добавляется восстановитель (газ NO), и она направляется на 2-й фильтр для осаждения вновь образовавшегося RuO_2, затем проба через измеритель расхода газа возвращается в основной трубопровод, количество осажденного RuO_2 на обоих фильтрах определяется инструментально [62]. Этот способ позволяет количественно оценить соотношение аэрозольной и газовой составляющих радиоактивного рутения в воздухе, но его недостатком является неудобство работы с газообразной и

токсичной окисью азота и возвращение пробы, содержащей окислы азота, в основной трубопровод, кроме того, для реализации данного способа предполагается использование стационарного оборудования.

1.7 Задачи диссертационного исследования

Из обзора методов и устройств, разработанных для оценки дисперсного состава аэрозолей, можно сделать вывод, что наибольшее распространение и практическую значимость в России и за рубежом получили импакторы - устройства, на каскадах которых происходит инерционное разделение частиц по размерам в диапазоне применимости понятия «аэродинамический диаметр» (т.е. до 0,25 мкм). Обзор характеристик существующих устройств, моделирующих осаждение аэрозолей в респираторном тракте человека, показал, что ввиду технической сложности применение данных устройств для исследования дисперсного состава радиоактивных аэрозолей в производственных условиях предприятий ЯТЦ представляется проблематичным, а процесс обработки экспериментальных данных – трудоемким. Из обзора работ в области вычислительной гидродинамики следует, что в настоящее время существует много компьютерных программ, в которых реализованы физические модели и математические алгоритмы, позволяющие эффективно решать задачи динамики двухфазных дисперсных потоков, которые могут быть применены для расчета характеристик пробоотборных устройств и моделирования распространения выбросов радиоактивных аэрозолей в воздушной среде. Данное программное обеспечение может применяться для оценки эффективности осаждения аэрозольных частиц на каскадах импактора. Из анализа физико-химических свойств радиоактивных газо-аэрозольных смесей следует, что к данным соединениям относятся летучие соединения радиоактивных изотопов различных химических элементов, в том числе иода, урана, рутения. Радиологическая опасность летучих соединений рутения особенно актуальна для ряда технологических операций при регенерации нитридного топлива, разрабатываемого в рамках формирования новой технологической платформы атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторными установками на быстрых нейтронах, так как данные технологические операции сопровождаются интенсивным выделением газовой и аэрозольной фракций рутения, подлежащих очистке. Кроме того, изотопы рутения (^{103}Ru, ^{106}Ru), так же, как изотопы иода, способны проникать через дефекты в защитных оболочках ядерно-энергетических установок в условиях штатной работы и в случае аварий, при этом в выбросах находятся в аэрозольном и газообразном состоянии. Таким образом, изучение

поведения изотопов рутения в воздушной среде, и оценка их ингаляционного поступления представляют отдельную исследовательскую задачу в области радиационной безопасности.

Обзор методов улавливания радиоактивного рутения показал, что существующие методы предназначены для их использования в стационарных вентиляционных очистительных комплексах, при этом, они не позволяют количественно оценивать соотношение аэрозольной и газовой составляющих радиоактивного рутения в воздухе.

Стоит подчеркнуть, до сих пор при анализе последствий радиационных аварий и ретроспективной оценке доз внутреннего облучения персонала и населения исследователи вынуждены использовать предположения о дисперсности аэрозольной фракции и соотношении газовой и аэрозольной составляющих, поскольку отсутствуют мобильные устройства, позволяющие оперативно получать необходимые экспериментальные данные об основных характеристиках ингаляционного поступления.

Изложенные аргументы обосновывают цель данной работы, которая заключалась в разработке аппаратурно-методического комплекса для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе экспериментального определения объемной активности:

- аэрозольной фракции с учетом распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта и
- газовой фракции путем ее преобразования в аэрозольную фракцию.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта человека, на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора.
2. Разработать импактор для реализации метода оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта человека.
3. Разработать способ оценки ингаляционного поступления на основе анализа фазового и дисперсного состава радиоактивных газо-аэрозольных смесей.
4. Разработать устройство, состоящее из размещенных последовательно импактора и химического реактора, для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей.

Глава 2 Разработка метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора

2.1 Постановка задачи

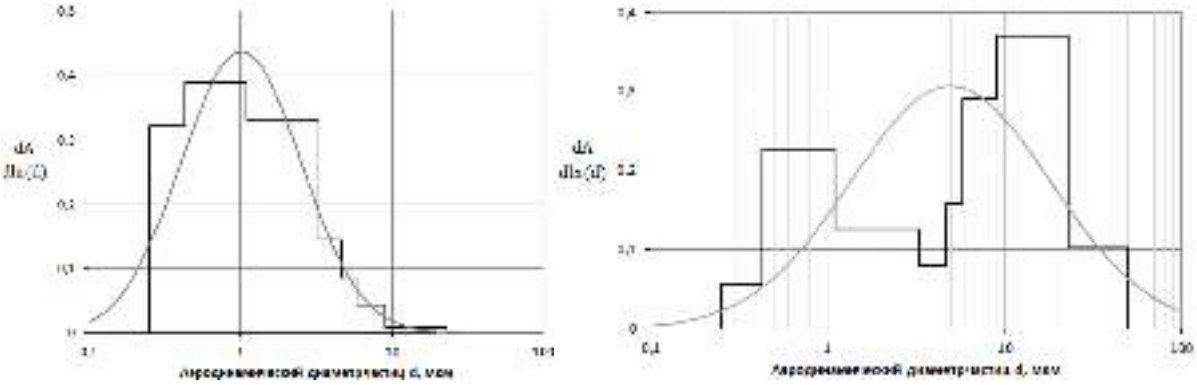
Радиоактивные аэрозоли, поступающие в окружающую среду во время аварийных ситуаций, либо в воздушное пространство производственных помещений в условиях нормальной эксплуатации оборудования, представляют угрозу здоровью человека, поскольку их поступление в организм приводит к формированию дозы внутреннего облучения. Например, при крупных радиационных авариях, таких как на Чернобыльской АЭС (1986) [12], или на АЭС Фукусима-Дайичи (2011) [4] в атмосферу были выброшены радиоактивные аэрозоли в количествах, опасных для здоровья человека, а при инциденте в г. Электросталь (2013) [5] - достаточных для регистрации измерительной аппаратурой.

Важным фактором, влияющим на дозу внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радионуклидов, является дисперсный состав аэрозолей. В случае поступления альфа-излучающих радионуклидов экспериментальная оценка долей активности аэрозольных частиц, осевших в различных отделах дыхательных путей, практически невозможна - для этой цели используют технические устройства, в той или иной степени, имитирующие респираторный тракт, либо математические модели.

В случае логнормального распределения [21, 22] активности аэрозольных частиц по размерам (рисунок 2.1 а) значения АМАД и β_g могут быть определены, например, с помощью импактора АИП-2 и последующей процедуры обработки экспериментальных данных [23, 40]. АМАД и β_g вместе с данными о радионуклидном составе и типе химического соединения при ингаляции позволяют установить дозовый коэффициент и провести оценку ОЭД внутреннего облучения человека. При необходимости можно оценить доли осажденной активности, приходящейся на различные отделы дыхательного тракта - с помощью модели осаждения аэрозолей Публикации 66 МКРЗ [61], либо используя программы, в которых реализована данная эмпирико-математическая модель, к примеру, LUDEP [52] или IMBA [53]. Входными параметрами при этом являются АМАД, β_g, плотность частиц и форм-фактор (отношение длины к ширине частицы).

На рисунке 2.1б представлено бимодальное распределение активности по размерам частиц. Логнормальное распределение, параметры которого были определены с помощью импактора, показано на графике. Аппроксимация полимодального спектра одномодальным логнормальным распределением представляется достаточно грубой, что может приводить к

погрешностям, иногда существенным, при оценке отложения долей активности аэрозольных частиц в отделах дыхательных путей, а значит и к последующим ошибкам при оценке ОЭД и ожидаемых эквивалентных доз на эти отделы.



а б

Рисунок 2.1 а - логнормальное распределение активности А по аэродинамическим диаметрам d аэрозольных частиц (АМАД = 1 мкм β_g = 2,5); б - бимодальное распределение активности А по аэродинамическим диаметрам d аэрозольных частиц (аппроксимация логнормальным распределением с АМАД = 5,0 мкм β_g = 3,7)

Целью данной главы являлась разработка метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора. Необходимость в данном методе возникает, когда дисперсный состав аэрозолей не подчиняется логарифмически-нормальному закону, при этом стоит задача по оценке распределения активности (и ожидаемых эквивалентных доз внутреннего облучения) по различным отделам дыхательного тракта.

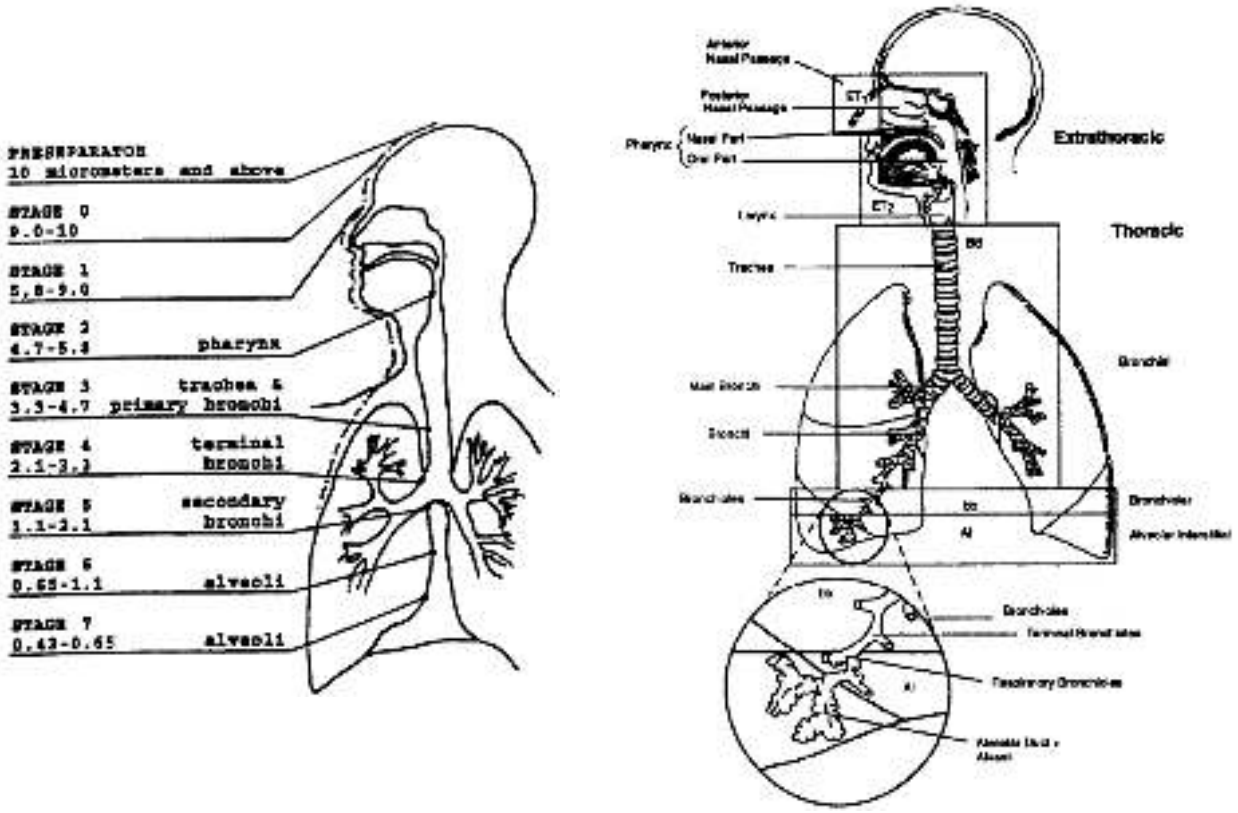
2.2 Каскадный импактор Андерсена

Как было показано в разделе 1.3 к основным недостаткам существующих устройств, моделирующих осаждение аэрозолей в дыхательном тракте, относятся техническая сложность и трудоемкость обработки экспериментальных данных. По сути, это стационарные лабораторные устройства, не предназначенные для работы в производственных условиях предприятий атомной отрасли. Представляется целесообразным для решения таких задач использовать импактор, в котором каждый каскад моделирует осаждение частиц в определенном отделе дыхательной системы.

Известно, что каскадный импактор Андерсена активно используется в аэрозольной терапии при исследовании дисперсного состава лечебных аэрозолей, генерируемых ингаляторами различных моделей [50, 59, 81]. Заявленное разработчиком соответствие размерных фракций осаждаемых аэрозолей на каскадах импактора Андерсена отделам

дыхательного тракта показано на рисунке 2.2а (границы диапазонов соответствуют значениям D_{50} каскадов). Рядом, на рисунке 2.2б показаны анатомические отделы респираторного тракта Публикации 66 МКРЗ [61]. Из сопоставления рисунков 2.2 а и б следует, что:

- каскады 1 и 2 импактора Андерсена по характеристикам осаждения должны соответствовать экстраторакальному отделу – камерам ET1 и ET2;
- каскады 3, 4 – трахеобронхиальному отделу BB;
- каскад 5 – бронхиолярному отделу bb;
- каскады 6, 7 – альвеолярному отделу AI.



а б

Рисунок 2.2 а - импактор Андерсена «имитирует» осаждение аэрозолей в дыхательном тракте [73]; б - анатомические отделы респираторного тракта, Публикация 66 МКРЗ.

Типичная кривая эффективности осаждения каскадного элемента импактора показана на рисунке 2.3. В идеальном случае кривая эффективности осаждения имеет ступенеобразную форму, т.е. все частицы, размер которых превышает определенную величину, должны осаждаться на каскаде, а остальные – проскакивать. На самом же деле происходит улавливание с различными эффективностями частиц, размеры которых распределены в некотором интервале [45]. Ввиду этого для характеристики каскадов

импакторов используют показатель 50%-ной эффективности захвата частиц определенного размера, характеризуемый эффективным аэродинамическим диаметром разделения – D_{50}. Наклон кривой вблизи этой точки должен максимально приближаться к наклону идеальной кривой. Реальная и идеальная кривые, представленные на рисунке 2.3, имеют одинаковые значения D_{50} для захвата частиц.

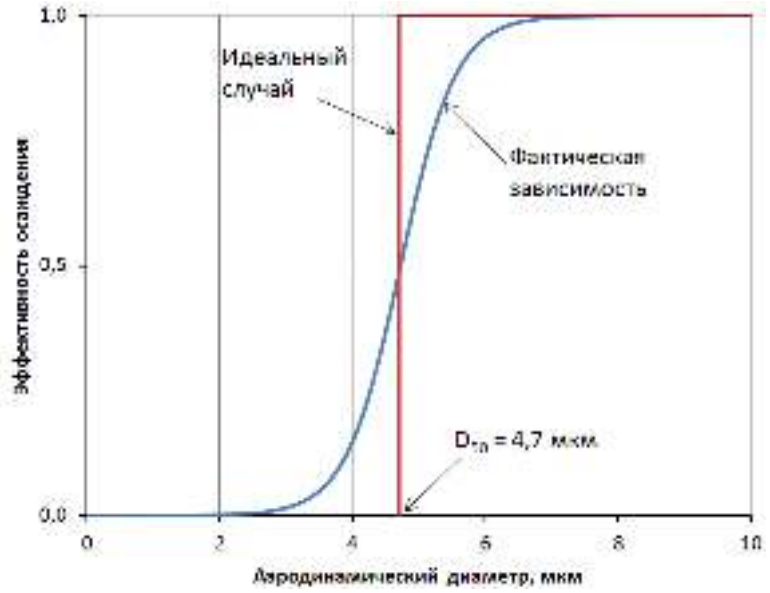


Рисунок 2.3 График зависимости эффективности осаждения каскадного элемента импактора от аэродинамического диаметра частиц (идеальный случай и фактическая зависимость)

Диссертантом были рассчитаны зависимости доли осажденных аэрозолей на каскадах импактора Андерсена от АМАД при предположении, что кривые эффективности имеют идеальный вид (т.е. все частицы крупнее D_{50} осаждаются со 100%-й эффективностью). Для наглядности на рисунке 2.4 представлено распределение активности аэрозольных частиц по размерам с АМАД = 1 мкм и β_g = 2,5 с выделенными диапазонами размеров частиц, осаждаемых на каскадах, при предположении, что был проведен пробоотбор аэрозоля с данным распределением (пунктирная линия соответствует D_{50} каскада).

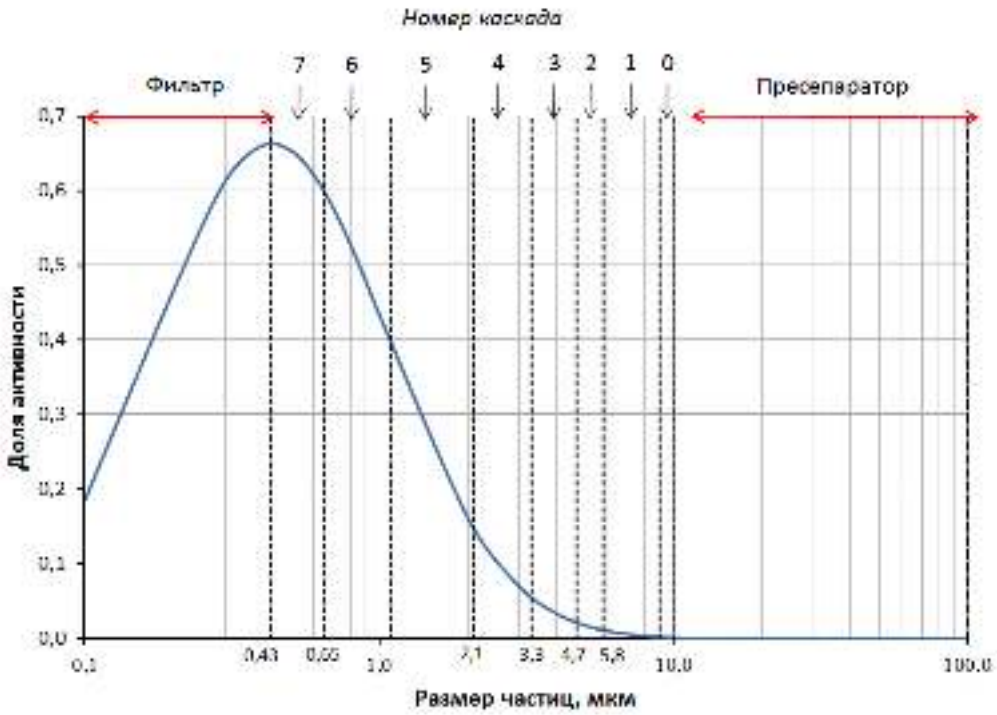


Рисунок 2.4 Распределение активности по размерам частиц (АМАД = 1 мкм β_g= 2,5) с выделенными интервалами размеров частиц, осаждаемых на каскадах импактора Андерсена

Доля осажденных аэрозолей на каскаде № 7 (для примера) будет вычисляться по формуле:

$$\delta = \frac{\int_{0,43}^{0,65} f(x)\,dx}{\int_{0,1}^{100} f(x)dx}$$

Где f(x) – плотность вероятности логнормального распределения,

Для данного примера доля активности осажденных аэрозолей с АМАД = 1 мкм на седьмом каскаде составила: 0,14.

Рассчитанные данным способом зависимости доли осажденных аэрозолей от АМАД для каскада № 7 приведены на рисунке 2.5. Согласно характеристикам, заявленным производителем (схема на рисунке 2.2а), данный каскад моделирует осаждение частиц в альвеолярном отделе, однако из рисунка 2.5, где для сравнения представлена аналогичная зависимость для отдела AI из Публикации 66 МКРЗ – видно несоответствие. Сравнение зависимостей доли осажденных аэрозолей от АМАД для других каскадов импактора Андерсена и отделов респираторного тракта Публикации 66 МКРЗ представлены на рисунке 2.6 а-г. Зависимости доли осажденных аэрозолей от АМАД приведены из таблицы F.1 Публикации 66 МКРЗ (условный работник, дыхание через нос, скорость дыхания 1,2 $м^3$/ч) [61].

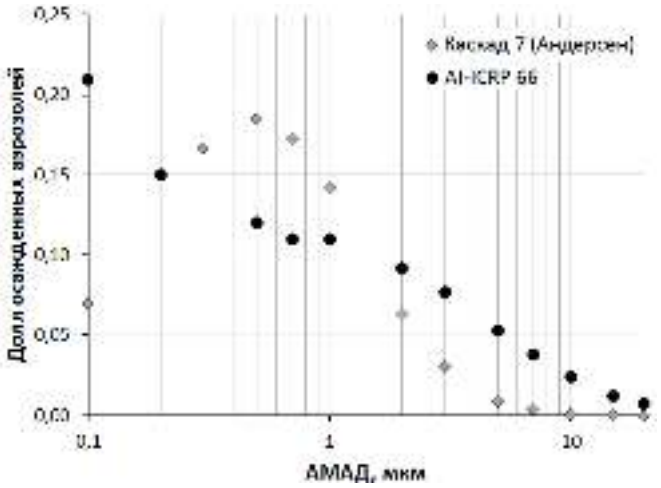
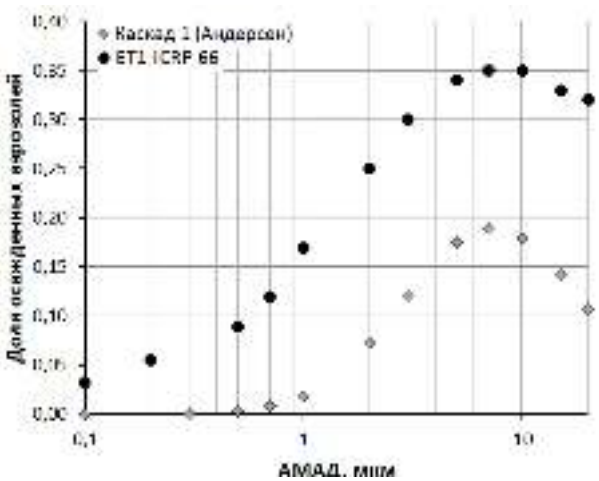
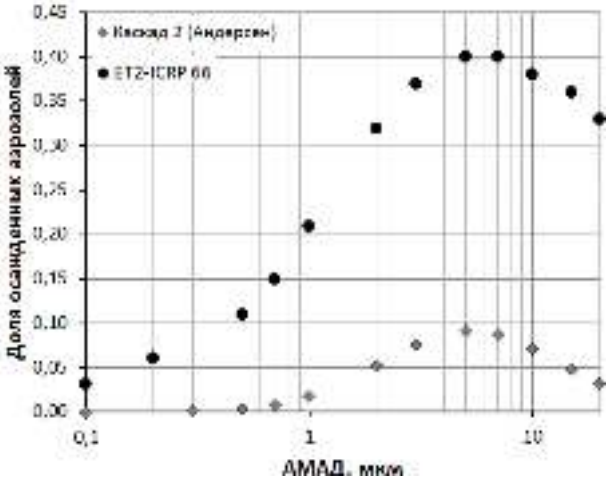


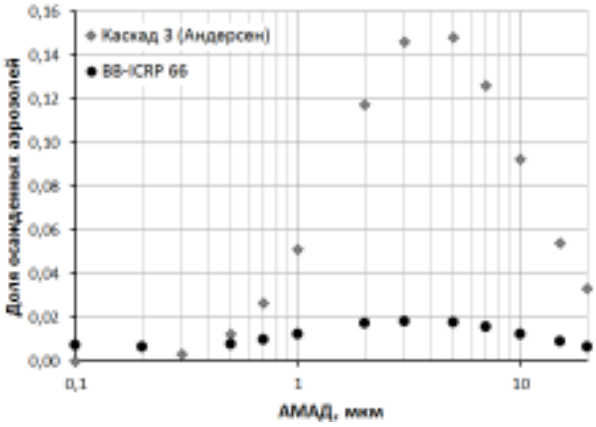
Рис.1 Сравнение зависимостей доли осажденных аэрозолей от АМАД для каскада № 7 импактора Андерсена и для отдела AI (Публикация 66 МКРЗ)



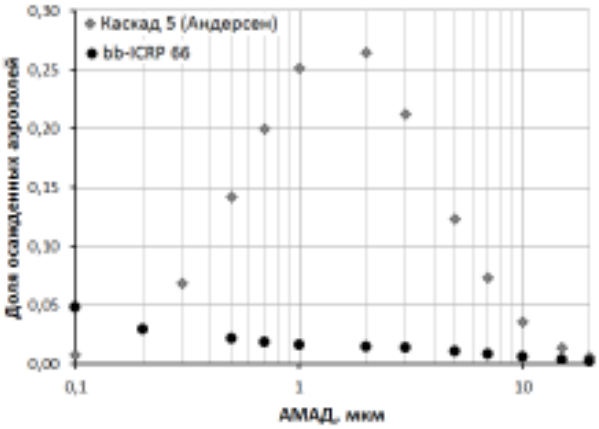
а



б



в



г

Рисунок 2.6 Сравнение зависимостей доли осажденных аэрозолей от АМАД: а - для каскада № 1 импактора Андерсена и для отдела ET1 (Публикация 66 МКРЗ); б - для каскада № 2 и для отдела ET2; в - для каскада № 3 и для отдела BB; г - для каскада № 5 и для отдела bb

Таким образом, из графиков на рисунках 2.5 и 2.6 а-г видно, что импактор Андерсена не может удовлетворительно служить в качестве модели респираторного тракта Публикации 66 МКРЗ; для корректной оценки фракционного осаждения радиоактивных аэрозолей по отделам дыхательного тракта необходим алгоритм обработки экспериментальных данных, полученных с помощью импактора.

2.3 Модель осаждения аэрозолей в респираторном тракте Публикации 66 МКРЗ

В дозиметрической модели Публикации 66 органы дыхания представлены двумя отделами и пятью областями (табл.2.0) [1]:

Таблица 2.0 Морфология дыхательного тракта в Публикации 66 МКРЗ

Отдел	Область		
	Обозначение	Описание	Номер генерации
Экстраторакальный (вне грудной клетки)	ET1	передняя часть носа	
	ET2	задняя часть носового хода, носовая и ротовая часть глотки гортань	
Торакальный	BB	Трахея	0
		Главные бронхи	1
		Бронхи	2-8
	bb	Бронхиолы	9-14
		Терминальные бронхиолы	15
	AI	Респираторные бронхиолы	16-18
		Альвеолярные ходы	19-21
		Альвеолярные мешочки	22

В целях моделирования осаждения частиц отделы дыхательной системы рассматриваются как последовательность фильтров, захватывающих взвешенные частицы при вдохе и выдохе (рисунок 2.7). Эффективность осаждения i-го фильтра, η_i, определяется как доля аэрозольных частиц, которые отложились на фильтре, по отношению к общему числу частиц, поступивших на фильтр. Эффективность каждого фильтра зависит от конкурирующих процессов аэродинамического и термодинамического осаждений частиц из воздушного потока на поверхности [24].

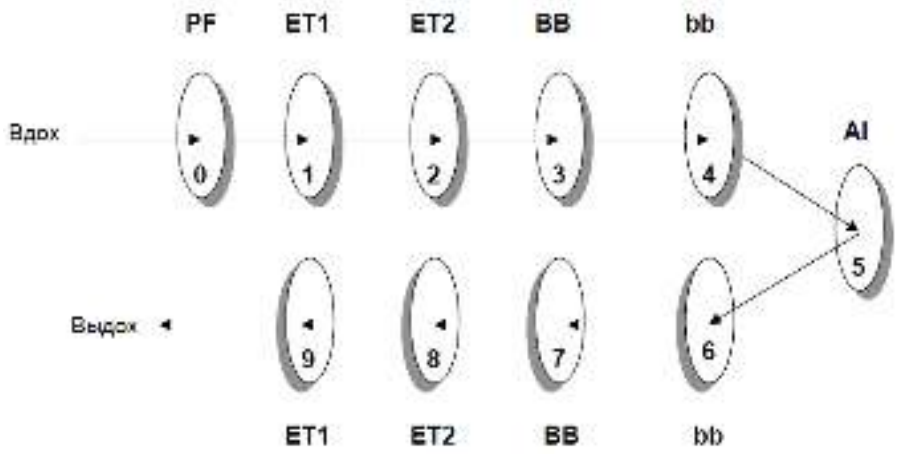


Рисунок 2.7 Респираторный тракт как система фильтров.

Аэродинамическое осаждение (гравитационное или инерционное) является детерминированным процессом, который определяется геометрией воздухоносных путей, их размерами, скоростью воздушного потока и аэродинамическим диаметром аэрозольной частицы. Величина аэродинамического диаметра d_{ae} данной частицы равна диаметру сферической частицы единичной плотности, которая имеет ту же скорость гравитационного осаждения в воздухе, что и рассматриваемая частица. Термодинамическое осаждение обусловлено броуновским движением, является стохастическим процессом и зависит от термодинамического диаметра аэрозольной частицы d_{th} (диаметр частицы плотностью 1 г/см^3, имеющей тот же коэффициент диффузии в воздухе при нормальных условиях, что и у данной частицы). Термодинамический и аэродинамический диаметры связаны между собой соотношением:

$$d_{th} = d_{ae}\sqrt{\frac{\chi}{\rho}} \quad (2.0)$$

Где χ – форм-фактор, ρ – плотность частицы, г/см^3.

Например, при χ = 1,5 и $\rho = 3$ г/см^3 аэродинамическому диаметру 5 мкм соответствует термодинамический диаметр 3,5 мкм.

Для частиц с геометрическим диаметром менее 0,1 мкм термодинамический процесс осаждения является основным; для частиц с аэродинамическим диаметром более 1 мкм – аэродинамический; для частиц промежуточных размеров значимыми являются оба процесса [24]. Суммарная эффективность осаждения аэрозольных частиц определяется для каждого отдела следующим выражением:

$$\eta = \sqrt{\eta_{ae}^2 + \eta_{th}^2} \quad (2.1)$$

где η_{ae} – эффективность аэродинамического осаждения; η_{th} - эффективность термодинамического осаждения.

Эффективность осаждения (для аэродинамического и термодинамического диаметра частицы) рассчитывается по эмпирической формуле Рудольфа:

$$\eta = 1 - \exp(-aR^p) \ , \qquad (2.2)$$

где a, R и p – параметры, значения которых приведены в Публикации 66 для диаметров обоих типов (аэродинамического и термодинамического) для каждого отдела респираторного тракта, как для входящего, так и для выходящего токов воздуха.

Примеры рассчитанных значений η_{ae} и η_{th} для аэродинамического диаметра 5 мкм представлены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 Пример рассчитанных значений η_{ae} для аэродинамического диаметра 5 мкм

Фильтр	Отдел	a	R	p	η_{ae}
1	ET1	3,00E-04	2,08E+04	1,00	0,43
2	ET2	5,50E-05	2,08E+04	1,17	0,86
3	BB	4,08E-06	2,08E+04	1,15	0,32
4	bb	1,15E-01	1,73E+00	1,17	0,20
5	AI	1,46E-01	3,20E+01	0,65	0,75
6	bb	1,15E-01	1,73E+00	1,17	0,20
7	BB	2,04E-06	2,08E+04	1,15	0,18
8	ET2	5,50E-05	2,08E+04	1,17	0,86
9	ET1	3,00E-04	2,08E+04	1,00	0,43

Таблица 2.2 Пример рассчитанных значений η_{th} для аэродинамического диаметра 5 мкм

Фильтр	Отдел	a	R	p	η_{th}
1	ET1	18,00	1,31E-08	0,50	0,0010
2	ET2	15,10	1,31E-08	0,54	0,0009
3	BB	60,19	4,94E-09	0,64	0,0003
4	bb	90,20	4,73E-09	0,57	0,0017
5	AI	273,00	9,04E-08	0,61	0,0137
6	bb	90,20	4,73E-09	0,57	0,0017
7	BB	60,19	4,94E-09	0,64	0,0003
8	ET2	15,10	1,31E-08	0,54	0,0009
9	ET1	18,00	1,31E-08	0,50	0,0010

Таким образом, суммарная эффективность осаждения для первого фильтра (отдел ET1) для монодисперсного аэрозоля с аэродинамическим диаметром 5 мкм составит в соответствии с формулой (2.1):

$$\eta = (0{,}43^2 + 0{,}001^2)^{1/2} = 0{,}43$$

Кроме того, в модели осаждения вводится понятие префильтра (нулевой фильтр на рисунке 2.7), эффективность которого вычисляется по формуле:

$$\eta_0 = 1 - \eta_I \quad (2.3)$$

где: η_I – ингалибельность (доля активности, содержащаяся во вдыхаемом объёме окружающего воздуха, которая поступает в экстраторакальный отдел).

Эффективность префильтра может быть определена по следующей эмпирической формуле:

$$\eta_0 = 1 - (1 - 0{,}5(1 - \left[7{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot {d_{ae}}^{2.8} + 1\right]^{-1} + 10^{-5} \cdot u^{2{,}75} \cdot \exp(0{,}055 d_{ae}) \quad (2.4)$$

где d_{ae} – аэродинамический диаметр частицы, u – скорость ветра.

Подставляя эмпирические коэффициенты, содержащиеся в Публикации 66 (таблицы 12-13) [81], в формулу (2.2), получаем следующие выражения для эффективности осаждения аэрозольных частиц с аэродинамическим диаметром d_{ae} и с термодинамическим диаметром d_{th} в различных отделах респираторного тракта:

$$\eta_{ae}(ET_1) = 0{,}5 \cdot (1 - (3{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot (d_{ae}^2 \cdot V \cdot SF_t^3) + 1)^{-1} \quad (2.5)$$

$$\eta_{th}(ET_1) = 0{,}5 \cdot \left(1 - \exp((-18 \cdot D \cdot (V \cdot SF_t)^{-\frac{1}{4}})^{\frac{1}{2}}\right) \quad (2.6)$$

$$\eta_{ae}(ET_2) = 1 - (5{,}5 \cdot 10^{-5} \cdot (d_{ae}^2 \cdot V \cdot SF_t^3)^{1.17} \quad (2.7)$$

$$\eta_{th}(ET_2) = 1 - \exp((-15{,}1 \cdot D \cdot (V \cdot SF_t)^{-\frac{1}{4}})^{0{,}538}) \quad (2.8)$$

$$\eta_{ae}(BB) = 1 - \exp(-4{,}08 \cdot 10^{-6}(d_{ae}^2 \cdot V \cdot SF_t^{2.3})^{1.152}) \text{ (при вдохе)} \quad (2.9)$$

$$\eta_{ae}(BB) = 1 - \exp(-2{,}04 \cdot 10^{-6}(d_{ae}^2 \cdot V \cdot SF_t^{2.3})^{1.152}) \text{ (при выдохе)} \quad (2.10)$$

$$\eta_{th}(BB) = 1 - \exp\left(-22{,}02 \cdot SF_t^{1{,}24} \cdot \left[1 + 100\, exp - \left(\left[log_{10}\left(100 + + \frac{100}{(d_{th})^{0{,}9}}\right)\right]^2\right)\right] \cdot (Dt_B)^{0{,}6391}\right) \quad (2.11)$$

$$\eta_{ae}(bb) = 1 - \exp\left[-0{,}1147 \cdot \left(\left(0{,}056 + t_b^{1{,}5}\right) \cdot d_{ae}^{{t_b}^{-0{,}25}}\right)^{1{,}173}\right] \quad (2.12)$$

$$\eta_{th}(bb) = 1 - \exp\left(-\left[76{,}8 + 167 \cdot SF_b^{0{,}65}\right] \cdot [Dt_b]^{0{,}5676}\right) \quad (2.13)$$

$$\eta_{ae}(AI) = 1 - \exp\left[-0{,}146 \cdot SF_A^{0{,}98} \cdot (d_{ae}^2 \cdot t_A)^{0{,}6495}\right] \quad (2.14)$$

$$\eta_{th}(AI) = 1 - \exp[-(170 + 103 \cdot SF_A^{2.13})(D \cdot t_A)^{0,6101}] \quad (2.15)$$

Где:

d_{ae} – аэродинамический диаметр частицы, мкм;

d_{th}– термодинамический диаметр частицы, мкм;

D – коэффициент диффузии Броуновской частицы, $см^2 \cdot с^{-1}$;

V– скорость дыхания, мл/с;

SF_t–параметр, учитывающий индивидуальные анатомические различия и равный $1,65/d_0$, где d_0 – диаметр трахеи (1,65 см для условного работника).

SF_b–параметр, равный $0,165/d_9$, где d_9 – диаметр 9-й генерации бронхов (d_9 =0,165 см для условного работника);

SF_A–параметр, равный $0,051/d_{16}$, где d_{16} – диаметр 16-й генерации респираторных бронхиол (d_{16} =0,051 см для условного работника);

t_B – время, за которое воздух проходит через трахею и бронхи:

$$t_B = V_D(BB) \cdot (1 + 0,5 \cdot \frac{V_T}{FRC})/V \quad (2.16)$$

где $V_D(BB)$ – анатомическое мертвое пространство (объем воздухоносных путей, где не происходит газообмена) трахеи и бронхов, л; FRC - функциональная остаточная емкость легких, равная объему воздуха, который остается в легких после каждого выдоха, л; V_T – тидальный объем легких (объем вдыхаемого/выдыхаемого воздуха), л;

t_b – время, за которое воздух проходит через бронхиолы:

$$t_b = V_D(bb) \cdot (1 + \frac{0,5V_T}{FRC})/V \quad (2.17)$$

где $V_D(bb)$ - анатомическое мертвое пространство бронхиол, л.

d_{ae} – аэродинамический диаметр частицы;

t_A – время, в течение которого воздух остается в альвеолярно-интерстициальном отделе:

$$t_A = \frac{\left\{V_T - V_D(ET) - [V_D(BB) + V_D(bb)]\left(1 + \frac{V_T}{FRC}\right)\right\}}{V} \quad (2.18)$$

Где

$V_D(ET)$ – объем экстраторакального отдела, л; $V_D(BB)$ – объем трахеи и бронхов, л; $V_D(bb)$ - объем бронхиол, л; V_T – тидальный объем легких, л; FRC - функциональная остаточная емкость легких, равная объему воздуха, который остается в легких после каждого выдоха, л; V - скорость дыхания мл/с.

Объем каждого фильтра в системе:

$$\nu_0 = 0 \qquad \nu_5 = V_T$$
$$\nu_1 = 0 \qquad \nu_6 = \nu_4$$
$$\nu_2 = V_D(ET) \qquad \nu_7 = \nu_3 \qquad (2.19)$$
$$\nu_3 = V_D(BB) \qquad \nu_8 = \nu_2$$
$$\nu_4 = V_D(bb) \qquad \nu_9 = \nu_1$$

Объемная фракция ϕ_i, характеризующая долю воздуха, доходящего до данного отдела дыхательных путей, определяется по формуле:

$$\phi_0 = 1$$
$$\phi_k = 1 - \left(\frac{\sum_{i=0}^{k-1} \nu_i}{V_T}\right), \text{при } k = 1 \text{ до } 5 \qquad (2.20)$$
$$\phi_k = \phi_{10-k}, \qquad \text{при } k = 6 \text{ до } 9$$

Или расписывая для каждого фильтра:

$$\phi_1 = 1 \qquad \phi_6 = \phi_4$$
$$\phi_2 = 1 \qquad \phi_7 = \phi_3$$
$$\phi_3 = 1 - \frac{V_D(ET)}{V_T} \qquad \phi_8 = \phi_2$$
$$\phi_4 = 1 - \frac{(V_D(ET) + V_D(BB))}{V_T} \qquad \phi_9 = \phi_1 \qquad (2.21)$$
$$\phi_5 = 1 - \frac{(V_D(ET) + V_D(BB) + V_D(bb))}{V_T}$$

Доля осажденных частиц на каждом фильтре определяется формулой:

$$DE_i = \eta_i \cdot \phi_i \cdot \prod_{k=0}^{i-1} (1 - \eta_k) \qquad (2.22)$$

где: DE_i – доля осажденных монодисперсных аэрозолей; η_i - эффективность фильтрации; ϕ_i – объемная фракция, характеризующая долю воздуха, доходящего до данного отдела дыхательных путей.

Или, расписывая подробно для каждого фильтра:

$$DE_1 = \eta_1(1 - \eta_0) \qquad (2.23)$$

$$DE_2 = \eta_2(1-\eta_0)(1-\eta_1) \quad (2.24)$$

$$DE_3 = \left(1-\frac{V_D(ET)}{V_T}\right)\eta_3(1-\eta_0)(1-\eta_1)(1-\eta_2) \quad (2.25)$$

$$DE_4 = \left(1-\frac{V_D(ET)+V_D(BB)}{V_T}\right)\eta_4(1-\eta_0)(1-\eta_1)(1-\eta_2)(1-\eta_3) \quad (2.26)$$

$$DE_5 = \left(1-\frac{V_D(ET)+V_D(BB)+V_D(bb)}{V_T}\right)\eta_5(1-\eta_0)(1-\eta_1)(1-\eta_2)\ldots$$

$$\ldots(1-\eta_4) \quad (2.27)$$

$$DE_6 = \left(1-\frac{V_D(ET)+V_D(BB)}{V_T}\right)\eta_6(1-\eta_0)(1-\eta_1)\ldots(1-\eta_5) \quad (2.28)$$

$$DE_7 = \left(1-\frac{V_D(ET)}{V_T}\right)\eta_7(1-\eta_0)(1-\eta_1)(1-\eta_2)\ldots(1-\eta_6) \quad (2.29)$$

$$DE_8 = \eta_8[(1-\eta_0)(1-\eta_1)(1-\eta_2)\ldots(1-\eta_7)] \quad (2.30)$$

$$DE_9 = \eta_9[(1-\eta_0)(1-\eta_1)(1-\eta_2)\ldots(1-\eta_9)] \quad (2.31)$$

И, наконец, доля осажденных аэрозольных частиц в определенном отделе респираторного тракта вычисляется по следующим формулам:

$D(ET_1) = DE_1 + DE_9$ (2.32)

$D(ET_2) = DE_2 + DE_8$ (2.33)

$D(BB) = DE_3 + DE_7$ (2.34)

$D(bb) = DE_4 + DE_6$ (2.35)

$D(AI) = DE_5$ (2.36)

И, соответственно, доля общего числа осажденных аэрозольных частиц в респираторном тракте:

$D(Total) = D(ET_1) + D(ET_2) + D(BB) + D(bb) + D(AI)$ (2.37)

К примеру, для монодисперсного аэрозоля с аэродинамическим диаметром 5 мкм:

D_{ET1} = 4,17e-1 + 4,13e-4 = 0,42

D_{ET2} = 4,74e-1 + 5,95e-3 = 0,48

D_{BB} = 2,34e-2 + 1,41e-3 = 0,02

D_{bb} = 9,4e-3 + 1,88e-3 = 0,11

D_{AI} = 0,028

При этом суммарная доля осажденных аэрозолей составит 0,96.

2.4 Описание метода оценки осаждения частиц радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека

В случае полидисперсных аэрозолей доля осажденных частиц в дыхательных путях согласно модели Публикации 66 МКРЗ вычисляется по формуле:

$$DE_A\left(AMAD, \beta_g\right) = \int_0^{\infty} DE(d_{ae}) p_A(d_{ae}) \delta d_{ae} \quad (2.38)$$

где: $DE(d_{ae})$ – доля осажденных монодисперсных аэрозолей с аэродинамическим диаметром d_{ae} (вычисляется по формуле (2.22) в зависимости от отдела дыхательных путей); $p_A(d_{ae})$ – доля активности аэрозольных частиц, приходящаяся на размерный интервал δd_{ae} логнормального распределения с данными АМАД и β_g (рис. 2.8)

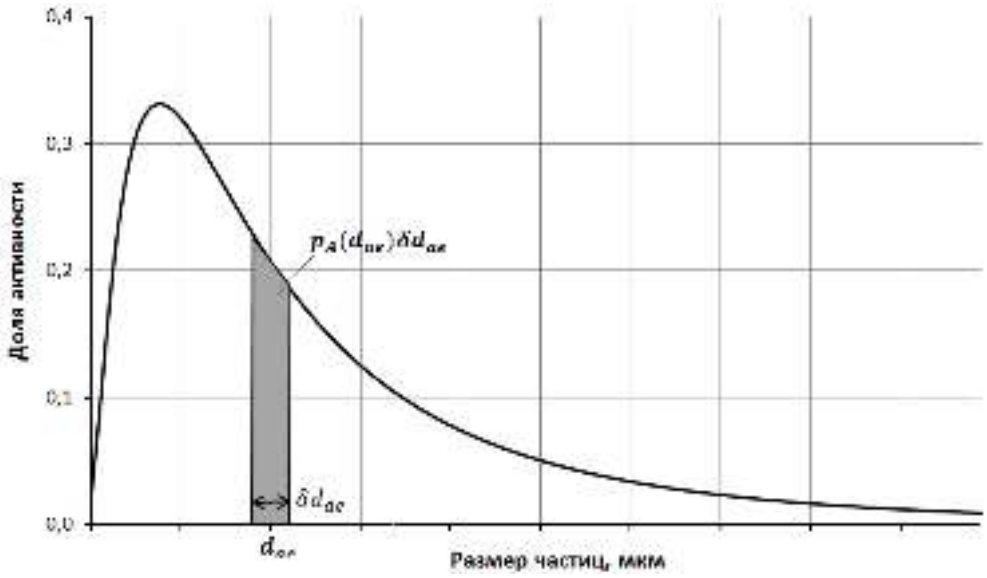


Рисунок 2.8 Иллюстрация к формуле (2.38); $p_A(d_{ae})$ - доля активности аэрозольных частиц, приходящаяся на размерный интервал δd_{ae} логнормального распределения

Для расчета параметра $DE_A\left(AMAD, \beta_g\right)$ в формуле (2.38) необходимо определить параметр $p_A(d_{ae})\delta d_{ae}$ поступающих в дыхательные пути человека радиоактивных аэрозолей. Предлагается разбить исходное распределение активности по размерам частиц ингалируемого радиоактивного аэрозоля на доли активности, приходящиеся на определенные размерные интервалы, с помощью импактора. В таблице 2.3 приведены значения D_{50} каскадов разрабатываемого импактора-фантома, используемые для разбиения спектра размеров радиоактивных аэрозольных частиц, поступающих в дыхательные пути человека (за основу были взяты значения D_{50} каскадного импактора Андерсена).

Таблица 2.3а Характеристики каскадов импактора

Номер каскада	Эффективный каскадный аэродинамический диаметр разделния D_{50}, мкм	Осаждаемая фракция, мкм
0	23	> 23
1	9	23 – 9
2	5,8	9 – 5,8
3	4,7	5,8 – 4,7
4	3,3	4,7 – 3,3
5	1,1	3,3 – 1,1
6	0,43	1,1 – 0,43
7 (фильтр)	-	< 0,43

Дальнейшая задача состояла в расчете значений долей $DE(d_{ae})$ монодисперсных аэрозолей, осевших в отделах дыхательных путей, причем значения d_{ae} ограничены диапазоном из таблицы 2.3а. Исходя из этого, для практического применения, формулы (2.38) представим её в виде (2.39), заменяя интеграл на суммирование по диапазонам частиц со средней долей осаждения:

$$DE_A = \sum \left[\frac{DE\left(d_{ae_i}\right) + DE(d_{ae_{i+1}})}{2} \right] \cdot \frac{A_i}{\sum A} \qquad (2.39)$$

где: $DE\left(d_{ae_i}\right)$ – доли осаждения монодисперсных аэрозолей для различных отделов дыхательных путей со значениями d_{ae}, соответствующими границам осаждаемых фракций на каскадах (таблица 2.3б); A_i – активность радионуклида на i-м каскаде, Бк; $\sum A$- суммарная активность радионуклида на всех каскадах импактора, Бк.

Таблица 2.3б Рассчитанные доли осаждения DE(d_{ae}) монодисперсных аэрозолей для различных отделов дыхательного тракта со значениями d_{ae}, соответствующими границам осаждаемых фракций на каскадах импактора-фантома

Номер каскада	d_{ae}, мкм	Доля осаждения монодисперсных аэрозолей $DE(d_{ae})$				
		ET1	ET2	BB	bb	AI
-	100	0,25	0,25	0	0	0
0	23	0,29	0,29	0,001	0	0
1	9	0,41	0,44	0,013	0,002	0,001
2	5,8	0,43	0,48	0,022	0,009	0,017
3	4,7	0,41	0,48	0,026	0,012	0,033
4	3,3	0,37	0,48	0,029	0,017	0,073
5	1,1	0,17	0,22	0,012	0,010	0,117
6	0,43	0,04	0,04	0,003	0,014	0,078
7 (фильтр)	0,1	0,02	0,02	0,007	0,049	0,233

Пример расчета доли осаждения полидисперсного аэрозоля с АМАД = 1 мкм и β_g = 2,5 для отдела ET_1 в соответствии с формулой (2.39) представлен в таблице 2.4. Аналогичным образом рассчитываются доли осаждения аэрозоля для других отделов. На рисунке 2.9 представлены результаты сравнения зависимостей доли осажденных аэрозолей от АМАД (во всех случаях β_g = 2,5), полученных с помощью данного метода со значениями из Публикации 66 МКРЗ [61]. В диапазоне АМАД от 1 до 10 мкм относительная погрешность расчета предложенным методом варьируется от 0,1% до 21%. В диапазоне от 0,2 до 1 мкм – от 0,1% до 26%. Наибольшие значения относительной погрешности наблюдаются для значения АМАД 0,1 мкм – от 27% (отдел BB - бронхи) до 39% (отдел bb - бронхиолы), что, по всей видимости, связано малым количеством в конструкции устройства каскадов, улавливающих субмикронную фракцию. Расчеты долей осаждения для АМАД 0,1 мкм с введением дополнительного каскада, улавливающего фракцию 0,1 – 0,03 мкм показывают значительное сокращение данного расхождения для альвеолярного отдела (таблица 2.5). Проблема могла бы быть решена применением каскадов под низким давлением, либо совмещением конструкции импактора с диффузионной батареей (в обычных импакторах нижний предел обнаружения частиц составляет 0,25 - 0,3 мкм [43]).

Таблица 2.4 Пример расчета долей осаждения аэрозоля с АМАД = 1 мкм и β_g = 2,5 для отдела ET1

Каскад	Размерный интервал, мкм		Отдел ET_1			Доля ЛНР*, приход. на размерный интервал d1 – d2, p_A	$\frac{DE(d1)+DE(d2)}{2} \cdot p_A$
	d1	d2	DE(d1)	DE(d2)	$\frac{DE(d1)+DE(d2)}{2}$		
0	100	23	0,25	0,29	0,27	3,12E-04	8,43E-05
1	23	9	0,29	0,41	0,35	7,98E-03	2,81E-03
2	9	5,8	0,41	0,43	0,42	1,91E-02	8,02E-03
3	5,8	4,7	0,43	0,41	0,42	1,81E-02	7,59E-03
4	4,7	3,3	0,41	0,37	0,39	5,13E-02	2,00E-02
5	3,3	1,1	0,37	0,17	0,27	3,64E-01	9,88E-02
6	1,1	0,43	0,17	0,04	0,11	3,65E-01	3,94E-02
7	0,43	0,1	0,04	0,02	0,03	1,74E-01	5,56E-03
						DE_A(AMAD, β_g):	1,82E-01

Таблица 2.5 Результаты расчетов долей осаждения аэрозоля с АМАД = 0,1 мкм для импактора-фантома с дополнительным каскадом (0,1 – 0,03 мкм) и без.

	Доля осажденных полидисперсных аэрозолей DE_A				
	ET1	ET2	BB	bb	AI
Публикация 66	0,03	0,03	0,007	0,05	0,21
Импактор-фантом с доп. каскадом (0,1 – 0,03 мкм)	0,04	0,04	0,008	0,05	0,25
Импактор-фантом без доп. каскада	0,04	0,04	0,005	0,03	0,15

Согласно экспериментальным исследованиям [38] и [55] дисперсный состав радиоактивных аэрозолей на предприятиях атомной отрасли характеризуется в основном значением АМАД от 1 до 10 мкм, и частично субмикронным диапазоном (от 0,1 до 1 мкм). В рамках этих диапазонов можно считать, что доли осаждения частиц радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека, рассчитанные по предложенному методу, с использованием специального импактора (со значениями D_{50} каскадов из таблицы 2.3), в

пределах погрешностей совпадают с результатами из Публикации 66 МКРЗ [61]. В общем виде импактор может быть любым. Чем больше будет у него каскадов, тем ближе будет результат к оценке по Публикации 66 МКРЗ.

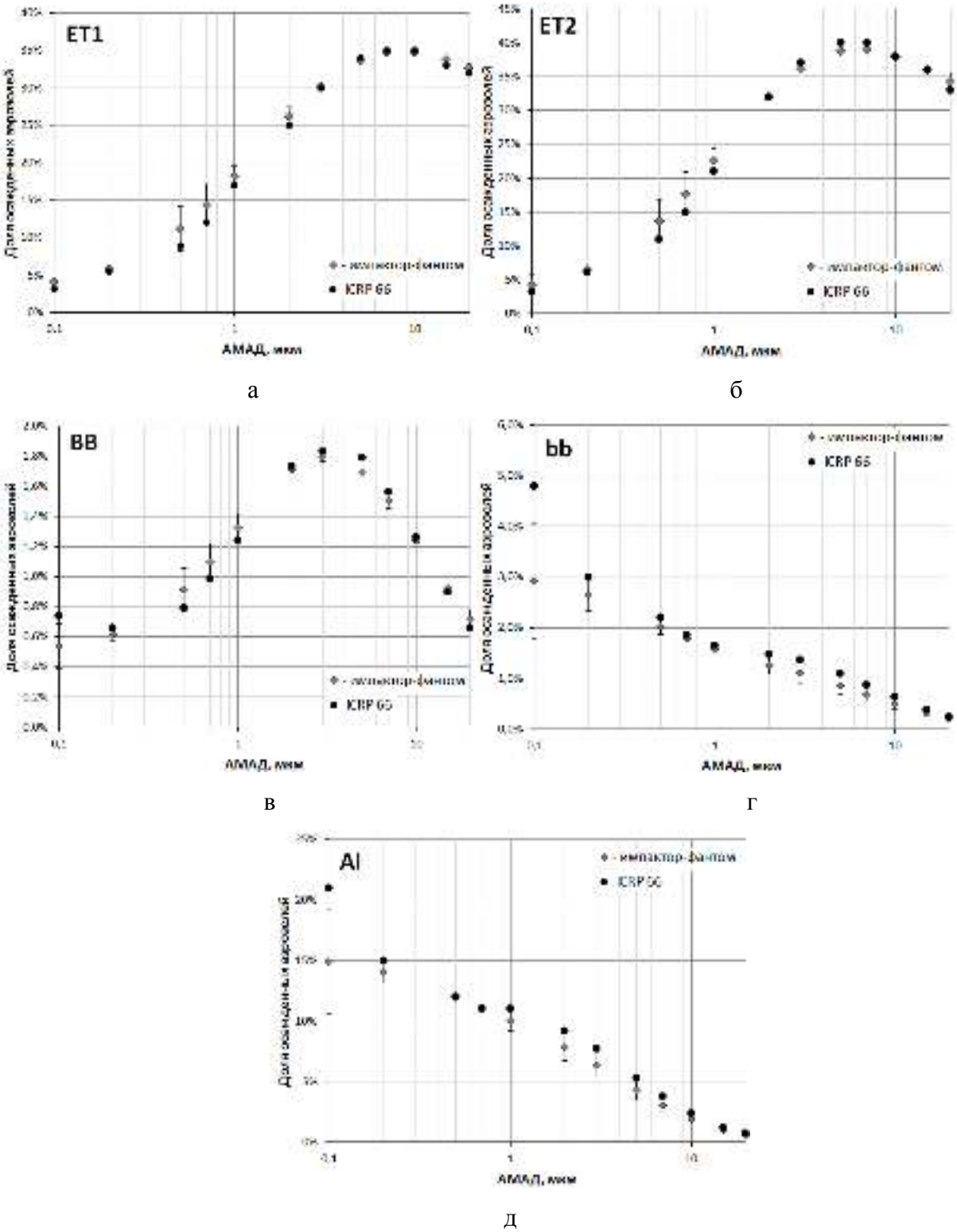
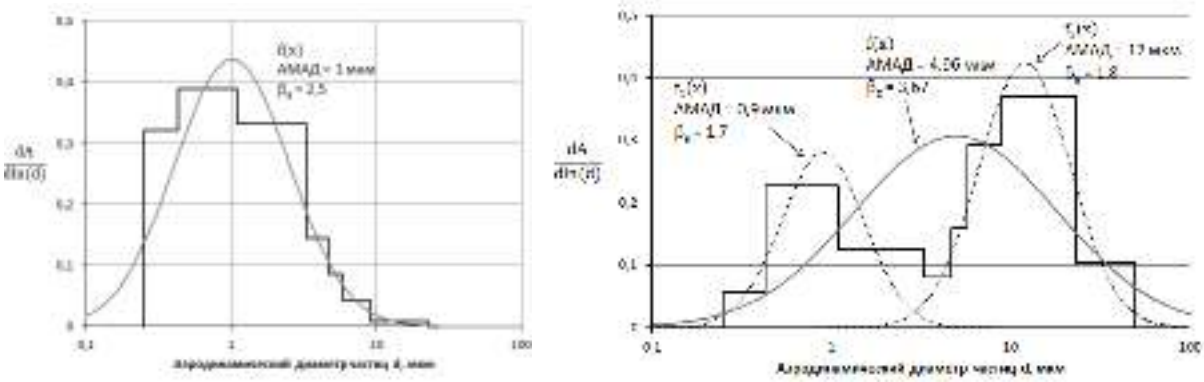


Рисунок 2.9 Сравнение зависимостей доли осажденных аэрозолей от АМАД. Отделы дыхательного тракта: а) ET_1, б) ET_2, в) BB, г) bb, д) AI.

2.5 Расчет долей осаждения для одномодальных и полимодальных распределений

Был проведен расчет долей осаждения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта для двух распределений, представленных на рис. 2.10. Расчет посредством предложенного метода выполнялся для фактических распределений (гистограммы, восстановленные по результатам измерений активности радионуклида на подложках импактора). Затем результаты расчета сопоставляли с расчетами в программе IMBA [53], где в качестве значений АМАД и β_g задавались параметры логнормальных распределений f(x), которые были определены посредством импактора (по стандартной процедуре обработки экспериментальных данных [45]).



а б

Рисунок 2.10 а - логнормальное распределение активности А по аэродинамическим диаметрам d аэрозольных частиц (АМАД = 1 мкм β_g = 2,5); б - бимодальное распределение активности А по аэродинамическим диаметрам d аэрозольных частиц (аппроксимация логнормальным распределением с АМАД = 5,0 мкм β_g = 3,7)

Бимодальное распределение на рис.2.10б также было аппроксимировано двумя логнормальными распределениями $f_1(x)$ и $f_2(x)$ с АМАД 0,9 мкм и 12 мкм, для каждого из которых были рассчитаны доли осаждения в IMBA. Доли осаждения для суммы распределений $f_1(x)$ и $f_2(x)$ для i-го отдела дыхательных путей рассчитывали по формуле:

$$DE_{Ai}(f_1(x)+f_2(x)) = a \cdot DE_{Ai}(f_1(x)) + b \cdot DE_{Ai}(f_2(x)) \qquad (2.40)$$

Где a, b – вклад каждого из одномодальных распределений в полимодальный спектр

$DE_{Ai}(f_1(x))$, $DE_{Ai}(f_2(x))$ – доли осаждения для i-го отдела, рассчитанные в IMBA для распределений $f_1(x)$ и $f_2(x)$ соответственно.

Относительная погрешность рассчитывалось по формуле:

$$\delta = \frac{|DE_x - DE_{\text{имп}}|}{DE_{\text{имп}}} \qquad (2.41)$$

Где DE_x – доли осаждения, рассчитанные с помощью IMBA

$DE_{имп}$ – доли осаждения, рассчитанные предложенным методом

Результаты расчетов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Доли активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта, рассчитанные с помощью программы IMBA и посредством предложенного метода

Тип распределения	Способ расчета	Доля в респираторном тракте, DE_A				
		ET_1	ET_2	BB	bb	AI
Одномодальное	IMBA f(x), DE_{A1}	0,28	0,35	0,019	0,015	0,095
	Предложенный метод, DE_{A2}	0,31	0,38	0,021	0,014	0,085
	Относительная погрешность f(x) $\delta = \frac{\lvert DE_{A1} - DE_{A2} \rvert}{DE_{A1}}$	13%	8%	8%	8%	11%
Полимодальное	IMBA f(x)	0,30	0,35	0,015	0,010	0,055
	IMBA $a \cdot f_1(x) + b \cdot f_2(x)$	0,28	0,30	0,010	0,007	0,045
	Предложенный метод	0,28	0,31	0,011	0,007	0,042
	Относительная погрешность f(x)	7%	13%	33%	48%	30%
	Относительная погрешность $a \cdot f_1(x) + b \cdot f_2(x)$	3%	3%	7%	5%	8%

Как видно, в первом случае (одномодальное распределение) результаты расчетов достаточно хорошо совпадают между собой (относительная погрешность варьируется от 4% до 9%). Во втором случае, когда полимодальный спектр аппроксимируется логнормальным распределением f(x), относительная погрешность варьируется от 7% (отдел ET_1) до 48% (отдел bb). Таким образом, предлагаемый метод позволяет снизить ошибку при оценке дозы внутреннего облучения при ингаляционном поступлении аэрозолей с полимодальным

распределением активности по размерам частиц (в данном примере – для отделов BB, bb и AI).

При аппроксимации полимодального спектра двумя логнормальными распределениями $f_1(x)$ и $f_2(x)$, относительная погрешность составила 3 – 8 %. Как видно, доли осаждения от полимодальных распределений, можно рассчитывать и посредством IMBA, однако для этого необходимо определять параметры (АМАД и β_g) каждой из компонент, а также их вклад в общий спектр, что требует разработки отдельной статистической процедуры. Преимуществом предложенного метода является относительная простота в использовании, а также тот факт, что расчет ведется по фактической форме распределения.

2.6 Расчет ожидаемых эквивалентных доз облучения торакального и экстраторакального отделов

Ожидаемая эквивалентная доза облучения торакального и экстраторакального отделов органов дыхания определена как взвешенная сумма ожидаемых эквивалентных доз облучения составляющих их тканей [24]:

$$H_{TH} = (0{,}5 \cdot H_{BBseq} + 0{,}5 \cdot H_{BBbas}) \cdot A_{BB} + H_{bb} \cdot A_{bb} + H_{AI} \cdot A_{AI} + H_{LN_{TH}} \cdot A_{LN_{TH}} \quad (2.42)$$

$$H_{ET} = H_{ET1} \cdot A_{ET1} + H_{ET2} \cdot A_{ET2} + H_{LN_{ET}} \cdot A_{LN_{ET}} \quad (2.43)$$

Где H_{TH} – ожидаемая эквивалентная доза облучения легких (торакального отдела органов дыхания как целого); H_{ET} – ожидаемая эквивалентная доза облучения экстраторакального отдела органов дыхания как целого; A_T и H_T – взвешивающие коэффициенты и ожидаемые эквивалентные дозы облучения соответствующих тканей T. Значения коэффициентов A_T приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 Взвешивающие тканевые коэффициенты для тканей органов дыхания [24]

Ткани органов дыхания		A_T
Экстраторакальный отдел		
ET_1	Ткани передней части носа	0,001
ET_2	Задняя часть носового хода, носовая часть глотки, ротовая часть глотки и гортань	1
LN_{ET}	Лимфатические узлы экстраторакального отдела	0,001
Торакальный отдел («легкие»)		
BB_{bas}	Базальные клетки стенок бронхов	0,167

BB_{sec}	Секреторные клетки стенок бронхов	0,167
bb	Бронхиолы	0,333
AI	Ткани альвеолярной области	0,333
LN_{TH}	Лимфатические узлы торакального отдела	0,001

Ожидаемая эквивалентная доза облучения органа или ткани T рассчитывается по формуле:

$$H_T(\tau) = I_{UT} \cdot h_T(\tau)_U^{inh} \quad (2.44)$$

Где I_{UT} – активность аэрозольных частиц, осажденная в области T респираторного тракта, Бк; $h_T(\tau)_U^{inh}$ – ожидаемая эквивалентная доза облучения органа T при ингаляционном поступлении 1 Бк радионуклида U, Зв/Бк. Когда τ не определено, то его следует принять равным 50 годам для взрослых [24].

$$I_{UT} = I_U \cdot DE_{AT} \quad (2.45)$$

Где I_U – суммарное ингаляционное поступление радионуклида U; DE_{AT} – доля активности, осажденная в области T респираторного тракта

2.7 Выводы по главе 2

1. Показано, что региональное отложение аэрозолей в респираторном тракте нельзя строго разбить на определенные размерные фракции, что затрудняет моделирование респираторного тракта с помощью импактора. Установлено, что вопреки заявленным характеристикам, импактор Андерсена не может удовлетворительно служить в качестве модели респираторного тракта Публикации 66 МКРЗ. Для корректной оценки фракционного осаждения радиоактивных аэрозолей по отделам дыхательного тракта необходим алгоритм обработки экспериментальных данных, полученных с помощью импактора

2. Разработан метод оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора. Предложенный метод позволяет оценить активность аэрозольных частиц, осажденных в различных отделах дыхательного тракта согласно дозиметрической модели Публикации 66 МКРЗ, независимо от типа распределения активности аэрозолей по размерам частиц.

3. Проведенное сопоставление зависимости доли осажденных аэрозолей, рассчитанных предложенным методом, от АМАД, показало достаточно хорошее соответствие с аналогичными зависимостями из Публикации 66 МКРЗ (для условного работника в условиях легкой работы). В диапазоне АМАД от 1 до 10 мкм относительная погрешность расчета предложенным методом варьируется от 0,1% до 21%. В диапазоне от 0,2 до 1 мкм – от 0,1% до 26%. Наибольшие значения относительной погрешности наблюдаются для значения

АМАД 0,1 мкм – от 27% (отдел BB) до 39% (отдел bb), что связано с малым количеством в конструкции устройства каскадов, улавливающих субмикронную фракцию аэрозолей. Необходимо отметить, что в расчетах не учитывалась реальная форма кривых эффективности осаждения аэрозолей на каскадах импактора, что может внести дополнительную погрешность.

4. В случае одномодальных распределений результаты рассчета долей осажденной активности аэрозольных частиц, выполненные в программе IMBA и посредством предложенного метода совпадают в пределах 9% погрешности. В случае полимодальных распределений, аппроксимация одномодальным логнормальным распределением может приводить к ошибкам (до 48%) при расчете долей активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта. Применение предлагаемого метода позволяет устранить данные неопределенности, т.к. расчет ведется по фактической форме спектра, восстановленной на каскадах импактора.

Глава 3 Разработка импактора для реализации метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта

В данной главе описан процесс разработки и исследований экспериментальных характеристик импактора для реализации метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта человека. Необходимость в данном устройстве возникает, когда размерное распределение аэрозолей по активности не соответствует логарифмически-нормальному закону, при этом стоит задача по оценке распределения активности (и ОЭД внутреннего облучения) по различным отделам дыхательного тракта.

В разделе 2.4 (глава 2) табл.2.3а представлены значения D_{50} каскадов разрабатываемого устройства. Был проведен расчет параметров импактора, при которых обеспечиваются заданные значения D_{50}, проведено численное моделирование осаждения частиц в программном комлексе Star-CCM+ и экспериментальное исследование пробоотборных характеристик устройства на специальном стенде.

Стоит отметить: так как устройство планируется применять на предприятиях атомной отрасли – отсюда вытекают определенные требования к конструкции, такие как, простота дезактивации, оперативность замены каскадных элементов, малогабаритность и т.д.

Так как устройство предназначено для реализации метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта, в начале процесса разработки было принято решение назвать его «импактор-фантом респираторного тракта человека», хотя такое название является не совсем корректным – устройство не воспроизводит анатомическое строение трахеобронхиального дерева, а по характеристикам осаждения импакторы, как было показано в главе 2, сами по себе не могут служить в качестве модели респираторного тракта Публикации 66 МКРЗ.

3.1 Расчет параметров конструкции импактора-фантома

Разделение частиц аэрозоля на размерные фракции происходит в процессе отбора пробы на каскадах импактора. Каждый каскад включает в себя: сопельную пластину, коллекторную пластину и разделительное кольцо (рисунок 3.1). Верхняя пластина с цилиндрическими отверстиями образует сопла. Геометрические размеры отверстий (ширина сопла W, глубина сопла T) формируют струю воздуха, с заданной линейной скоростью и направленную перпендикулярно поверхности нижней пластины – коллектора, на котором происходит осаждение аэрозольных частиц (рисунок 3.2). Коллектор имеет центральное

отверстие для прохождения потока воздуха на следующий каскад. На каждом каскаде происходит разделение частиц на 2 фракции: крупные частицы (аэродинамический диаметр которых больше D_{50} данного каскада) под действием сил инерции смещаются с линий тока и, ударяясь о пластину, осаждаются на ней (для предотвращения сдувания частиц с пластины ее смазывают тонким слоем вязкого масла или технического вазелина), мелкие частицы остаются в потоке воздуха и поступают на следующий каскад, имеющий меньшее значение D_{50}, или на фильтр.

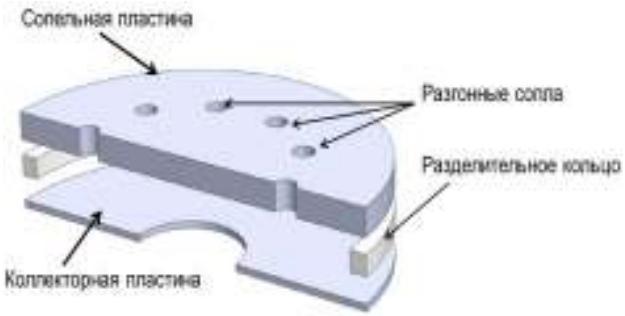


Рисунок 3.1 Поперечный разрез каскада импактора-фантома

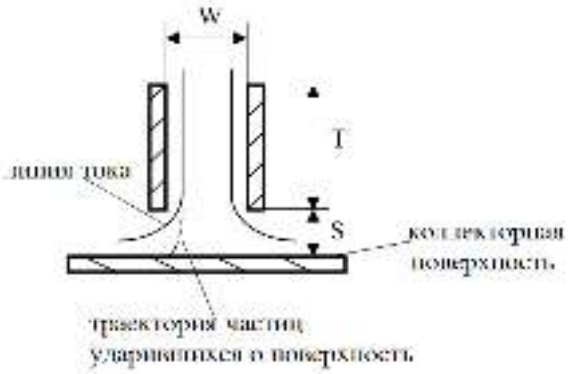


Рисунок 3.2 Принципиальная схема каскада импактора

Для описания движения частиц в импакторе используется число Стокса, безразмерный параметр, равный отношению инерционного пробега частицы к радиусу сопла, вычисляемый по формуле [45]:

$$S_{tk} = \frac{L}{W} = \frac{2 \cdot V \cdot \tau}{W} \qquad (3.1)$$

Где L – длина инерционного пробега частицы, W – диамер сопла, V–линейная скорость в сопле, τ – время релаксации.

Частица, внесенная в газовый поток, по причине присущей ей инерции, приобретает значение вектора-скорости, равное вектору-скорости потока не мгновенно, а через некоторое время, называемое временем релаксации. Одним из видов релаксированного состояния частицы является ее оседание (седиментация) в массе газа под действием силы тяжести с равномерной скоростью [10]. Время релаксации аэрозольной частицы вычисляется по формуле:

$$\tau = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_p^2}{\mu} \cdot \rho_p \cdot C_{kn} \quad , \qquad (3.2)$$

где d_p – диаметр частицы, ρ_p–плотность частицы, μ – динамическая вязкость, C_{kn} – поправка Каннингема.

Подставляя (3.2) в (3.1), получим следующее выражение для числа Стокса:

$$S_{tk} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot C_{kn} \cdot u}{18\mu W} \qquad (3.3)$$

При $Stk = 0$ (у частиц с бесконечно малой массой) частица точно следует по линии тока, не соприкасаясь с поверхностью обтекаемого тела. Такое же явление будет наблюдаться при достаточно малых значениях числа Стокса.

Существует минимальное, так называемое критическое значение числа Стокса $Stk_{кр}$, при котором инерция частицы оказывается достаточной, чтобы преодолеть увлечение ее газовым потоком, и она достигает поверхности подложки. Таким образом, захват частицы на коллекторной пластине возможен при условии $Stk > Stk_{кр}$. Тщательные анализы поля скоростей в импакторе показывают, что существуют значения чисел Стокса $Stk_{кр}$, ниже которых импакции не происходит. Экспериментально установлено, что для импакторов с круглым отверстием $Stk_{кр} = 1/8$ [45].

Эффективность осаждения частиц ε_i на коллекторной пластине i-го каскада импактора вычисляется по формуле [64]:

$$\varepsilon_i = N_1/N_2, \qquad (3.4)$$

где N_1 – число частиц данного аэродинамического диаметра, осевших на коллекторной пластине *i*-го каскада; N_2 – число частиц того же диаметра, находившихся в струе воздуха, направленной на данный каскадный элемент.

Аэродинамический диаметр, соответствующий $\varepsilon_i(x)$=0,5, называется эффективным диаметром разделения D_{50} или ECAD (Effective Cut-off Aerodynamic Diameter). Типичная зависимость эффективности осаждения каскада импактора от аэродинамического диаметра частиц представлена на рисунке 2.3 (Глава 2). Параметр $\sqrt{S_{tk}}$, соответствующий 50% эффективности осаждения, обозначается $\sqrt{Stk_{50}}$ и вычисляется по формуле:

$$\sqrt{Stk_{50}} = D_{50} \cdot \sqrt{\frac{\rho_p \cdot V \cdot C_{kn}}{9 \cdot \mu \cdot W}} \qquad (3.5)$$

где ρ_0 = 1 г/см^3; C_{kn} – поправка Каннингема; D_{50} – эффективный каскадный аэродинамический диаметр разделения; V – линейная скорость воздуха в соплах; μ - динамическая вязкость воздуха; W – диаметр сопла.

Линейная скорость в разгонных соплах каскадов определяется по формуле:

$$V = \frac{Q}{N \cdot s'} = \frac{Q}{N \cdot \left(\pi \cdot \frac{W^2}{4}\right)} \quad (3.6)$$

Где Q – объемный расход, $м^3/с$; s' – площадь сопла; N – число сопел; W – диаметр сопла.

Число Рейнольдса для круглого отверстия определяется по формуле:

$$Re = \frac{\rho_{air} \cdot W \cdot V}{\mu} \quad (3.7)$$

Где ρ_{air} – плотность воздуха, равная $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ г/см^3, μ - динамическая вязкость воздуха, равная $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ г/см·с, W – диаметр сопла, см; V - линейная скорость в разгонных соплах каскадов, см/с.

На рисунках 3.3, 3.4 представлены зависимости значения параметра $\sqrt{Stk_{50}}$ от числа Рейнольдса Re и от отношения S/W. Из этих зависимостей видно слабое влияние S/W и Re на характеристики импактора за исключением области малых значений S/W, из чего вытекает конструктивное условие (рис.3.4): S/W > 1.

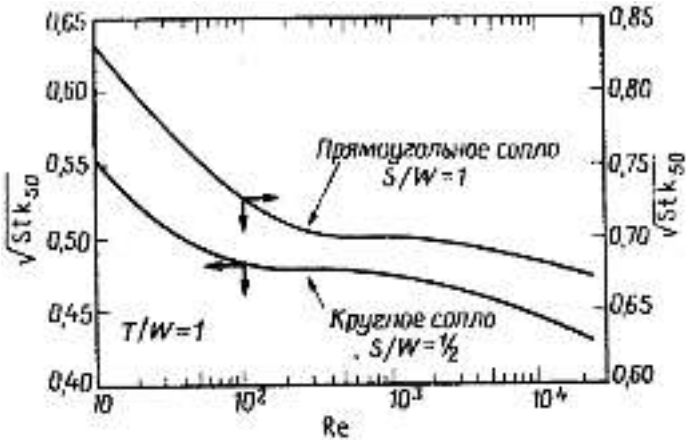


Рисунок 3.3 Зависимость квадратного корня из числа Стокса при 50%-м осаждении частиц от числа Рейнольдса при различных значениях S/W, где S – расстояние от выхода из сопла до коллектора, W – диаметр сопла, T – длина сопла [65].

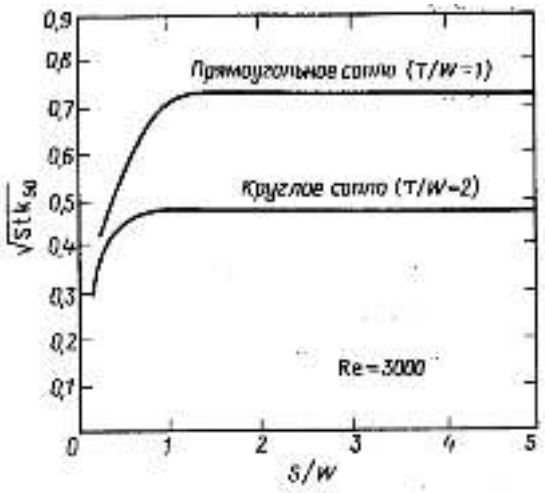


Рисунок 3.4 Зависимость квадратного корня из числа Стокса при 50%-м осаждении частиц от параметра S/W, где S – расстояние от выхода из сопла до коллектора, W – диаметр сопла, T – длина сопла [65].

Эффективный каскадный аэродинамический диаметр разделения D_{50} рассчитывается по формуле:

$$D_{50} = \sqrt{Stk_{50}} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{C_{kn} \cdot \rho_p \cdot V}} \qquad (3.8)$$

где $\sqrt{Stk_{50}}$ – корень из числа Стокса, соответствующего аэродинамическому диаметру частицы с эффективностью осаждения 50%; W - диаметр сопла, м; $\rho_ч$ - плотность частиц аэрозоля, кг/м^3; V - линейная скорость движения частиц в сопле, м/с; C_{kn} - поправка Каннингема, учитывающая увеличение подвижности частиц, размер которых сравним со средней длиной пробега молекул газа λ:

$$C_{kn} = 1 + \frac{\lambda}{d_{аэр}}\left[2{,}514 + 0{,}8\exp\left(-0{,}55\frac{d_{аэр}}{\lambda}\right)\right]$$

Где $d_{аэр}$ – аэродинамический диаметр частицы; λ – средняя длина свободного пробега газовых молекул. $C_{kn} = 1$ при $d_{физ} > 1$ мкм [45].

Расчеты D_{50} проводились для значения объемного расхода 20 л/мин (1,2 м^3/ч), что соответствует средней скорости дыхания человека в соответствии с НРБ-99/2009 п.4.2 [36] (или скорости дыхания условного работника в условиях «легкой работы» согласно Публикации 66 МКРЗ).

3.1.1 Пример расчета D_{50} каскада импактора-фантома

Пусть диаметр круглого сопла каскада импактора-фантома равен W = 1,7 мм, количество сопел N = 24, а скорость прокачки воздуха Q = 20 л/мин ($3{,}3 \cdot 10^{-4}$ м^3/с)

Линейная скорость в разгонных соплах будет (см.формулу (3.6)):

$$V = \frac{3{,}3 \cdot 10^{-4}\ \text{м/с}}{24 \cdot (\pi \cdot \frac{(1{,}7 \cdot 10^{-3}\text{м})^2}{4}} = 6{,}12\ \text{м}/c$$

Число Рейнольдса (см.формулу (3.7)):

$$Re = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-3}\text{г/см}^3 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-2}\text{см} \cdot 612\ \text{см/с}}{1{,}8 \cdot 10^{-4}\text{г/см} \cdot \text{с}} = 694$$

По таблице 3.1 (полученной из графика на рисунке 3.3) находим значение $\sqrt{Stk_{50}}$.

Таблица 3.1 Зависимость параметра $\sqrt{Stk_{50}}$ от значений числа Рейнольдса Re

Re	10000	3000	500
$\sqrt{Stk_{50}}$	0,450	0,475	0,495

В данном случае (Re = 694) $\sqrt{Stk_{50}}$= 0,49.

Используя формулу (3.8) рассчитывают D_{50}:

$$D_{50} = 0{,}49 \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-4}\frac{\text{г}}{\text{см}} \cdot \text{с} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-2}\text{см}}{1 \cdot 1\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 612\frac{\text{см}}{\text{с}}}} = 3{,}29 \cdot 10^{-4}\ \text{см} = 3{,}29\ \text{мкм}$$

В таблице 3.2 приведены размеры и значения D_{50} каскадов импактора-фантома, рассчитанные в соответствии с приведенными выше формулами.

Таблица 3.2 Параметры каскадов и значения эффективных аэродинамических диаметров разделения D_{50} (мкм), рассчитанные для импактора-фантома

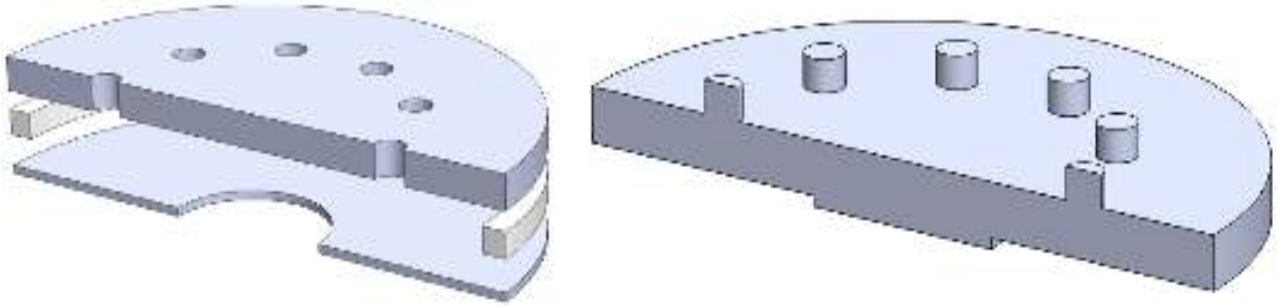
№ каскада	Диаметр сопел W, мм	Число сопел N	Длина сопла, T, мм	Расстояние от сопла до подложки S, мм	D_{50}, мкм	Число Рейнольдса Re
0	18	1	20	9	23,1	1572
1	3,34	24	3	4	9,1	353
2	2,5	24	3	3	5,9	472
3	2,15	24	2	3	4,7	589
4	1,7	24	2	3	3,3	693
5	0,8	24	1	3	1,1	1474
6	0,56	12	1	3	0,43	3930

3.2 Численное моделирование осаждения аэрозольных частиц на каскадах импактора-фантома

Многообразие различных факторов, влияющих на эффективность осаждения частиц в импакторах (расстояние между выходом из сопла и подложкой, форма сопла), сильно затрудняет расчеты параметров данных устройств. Современные технологии моделирования турбулентных потоков (CFD), основанные на численном решении уравнений гидрогазодинамики, позволяют проанализировать вклад различных факторов и оценить эффективность улавливания аэрозольных частиц на каскадах импактора. Исследование осаждения аэрозольных частиц в трехмерной модели импактора-фантома проводилось в программном комплексе STAR-CCM+ (разработчик CD Adapco) [78].

3.2.1 Построение геометрической модели

По расчитанным в разделе 3.1.1 размерам, которые представлены в таблице 3.2 с помощью программы SolidWorks были построены трехмерные модели каскадов импактора-фантома. В Star-CCM+ для расчета используется внутренний объем (т.е. объем, заполняемый газом). В результате каждый каскад импактора, состоящий из сопельной пластины, разделительного кольца и коллекторной пластины (рисунок 3.5а), преобразуется в фигуру, изображенную на рисунке 3.5б.



а б

Рисунок 3.5 Поперечный срез каскада импактора фантома (а) и его внутренний объем (б)

3.2.2 Построение расчетной сетки

Модель внутреннего объема импактора-фантома была импортирована в программный комплекс Star-CCM+ для построения объемной сетки. Основная цель построения сетки – описание граничных поверхностей расчетной области и разбиение этих объемов на ячейки, используемые для численного решения дифференциальных уравнений математической модели. Расчетная сетка в данной работе включала в себя 1 094 810 ячеек.

3.2.3 Математическая и физическая модель

При моделировании использовались следующие допущения:

- Воздух считается несжимаемой жидкостью (плотность постоянна);
- Поле течения – стационарное;
- Режим течения – турбулентный;
- Для моделирования турбулентности применялась k-ε модель;
- Поле течения находится при нормальных условиях воздушной среды, т.е. при температуре +20 ºС и давлении 1 атм.

Математическая модель для описания гидродинамических процессов, происходящих в импакторе, состояла из системы уравнений, описывающих стационарное турбулентное движение несжимаемой вязкой жидкости, и включала в себя:

Уравнение Навье-Стокса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P + \frac{\mu}{\rho}\vec{\nabla}^2\vec{u} \qquad (3.9)$$

Где ρ, P, μ - плотность, давление и динамическая вязкость газовой среды, а $u = u_x\vec{i} + u_y\vec{j} + u_z\vec{k}$ – вектор скорости газовой среды.

Уравнения, описывающие поле течения, используемые в к–ε модели турбулентности [63]:

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t} + \rho\vec{u}_i\frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij}\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial \vec{x}_j} - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \qquad (3.10)$$

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho\vec{u}_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \qquad (3.11)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (3.12)$$

$$\tau_{ij} = \rho\mu_t\left(\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \vec{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \qquad (3.13)$$

где $\vec{u}_i$ – компоненты вектора скорости, μ – динамическая вязкость газовой среды, μ_t – турбулентная вязкость, k – турбулентная кинетическая энергия, ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; τ_{ij} – компоненты тензора рейнольдсовых напряжений;

δ_{ij} – символ Кронекера ($i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$; $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$); модельные константы: $c_{\varepsilon 1}$ = 1,44; $c_{\varepsilon 2}$ = 1,92; C_{μ} = 0,09; σ_k=1,0; σ_ε = 1,3.

3.2.4 Задание граничных условий

В расчете были приняты следующие граничные условия (рисунок 3.6):

– стагнация на входе - условие входа потока среды в расчетную область с фиксированным значением давления и компонентами линейной скорости $\{u_x, u_y, u_z\}$, $u_x = 0$, $u_y = 0$, $u_z = 0$, p = 101325 Па;

- поток массы, равный $4 \cdot 10^{-4}$ кг/с, при объемном расходе 20 л/мин - условие выхода потока среды из расчетной области, $u_x \neq 0$, $u_y \neq 0$, $u_z \neq 0$, p = 0.

Рисунок 3.6 Общий вид расчетной области с указанием граничных условий: 1 - Стагнация на входе (P_0 = 101325 Па), 2 - поток массы при объемном расходе 20 л/мин.

3.2.5 Результаты расчета поля скоростей и перепада давления через устройство

В результате расчета были получены значения средних линейных скоростей в разгонных соплах инерционных каскадов (таблица 3.3) Пример рассчитанного поля скоростей в поперечном срезе четвертого каскада представлен на рисунке 3.7. Вычисленные с помощью программного комплекса Star-CCM+ линейные скорости в соплах в пределах 20% погрешности совпали со значениями, рассчитанными по формуле (3.6). Поле давления в поперечном срезе расчетной геометрии показано на рисунке 3.8. Значение перепада давления через устройство при объемном расходе 20 л/мин и отсутствии фильтра на выходе составило 13,9 кПа (1390 мм.вод.ст.). В табл.3.4 представлены значения абсолютного давления P в поперечных сечениях, отношение P/P_0 (где P_0 – атмосферное давление), а также рассчитанные значения перепада давления на каскадах DP.

Таблица 3.3 Сравнение результатов расчетов средних значений линейных скоростей в разгонных соплах каскадов импактора-фантома, выполненных с помощью Star-CCM+ со значениями, рассчитанными по формуле (3.6)

Номер каскада	Средняя линейная скорость в соплах V, м/с		
	Расчет по формуле	Расчет с помощью Star-CCM+	Относительная погрешность, %
0	1,31	1,32	1
1	1,58	1,64	4
2	2,83	2,96	5
3	3,83	4,57	19
4	6,12	6,32	3
5	27,6	30,7	11
6	98	101	3

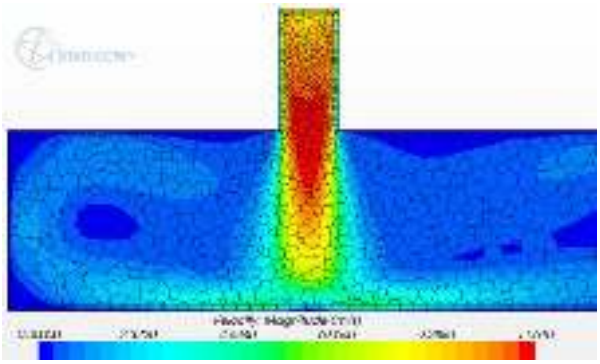


Рисунок 3.7 Поле скоростей в поперечном срезе четвертого каскада импактора-фантома с отображением расчетной сетки

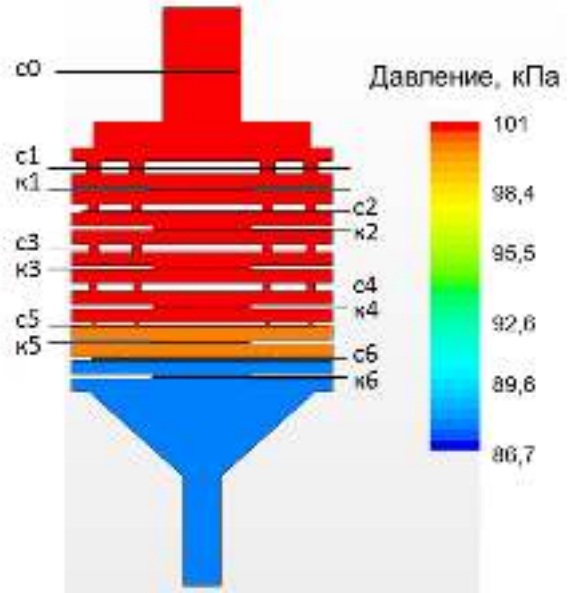


Рисунок 3.8 Поле давления в поперечном срезе расчетной геометрии импактора-фантома с указанием поперечных сечений

Табл.3.4 Абсолютное давление P в поперечных сечениях (рис.3.8)

Сечение	P, Па	P/P_0	ΔP, Па
C0	101323	100%	4
C1	101319	100%	2
K1	101317	100%	
C2	101304	100%	3
K2	101302	100%	
C3	101277	100%	4
K3	101273	100%	
C4	101231	100%	6
K4	101225	100%	
C5	100433	99%	53
K5	100380	99%	
C6	88325	87%	900
K6	87425	86%	

3.2.6 Моделирование и расчет эффективности осаждения частиц в импакторе-фантоме с помощью Лагранжевой модели

При моделировании осаждения частиц в импакторе-фантоме в программу загружалась трехмерная модель внутреннего объема *отдельного* каскада. При этом задавались следующие граничные условия (рисунок 3.9):

- стагнация на входе (значение давления в соответствии с табл.3.4);
- поток массы (при объемном расходе 20 л/мин).

Для моделирования инерционного осаждения частиц на коллекторной плоскости задавалось граничное условие «стенка с выпуском» – осажденными считались частицы, траектории которых пересекли коллекторную плоскость.

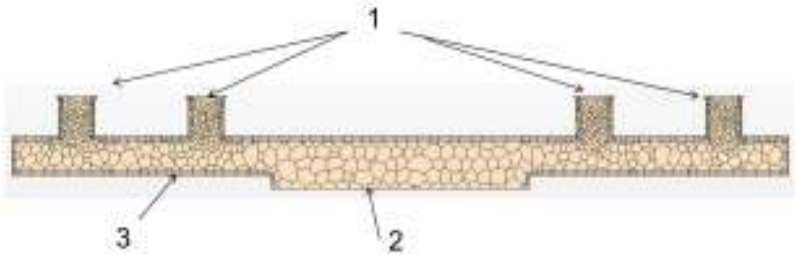


Рисунок 3.9 Задание граничных условий на расчетной области модели каскада импактора-фантома (поперечный срез), 1 – стагнация на входе, 2 – поток массы (на выходе), 3 – «стенка с выпуском».

Для описания движения частиц дисперсной фазы была выбрана Лагранжева модель, которая позволяет решить задачу об эффективности улавливания частиц статистически. Полученное этим способом решение для всех частиц строится по принципу обобщения

поведения в потоке группы частиц (порядка 1000). Уравнение (3.14) использовалось для вычисления траекторий аэрозольных частиц, на основе рассчитанных полей течения:.

$$m_p \frac{\partial \vec{V}_p}{\partial t} = \frac{1}{2} \cdot \mathrm{C}_d \cdot \rho_p \cdot A_p \left|\vec{u} - \vec{V}_p\right| \cdot \left(\vec{u} - \vec{V}_p\right) \qquad (3.14)$$

где m_p– масса частицы, $\vec{V}_p$–скорость частицы, $\vec{u}$– скорость газовой среды, ρ_p– плотность частицы, A_p – площадь поперечного сечения частицы, C_d – безразмерный коэффициент сопротивления при малых числах Рейнольдса равный $24/Re_p$, где Re_p – число Рейнольдса для частицы:

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p \left|\vec{u} - \vec{V}_p\right|}{\mu} \qquad (3.15)$$

Проводилось моделирование осаждения монодисперсных аэрозолей на коллекторных пластинах импактора в диапазоне размеров от 0,3 мкм до 30 мкм, плотность частиц ρ_p=1000 кг/м^3. На рисунке 3.10 представлены рассчитанные траектории движения частиц в импакторе-фантоме на примере четвертого каскада и частиц диаметром 5 мкм. На рисунке 3.11 показаны следы осажденных частиц на коллекторной пластине первого каскада.

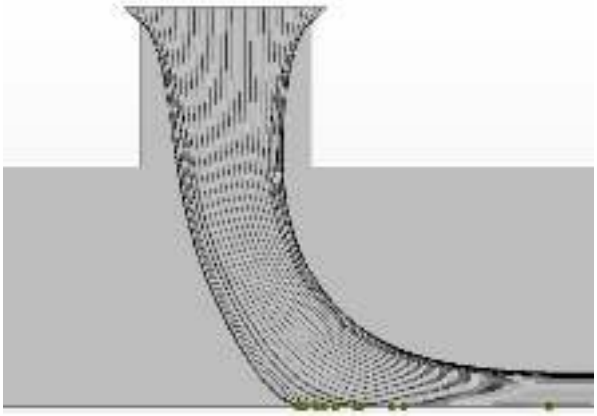


Рисунок 3.10 Рассчитанные траектории движения частиц в импакторе-фантоме (каскад №4, диаметр частиц – 5 мкм)

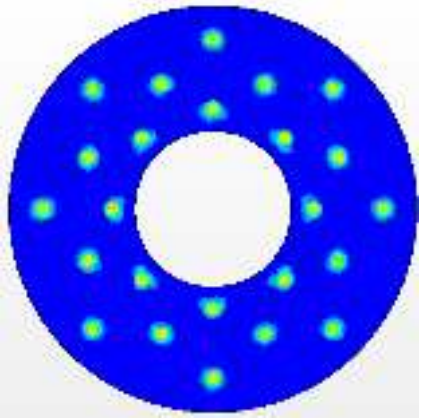


Рисунок 3.11 Следы осажденных частиц на коллекторной пластине первого каскада, полученные в результате моделирования

В результате расчета определялось количество частиц, осадившихся на коллекторной пластине; затем по формуле (3.4) вычислялась эффективность осаждения частиц для отдельного каскада. Были построены графики зависимости эффективности осаждения частиц на каскадных элементах от аэродинамического диаметра частиц (рисунок 3.12), по которым были определены эффективные аэродинамические диаметры разделения каскадов D_{50} (таблица 3.5).

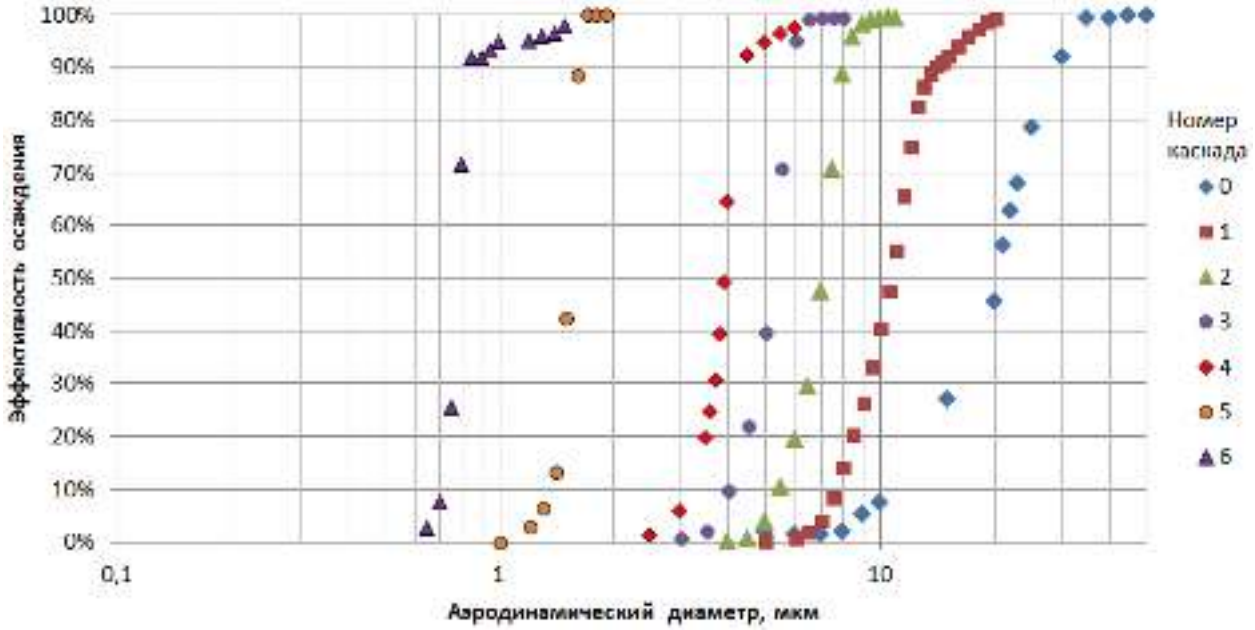


Рисунок 3.12 График зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра частиц для различных каскадов (результат моделирования в Star-CCM+)

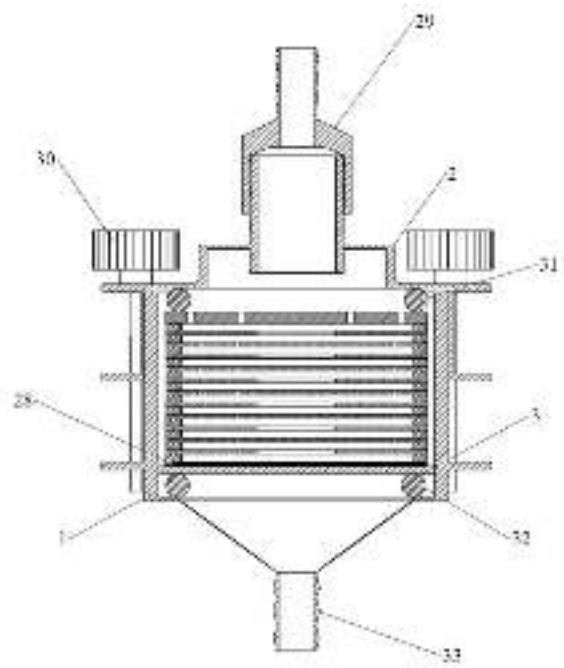
Табл. 3.5 Сравнение значений D_{50}, полученных в результате численного моделирования с требуемыми значениями.

D_{50}, мкм	Номер каскада						
	0	1	2	3	4	5	6
Требуемое значение	23	9	5,9	4,7	3,3	1,1	0,43
STAR-CCM+	20,5	10,5	7,1	5,3	3,9	1,5	0,68
Отн.погр.	11%	17%	20%	12%	18%	36%	57%

3.3 Разработка конструкции импактора-фантома

Общий вид устройства представлен на рисунке 3.13а. Импактор-фантом состоит из нижней части корпуса 1, верхней части корпуса 2, пробоотборной корзины 3 и каскадов, размещенных в пробоотборной корзине, что обеспечивает оперативность их замены (рисунок 3.13б).

а



б

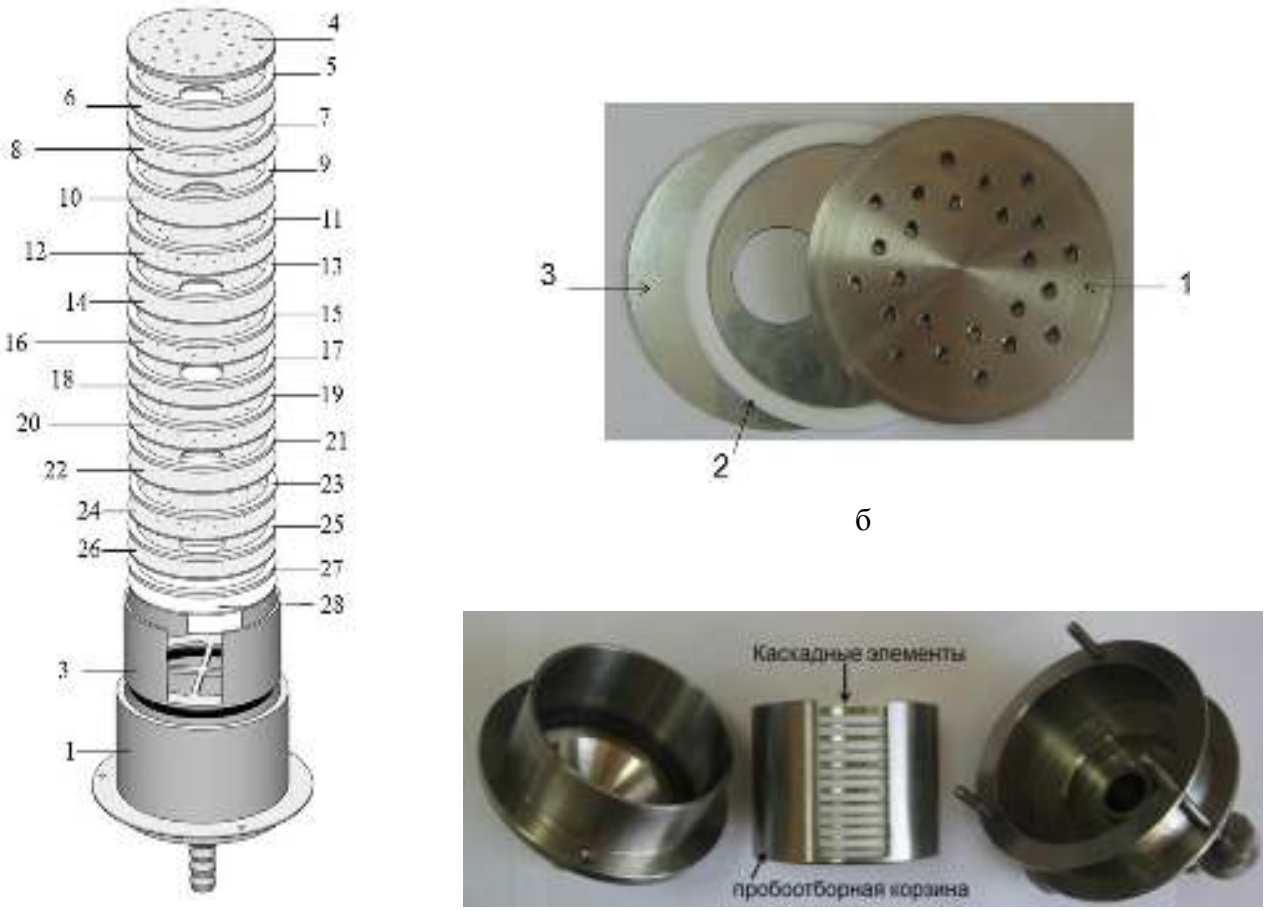
Рисунок 3.13 Общий вид (а) и поперечный срез (б) импактора-фантома респираторного тракта-человека

К верхней части корпуса 2 посредством резьбового соединения присоединяется штуцер 29, обе части корпуса соединяются при помощи крепежных винтов 30, для уплотнения используются прокладки 31, 32. В нижней части корпуса 1 находится штуцер 33 для подсоединения побудителя расхода.

Каждый каскад включает в себя сопельную пластину, коллекторную пластину и разделительное фторопластовое кольцо (рисунок 3.14б). Сопельные пластины представляют собой плоские диски с разгонными соплами, равномерно распределенными по нескольким концентрическим окружностям. Многосопельность способствует равномерному распределению осажденных частиц по поверхности коллекторных пластин.

Выбором материала разделительного кольца (фторопласт) обеспечивается герметичность внутреннего пространства и стабильность расстояния между соплом и коллектором. Для повышения эффективности удержания поверхность коллекторной пластины покрывается равномерным тонким слоем вазелина или вакуумной смазки.

Схема компоновки пробоотборной корзины устройства показана на рисунке 3.14а. Пробоотборная корзина (рис. 3.14в) представляет собой полый цилиндр, открытый сверху, имеющий снизу крестовину для фиксации фильтра и других каскадных элементов, а также две выемки по бокам для удобства установки каскадных элементов



а б в

Рисунок 3.14 (а) Схема компоновки пробоотборной корзины устройства; (б) Каскадные элементы импактора-фантома (1 – сопельная пластина, 2 – разделительное кольцо, 3 – коллекторная пластина); (в) Корпус устройства и пробоотборная корзина с каскадными элементами.

Отбор радиоактивного аэрозоля осуществляется при объемном расходе 20 л/мин, что соответствует средней скорости дыхания человека в соответствии с п.4.2 НРБ-99/2009 [36].

Длительность отбора пробы определяется уровнями объемной активности радионуклидов в воздухе, а также МДА измерительной аппаратуры. Измерение активности, накопленной на коллекторных пластинах и фильтре, производится с помощью спектрометрических или радиометрических приборов. Технология изготовления устройства отработана на базе ООО НПП «Доза».

3.4 Экспериментальное исследование характеристик импактора-фантома

Исследования экспериментальных характеристик импактора-фантома проводились на базе специального стенда, внешний вид которого представлен на рисунке 3.15а. Стенд представлял собой замкнутый куб из фанеры объемом 8 м^3, оснащенный наблюдательными

окнами, монтажной полкой для хранения инвентаря, а также поворотными колесами для обеспечения мобильности.

а

б

Рис.3.15 а- Внешний вид экспериментального стенда; б – общий вид экспериментальной установки.

Схема эксперимента показана на рисунке 3.16. Счетная концентрация аэрозолей на входе и выходе из импактора-фантома 4 с одним каскадом измерялась посредством двух оптических счетчиков HandHeld 3016 IAQ (счетные каналы 0,3/0,5/1/2,5/5/10 мкм), подключенных посредством изокинетических трубок 3. Для повышения эффективности осаждения на поверхность коллекторной пластины каскада предварительно наносилась вакуумная смазка.

В качестве источника полидисперсных аэрозолей применялась поваренная соль, предварительно просеянная через сито размером ячейки 1 мм. Частицы NaCl распылялись из пластикового дозатора 8 (с диаметром сопла ~ 8 мм), подвешенного к потолку стенда (всего в эксперименте использовалось 4 дозатора, которые последовательно запускались в работу). На дне стенда был размещен вентилятор 9 для замедления процесса седиментации. Для предотвращения засорения побудителя расхода 7 в схему был включен аллонж 6 с фильтром.

Выбор солей NaCl обусловлен необходимостью применения вещества с известной плотностью для перехода от физического диаметра, измеряемого оптическими счетчиками, к аэродинамическому. Известно, что в оптических счетчиках, тонкая струя аэрозоля прокачивается через сфокусированный луч света от источника излучения (лазера), причем диаметр струи подбирается таким образом, чтобы в луче находилось не более одной аэрозольной частицы. Свет, рассеянный частицей, собирается оптической схемой и направляется на фотоприемное устройство. Световые импульсы преобразуются

фотоприемником в электрические импульсы, амплитуда которых пропорциональна *геометрическому* размеру частиц.

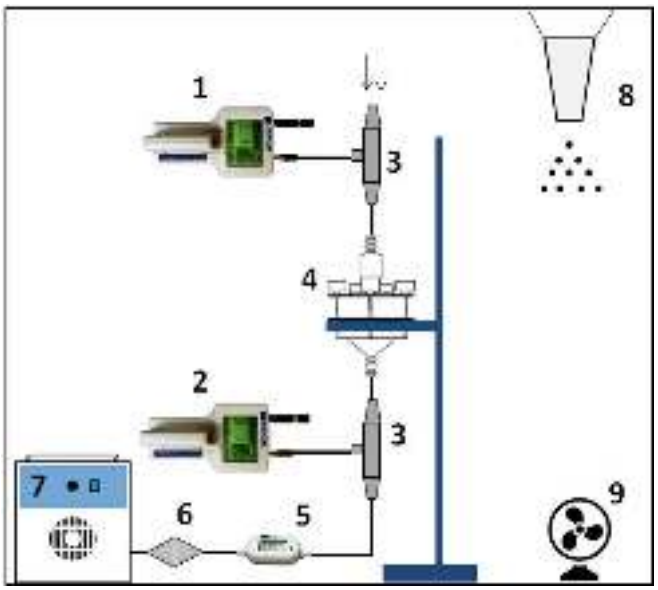


Рисунок 3.16 Схема экспериментальной установки: 1 – Оптический счетчик, измеряющий счетную концентрацию аэрозолей на входе в импактор; 2 – Оптический счетчик, измеряющий счетную концентрацию на выходе; 3 – изокинетические трубки; 4 – импактор-фантом с одним каскадом; 5 – цифровой ротаметр TSI; 6 – аллонж с фильтром; 7 – побудитель расхода; 8 - пластиковый дозатор с NaCl; 9 - вентилятор

Аэродинамический и физический диаметры связаны между собой следующим соотношением [60]:

$$d_{\text{аэр}} = d_{\text{физ}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0} \cdot \frac{C_{\text{физ}}}{\text{C}_{\text{аэр}}} \cdot \frac{1}{\text{X}}} \qquad (3.16)$$

Где $d_{аэ}$ – аэродинамический диаметр; $d_{физ}$ – физический диаметр; ρ_p – плотность частиц, (2,16 г/см^3 для NaCl); ρ_0 = 1 г/см^3; $C_{физ}$ – поправка Каннингема для физического диаметра; $C_{аэр}$ - поправка Каннингема для аэродинамического диаметра; X – форм-фактор.

При $d_{физ}$ >> l (средняя длина свободного пробега газовых молекул, l = 0,066 мкм при нормальном атмосферном давлении и T = 20^{0}C) $C_{физ}$ = $C_{аэр}$ = 1, а также при X =1, верно следующее упрощенное выражение:

$$d_{аэ} = d_{\text{физ}} \cdot \sqrt{\rho_p} \qquad (3.17)$$

На рисунке 3.17 показан пример временной динамики счетной концентрации аэрозолей в различных каналах счетчика на входе в импактор. График разбит на минутные интервалы, для каждого по средним значениям счетной концентрации в каналах была рассчитана медиана логнормального распределения. Как видно, дисперсный состав в камере достаточно нестабильный – после прекращения распыления медиана стремительно падает – от 4,83 мкм до 2,1 мкм (физический диаметр) вследствие быстрого осаждения крупнодисперсных частиц (каналы 5, 10 мкм).

Для расчета эффективности осаждения брались средние значения счетных концентраций на временных участках, где счетная концентрация была максимальна (окончание периода распыления) (для примера на рисунке 3.17 – второй временной интервал с медианой 3,62 мкм). Эксперимент повторялся несколько раз, после чего рассчитывалось среднее значение счетной концентрации на входе и выходе из импактора.

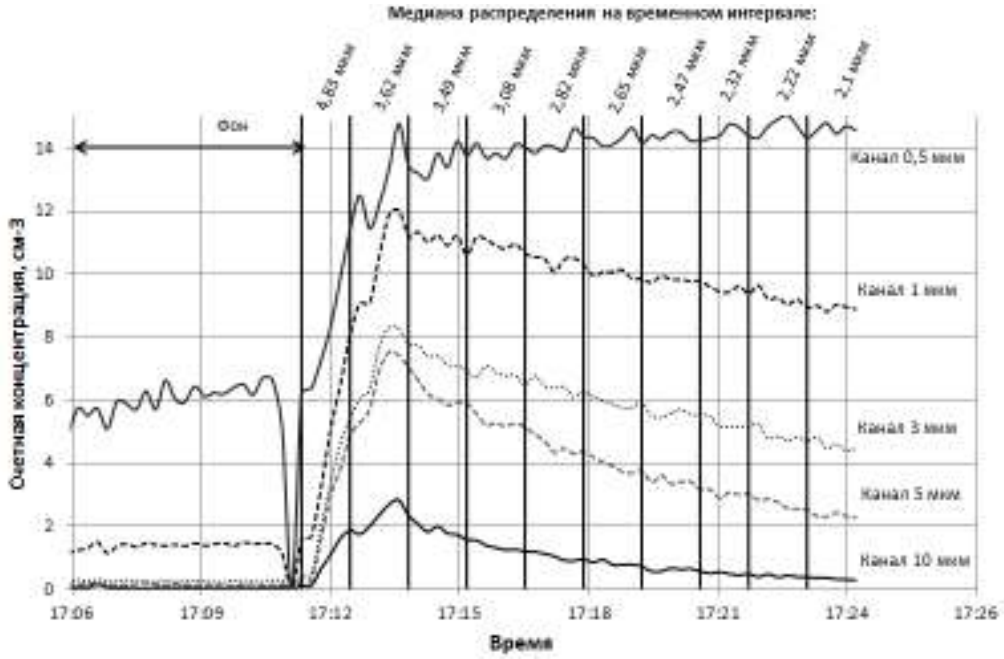


Рисунок 3.17 Временная динамика счетной концентрации аэрозолей входе эксперимента (указан физический диаметр)

Эффективность осаждения частиц для i-го канала оптического счетчика рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_i = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot 100\% \qquad (3.18)$$

где: N_1 – средняя счетная концентрация частиц в i-ом канале на входе в импактор; N_2 – средняя счетная концентрация частиц в i-ом канале на выходе из импактора

Абсолютная погрешность ∈ рассчитывалась по следующей формуле:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial N_2} = -\frac{1}{N_1}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial N_1} = \frac{\partial (N_2 \cdot N_1^{-1})}{\partial N_1} = \frac{N_2}{N_1^2}$$

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial N_2}\cdot\Delta N_2\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial N_1}\cdot\Delta N_1\right)^2}$$

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_2}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_1\cdot N_2}{N_1^2}\right)^2} \qquad (3.19)$$

В табл.3.6. приведены размерные интервалы, соответсвующие каналам оптических счетчиков, используемых в эксперименте. При построении графиков зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра использовалось значение середины интервала аэродинамических диаметров (для NaCl) в соответсвующем канале.

Для адекватного сравнения зависимостей эффективности осаждения от аэродинамического диаметра, полученных в эксперименте и в результате численного моделирования, в случае последних брались средние значения эффективностей осаждения в интервалах аэродинамических диаметров, указанных в табл.3.6.

Табл.3.6 Каналы оптического счетчика HandHeld 3016 и соответствующие им размерные интервалы

Канал счетчика	Физический диаметр	Аэродинамический диаметр (NaCl, ρ = 2,165г/см^3)	
		Интервал	Середина интервала
0,3	0,3 – 0,5	0,4 – 0,7	0,6
0,5	0,5 – 1	0,7 – 1,5	1,1
1	1 – 2,5	1,5 – 3,7	2,6
2,5	2,5 – 5	3,7 – 7,4	5,5
5	5 - 10	7,4 – 14,7	11
10	10 - 20	14,7 – 29,4	22,1

Экспериментальные зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра для каскадов импактора-фантома представлены на рисунках 3.18(а-е). Погрешность по оси абсцисс рассчитывалась методом Корнфельда.

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \qquad (3.20)$$

Где x_{max}, x_{min} – граничные значения интервалов аэродинамических диаметров, соответствующих каналам оптическиго счетчика для частиц NaCl (табл.3.6)

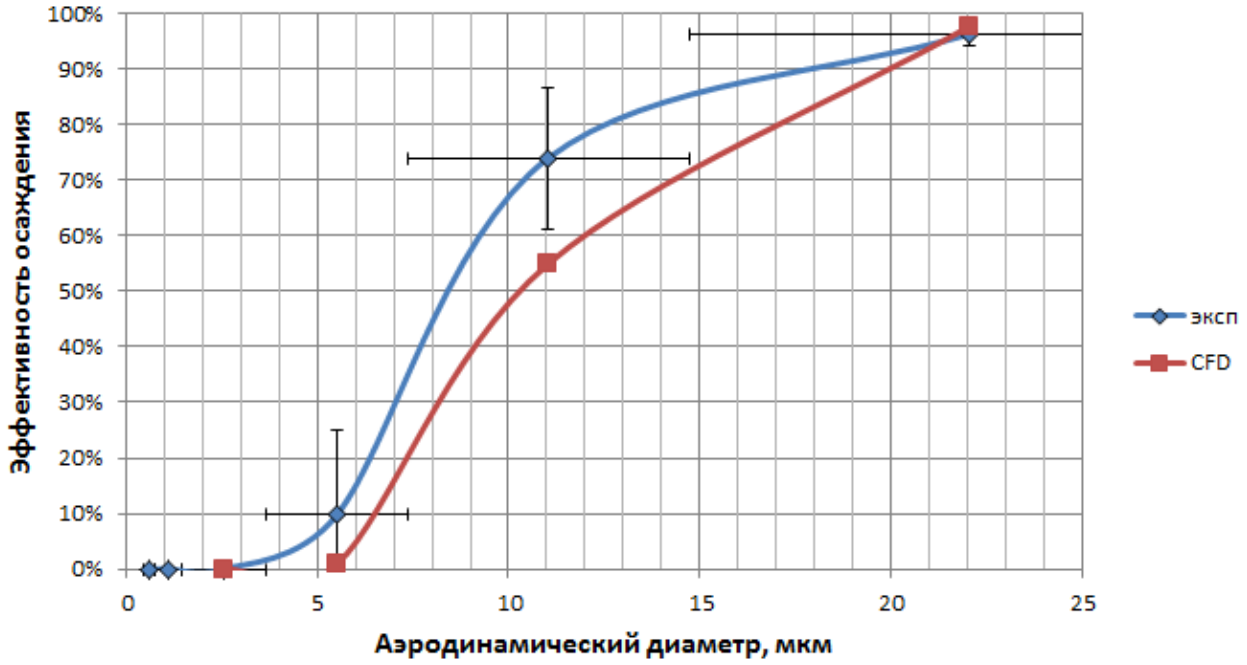


Рисунок 3.18а Каскад 1, зависимость эффективности осаждения от аэродинамического диаметра (эксперимент и численное моделирование)

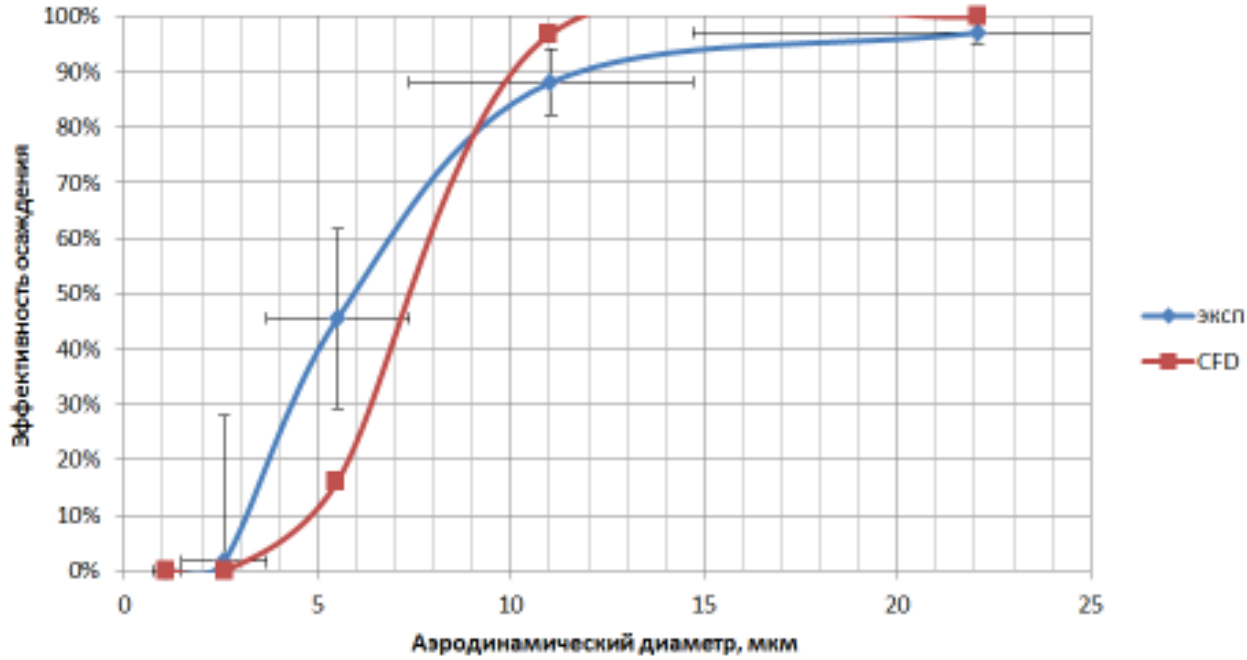


Рисунок 3.18б Каскад 2, зависимость эффективности осаждения от аэродинамического диаметра (эксперимент и численное моделирование)

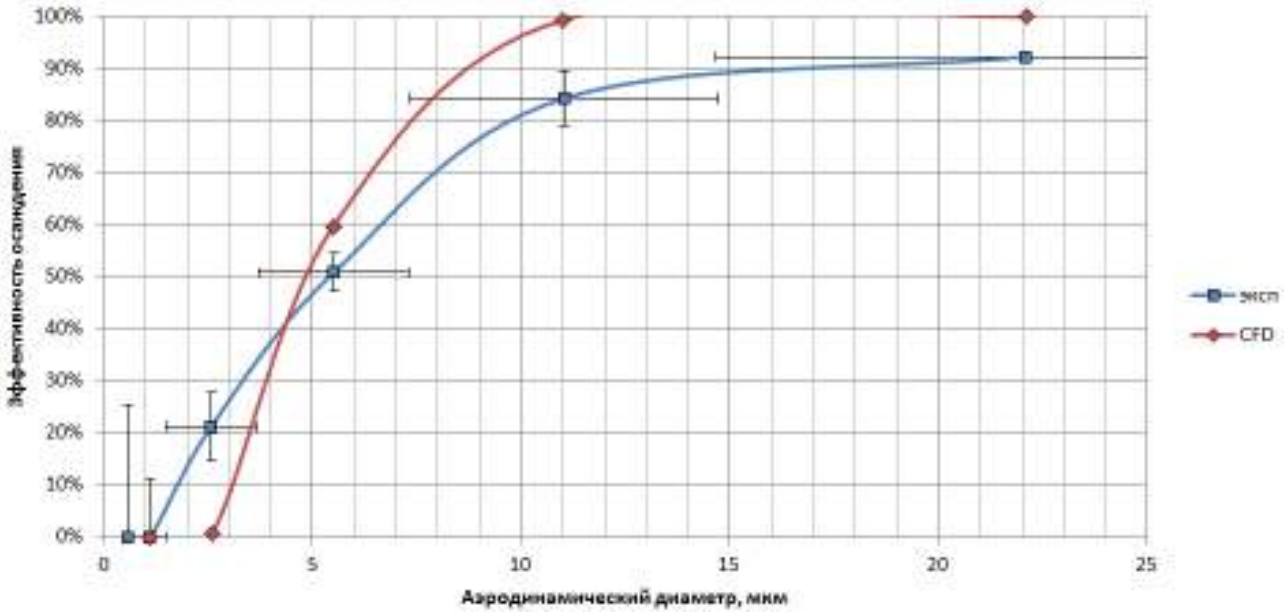


Рисунок 3.18в Каскад 3, зависимость эффективности осаждения от аэродинамического диаметра (эксперимент и численное моделирование)

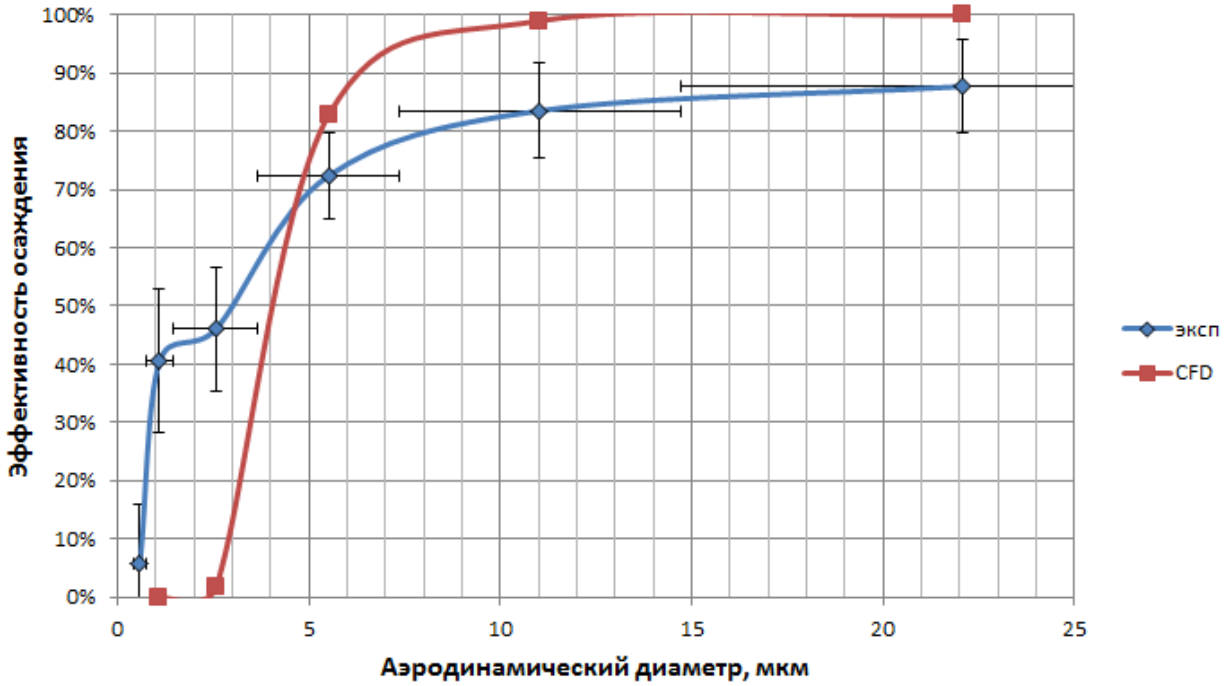


Рисунок 3.18г Каскад 4, зависимость эффективности осаждения от аэродинамического диаметра (эксперимент и численное моделирование)

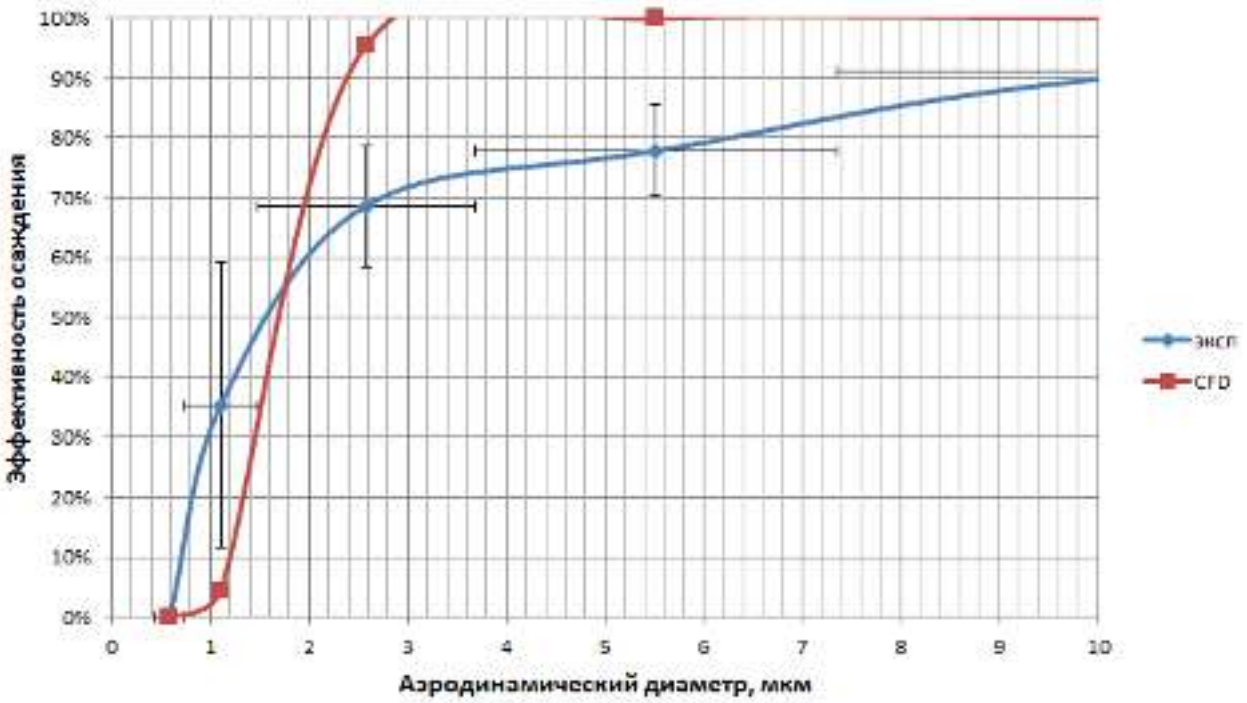


Рисунок 3.18д Каскад 5, зависимость эффективности осаждения от аэродинамического диаметра (эксперимент и численное моделирование)

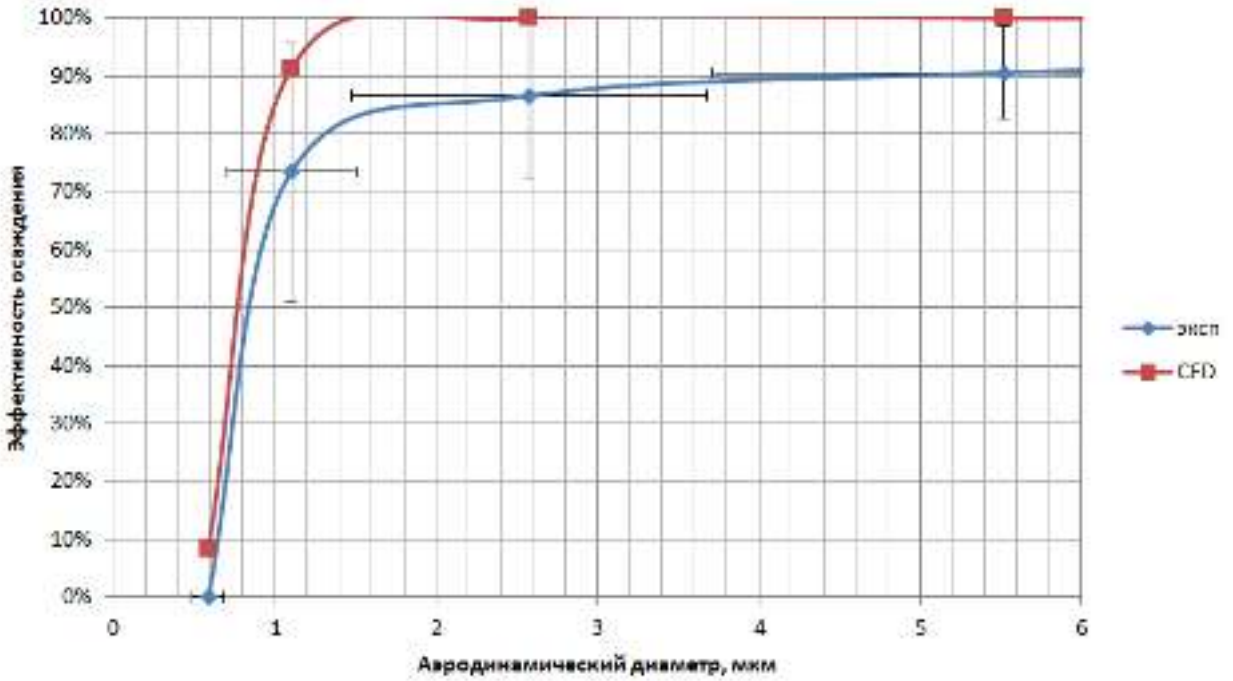


Рисунок 3.18е Каскад 6, зависимость эффективности осаждения от аэродинамического диаметра (эксперимент и численное моделирование)

Как видно из табл.3.7, экспериментальные значения D_{50} для первых четырех каскадов находятся в достаточно хорошем сооветствии с требуемыми значениями (относительная

погрешность варьируется от 7 до 21%). Наибольшие различия (как в эксперименте, так и по численному моделированию) наблюдаются для двух последних каскадов. В случае эксперимента, это может быть связано с отклонениями в диаметрах сопел при изготовлении устройства, в случае CFD-моделирования – указывает на необходимость проведения моделирования на сетке с меньшим размером ячеек.

Табл.3.7 Сравнение экспериментальных и численных значений D_{50}

Каскад	D_{50}, мкм			d	
	Требуемый	CFD*	Эксп	CFD	Эксп
1	9,0	10,3	8,4	14%	7%
2	5,9	7,3	6,0	24%	2%
3	4,7	4,8	5,4	2%	15%
4	3,3	4,0	3,0	21%	9%
5	1,1	1,7	1,6	55%	45%
6	0,43	0,76	0,83	77%	93%

* значения D_{50} по численному моделированию отличаются от представленных ранее в табл.3.5, т.к. для корректного сравнения с экспериментом брались средние значения эффективностей осаждения в интервалах аэродинамических диаметров, соответствующих каналам оптического счетчика для частиц NaCl (табл.3.6)

3.5 Оценка МДА по различным радионуклидам

Была выполнена оценка МДА на полупроводниковом гамма-спектрометре Canberra с широкополосным германиевым детектором (серия BeGe) по различным радионуклидам, т.е. при каком значении объемной активности радионуклида в воздушной среде возможно получить достоверные значения активности на каждом каскаде импактора-фантома. Расчет минимальной детектируемой активности выполнялся с помощью программного комплекса Genie-2000. Для расчета МДА применялся метод Курье. В расчете на единицу массы (или объема) МДА определяется как:

$$MDA = \frac{L_D}{T_l \varepsilon' y V K_C K_w K_x C_f U_f} \qquad (3.21)$$

Где:

L_D – предел регистрации, минимальный сигнал, который может быть достоверно зарегистрирован; T_l – живое время измерения в секундах; ε’ – эффективность с

поправкой на ослабление; y – выход при энергии пика ; V – масса (или объем) образца; K_c – коэффициент поправки на распад нуклида во время измерения; K_w – коэффициент поправки на распад нуклида со времени отбора пробы до начала измерения; K_x – коэффициент поправки на распад во время осаждения на воздушных фильтрах; C_f – массовый (или объемный) коэффициент преобразования для приведения вычисленной величины активности к оригинальной массе образца, если измерявшаяся масса является только частью всего образца; U_f – коэффициент для преобразования активности в Бк или в выбранную для отчета единицу.

Оценка МДА была выполнена по радионуклидам ^{137}Cs и ^{106}Ru, при предположении, что активность аэрозольной составляющей равномерно распределена по восьми каскадам импактора-фантома. Для расчета использовались значения объемных активностей над развалом 4-го блока ЧАЭС 28.08.1986 [39], а также данные из ежегодного отчета НПО «Тайфун» [37]. Результаты расчетов представлены в табл. 3.8а.

Таблица 3.8а Оценка МДА по различным нуклидам

Нуклид	МДА, Бк за время изм. 251226 с	Тип ситуации	Объемная активность, Бк/м^3	Время отбора (при 20 л/мин)
Cs-137	0,03	Штатная (СЗЗ Балаковской АЭС)*	$6{,}48 \cdot 10^{-7}$	12860 дн
		Аварийная** (над развалом 4-го блока ЧАЭС 28.08.86)	55,5	13 с
Ru-106	0,59	Штатная (10 км на северо-восток, граница СЗЗ ГХК)***	$< 10^{-6}$	163889 дн
		Аварийная** (над развалом 4-го блока ЧАЭС 28.08.86)	137	103 с
		г. Бухарест, Румыния**** 30.09.17 12:00	0,145	14,8 ч

* НПО «Тайфун» Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году, стр.153 табл. 3.1.3 [37]

** Б.И. Огородников, Э.М. Пазухин Радиоактивные аэрозоли объекта "Укрытие" (обзор). Часть 4.1 Источники и генерация радиоактивных аэрозолей в 1986 г., стр.22, табл.3 [39]

*** НПО «Тайфун» Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году, стр.261 табл. 3.12.4 [37]

**** Technical Attachment. Status of Measurements of Ru-106 in Europe, IAEA, 2017-10-13 at 19:00 UTC

Полученные результаты (табл.3.8а) показывают, что при отборе пробы в полевых условиях применение импактора-фантома целесообразно в основном в аварийных ситуациях.

3.6 Оценка неопределенности при расчете АМАД

Оценку неопределенности при расчете АМАД проводили следующим образом: генерировали случайное значение активности на каскадах в диапазоне ± 20% от исходной активности аэрозольных частиц, осажденных на каскадах импактора при АМАД = 1 мкм βg = 2,5. Процедуру повторяли 100 000 раз. Из полученных выборок АМАД и βg находили минимальные и максимальные значения. Неопределенность рассчитывали методом Корнфельда (формула 3.20). Результаты расчетов представлены в таблице 3.8б.

Таблица 3.8б Результаты расчета неопределенности при погрешности измерения активности аэрозольных частиц на каскадах ±20%.

Число каскадов (включая фильтр)	D_{50}, мкм	Параметр ЛНР	Min	Max	Среднее значение	Δ	δ
8	23; 9; 5,8; 4,7; 3,3; 1,1; 0,43	АМАД	0,88	1,15	1,0	0,13	13,0%
		β_g	2,34	2,66	2,5	0,16	6,4%
6	23; 9; 5,8; 3,3; 1,1	АМАД	0,79	1,23	1,0	0,22	21,6%
		β_g	2,32	2,71	2,5	0,20	7,9%
4	9; 5,8; 1,1	АМАД	0,77	1,24	1,0	0,24	23,6%
		β_g	2,23	2,86	2,5	0,32	12,4%

В состав конструкции ФРТЧ входит 8 каскадов. Неопределенность расчета АМАД в данном случае составит 13% (табл.3.8б).

3.7 Применение импактора-фантома для анализа дисперсного состава воздуха производственной среды

3.7.1 ФГУП «ПО «Маяк», завод 45

В 2013 г. лабораторией № 25 ФМБЦ им. А.И. Бурназяна проводились исследования физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей на технологических участках завода 45 ФГУП «ПО «Маяк» по производству радиоизотопных источников на цепочке Н. Результаты представлены в отчете «Исследование особенностей формирования аэродисперсных систем на предприятии ФГУП ПО «Маяк», НИР «Защита», исх. № 5-02/2091 от 5.11.2014 [33]. Цепочка «Н» выпускает: источники нейтронного излучения на основе плутония-239, плутония-238 и америция-241; источники гамма-излучения на основе америция-241. Выход аэрозолей в операторскую в основном обусловлен разрывом каландрованных перчаток – 1-5 случаев в год. Отбор проб аэрозолей проводился с 26 по 27.09.2013 в операторской и ремонтной зоне 319. В операторской 319 расположены: горячая камера, где осуществляется прессование таблеток, предварительное измерение потока нейтронов от таблеток нейтронных источников, изготовление активных частей для источников гамма-излучения и измерение мощности амбиентного эквивалента дозы от них; тяжелый бокс, где осуществляется хранение препаратов плутония и америция и порошка бериллия, взвешивание технологических смесей.

В ремонтной зоне 319 был установлен импактор АИП-2. В операторской 319 – импактор Андерсена и импактор-фантом респираторного тракта человека. Импактор АИП-2 защищен патентом РФ (RU 2239815), прошел испытания и внесен в Государственный реестр средств измерений (сертификат федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.E.27.002.A №19112). Характеристики отобранных проб и результаты исследования дисперсного состава аэрозолей представлены в таблицах 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9 Характеристики проб, отобранных на цепочке Н с 26 по 27.09.2013

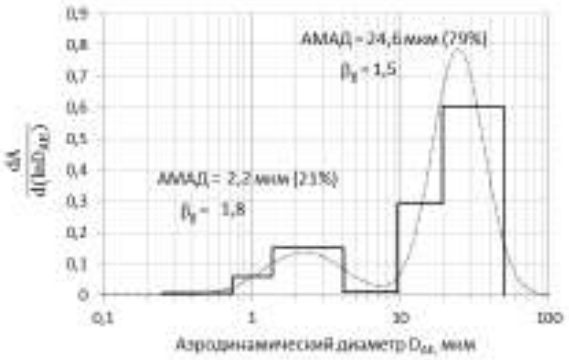
№ пробы	Точка	Импактор	Средний объемный расход, л/мин	Длительность, мин	Отобранный объем, м3
1.1	Ремзона 319	АИП-2	40	1750	70
2.2	Операторская 319	ФРТЧ	20	1850	37
2.3		импактор Андерсена	60	1830	109,8

Таблица 3.10 Результаты исследований дисперсного состава аэрозолей в операторской и ремонтной зоне 319 цепочки Н завода 45 ФГУП «ПО «Маяк».

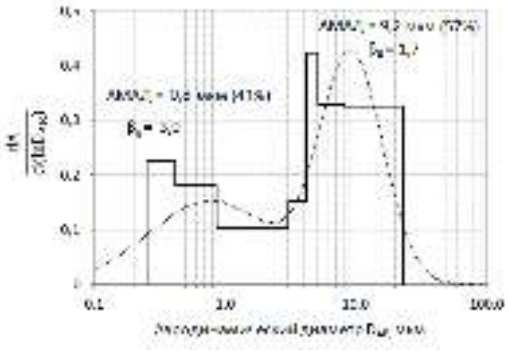
Цепочка	Место отбора	№ пробы	Импактор	Фракция I			Фракция II		
				АМАД, мкм	β_g	k_1	АМАД, мкм	β_g	k_2
Н	РЕМ-ЗОНА	1.1	АИП-2	**2,2**	1,8	21%	**24,6**	1,5	79%
	ОПЕР.ЗОНА	2.2	Импактор-фантом	**0,8**	3,0	43%	**9,3**	1,7	57%
		2.3	импактор Андерсена	**1,2**	2,2	18%	**10,1**	1,7	82%

k_1, k_2 - доля активности с данным АМАД

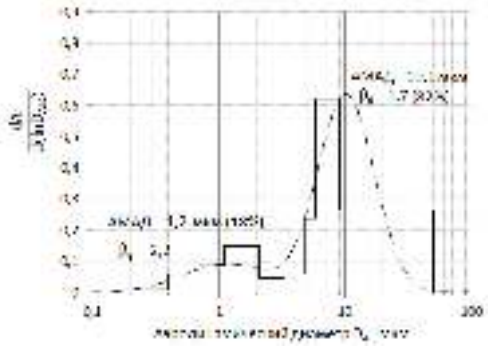
Распределение, восстановленное в **ремонтной зоне** (рисунок 3.19а), имеет бимодальный характер с двумя модами – 2,2 мкм и 24,6 мкм. Данные с импакторов, установленных в **операторской,** несколько разнятся между собой, но в целом указывают на бимодальный характер распределения. Значение первой моды варьируется от 0,8 до 1,2 мкм; значение второй моды – от 9,3 до 10,1 мкм.



а) 1.1. АИП, ремзона 319



б) 2.2 Импактор-фантом, операторская 319



в) 2.3 Импактор Андерсена, операторская 319

Рисунок 3.19 Распределения активности по аэродинамическим диаметрам на цепочке «Н», завод 45.

Есть взять средние значения по импактору-фантому и импактору Андерсена, то характеристики распределения будут следующие:

Фракция 1: АМАД = 1,0 мкм, βg = 2,6, вклад в активность - 30%

Фракция 2: АМАД = 9,7 мкм, βg = 1,7, вклад в активность - 70%

С учетом установленного в ходе исследований радионуклидного состава: ^{241}Am – 65%, $^{238+239}$Pu – 35% и типа химического соединения при ингаляции – М (доля активности, перешедшая в имитатор легочной жидкости на 30 сутки составила 3,6%, на 180 сутки – 5%) были рассчитаны значения дозовых коэффициентов, ПГП и ДОА для операторской и ремонтной зоны 319 цепочки Н (таблица 3.11 и 3.12) (в базе данных МКРЗ [80] дозовые коэффициенты для Am-241 тип М отсутствуют, поэтому в расчете использовались дозовые коэффициенты для типа П).

Таблица 3.11 Дозовый коэффициент, ПГП и ДОА для операторской 319, цеп.Н завод 45 ФГУП «ПО «Маяк»

Нуклид	Нуклидный состав	Тип хим. соед. при инг.	Вклад в активность аэрозолей с данным АМАД		Доз.коэф МКРЗ для АМАД, Зв/Бк		Доз.коэф Зв/Бк	ПГП, Бк	ДОА, Бк/м3
			1 мкм	10 мкм	1 мкм	10 мкм			
Am-241	0,65	П	0,3	0,7	3,9E-05	1,7E-05	1,E-05	1100	0,45
Pu-239	0,35	М			1,5E-05	5,9E-06			

Таблица 3.12 Дозовый коэффициент, ПГП и ДОА для ремзоны 319, цеп.Н завод 45 ФГУП «ПО «Маяк»

Нуклид	Нуклидный состав	Тип хим. соед. при инг.	Вклад в активность аэрозолей с данным АМАД		Доз.коэф МКРЗ для АМАД		Доз.коэф Зв/Бк	ПГП, Бк	ДОА, Бк/м3
			1 мкм*	10 мкм	1 мкм	10 мкм			
Am-241	0,65	П	0,21	0,79	3,9E-05	1,7E-05	1,7E-05	1200	0,5
Pu-239	0,35	М			1,5E-05	5,9E-06			

*фактическое значение АМАД для первой моды распределения составило 2,2 мкм (рисунок 3.19а), но т.к. дозовый коэффициент для АМАД = 2 мкм в базе МКРЗ [80] отсутствует, данной фракции частиц приписывается дозовый коэффициент для АМАД = 1 мкм

При отсутствии экспериментальных данных для оценки дозы внутреннего облучения персонала используют дозовый коэффициент для ^{241}Am соответствующий АМАД 1 мкм (3,9E-5 Зв/Бк) (Приложение 1 к НРБ-99/2009). Применение рассчитанных в ходе исследований значений дозовых коэффициентов 1,8E-05 Зв/Бк для операторской и 1,7E-05 Зв/Бк для ремзоны, позволяет устранить систематическое завышение оценки ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения для лиц из персонала в 2 раза.

С помощью метода, описанного в Главе 2, для распределения представленного на рисунке 3.19б (восстановленного с помощью импактора-фантома) были рассчитаны доли активности аэрозолей, осажденных в различных отделах дыхательного тракта:

Таблица 3.13 Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте (для распределения на рисунке 3.19 б)

Фракция 1			Фракция 2			Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте				
АМАД, мкм	β_g	Вклад в активность, %	АМАД, мкм	β_g	Вклад в активность, %	ET_1	ET_2	BB	bb	AI
0,8	3,0	43	9,2	1,7	57	28,7%	32,0%	1,3%	1,0%	5,1%

Как видно из таблицы 3.13, наибольшая доля осажденной активности приходится на экстраторакальный отдел (область ET_2).

Для расчета H_{ET} и H_{TH}, фракции 1 бимодального распределения из таблицы 3.13 может быть приписан дозовый коэффициент из базы данных МКРЗ [80] для АМАД 1 мкм, а фракции 2 – дозовый коэффициент для АМАД 10 мкм (таблица 3.14).

Таблица 3.14 Дозовые коэффициенты $h_T(50)^{inh}$ для Pu-239 тип М и Am-241 тип П для значений АМАД 1 мкм и 10 мкм для различных областей респираторного тракта

Область респираторного тракта	$h_T(50)^{inh}$, Зв/Бк			
	Pu-239 тип М		Am-241 тип П	
	1 мкм	10 мкм	1 мкм	10 мкм
ET1	1,0E-06	1,6E-06	1,7E-05	3,0E-05
ET2	4,2E-05	7,7E-05	9,9E-06	1,4E-05
BBsec	6,5E-05	3,4E-05	6,4E-05	3,4E-05
BBbas	4,4E-06	4,1E-06	7,7E-06	5,1E-06
bb	6,2E-05	1,6E-05	4,5E-05	1,2E-05
AI	1,4E-04	3,1E-05	2,0E-05	5,0E-06

По данным таблицы 3.14 рассчитали дозовые коэффициенты для различных областей респираторного тракта для смеси радионуклидов Pu-239 тип М и Am-241 тип П (с учетом установленного в ходе исследований нуклидного и дисперсного состава радиоактивных аэрозолей (таблица 3.15).

Таблица 3.15 Дозовые коэффициенты для смеси радионуклидов Pu-239 тип М и Am-241 тип П для значений АМАД 1 мкм и 10 мкм для различных отделов респираторного тракта с учетом нуклидного и дисперсного состава

Обл. респ. тракта	Нуклидный состав		$h_T(50)^{inh}$ для смеси нуклидов, Зв/Бк		Вклад в суммарную активность аэрозолей с данным АМАД		$h_T(50)^{inh}$ с учетом нуклидного и дисперсного состава, Зв/Бк
	Am-241	Pu-239	1 мкм	10 мкм	1 мкм	10 мкм	
ET1	65%	35%	1,1E-05	2,0E-05	43%	57%	**1,6E-05**
ET2			2,1E-05	3,6E-05			**3,0E-05**
BBsec			6,4E-05	3,4E-05			**4,7E-05**
BBbas			6,5E-06	4,8E-06			**5,5E-06**
bb			5,1E-05	1,3E-05			**3,0E-05**
AI			6,2E-05	1,4E-05			**3,5E-05**

Объемная активность в операторской 319 по данным альфа-радиометрии каскадов импактора-фантома составила 9,3E-4 Бк/м^3. При годовом объеме вдыхаемого воздуха для персонала 2400 м^3 (п.8.2 НРБ-99/2009) ингаляционное поступление в год составит 2,2 Бк. Рассчитанные значения ожидаемых эквивалентных доз облучения в год экстраторакального H_{ET} и торакального H_{TH} отделов составили 21,2 мкЗв и 1,7 мкЗв соответственно (таблица 3.16)(без учета активности, депонированной в лимфатических узлах).

Таблица 3.16 Активность аэрозольных частиц, осажденных в отделах респираторного тракта (для распределения на рисунке 3.19 б) и рассчитанные значения H_{ET} и H_{TH}.

Ингаляционное поступление, Бк в год	Активность аэрозольных частиц, осажденных в отделах респираторного тракта, Бк					
	ET1	ET2	BBsec	BBbas	bb	AI
2,2	0,64	0,71	0,015	0,015	0,02	0,11
$h_T(50)^{inh}$, Зв/Бк (из табл.3.15)	1,6E-05	3,0E-05	4,7E-05	5,5E-06	3,0E-05	3,5E-05
Ожидаемая эквивалентная доза H_T, мкЗв	1,0E-05	2,1E-05	6,8E-07	8,0E-08	6,6E-07	3,9E-06
Взвешивающий коэффициент A_T	0,001	1,0	0,167	0,167	0,333	0,333
H_{ET}, мкЗв	21					
H_{TH}, мкЗв	1,7					

3.7.2 Химико-металлургический завод АО «СХК»

В 2014 году лабораторией № 25 ФМБЦ им. А.И. Бурназяна проводились исследования физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей ХМЗ АО «СХК». Результаты исследований представлены в отчете о выполнении работ «Комплексное обследование радиоактивных аэрозолей производств ХМЗ «СХК» Договор № 27/02-0399 от 28.03.2014 г. (Инв. № Ц-602)». Химико-металлургическое производство плутония предназначено для получения плутония и очистки его от примесей. Отбор проб проводился на участке металлургии вблизи установок 08 и 11 (рисунок 3.20). Упрощенная схема технологической цепи на участке отбора проб представлена в таблице 3.17.

Установка 07 предназначена для получения диоксида плутония путем прокалки оксалата $Pu(C_2O_4)_2$ и передачи его для дальнейшей обработки на установку 08.

Установка 08 предназначена для хлорирования диоксида плутония и передачи хлорида плутония на дальнейшую переработку на установку 11.

Установка 11 предназначена для получения черновых слитков плутония методом проведения восстановительных плавок в индукционной печи. Исходным сырьем является хлорид плутония и металлический плутоний. Конечным продуктом - черновой слиток металлического плутония. Список отобранных проб представлен в таблице 3.18.

Таблица 3.17 Краткая схема технологической цепи на участке отбора проб

Номер установки	Исходный продукт	Выполняемая операция	Конечный продукт
07	Оксалат плутония $Pu(C_2O_4)_2$	Прокалка оксалата плутония	PuO_2
08	PuO_2	Хлорирование PuO_2	$PuCl_3$
11	$PuCl_3$	Восстановительная плавка	черновой слиток металлического плутония

Таблица 3.18 - Список проб, отобранных на участке металлургии ХМЗ

Зона	Начало отбора	Конец отбора	Точка	Импактор	Побудитель расхода	Расход, л/мин	Отобранный объем, $м^3$
Опер. зона	18.06.14 10:20	24.06.14 11:15	9	АИП-2	Штатная вакуумная система	45	360,8
	18.06.14 11:25	24.06.14 11:10	12	ФРТЧ	ПУ-АИП-01Д	22,7	197
Рем. зона	18.06.14 15:10	24.06.14 14:00	10	АИП-2	Eberline	55	316,8

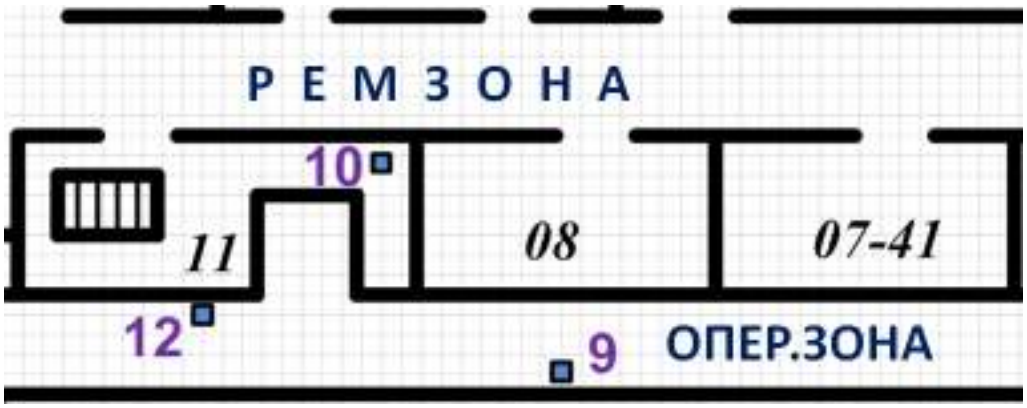
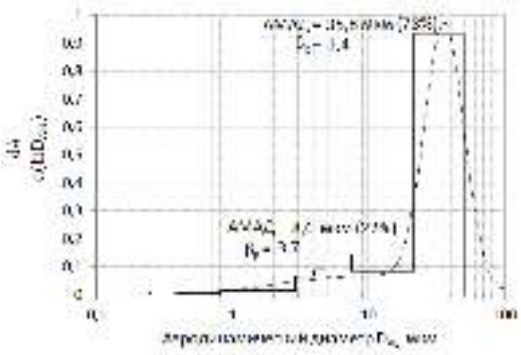
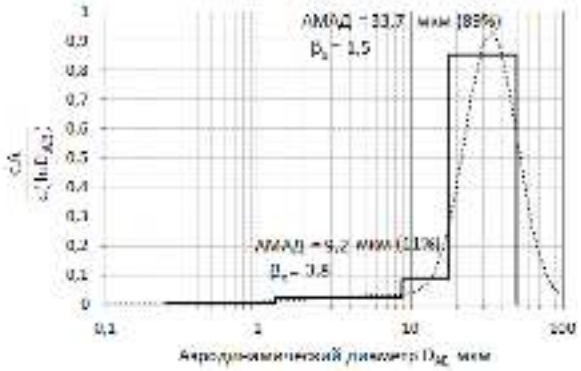


Рисунок 3.20 Схема отбора проб на участке металлургии ХМЗ.

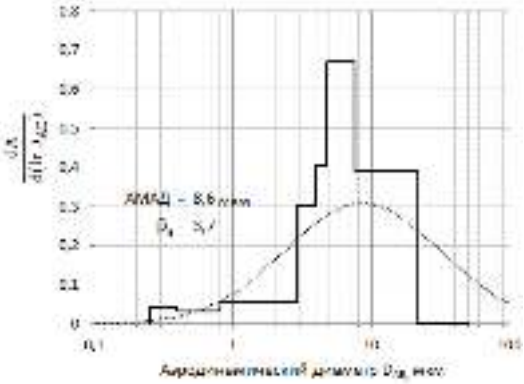
На рисунках 3.21 – 3.22 представлены распределения активности по аэродинамическим диаметрам аэрозольных частиц в операторской и ремонтной зонах на участке металлургии ХМЗ, восстановленные по результатам альфа-радиометрии каскадов импакторов.



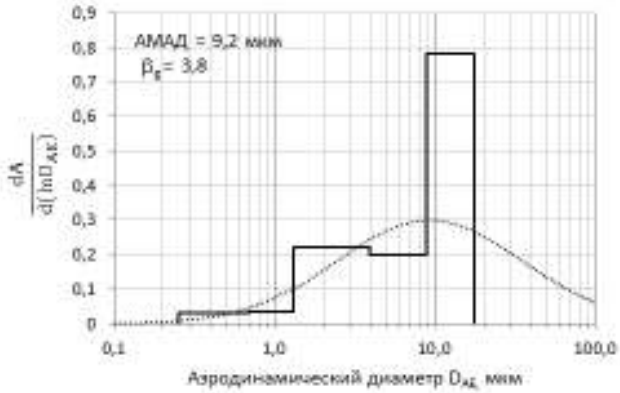
а) Точка № 12 ФРТЧ Все каскады



б) Точка № 9 АИП все каскады



в) Точка № 12 ФРТЧ (без 1-го каскада)



г) Точка № 9 АИП (без 1-го каскада)

Рисунок 3.21 Распределения активности по аэродинамическим диаметрам в операторской зоне на участке металлургии ХМЗ.

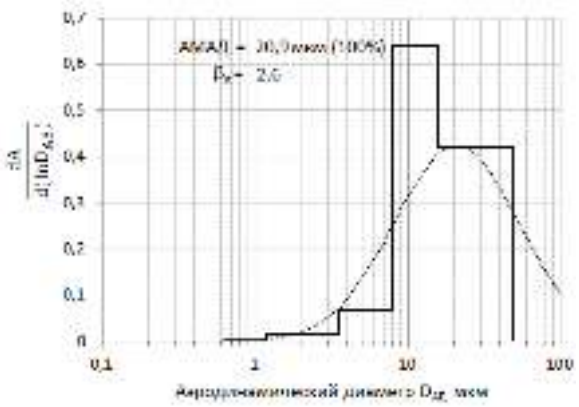


Рисунок 3.22 Точка № 10 АИП-2, распределение активности по аэродинамическим диаметрам в ремзоне на участке металлургии ХМЗ.

Размерный спектр активности аэрозольных частиц в операторской носит бимодальный характер со значительным вкладом в суммарную активность грубодисперсных аэрозолей. Среднее значение АМАД первой фракции (по двум пробам, отобранным в операторской) составило 8,9 мкм (β_g = 3,8, вклад 16,5%), среднее значение АМАД грубодисперсной фракции: 35 мкм (β_g = 1,5, вклад 83,5%). Значение АМАД в ремзоне установки 11 составило 21 мкм, β_g = 2,6.

Таким образом, аэрозолям производственной среды участка металлургии ХМЗ в операторской и ремонтой зонах может быть приписан дозовый коэффициент для значения АМАД 10 мкм.

Рассчитанные значения дозового коэффициента, ПГП и ДОА с учетом нуклидного состава и типа при ингаляции представлены в таблице 3.19 (для консервативной оценки в расчете использовались дозовые коэффициенты из базы МКРЗ [80] для АМАД 5 мкм).

Таблица 3.19 Дозовый коэффициент, ПГП и ДОА для участка металлургии ХМЗ (операторская и ремзона), установленные в результате исследований.

АМАД, мкм	Тип при ингаляции	Доз.коэф из базы МКРЗ для данного АМАД, Зв/Бк			Нуклидный состав			Доз.коэф.для данного нуклидного состава, Зв/Бк	ПГП, Бк	ДОА, Бк/м^3
		Pu-239	Pu-238	Am-241	Pu-239	Pu-238	Am-241			
5	П	3,2E-5	3,0E-5	2,7E-5	53,9%	0,6%	45,4%	3,0E-5	670	0,28

Дозиметрический контроль на предприятии ведется по Pu-239 тип П (дозовый коэффициент – 4,7E-05 Зв/Бк). Применение рассчитанного в ходе исследований значения дозового коэффициента позволяет устранить систематическое завышение оценки ОЭД для лиц из персонала в 1,6 раз.

Полученное значение ДОА менее консервативно, по сравнению с используемым на предприятии, т.к. в НРБ-99/2009 приведено значение ДОА для Pu-239 тип П (АМАД 1 мкм), рассчитанное из значения ПГП, приведенного в НРБ-76/87 (78 Бк).

Рассчитанные значения ПГП и ДОА для Pu-239 тип П в зависимости от дозовых коэффициентов для различных значений АМАД из базы данных МКРЗ [80] приведены в таблице 3.20.

Таблица 3.20 Значения ПГП и ДОА, рассчитанные на основе дозовых коэффициентов из базы данных МКРЗ [80] для различных значений АМАД для Pu-239 тип П

АМАД, мкм	Дозовый коэффициент, Зв/Бк	ПГП, Бк	ДОА, Бк/м3
0,001	3,0E-05	667	0,28
0,003	6,3E-05	317	0,13
0,01	1,5E-04	133	0,06
0,03	**2,1E-04**	**95**	**0,04**
0,1	1,1E-04	182	0,08
0,3	5,9E-05	339	0,14
1	**4,7E-05**	**426**	**0,18**
3	4,1E-05	488	0,20
5	3,2E-05	625	0,26
10	2,0E-05	1000	0,42

Как видно из таблицы 3.20, наиболее консервативное значение ПГП 95 Бк (близкое значению ПГП, приведенному в НРБ-99/2009 – 78 Бк) соответствует значению АМАД 0,03 мкм. При этом, как видно из проведенных исследований до 80% активности аэрозольных частиц в диапазоне аэродинамических диаметров до 0,25 мкм приходится на грубодисперсные аэрозоли.

Если же вести расчет ПГП по дозовому коэффициенту для 1 мкм (который также приведен в НРБ-99/2009 - 4,7E-05 Зв/Бк) – значение ПГП составит 426 Бк. Т.е. в 5,5 раз больше 78 Бк, приведенных в НРБ-99/2009.

Значение ПГП для АМАД 5 мкм составит 625 Бк, что 8 раз больше 78 Бк. Собственно, именно этим фактом (что расчет велся по фактическим дозовым коэффициентам из базы МКРЗ), объясняется менее консервативное значение ДОА, представленное в таблице 3.16 для участка металлургии.

Если бы таблице 3.19 расчет велся по дозовым коэффициентам для АМАД 10 мкм (что соответствует фактическому размерному спектру активности) полученное значение ДОА было бы меньше в 14 раз по сравнению с используемым на предприятии.

С помощью метода, описанного в Главе 2, для распределения, представленного на рисунке 3.21а (восстановленного с помощью импактора-фантома) были рассчитаны доли активности аэрозолей, осажденных в различных отделах дыхательного тракта:

Таблица 3.21 Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте (для распределения на рисунке 3.21 а)

Фракция 1			Фракция 2			Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте				
АМАД, мкм	β_g	Вклад в активность, %	АМАД, мкм	β_g	Вклад в активность, %	ET1	ET2	BB	bb	AI
8,6	3,7	22	35,8	1,4	78	29,0%	30,2%	0,4%	0,2%	0,8%

Наибольшая доля осажденной активности при данном распределении приходится на экстраторакальный отдел (таблица 3.21).

Для расчета H_{ET} и H_{TH}, фракции 1 бимодального распределения из таблицы 3.21 может быть приписан консервативный дозовый коэффициент из базы данных МКРЗ [80] для АМАД 5 мкм, а фракции 2 – дозовый коэффициент для АМАД 10 мкм (таблица 3.22).

Таблица 3.22 Дозовые коэффициенты $h_T(50)^{inh}$ для Pu-239, 238 Am-241 тип П для значений АМАД 5 мкм и 10 мкм для различных областей респираторного тракта

Обл. респ. тракта	$h_T(50)^{inh}$, Зв/Бк					
	Pu-239 тип П		Am-241 тип П		Pu-238 тип П	
	5 мкм	10 мкм	5 мкм	10 мкм	5 мкм	10 мкм
ET1	3,2E-06	2,6E-06	3,0E-05	3,0E-05	3,2E-05	3,2E-05
ET2	1,5E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,4E-05
BBsec	5,2E-05	2,7E-05	6,4E-05	3,4E-05	6,4E-05	3,4E-05
BBbas	5,3E-06	3,6E-06	8,0E-06	5,1E-06	7,8E-06	4,9E-06
bb	2,4E-05	1,2E-05	2,5E-05	1,2E-05	2,5E-05	1,2E-05
AI	9,9E-06	4,7E-06	1,1E-05	5,0E-06	1,0E-05	4,8E-06

По данным таблицы 3.22 рассчитали дозовые коэффициенты для отделов респираторного тракта для смеси радионуклидов Pu-239, 238 Am-241 тип П (с учетом установленного в ходе исследований нуклидного состава), а также – с учетом дисперсного состава (таблица 3.23).

Таблица 3.23 Дозовые коэффициенты $h_T(50)^{inh}$ для смеси радионуклидов Pu-239, 238 и Am-241 тип П для значений АМАД 5 мкм и 10 мкм для различных областей респираторного тракта с учетом дисперсного состава

Обл. респ. тракта	Нуклидный состав			$h_T(50)^{inh}$ для смеси нуклидов, Зв/Бк		Вклад в активность		$h_T(50)^{inh}$ с учетом нуклидного и дисперного состава, Зв/Бк
	Pu-239	Pu-238	Am-241	5 мкм	10 мкм	5 мкм	10 мкм	
ET1	53,9%	0,6%	45,4%	1,6E-05	1,5E-05	22%	78%	**1,5E-05**
ET2				1,5E-05	1,4E-05			**1,4E-05**
BBsec				5,7E-05	3,0E-05			**3,6E-05**
BBbas				6,5E-06	4,3E-06			**4,8E-06**
bb				2,4E-05	1,2E-05			**1,5E-05**
AI				1,0E-05	4,8E-06			**6,1E-06**

Объемная активность в операторской на участке металлургии по данным альфа-радиометрии каскадов импактора-фантома составила 0,05 Бк/м^3. При годовом объеме вдыхаемого воздуха для персонала 2400 м^3 (п.8.2 НРБ-99/2009) ингаляционное поступление в год составит 120 Бк. Рассчитанные значения ожидаемых эквивалентных доз облучения в год экстраторакального H_{ET} и торакального H_{TH} отделов составили 514,3 мкЗв и 4,8 мкЗв соответственно (таблица 3.24)(без учета активности, депонированной в лимфатических узлах).

Таблица 3.24 Активность аэрозольных частиц, осажденных в отделах респираторного тракта (для распределения на рисунке 3.21 а) и рассчитанные значения H_{ET} и H_{TH}

Ингаляционное поступление, Бк в год	Активность аэрозольных частиц, осажденных в отделах респираторного тракта, Бк					
	ET_1	ET_2	BBsec	BBbas	bb	AI
120	34,8	36,24	0,24	0,24	0,24	0,96
$h_T(50)^{inh}$ (из табл.3.23)	1,5E-05	1,4E-05	3,6E-05	4,8E-06	1,5E-05	6,1E-06
Ожидаемая эквивалентная доза H_T, мЗв	0,53	0,51	0,009	0,001	0,004	0,006
Тканевый весовой множитель A_T	0,001	0,998	0,167	0,167	0,333	0,333
H_{ET}, мкЗв	514					
H_{TH}, мкЗв	4,8					

3.7.3 Сублиматный завод АО «СХК»

С 23.01.17 по 18.02.17 специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им.А.И. Бурназяна ФМБА России проводился отбор проб радиоактивных аэрозолей на сублиматном заводе АО «СХК». Результаты исследований представлены в отчете [34]. В работе были задействованы импактор АИП-2, импактор-фантом респираторного тракта человека, индивидуальный импактор ИРАМ-2-4-И. В настоящем разделе представлены результаты по производству № 2.

Производство № 2 СЗ предназначено для получения сырьевого ГФУ методом высокотемпературного прямого фторирования оксидов урана различных марок и тетрафторида урана. В состав производства входят: щит технологического контроля с пунктом управления, отделение фторирования и гидрофторирования оксидов, и промежуточных фторидов урана с получением газообразного ГФУ, включая очистку его от пыли, улавливание ценных компонентов из сбросных газов (отделение № 3); отделение конденсации (десублимации) гексафторида урана (отделение № 4); установка «сухого» вакуумирования емкостей с гексафторидом урана.

Измерение активности каскадов импакторов проводили на альфа/бета-радиометрах УМФ-2000 с калибровкой по источнику У4У5У8-3 ($^{234}U+^{235}U+^{238}U$). Несколько импакторов (пробы № 1, 5, 9, 10, 13) были измерены на полупроводниковом гамма-спектрометре Canberra с широкополосным детектором BE3830 в соответствии с методикой [29].

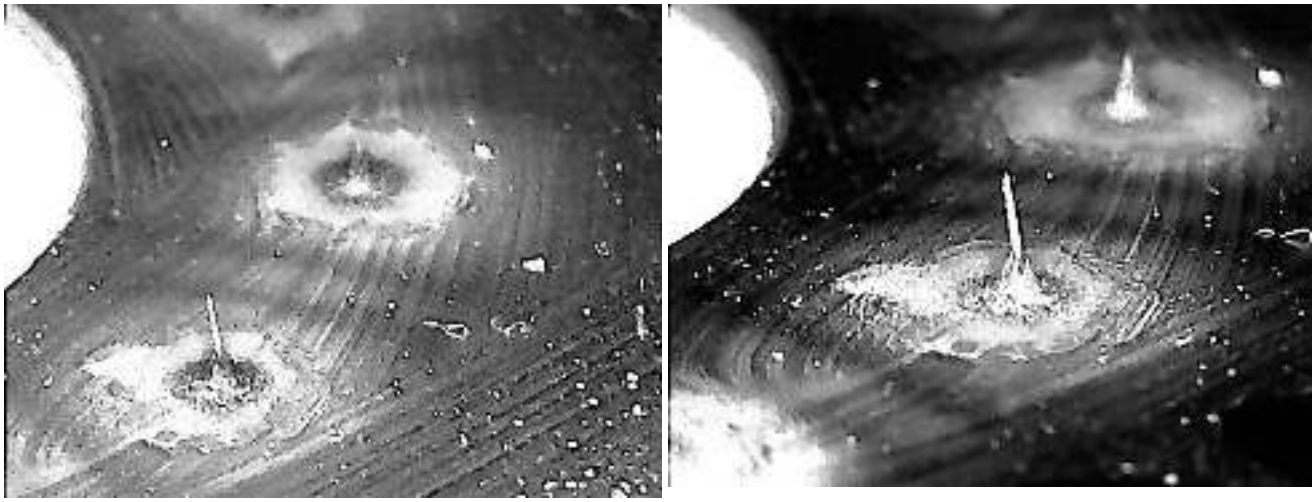
Для альфа-спектрометрии был проведен смыв активности с коллекторных пластин импактора № 1 (точка 202в) с помощью раствора ксилола. Полученные смывы озолялись в муфеле в присутствии азотной кислоты («мокрое» озоление) и подвергались последующей радиохимической обработке в соответствии с методикой [30]. Полученные в результате электролитического осаждения счетные образцы измерялись на альфа-спектрометре.

Рассчитанные значения АМАД и β_g представлены в таблице 3.25. Вследствие сильной запыленности воздуха рабочей зоны и образования крупного осадка из нерадиоактивной пыли на подложках импакторов альфа-частицы имеют высокое и неравномерное самопоглощение по каскадам, что подтверждают результаты измерения суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов (таблица 3.26-3.27). Наиболее характерно образование осадка на первых и последних каскадах (рисунок 3.23-3.24аб).

С учетом нуклидного состава аэрозолей воздушной среды (в большинстве проб до 48% активности приходится на U-238, см. таблицу 3.28) счет по бета-каналу будет определяться Pa-234m (ДПР U-238) с E_{max} = 2,3 МэВ и выходом 98,2% ($T_{1/2}$ = 1,17 мин).

Вследствие чего более корректным будет определение АМАД по активности U-238, пропорциональной счету радиометра в бета-канале.

Рисунок 3.23 Иглообразный осадок на последнем каскаде импактора ФРТЧ



а б

Рисунок 3.24 Снимки иглообразных осадков на последнем каскаде с помощью цифрового светодиодного микроскопа Gaosuo x1000

Первый каскад импакторов рассматривался как пресепаратор, отсекающий грубодисперсную фракцию радиоактивных аэрозолей с аэродинамическим диаметром более 10 мкм. Данная фракция, носящая название **экстраторакальной** [18], не проникает за пределы гортани и, соответственно, не участвует в формировании дозы внутреннего облучения при поступлении радиоактивных веществ по нижним дыхательным путям (через трахею – в бронхи и легкие). Долевой вклад данной фракции в объемную активность аэрозолей рассчитывался по формуле:

$$\delta_{\text{экст}} = \frac{A_1}{\sum A} \qquad (3.22)$$

Где A_1 – активность на первом каскаде, Бк; $\sum A$ – сумма активностей на всех каскадах импактора, Бк.

Указанные в таблице 3.25 значения АМАД для экстраторакальной фракции соответствуют D_{50} первого каскада при данном объемном расходе.

Значение АМАД, рассчитанное без учета активности на первом каскаде, характеризует **торакальную** фракцию [18] аэрозольных частиц с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм, которые при дыхании проникают за пределы гортани и формируют дозу внутреннего облучения при поступлении радиоактивных веществ по нижним дыхательным путям. Долевой вклад торакальной фракции в общую активность рассчитывался по формуле:

$$\delta_{\text{тор}} = 1 - \delta_{\text{экст}} \quad (3.23)$$

Где $\delta_{\text{экст}}$ - вклад экстраторакальной фракции в объемную активность.

Таблица 3.25 Дисперсный состав радиоактивных аэрозолей производства № 2 СЗ

№ пробы	Точка	Отметка, м	Характеристика точки	Импактор	Торакальная фракция			Экстраторакальная фракция		Вид анализа
					АМАД, мкм	βg	Активность с данным АМАД, %	АМАД, мкм	Активность с данным АМАД, %	
1	202в	11,3	У стола для снятия крышек контейнеров	ФРТЧ	1,8	2,7	80,3	> 16	19,7	U-238 α
7	212в	8,5	Десублиматоры 212/1,2	ФРТЧ	2,9	3	27,4	> 15,6	72,6	β
12	213	8,6	Аппарат комбинированного типа 213/1**	ИРАМ-2-4И	6,2	2,9	100*	-	-	β
4	213	6,3	Циклоны-обеспыливатели 217/2, 217/3	АИП-2	3,2	2,6	33,2	> 23,3	66,8	β
9	226	6,3	Реактор гидрофторирования 226	АИП-2	3,1	3,0	60,3	> 22,1	39,7	U-238 γ (по Th-234)
5	212н	0	Десублиматоры 211/1,2	АИП-2	2,0	2,4	75,2	> 19,2	24,8	U-238 γ (по Th-234)
11	210/3	0	Десублиматор 210/3	АИП-2	3,5	2,3	36,7	> 25,3	63,3	β
10	202н	0	Узел выгрузки огарков из пламенного реактора	ИРАМ-2-4И	11,9	4,6	100*	-	-	U-238 γ (по Th-234)
14	202н	0		ИРАМ-2-4И	22	4,6	100*	-	-	β
15	202н	0		ИРАМ-2-4И	5,9	3,3	100*	-	-	β
13	Отделение готовой продукции	0	-	SKC Sioutas	0,5	2,4	100*	-	-	Am-241 γ

* в точке 202н и пробах 12, 13 приведены значения АМАД для *всех* взвешенных в воздухе частиц

** Улавливание остаточных количеств UF_6, F_2 и HF из технологического газа после прохождения десублиматоров

Табл.3.26 Результаты измерения активности на каскадах импакторов, пр-во № 2 СЗ

№ пробы	Точка	Отм	Описание	Вид измерения	Активность на каскаде, Бк							ОА, Бк/м3	Фракция I			Фракция II	
					1	2	3	4	5	6	7		АМАД, мкм	βg	Активность с данным АМАД, %	АМАД, мкм	Активность с данным АМАД, %
1	202в	11	У стола для снятия крышек контейнеров	D50, мкм	16	4,8	3	2,6	1,7	0,6	F						
				α	31,0 ± 4,7	23,7 ± 3,6	7,2 ± 1,2	4,9 ± 0,8	6,0 ± 1,0	8,7 ± 1,3	15,7 ± 2,4	0,6	2,7	6,4	68,1	> 16	31,9
				β	130,6 ± 19,8	23,6 ± 3,6	18,9 ± 2,9	10,8 ± 1,7	16,0 ± 2,5	31,3 ± 4,9	12,3 ± 2,0	1,5	2,2	2,8	46,2		53,8
				U-238 γ (по Th-234)	63,8 ± 7,6	31,7 ± 3,6	16,9 ± 2,0	8,8 ± 1,0	16,8 ± 1,9	45,3 ± 5,1	13,3 ± 1,5	1,5	2,2	2,8	67,6		32,4
				U-235 γ	3,7 ± 0,4	1,9 ± 0,2	1,2 ± 0,3	0,7 ± 0,1	1,3 ± 0,2	4,0 ± 0,3	1,5 ± 0,2	0,09	1,8	2,8	73,9		26,1
				U-238 α	34,4 ± 4,2	26,6 ± 2,9	16,1 ± 2,0	8,2 ± 0,9	17,6 ± 1,9	55,0 ± 6,5	17,1 ± 2,0	1,1	1,8	2,7	80,3		19,7
				U-235 α	1,8 ± 0,4	1,2 ± 0,2	0,87 ± 0,15	0,46 ± 0,05	0,91 ± 0,07	3,1 ± 0,4	0,9 ± 0,2	0,06	1,8	2,6	80,2		19,8
				U-234 α	36,3 ± 4,4	27,6 ± 3,0	16,8 ± 2,1	8,7 ± 0,9	17,9 ± 1,9	54,9 ± 6,5	16,9 ± 1,8	1,1	1,9	2,7	79,7		20,3
7	212в	8,5	Десублиматоры 212/1,2	D50, мкм	15,6	4,7	2,9	2,5	1,7	0,6	F						
				α	12,5 ± 1,9	3,5 ± 0,5	2,6 ± 0,4	1,2 ± 0,2	1,6 ± 0,3	1,9 ± 0,3	2,2 ± 0,4	0,2	2,5	3,6	50,9	> 15,6	49,1
				β	51,8 ± 8,2	6,0 ± 1,0	3,5 ± 0,7	1,8 ± 0,4	2,2 ± 0,4	4,4 ± 0,7	1,5 ± 0,3	0,6	2,9	3	27,4		72,6
12	213	8,6	Аппарат комбинированного типа 213/1	D50, мкм	14	3,7	0,9	F	-	-	-						
				α	3,0 ± 0,5	8,8 ± 1,4	1,8 ± 0,3	1,2 ± 0,2	-	-	-	1,4	6,2	3,1	100	-	-
				β	4,0 ± 0,6	10,5 ± 1,6	4,2 ± 0,7	0,9 ± 0,2	-	-	-	1,8	6,2	2,9	100	-	-
4	213	6,3	Циклоны-обеспыливатели 217/2, 217/3	D50, мкм	23,3	11,7	5,1	1,7	0,9	F	-						
				α	39,5 ± 6,0	3 ± 0,6	4,8 ± 0,8	5,6 ± 0,9	2,1 ± 0,3	8,2 ± 1,3	-	0,6	2,0	5,1	37,6	> 23,3	62,4
				β	141,8 ± 21,4	7,1 ± 1,1	11,5 ± 1,9	33,5 ± 5,1	12,4 ± 1,9	5,9 ± 1,0	-	2,0	3,2	2,6	33,2		66,8
9	226	6,3	Реактор гидрофторирования 226	D50, мкм	22,1	11,1	4,8	1,6	0,9	F	-						
				α	20,4 ± 3,1	1,5 ± 0,3	1,2 ± 0,2	1,6 ± 0,3	0,52 ± 0,09	1,8 ± 0,3	-	0,3	3	6,2	24,3	> 22,1	75,7
				β	33 ± 5,3	2,7 ± 0,4	2,0 ± 0,3	6,4 ± 1,0	2,7 ± 0,5	1,2 ± 0,2	-	0,6	3,5	2,9	31,3		68,7
				U-238 γ (по Th-234)	12,2 ± 1,5	3,2 ± 0,4	2,1 ± 0,4	7,0 ± 0,8	4,3 ± 0,7	1,9 ± 0,3	-	0,4	3,1	3,0	60,3		39,7
				U-235 γ	0,85 ± 0,30	0,17 ± 0,06	0,22 ± 0,06	0,56 ± 0,15	0,2 ± 0,2	0,15 ± 0,04		0,03	3,1	2,9	60,3		39,7

Табл. 3.27 Результаты измерения активности на каскадах импакторов, пр-во № 2 СЗ

№ пробы	Точка	Отм	Описание	Вид измерения	Активность на каскаде, Бк							ОА, Бк/м3	Фракция I			Фракция II	
					1	2	3	4	5	6	7		АМАД, мкм	βg	Активность с данным АМАД, %	АМАД, мкм	Активность с данным АМАД, %
5	212н	0	Десублиматоры 211/1,2	D50, мкм	19,2	9,6	4,2	1,4	0,8	F	-					> 19,2	
				α	30,1 ± 4,8	2,3 ± 0,4	4,0 ± 0,6	5,3 ± 0,8	4,4 ± 0,7	2,6 ± 0,4	-	0,3	2,4	3,2	38,1		61,9
				β	88 ± 13,6	5,4 ± 0,8	6,3 ± 1,0	24,2 ± 3,7	11,1 ± 1,7	15,3 ± 2,4	-	1,0	1,7	3,3	41,4		58,6
				U-238 γ (по Th-234)	22,7 ± 2,5	4,1 ± 0,6	5,8 ± 0,8	33,4 ± 3,8	17,5 ± 2,1	8,1 ± 0,9	-	0,6	2,0	2,4	75,2		24,8
				U-235 γ	1,84 ± 0,15	0,38 ± 0,07	0,39 ± 0,26	2,8 ± 0,2	1,3 ± 0,3	0,65 ± 0,14	-	0,05	2,0	2,4	75		25
11	210/3	0	Десублиматор 210/3	D50, мкм	25,3	12,6	5,5	1,8	1,0	F	-					> 25,3	
				α	8,6 ± 1,3	0,64 ± 0,11	1,0 ± 0,2	1,4 ± 0,2	0,44 ± 0,07	1,2 ± 0,2	-	0,2	2,9	4,2	34,8		65,2
				β	18,8 ± 2,9	1,0 ± 0,2	1,6 ± 0,3	6,2 ± 1,0	1,4 ± 0,2	0,74 ± 0,14	-	0,5	3,5	2,3	36,7		63,3
10	202н	0	Узел выгрузки	D50, мкм	13,4	3,5	0,9	F	-	-	-					-	-
				α	2,2 ± 0,4	3,1 ± 0,6	0,66 ± 0,11	1,4 ± 0,3	-	-	-	0,8	6,0	5,7	100		
				β	39,8 ± 6,0	25,5 ± 3,9	9,5 ± 1,4	1,2 ± 0,2	-	-	-	8,3	14,4	3,7	100	-	-
				U-238 γ (по Th-234)	8,8 ± 1,1	4,9 ± 0,6	3,5 ± 0,4	0,7 ± 0,2				2,0	11,9	4,6	100	-	-
				U-235 γ	0,14 ±0,06	0,14 ±0,04	0,20 ±0,10	0,07 ±0,03	-	-	-	0,06	4,4	4,5	100	-	-
14	202н	0	Узел выгрузки	D50, мкм	15,1	4,0	1,0	F	-	-	-					-	-
				α	25,2 ± 4,1	13,7 ± 2,3	1,8 ± 0,6	0,40 ± 0,10	-	-	-	7,6	24	3,6	100		
				β	296,2 ± 44,5	146,1 ± 22,2	49,1 ± 7,6	11,1 ± 1,9	-	-	-	93	22	4,6	100	-	-
15	202н	0	Узел выгрузки	D50, мкм	16,4	4,3	1,1	F	-	-	-					-	-
				α	1 ± 0,2	2,7 ± 0,4	0,55 ± 0,14	1,2 ± 0,2	-	-	-	1,9	5,1	4,2	100		
				β	1,8 ± 0,4	4,8 ± 0,8	2,6 ± 0,5	0,9 ± 0,3	-	-	-	3,5	5,9	3,3	100	-	-
13		0	Отделение готовой продукции	D50, мкм	2,3	0,9	0,45	0,23	F	-	-					-	-
				Am-241 γ	0,023 ± 0,010	0,085 ± 0,015	0,23 ± 0,03	0,071 ± 0,013	0,13 ± 0,02	-	-	0,004	0,5	2,4	100		
				U-235 γ	0,014 ± 0,021	0,011 ± 0,021	0,017 ± 0,022	0,022 ± 0,016	0,031 ± 0,023	-	-	0,003	0,4	4,5	100	-	-

Табл.3.28 Соотношение изотопов урана на каскадах импактора № 1 ФРТЧ (т. 202в, пр-во №2 СЗ)

Каскад	D_{50}, мкм	Вклад в суммарную активность $^{234}U+^{235}U+^{238}U$ (по результатам альфа-спектрометрии)		
		U-238	U-235	U-234
1	16,0	47,8%	1,9%	50,3%
2	4,8	48,2%	1,7%	50,1%
3	3,0	47,9%	2,0%	50,1%
4	2,6	47,6%	2,0%	50,4%
5	1,7	48,6%	1,9%	49,5%
6	0,6	49,0%	2,1%	48,9%
F	-	49,3%	1,9%	48,9%

Дисперсный состав аэрозолей пр-ва № 2 СЗ на всех отметках (кроме узла выгрузки и отделения готовой продукции) характеризуется АМАД в диапазоне от 1,8 мкм до 6,2 мкм, со средним значением АМАД 3,2 мкм и βg = 2,7. Наибольший вклад торакальной фракции (75-80%) был зафиксирован в точках 202в отм.+11,3 (у стола для снятия крышек контейнеров) и в 212н отм.0 (отделение десублимации UF_6). Полученные распределения активности по размерам частиц (с учетом первого каскада) представлены на рисунках 3.25-3.26.

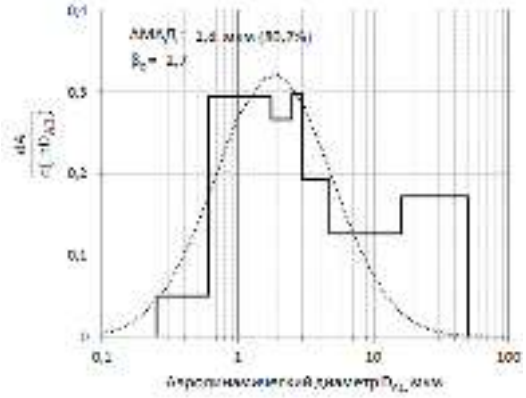


Рисунок 3.25 т.202в, у стола для снятия крышек контейнеров (проба № 1 СЗ), U-238α, импактор ФРТЧ

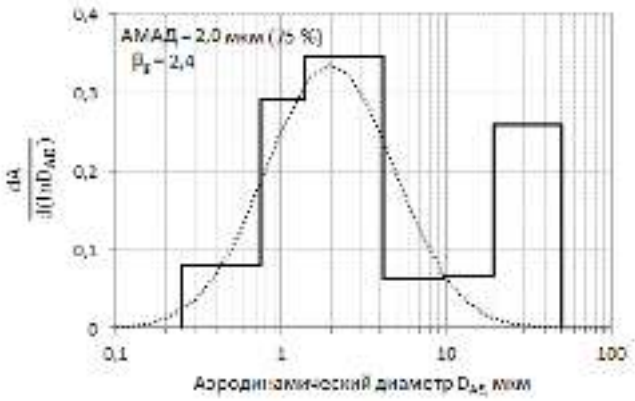


Рисунок 3.26 т. 212н, Десублиматоры 211/1,2 (проба № 5 СЗ), U-238γ (по Th-234), импактор АИП-2

Значение АМАД 6,2 мкм в пробе 12 (рисунок 3.27), а также крупные значения АМАД в точке 202н (рисунок 3.25) получены с помощью индивидуального импактора ИРАМ-2-4И. Данный импактор имеет всего 4 каскада, в этом случае использовать первый

каскад в качестве пресепаратора не представляется возможным (остается слишком мало точек для расчета АМАД). Таким образом, расчет АМАД проводился по всем четырем каскадам, с учетом активности экстраторакальной фракции, осажденной на первом каскаде, чем и объясняются крупные значения АМАД в указанных точках.

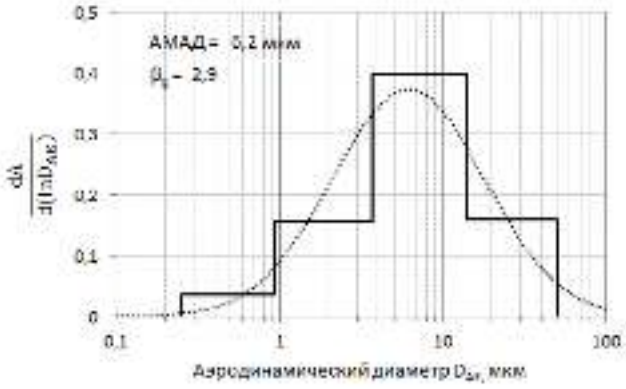


Рисунок 3.27 Аппарат комбинированного типа 213/1 отм. +8,6 м (проба № 12 СЗ), β

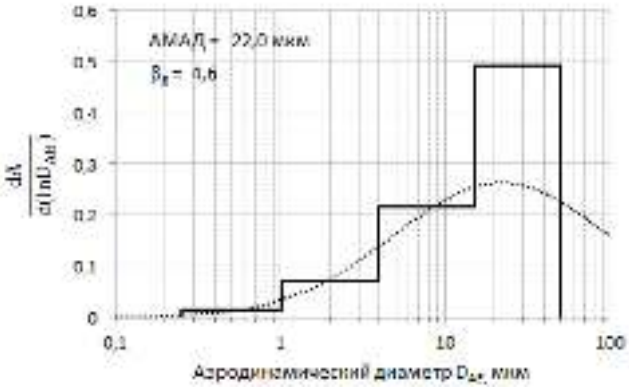
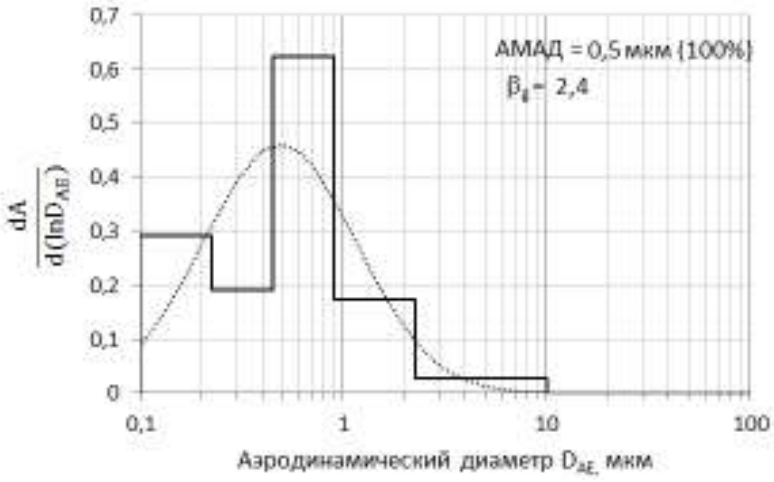


Рисунок 3.28 Узел выгрузки т. 202н отм. +0 м, (проба № 14 СЗ), β

Наименьшее значение АМАД на пр-ве № 2 СЗ обнаружено в отделении готовой продукции и составило 0,5 мкм при βg = 2,4 (рисунок 3.26); доля частиц с аэродинамическим диаметром менее 100 нм при данных характеристиках ЛНР составит 3,3%.

а

б



в

Рисунок 3.29 Проба 13, Отделение готовой продукции СЗ; а – индивидуальный импактор SKC Sioutas с щелевыми соплами;
б – один из каскадов с отобранной пробой
в – распределение активности по размерам частиц (Am-241 γ)

Обращает внимание значительная вариация АМАД в точке 202н (узел выгрузки), где индивидуальный импактор ИРАМ-2-4И устанавливался трижды (рисунок 3.30). Значение АМАД в разные дни варьировалось от 5,9 мкм до 22 мкм при среднем значении $\beta_g = 4{,}2$.

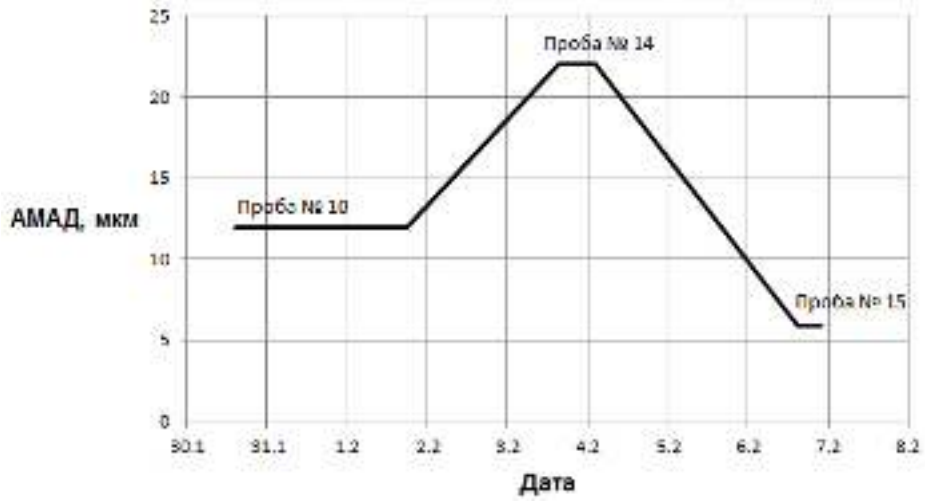


Рисунок 3.30 Временная динамика значений АМАД в точке 202н СЗ

Рисунок3.31 Индивидуальный импактор ИРАМ-2-4И с побудителем расхода Leland Pump

Из-за отсутствия доступа к электросети в точке 202н отбор проб велся посредством индивидуального побудителя расхода Leland Pump (рисунок 3.31) Этим обусловлена короткая длительность отбора проб (на рисунке 3.30 горизонтальные линии соответствуют длительности пробоотбора). С учетом значительных уровней объемных активностей в точке 202н (7,6 Бк/м^3 по альфа-радиометрии в пробе № 14, таблица 3.25) и сильной вариации АМАД представляется целесообразным проведение дополнительных исследований на узле выгрузки (в настоящей работе анализ нуклидного состава и типа химического соединения при ингаляции в точке 202н не проводился).

Кинетику диализа радионуклидов в имитатор легочной жидкости (раствор Рингера) определяли с помощью измерений активности диализата на жидко-сцинтилляционном спектрометре Quantulus 1220. По результатам измерений рассчитывали суммарную долю активности, перешедшую раствор. Графики кинетики диализа проб аэрозолей в растворе

Рингера представлены на рисунке 3.32. Для обработки результатов измерений использовали следующее аппроксимирующее уравнение:

$$Q = 1 - A_t/A_0 = 1-(a_1e^{-k1t}+ a_2e^{-k2t}+a_3^{-k3t}) \quad (3.24)$$

Где Q – доля активности фильтра, перешедшая в раствор в момент времени t;

A_0 – исходная активность фильтра;

A_t – активность фильтра в момент времени t;

a_1, a_2, a_3 – коэффициенты, определяющие долевой состав фракций с разной скоростью перехода в раствор (Б, П, М);

k1, k2, k3 – коэффициенты, определяющие скорости диализа вещества, $сут^{-1}$.

Установленные в ходе эксперимента характеристики растворения проб аэрозолей СЗ представлены в таблице 3.29. На пр-ве № 2 до 74% и более приходится на соединения с типом Б (видимо, за счет уранил-фторида, который образуется при гидролизации ГФУ по реакции: $UF_6 + 2H_2O \rightarrow UO_2F_2 + 4HF$). Наибольшая доля соединений с промежуточным типом растворения (23%) приходится на т.202ср (отм. +6,3 м), где расположен реактор гидрофторирования 226 и ведутся работы с оксидами урана, непрореагировавшими в реакторе 202.

Для проверки зависимости скорости растворения от дисперсного состава в эксперименте участвовал фильтр из импактора № 1 (т.202в отм.+11,3 м). Как видно из графика на рисунке 3.32 процесс растворения на фильтре импактора № 1, содержащем частицы с аэродинамическим диаметром менее 0,6 мкм, на начальном этапе идет быстрее, чем на фильтре 202в, на который отбирались все взвешенные в воздухе частицы: доля активности перешедшая в раствор в первые 3 часа составила 90% и 59,7% соответственно. Однако уже после первых суток графики растворения по обоим пробам лежат достаточно близко.

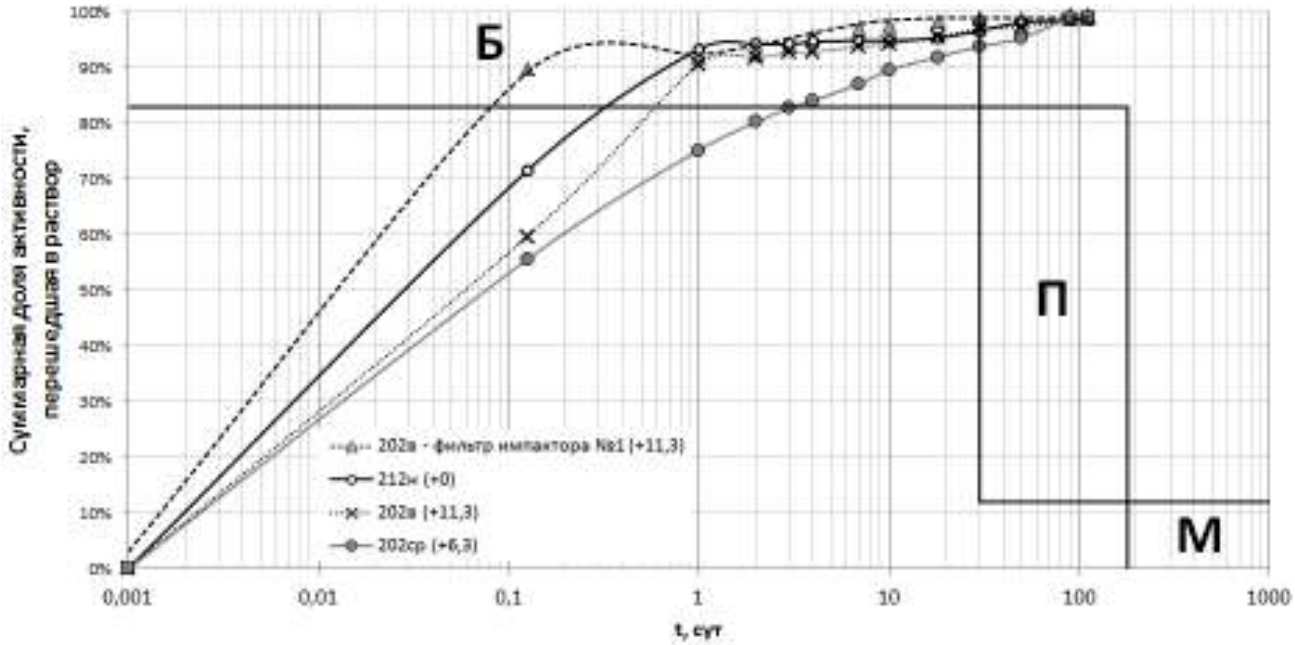


Рисунок 3.32 Кинетика диализа проб аэрозолей в растворе Рингера, пр-во № 2 СЗ

Таблица 3.29 Характеристики растворения проб аэрозолей, пр-во № 2 СЗ

Пр-во	№ пробы	Точка	Долевой состав фракций			Скорость диализа, сут-1		
			Б	П	М	k1	k2	k3
2	2	202в (+11,3)	0,81	0,17	0,02	10	0,30	0,0001
	3	202ср (+6,3)	0,74	0,23	0,03	11	0,11	0,0090
	6	202н (+0)	0,85	0,13	0,02	15	0,3	0,0001
	1	202в - фильтр импактора	0,9	0,09	0,01	35	0,3	0,0001

Установленный в ходе исследований радионуклидный состав радиоактивных аэрозолей пр-ва № 2 представлен в таблице 3.30.

Таблица 3.30 Результаты исследования нуклидного состава аэрозолей, пр-во № 2 СЗ (средние значения по всем пробам)

Пр-во	Точка	Соотношение изотопов							
		U-232	U-234	U-235	U-236	U-238	Pu-239	Am-241	Th-228
№2	Все точки	0,4%	49,3%	2,3%	0,2%	47,6%	0,08%	0,04%	0,03%

Расчет дозового коэффициента проводился по формуле:

$$\varepsilon_{\text{перс}} = \delta_{\text{тор}} \cdot \sum z_i \cdot f_i \cdot \varepsilon_{i,f,d} \quad (3.25)$$

где $\delta_{тор}$ – вклад торакальной фракции в объемную активность (для консервативной оценки принималось $\delta_{тор}$ = 100%)

z_i – вклад радионуклида i в суммарную активность (по табл.3.30)

f_i – долевой вклад соединения f при ингаляции для радионуклида i

$\varepsilon_{i,f,d}$ – дозовый коэффициент для радионуклида i с типом химического соединения при ингаляции f и с АМАД d, взятый из базы данных МКРЗ [80] (кроме U-238 тип Б, П, U-235 тип П и Pu-239 тип П). Для консервативной оценки дозовые коэффициенты $\varepsilon_{i,f,d}$ для U-238 тип Б, П, U-235 тип П и Pu-239 тип П рассчитывались исходя из значений ПГП из Приложения 1 к НРБ-99/2009, где значение ПГП урана (в Бк) соответствует 500 мг в год (определяется химической токсичностью соединений урана), а по плутонию приведено консервативное значение ПГП из НРБ-76/87. Дозовые коэффициенты для данных соединений рассчитывались по формуле:

ε = 20 мЗв/$ПГП_{перс}$

Где 20мЗв – эффективная доза для персонала группы А за год (табл.3.1 НРБ-99/2009).

В табл.3.31 представлены дозовые коэффициенты из базы данных МКРЗ, используемые в расчетах.

Табл.3.31 Дозовые коэффициенты из базы МКРЗ [80], используемые в расчетах, Зв/Бк

АМАД	U-234			U-235			U-238		
	Б	П	М	Б	П	М	Б	П	М
0,3	4,9E-07	4,4E-06	1,2E-05	4,6E-07	4,0E-06	1,1E-05	4,4E-07	3,8E-06	1,0E-05
1	5,5E-07	3,1E-06	8,5E-06	5,1E-07	2,8E-06	7,7E-06	4,9E-07	2,6E-06	7,3E-06
3	6,7E-07	2,7E-06	8,5E-06	6,3E-07	2,4E-06	7,6E-06	6,1E-07	2,2E-06	7,1E-06
5	6,4E-07	2,1E-06	6,8E-06	6,0E-07	1,8E-06	6,1E-06	5,8E-07	1,6E-06	5,7E-06
10	5,4E-07	1,4E-06	4,1E-06	5,0E-07	1,2E-06	3,7E-06	4,8E-07	1,1E-06	3,5E-06

АМАД	U-232			U-236			Pu-239		Am-241	Th-228	
	Б	П	М	Б	П	М	П	М	П	П	М
0,3	3,5E-06	9,5E-06	4,8E-05	4,6E-07	4,1E-06	1,1E-05	5,9E-05	2,0E-05	4,90E-05	3,60E-05	4,50E-05
1	4,0E-06	7,2E-06	3,5E-05	5,2E-07	2,9E-06	7,9E-06	4,7E-05	1,5E-05	3,90E-05	3,00E-05	3,70E-05
3	4,8E-06	6,3E-06	3,3E-05	6,4E-07	2,5E-06	7,9E-06	4,1E-05	1,1E-05	3,40E-05	2,80E-05	3,30E-05
5	4,7E-06	4,8E-06	2,6E-05	6,1E-07	1,9E-06	6,3E-06	3,2E-05	8,3E-06	2,70E-05	2,20E-05	2,50E-05
10	3,9E-06	2,6E-06	1,5E-05	5,1E-07	1,3E-06	3,8E-06	2,0E-05	5,9E-06	1,70E-05	1,20E-05	1,80E-05

Расчет $ПГП_{перс}$ и $ДОА_{перс}$ велся по формулам:

$ПГП_{перс}$ = 20мЗв/$\varepsilon_{перс}$ (3.26)

Где $\varepsilon_{перс}$ - дозовый коэффициент для данного производства, рассчитанный по формуле (3.25).

$ДОА_{ПЕРС} = ПГП_{перс} / V_{перс}$ (3.27)

Где $V_{перс}$ = 2400 м^3, объем вдыхаемого воздуха в год для персонала (при продолжительности работы $t_{перс}$ = 1700 ч, п.8.2 НРБ-99/2009)

Рассчитанные значения дозовых коэффициентов, $ПГП_{ПЕРС}$ и $ДОА_{ПЕРС}$ с учетом установленных в ходе работы физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей, представлены в табл.3.32.

Табл.3.32 Значения дозовых коэффициентов, ПГП и ДОА для пр-ва № 2 СЗ

АМАД, мкм	Доля фракций по растворимости			Доз.коэф., Зв/Бк	ПГП, Бк	ДОА, Бк/м^3
	Б	П	М			
5	80%	18%	2%	2,2E-06	9,0E+03	3,8

Полученное значение ДОА менее консервативно (в 3,8 раза) за счет значительного присутствия соединений с быстрым типом химического соединения при ингаляции в воздушной среде (рисунок 3.33).

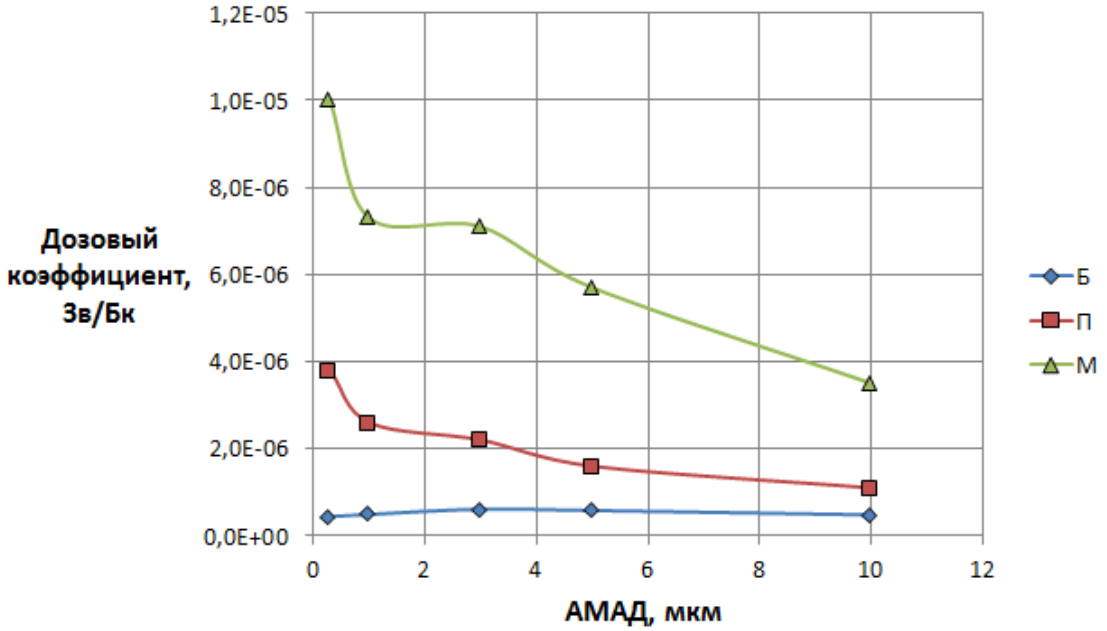


Рис.3.33 Зависимость дозового коэффициента для U-238 от АМАД в диапазоне от 0,3 мкм до 10 мкм для различных типов при ингаляции.

С помощью метода, описанного в Главе 2, для распределений на рисунках 3.25 (восстановленного с помощью импактора-фантома) и 3.29в (восстановленного с помощью щелевого импактора SKC Sioutas) были рассчитаны доли активности аэрозолей, осажденных в различных отделах дыхательного тракта (таблица 3.33). В случае импактора SKC рассчитывались доли активности, осажденные на каскадах импактора-фантома при данных характеристиках распределения (АМАД 0,5 мкм β_g 2,4) по формуле:

$$\delta = \frac{\int_{D50i+1}^{D50i} f(x)\,dx}{\int_{0,1}^{100} f(x)dx} \quad (3.28)$$

Где f(x) – плотность вероятности логнормального распределения

$D50_i$ – эффективный аэродинамический диаметр разделения каскада импактора-фантома (в соответствии с таблицей 2.3а)

Таблица 3.33 Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте (для распределений на рисунках 3.25 и 3.29в)

Номер пробы	Фракция 1			Фракция 2			Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте, %				
	АМАД, мкм	β_g	Вклад в активность, %	АМАД, мкм	β_g	Вклад в активность, %	ET1	ET2	BB	bb	AI
1	1,8	2,7	80%	33	1,5	20%	25,6	30,1	1,4	1,1	6,7
13	0,5	2,4	100%	-	-	-	10,9	13,3	0,9	2,0	12,0

Как видно из таблицы 3.33 в случае пробы 1 наибольшая доля осажденной активности (30,1%) приходится на экстраторакальный отдел ET2. В случае пробы 13 – на экстраторакальный ET2 (13,3%) и альвеолярно-интерстициальный отдел AI (12%).

Выводы по главе 3

1. Рассчитаны параметры конструкции, проведено численное моделирование, изготовлен пилотный образец и проведено экспериментальное исследование пробоотборных характеристик импактора для реализации метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта (импактор-фантом респираторного тракта человека). Получены экспериментальные зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра аэрозольных частиц на каскадах устройства.
2. Проведена оценка нижнего порога измерения по различным нуклидам для случая использования полупроводникового спектрометра Canberra с широкополосным германиевым детектором (серия BeGe) по различным радионуклидам: Cs-137, Ru-106. Полученные результаты показали, что при отборе пробы в полевых условиях применение импактора-фантома целесообразно в основном в аварийных ситуациях.
3. В результате применения ФРТЧ на технологической цепочке Н (производство ^{241}Am-Be нейтронных источников) ФГУП «ПО «Маяк» установлены следующие характеристики распределения активности аэрозольных частиц по аэродинамическим диаметрам в операторской:

   Фракция 1: АМАД = 0,8 мкм, βg = 3,0, вклад в суммарную активность - 43%

Фракция 2: АМАД = 9,2 мкм, βg = 1,7, вклад в суммарную активность - 57%

Полученные характеристики могут быть использованы а) для расчета ожидаемых эквивалентных доз отделов респираторного тракта при штатном режиме работы б) для расчета дозовых коэффициентов для перехода от объемной активности радиоактивных аэрозолей к ожидаемой эффективной дозе внутреннего облучения.

4. Рассчитанные значения ожидаемых эквивалентных доз облучения в год экстраторакального H_{ET} и торакального H_{TH} отделов респираторного тракта при среднегодовой объемной активности $9{,}3\cdot10^{-4}$ Бк/м^3 и установленных характеристиках распределения активности по аэродинамическим диаметрам аэрозольных частиц на ФГУП «ПО «Маяк» (п.1) составили 21 мкЗв и 1,7 мкЗв соответственно.
5. Дозовые коэффициенты, установленные в результате применения ФРТЧ на ФГУП «ПО «Маяк» (для операторской: $1{,}8\cdot10^{-5}$ Зв/Бк; для ремонтной зоны: $1{,}7\cdot10^{-5}$ Зв/Бк), позволяют устранить возможное систематическое завышение ОЭД для лиц из персонала в 2 раза. Результаты работ подтверждены актом о внедрении результатов диссертационной работы на ФГУП «ПО «Маяк» (№ 193-5-5.5/3297 от 9.12.2015)
6. Установлено, что распределение активности по аэродинамическим диаметрам аэрозольных частиц в операторской на участке металлургии ХМЗ АО «СХК» носит бимодальный характер со значительным вкладом грубодисперсных аэрозолей в суммарную активность. Значение АМАД первой фракции (по данным, полученным с помощью ФРТЧ) составило 8,6 мкм (β_g = 3,7, вклад в суммарную активность 22%), среднее значение АМАД грубодисперсной фракции: 36 мкм (β_g = 1,4, вклад в суммарную активность 78%). Рассчитанные значения ожидаемых эквивалентных доз облучения в год экстраторакального H_{ET} и торакального H_{TH} отделов респираторного тракта при среднегодовой объемной активности 0,05 Бк/м^3 и установленном дисперсном составе радиоактивных аэрозолей составили 510 мкЗв и 4,8 мкЗв соответственно.
7. Значение дозового коэффициента для операторской и ремонтной зоны ($3{,}0\cdot10^{-5}$ Зв/Бк), установленное в результате применения ФРТЧ на участке металлургии ХМЗ АО «СХК» позволяет устранить систематическое завышение оценки ОЭД для лиц из персонала в 1,6 раз. Результаты работ подтверждены актом о внедрении результатов диссертационной работы на АО "СХК" (№ 106-08/470 от 3.04.2015).
8. Дисперсный состав аэрозолей пр-ва № 2 СЗ на всех отметках (кроме узла выгрузки и отделения готовой продукции) характеризуется значением АМАД в диапазоне от

1,8 мкм до 6,2 мкм, со средним значением АМАД 3,2 мкм и βg = 2,7. Наибольший вклад торакальной фракции в суммарную объемную активность (75-80%) был зафиксирован в точках 202в отметка +11,3м (у стола для снятия крышек контейнеров) и в 212н отметка 0м (отделение десублимации UF_6).

9. Дозовый коэффициент, установленный в результате применения импактора-фантома респираторного тракта человека на производстве сырьевого гексафторида урана на Сублиматном заводе АО «СХК» (2,2Е-6 Зв/Бк) позволяет снизить возможное систематическое завышение ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения для лиц из персонала в 3,8 раз. Полученное значение ДОА менее консервативно за счет значительного присутствия соединений с быстрым типом химического соединения при ингаляции в воздушной среде (до 80%), по всей видимости, за счет уранил-фторида, который образуется при гидролизации ГФУ.
10. С помощью метода, описанного в Главе 2, были рассчитаны доли активности аэрозолей, осажденных в различных отделах дыхательного тракта. Результаты по различным предприятиям объединены в таблице 3.34.

Таблица 3.34 Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте

Предприятие	Фракция 1			Фракция 2			Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте, %				
	АМАД, мкм	βg	k1	АМАД, мкм	βg	k2	ET1	ET2	BB	bb	AI
Завод 45 МАЯК	0,8	3,0	43%	9,2	1,7	57%	28,7	32,0	1,3	1,0	5,1
ХМЗ АО «СХК»	8,6	3,7	22%	35,8	1,4	78%	29,0	30,2	0,4	0,2	0,8
СЗ АО «СХК»	1,8	2,7	80%	33	1,5	20%	25,6	30,1	1,4	1,1	6,7
	0,5	2,4	100%	-	-	-	10,9	13,3	0,9	2,0	12,0

k_1, k_2 - доля активности с данным АМАД

Наибольшая доля активности аэрозольных частиц, осажденная в альвеолярно-интерстициальном отделе AI зафиксирована в отделении готовой продукции СЗ (АМАД 0,5 мкм βg 2,4) и составила 12%. Наименьшая доля активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах BB, bb и AI обнаружена в операторской на участке металлургии ХМЗ, что обусловлено наибольшим вкладом грубодисперсных аэрозолей в суммарную активность из рассматриваемых предприятий (78%). Доля активности аэрозолей, осажденных в отделе AI на ФГУП «ПО «Маяк» (завод 45) и СЗ (отметка +11,3 м) составила 5,1% и 6,7% соответственно. Доля активности аэрозолей, приходящаяся на экстраторакальный отдел, на всех исследованных участках варьируется от 25,6 до 32%, за исключением отделения готовой продукции СЗ, где данный показатель оказался наименьшим и составил 10,9% (ET1) и 13,3% (ET2).

Глава 4 Разработка способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси

4.1 Постановка задачи

В силу своей природы аэрозоли чрезвычайно подвижны и неустойчивы. В них непрерывно происходят изменения дисперсного и фазового состава. Динамика этих изменений зависит от физико-химических процессов, протекающих в системе. Между газовой средой и частицами происходит постоянное взаимодействие, которое влияет на состояние частиц и приводит к изменениям как дисперсного, так и фазового состава аэрозолей [12]. Некоторые радиоактивные вещества и их соединения могут находиться ввоздухе одновременно в дисперсном и газообразном состоянии, например соединения радиоактивного йода, ртути, рутения и других радионуклидов.

Данная глава посвящена разработке способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси включающий в себя определение объемной активности аэрозольной фракции с учетом распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта и газовой фракции путем ее преобразования в аэрозоль.

4.2 Описание способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси

Предлагаемый способ основан на химическом преобразовании газовой составляющей газо-аэрозольной смеси в аэрозольную фракцию и включает в себя:

1) Отделение аэрозольной фракции от газовой инерционным осаждением на каскадах импактора-фантома;
2) Химическое преобразование газовой составляющей газо-аэрозольной смеси в аэрозольную фракцию путем ввода паров реагента в газовый поток;
3) Осаждение полученных частиц на фильтр.

Устройство для реализации предлагаемого способа (рисунок 4.1) состоит из расположенных последовательно импактора-фантома и химического реактора и присоединенной к реактору емкости для реагента, преобразующего газовую составляющую газо-аэрозольной смеси в аэрозольную фракцию.

Импактор-фантом применяется для анализа дисперсности и определения объемной активности аэрозольной составляющей газо-аэрозольной смеси (обеспечивает получение образцов для исследования на гамма-/альфа-спектрометрической установке). Информация о дисперсности аэрозольной составляющей радиоактивной газо-аэрозольной смеси позволяет проводить оценку дозы внутреннего облучения с учетом дисперсного состава, повышая точность и адекватность данной оценки.

С помощью химического реактора, в котором газовая составляющая газо-аэрозольной смеси, содержащаяся в пробе, преобразуется в аэрозольную фракцию, определяется объемная активность исследуемого радионуклида в газовой фракции. Химический реактор представляет собой полую емкость, на входе в которую расположены два штуцера: штуцер 1 для подачи незначительной части газового потока в емкость с реагентом и штуцер 2 для подачи паров реагента из емкости в химический реактор. На выходе из реактора находится фильтр, улавливающий образовавшиеся частицы, и сетка, предотвращающая разрыв фильтра. Активность исследуемого радионуклида, осажденного на фильтре, определяется с помощью гамма- (либо альфа)-спектрометрической установки.

Рисунок 4.1 Схема устройства для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси

4.3 Подбор реагента, для преобразования газовой составляющей газо-аэрозольных смесей в аэрозольную фракцию

Известен способ очистки газов от рутения, основанный на смешивании газообразного тетраоксида рутения RuO_4 с окисью углерода CO,предварительно нагретых до температуры не ниже 50^0C, в количестве не менее 0,45 кг CO на 1 кг RuO_4 [35]. В смеси происходит реакция

$RuO_4 + 2CO = RuO_2 + 2CO_2$ (4.1)

Образующийся аэрозоль двуокиси рутения RuO_2 частично оседает на стенках реактора, а оставшаяся часть выносится газовым потоком на аэрозольные фильтры. К недостаткам применения окиси углерода CO в качестве реагента стоит отнести необходимость предварительного нагрева реагента и газообразного тетраоксида рутения до температуры не менее 50^0C, что приводит к усложнению конструкции устройства и проблематичности использования его в производственных условиях.

Известны способы очистки газов от рутения путем пропускания его через слой сорбента, представляющего собой огнеупорный кирпич, импрегнированный окислами железа, сетку из нержавеющей стали или силикагель [2]. На огнеупорном кирпиче сравнительно небольшие коэффициенты очистки (50 – 100) достигаются за счет применения очень высоких температур (до 800 ^{0}C), что нерационально. Кроме того, емкость этого сорбента по рутению крайне мала. Применение сетки из нержавеющей стали нецелесообразно из-за низких коэффициентов очистки и малой емкости (8 г рутения на 1 $м^3$ насадки). В случае силикагеля при низких температурах достигается достаточно высокий коэффициент очистки. Однако из-за малой емкости сорбента (0,29 г/$м^3$ насадки) необходимо применять большие объемы колонн, регенерация которых приводит к образованию значительных количеств жидких радиоактивных отходов.

В качестве реагента целесообразным представляется применение этанола поскольку известно, что тетраоксид рутения RuO_4 активно взаимодействует с этанолом, при этом образуется двуокись рутения RuO_2 и продукты окисления этанола [82]. Реакции имеют вид:

$$RuO_4 + 2C_2H_5OH \rightarrow RuO_2 + 2CH_3COH + 2H_2O \quad (4.2)$$

$$RuO_4 + C_2H_5OH \rightarrow RuO_2 + CH_3CO_2H + H_2O \quad (4.3)$$

В случае гексафторида урана в качестве реагента может быть применен водный раствор аммиака. Реакции имеют вид:

$UF_6 + 0{,}67NH_3 = UF_4 + 0{,}33N_2 + 2HF$ (4.4)

$UF_6 + 2H_2O \rightarrow UO_2F_2 + 4HF$ (4.5)

4.4 Расчет необходимого объема реагента

На рисунке 4.2 изображена схема подачи реагента в реакционную камеру, обеспечивающая поток паров реагента из емкости, достаточный для достижения необходимой концентрации реагента в реакционной камере. На рисунке 3.2: C_R – концентрация реагента в растворе; C_{R0} – концентрация паров реагента в емкости; C_{R1} – концентрация реагента в реакционной камере; C_G – концентрация газа в реакционной камере; h – толщина раствора реагента; V_R – объем раствора реагента; r_1 – радиус входа реакционной камеры; r_2 – радиус трубок подачи регента; w_0 – средняя скорость потока в реакционной камере; w_1 – скорость потока через емкость; w_2 – скорость потока на входе реакционной камеры.

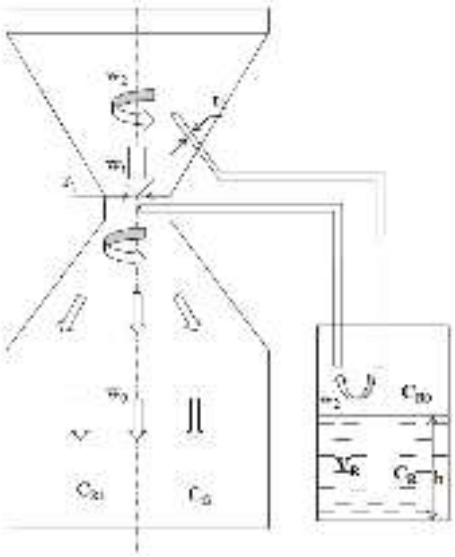


Рисунок 4.2 Схема подачи паров реагента в реакционную камеру

В емкости должно содержаться количество реагента, необходимое для поддержания реакции в течение всего времени отбора пробы, даже при максимальной возможной концентрации газа. Из уравнения химической реакции выбранного реагента и исследуемого газа вычисляется количество молей реагента, необходимое для полной реакции одного моля газа (k).

Достаточная концентрация реагента в реакционной камере:

$C_{R1} = C_G \cdot \mu_R / k \cdot \mu_G$ (4.6)

где: μ_R–грамм-моль реагента, г; μ_G–грамм-моль газа, г; C_{R1} – концентрация реагента в реакционной камере, г/см^3; C_G – значение максимальной ожидаемой концентрации газа, г/см^3.

Соотношение параметров устройства подачи реагента определяется по формуле:

$r_2^2/r_1^2 = C_{R1}/C_{R0}$ (4.7)

где r_1 – радиус входа реакционной камеры, r_2 - радиус трубок для подачи паров реагента, C_{R0} – концентрация паров реагента в емкости, г/см^3.

Удельный расход реагента u_v, г/с, вычисляется по формуле:

$u_v = w_2 \cdot C_{R0}$ (4.8)

где w_2 – скорость потока через емкость с реагентом, $w_2 = w_0 r_2^2/(r_1^2 + r_2^2)$,

w_0 – скорость потока в реакционной камере, которую можно приравнять к средней скорости потока $w_0 = u$.

4.4.1 Расчет необходимого количества реагента в случае пробоотбора газо-аэрозольных смесей рутения

Предположим, что на вход устройства поступает чистый газообразный тетраоксид рутения RuO_4. В этом случае максимальная ожидаемая концентрация газа на входе C_G составит:

$C_G = M(RuO_4)/V_m$ (4.9)

где $M(RuO_4)$ – молярная масса тетроксида рутения, 165 г/моль; V_m- молярный объем, 22,4 л/моль.

В этом случае значение составит 7,4е-3 г/см^3

1) Рассчитаем достаточную концентрациюпаров реагента (этанола) в реакционной камере по формуле (4.6). При C_G = 7,4е-3 г/см^3, μ_R = 46 г, μ_G= 167 г, k=2 (расчет выполняется для реакции (4.2)) концентрация паров реагента в реакционной камере составит C_{R1} = 1,0е-3 г/см^3;
2) Соотношение параметров устройства подачи реагента (ф-ла (4.7)):
   При r_1 = 0,8см, r_2 = 0,4см, C_{R1} = 4,18е-3г/см^3, концентрация паров реагента в емкости C_{R0} = 4,1е-3 г/см^3.
3) Удельный расход реагента u_v, г/с (по ф-ле (4.8)):
   При w_0 = 20л/мин, r_1 = 0,8 см, r_2 = 0,4 см,
   C_{R0} = 4,1е-3г/см^3, удельный расход реагента u_v = 0,27 г/с.
4) Масса реагента, которая потребуется для работы устройства в течение времени отбора t = 3600 с определяется выражением:

$m = u_v \cdot t$ (4.10)

В данном примере при u_v = 0,27 г/с, масса реагента составит m = 986 г

5) Необходимый объем реагента:

$V = m / \rho$ (4.11)

При m = 986 г и $\rho(C_2H_5OH)$ = 0,78г/см^3, необходимый объем реагента для работы устройства в течение часа составит V = 1264 см^3 или 1,3 л.

Стоит заметить, что фактические ожидаемые концентрации рутения будут значительно ниже. Например, при объемной активности тетраоксида рутения (^{103}Ru) равной 1000ДОА, ожидаемая концентрация газа на входе устройства составит всего 1,7е-13 г/см^3.

4.5 Расчет длины реакционной камеры

Достаточность времени реакции достигается выбором такого соотношения объема реакционной камеры и объемной скорости, которое обеспечивает полноту реакции. Если t_0 - время, за которое в реакцию вступило 99,99% вещества (исследуемого газа), то получаем условие:

$t_0 \leq t = V / w = (x \cdot \pi \cdot r^2)/w$ (4.12)

где V – объем реакционной камеры, см^3; t – время прохождения реакции в реакционной камере, с; x – длина реакционной камеры, см; r – внутренний радиус рекционной камеры, см; w – объемный расход.

4.6 Минимизация осаждения аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора

Минимизация осаждения аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора достигается за счет уменьшения вероятности возникновения вихрей на входе в реакционную камеру и организации ламинарного потока в реакционной камере (рисунок 3.3). В этом случае воздействием неровностей внутренней поверхности можно пренебречь и осаждение образовавшегося аэрозоля на внутренней поверхности будет минимально.

Опытным путем установлено, что число Рейнольдса, при котором переход от ламинарного потока к турбулентному начинает влиять на осаждение, имеет значение Re = 2300 [48]. Для камеры в форме трубы [74]:

$$Re = \frac{ux}{\upsilon} = \frac{wx}{\upsilon \pi r^2} \ll 2300 \quad (4.13)$$

$$x \ll \frac{2300 \upsilon \pi r^2}{w} \qquad (4.14)$$

где: u – средняя скорость потока, для трубы $u = w/\pi r^2$, см/с; x – длина реакционной камеры, см; r – внутренний радиус трубы, см; υ - кинематическая вязкость воздуха, $\upsilon = 0{,}15 см^2/с$; w – объемный расход (объемная скорость), $см^3/с$;

Следовательно:

$$x \leq \frac{2300 \cdot 0{,}15 \frac{см^2}{с} \cdot 3{,}14 \cdot r^2}{w} \quad (4.15)$$

т.е. $x \leq 1083\ r^2/w$.

Данное соотношение выполняется при x = 26 см, r = 3,5 см и w = 20 л/мин.

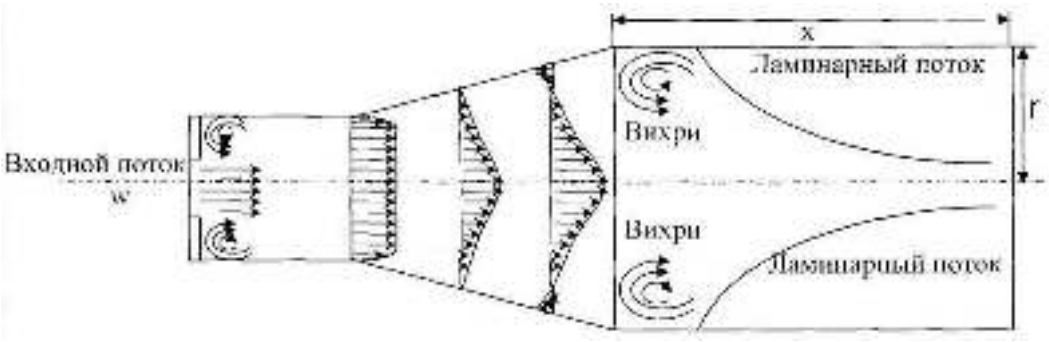


Рисунок 4.3 Схема образования вихрей в реакционной камере

4.7 Параметры реакционной камеры

Параметры реакционной камеры, полученные в результате предыдущих расчетов, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Параметры реакционной камеры

Параметр	Значение
Длина реакционной камеры	26 см
Радиус входа реакционной камеры	0,8 см
Радиус трубок для подачи реагента	0,4 см
Внутренний радиус реакционной камеры	3,5 см
Объемный расход	20 л/мин

4.8 Выводы по главе 4

1. Предложен способ оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси. Способ включает в себя:

1) Отделение аэрозольной фракции от газовой инерционным осаждением на коллекторных пластинах каскадных элементов импактора-фантома;
2) Химическое преобразование газовой составляющей газо-аэрозольной смеси в аэрозольную фракцию путем ввода паров реагента в газовый поток;
3) Осаждение полученных аэрозольных частиц на фильтр.

2. Показано, что минимизация осаждения аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора достигается за счет уменьшения вероятности возникновения вихрей на входе в реакционную камеру и организации ламинарного потока в реакционной камере.

3. Показано, что эффективность преобразования газовой фракции в аэрозольную фракцию зависит от подбора оптимального типа реагента. Установлена принципиальная возможность применения этанола в качестве реагента для преобразования газовой фракции газо-аэрозольныхсмесей, содержащих рутений, в аэрозольную фракцию. В случае гексафторида урана в качестве реагента может быть применен водный раствор аммиака

4.В результате расчетов определено необходимое количество реагента для работы устройства в течение часа при максимальной ожидаемой концентрации газа (предположение, что на вход устройства поступает чистый газообразный тетраоксид рутения RuO_4): 1,3 л этанола.

Глава 5 Численное моделирование и разработка устройства для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси

В данной главе проводилось численное моделирование течения воздушной среды и экспериментальное исследование пробоотборных характеристик устройства для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси.

5.1 Численное моделирование течения воздушного потока в реакционной камере с помощью программного комплекса STAR-CCM+

5.1.1 Построение геометрической модели

Трехмерная модель внутреннего объема устройства (рисунок 5.1) была построена в программе SolidWorks на основе расчетных данных, представленных в таблице 4.1. Для упрощения геометрии модели импактор-фантом был заменен конусом (в первую очередь исследовалось поле скоростей в реакционной камере устройства, исследование поля скоростей в импакторе-фантоме было проведено в главе 3). Для упрощения расчетов использовалась только половина геометрической модели (при задании граничных условий применялось условие симметрии поля течения).

5.1.2 Построение расчетной сетки

Модель внутреннего объема устройства была импортирована в программный комплекс Star-CCM+ для построения объемной сетки. При построении расчетной сетки использовались:

- генератор поверхностной сетки;
- генератор многогранных ячек;
- генератор призматического слоя.

Расчетная сетка включала в себя 640 536 ячеек.

5.1.3 Математическая и физическая модель

При моделировании использовались следующие допущения:

- Воздух считается несжимаемой жидкостью (плотность постоянна);
- Поле течения – стационарное;
- Режим течения – турбулентный;

- Для моделирования турбулентности применялась k-ε модель турбулентности;
- Поле течения находится при нормальных условиях воздушной среды, т.е. температуре +20 ºС и давлении 1 атм.

Математическая модель для описания гидродинамических процессов, происходящих в устройстве, состояла из системы уравнений, описывающих стационарное турбулентное движение несжимаемой вязкой жидкости, и включала в себя уравнение Навье-Стокса (3.9), а также уравнения, описывающие поле течения, используемые в к–ε модели турбулентности (3.10 – 3.13).

5.1.4 Задание граничных условий

В расчете были приняты следующие граничные условия (рисунок 5.1):

– стагнация на входе - условие входа потока среды в расчетную область с фиксированным перепадом давления и компонентами линейной скорости $\{u_x, u_y, u_z\}$, $u_x = 0$, $u_y = 0$, $u_z \neq 0$, p = 101325 Па;

- поток массы на выходе, равный $4 \cdot 10^{-4}$ кг/с при объемном расходе 20 л/мин - условие выхода потока среды из расчетной области, $u_x \neq 0$, $u_y \neq 0$, $u_z \neq 0$, p = 0.

Рисунок 5.1 Трехмерная модель внутреннего объема устройства с указанием граничных условий: 1 – стагнация на входе, 2 – поток массы на выходе, 3 – плоскость симметрии.

5.1.5 Результаты расчета поля скоростей и перепада давления через устройство

В результате расчета с помощью программного комплекса Star-CCM+ было получено поле скоростей в устройстве (рисунок 5.2) и поле давления (рисунок 5.3).

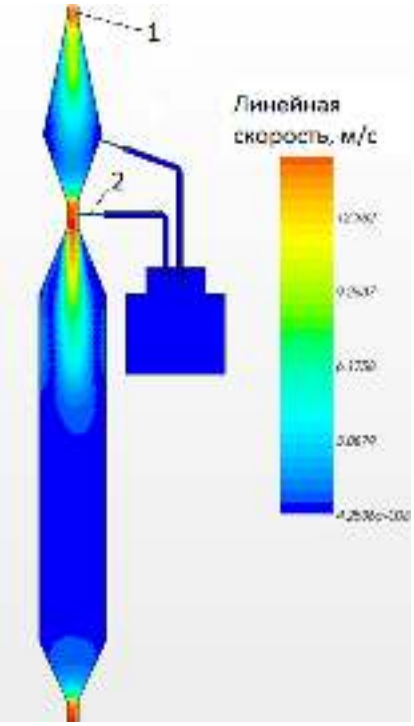


Рисунок 5.2 Поле скоростей

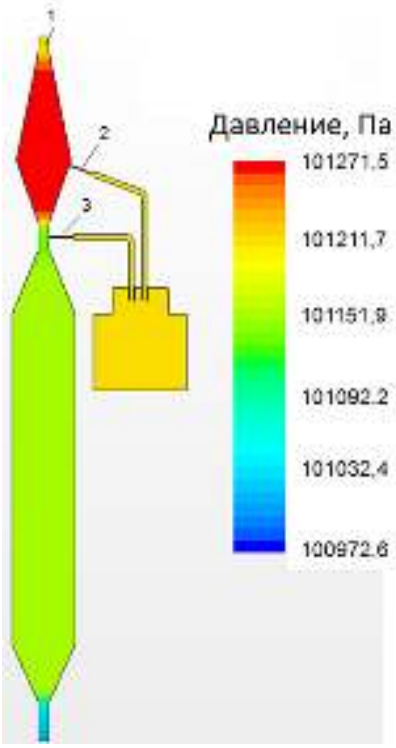


Рисунок 5.3 Поле давления

В таблице 5.1 представлены значения линейных скоростей в точках 1 и 2 устройства.

Таблица 5.1 Значения линейных скоростей потока, м/с в точке 1 и точке 2 (рисунок 5.2) устройства

Лин.скорость, м/с		1/2	
Точка 1	Точка 2		Объемный расход, л/мин
8,40E-05	1,70E-07	124	20
1,26E-04	2,98E-07	106	30
6,03E-05	5,98E-07	101	40
2,11E-04	5,73E-07	91,9	50

Из данных таблицы 5.1 следует, что объемная скорость потока через штуцер 2 в 100-120 раз меньше, чем объемная скорость воздуха в верхней цилиндрической части реактора 1. Это приводит к тому, что незначительная часть воздуха от основного потока (от 0,8% при объемной скорости прокачки 20 л/мин, до 1% при 50 л/мин) направляется через штуцер 1 из химического реактора в емкость для реагента, где насыщается парами реагента, после чего возвращается в химический реактор через штуцер 2. Наличие

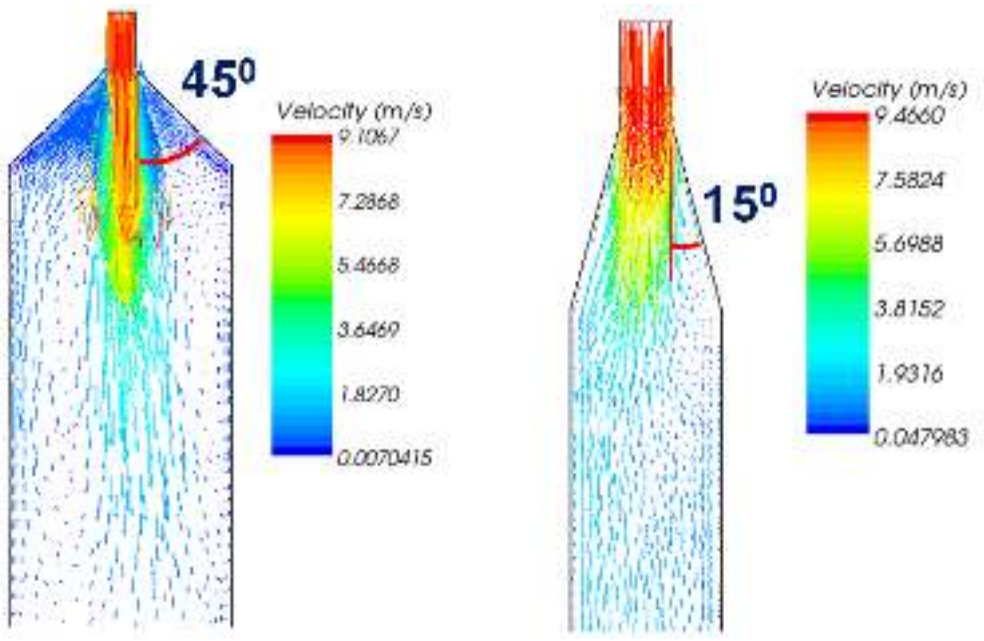
перепада давления между штуцерами 1 и 2 также подтверждается профилем перепада давления в поперечном срезе геометрии устройства (рисунок 5.3) и данными таблицы 5.2.

Таблица 5.2 Значение давления в точках 1-3 (Рисунок 5.3)

Точка	1	2	3	DP (2 – 3)
Давление, Па	100351	100441	99995	446

5.1.6 Исследование влияния угла расширения диффузора реакционной камеры на осаждение аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора

Минимизация осаждения аэрозолей на внутренней поверхности химического реактора достигается за счет уменьшения вероятности возникновения вихрей на входе в реакционную камеру и создании в ней ламинарного потока. В результате численного моделирования было установлено, что на ламинарность потока влияет угол расширения диффузора. Расчеты показывают, что оптимальным углом является значение угла α = 15° (рисунок 5.4б).



а) б)

Рисунок 5.4б Схема образования вихрей в реакторе

а) вихри образуются б) вихри не образуются

5.2 Разработка конструкции устройства для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси

Предлагаемое устройство (рисунок 5.5) состоит из импактора 1, реактора 2 и емкости для реагента 3, при этом импактор (рисунок 5.6) состоит из корпуса 4 и каскадных элементов 5. К верхней части корпуса импактора 4 посредством резьбового соединения может присоединяться штуцер 6, нижняя часть корпуса импактора 4 соединена с верхней конической частью реактора 7 посредством резьбового соединения.

На верхней конической части реактора 7 располагается штуцер 8 для присоединения емкости для реагента 3, второй штуцер 9 для присоединения емкости для реагента 3 расположен на цилиндрической горловине реактора 10. Корпус реактора 11 имеет цилиндрическую форму, на выходе из реактора устанавливается фильтр 12 и сетка 13, предотвращающая разрыв фильтра (рисунок 5.7). Днище реактора 14 имеет коническую форму и оснащено штуцером 15 для присоединения побудителя расхода. Корпус реактора 11 и днище реактора 14 соединяются при помощи крепежных винтов 16, для уплотнения соединения используется прокладка 17 (рисунок 5.7). Емкость для реагента 3 закрывается герметично крышкой 18 со штуцером 19 (для подачи незначительной части газового потока из реактора 2 в емкость 3) и штуцером 20 (для подачи паров реагента из емкости 3 в реактор 2.

Подготовка устройства к работе осуществляется в следующем порядке. Корпус реактора 11 закрепляется на штативе 21 (рисунок 5.5). В соответствии со схемой на рисунке 5.7 компонуется нижняя часть реактора: в днище реактора 14 устанавливается фторопластовое кольцо 22, сетка 13, фильтр 12, прокладка 17. Скомпонованная нижняя часть реактора соединяется с корпусом реактора 11 (рисунок 5.7) при помощи крепежных винтов 16. Затем собирается импактор (рисунок 5.8). Перед присоединением импактора 1 к реактору 2 (рисунок 5.5) в верхней конической части реактора 7 размещается прокладка 23, затем вворачивается собранный импактор 1. В емкость 3 заливается реагент, и она закрывается герметично крышкой 18 (рисунок 5.5). Емкость 3 прикрепляется к реактору 2 с помощью хомута 24. С помощью трубок 25 и 26 емкость 3 подсоединяется к штуцерам 8 и 9 соответственно. К штуцеру 15 подсоединяется побудитель расхода 27, как указано на схеме подключения устройства (рисунок 5.9). Внешний вид устройства показан на рисунке 5.10.

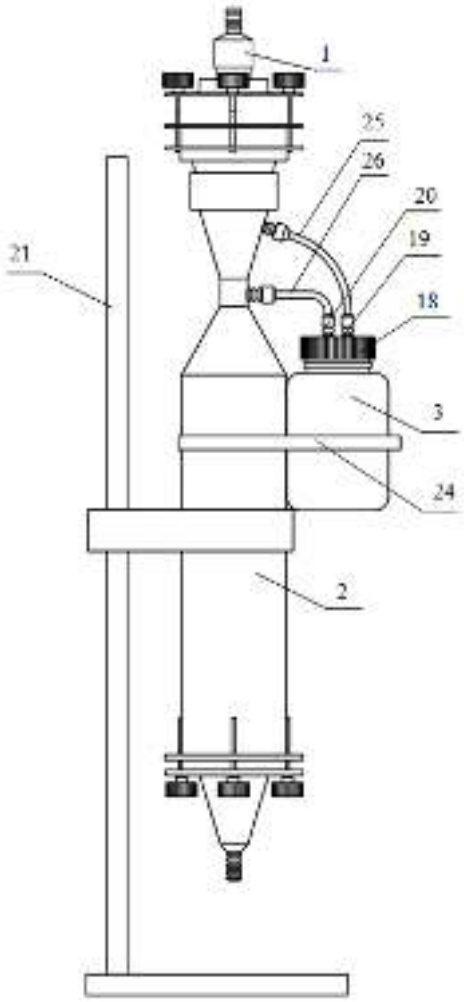


Рисунок 5.5 Общий вид устройства

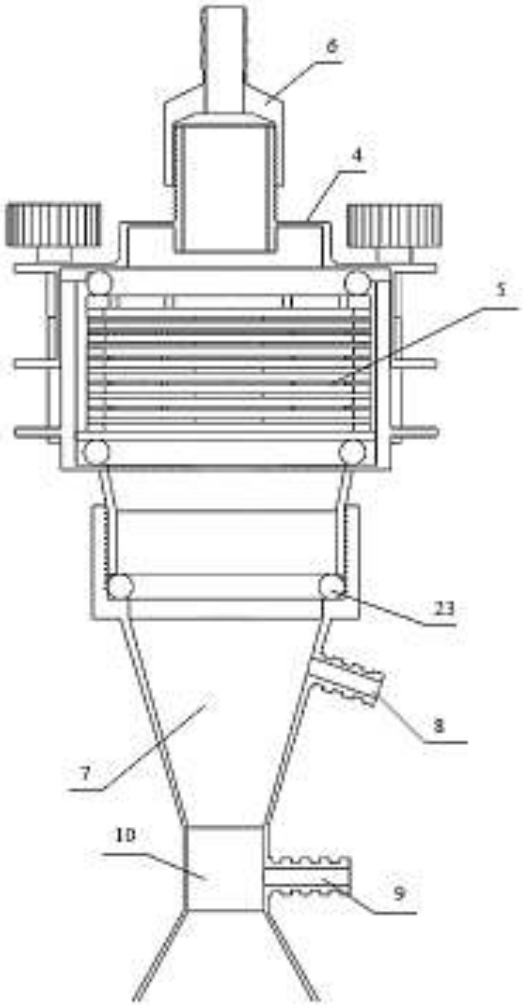
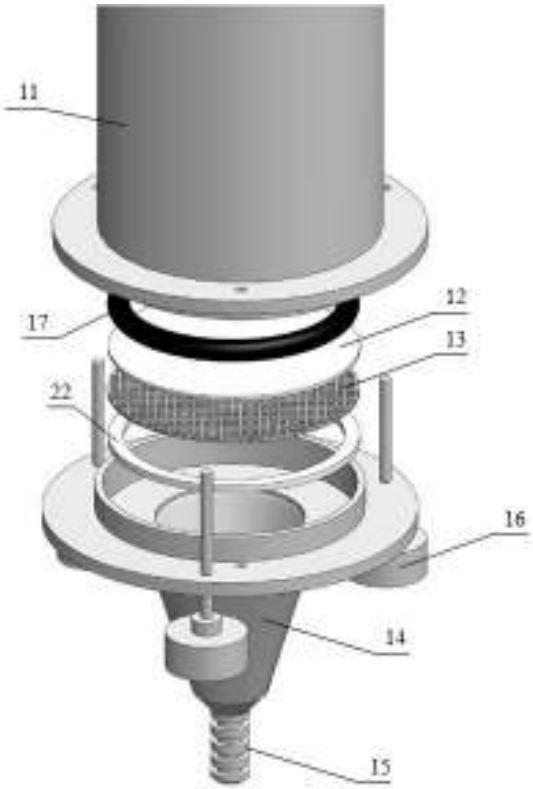


Рисунок 5.6 Соединение импактора с верхней конической частью реактора

Устройство работает следующим образом: включается побудитель расхода 27 (рисунок 5.9) и воздух, содержащий радиоактивную газо-аэрозольную смесь, поступает в импактор через штуцер 6 (рисунок 5.6) и формируется в поток с заданными пространственно-скоростными параметрами. При прохождении через импактор 1 частицы аэрозоля осаждаются на каскадных элементах 5 (рисунок 5.6), распределяясь в соответствии с их аэродинамическими диаметрами. Очищенный от аэрозоля воздух, содержащий газовую фракцию исследуемой газо-аэрозольной смеси, поступает из импактора 1 в реактор 2 (рисунок 5.5).

Экспериментально с помощью цифровых расходомеров, а также методами вычислительной гидродинамики установлено, что объемная скорость потока через штуцер 8 в 100-120 раз меньше, чем объемная скорость воздуха в верхней цилиндрической части реактора 7.



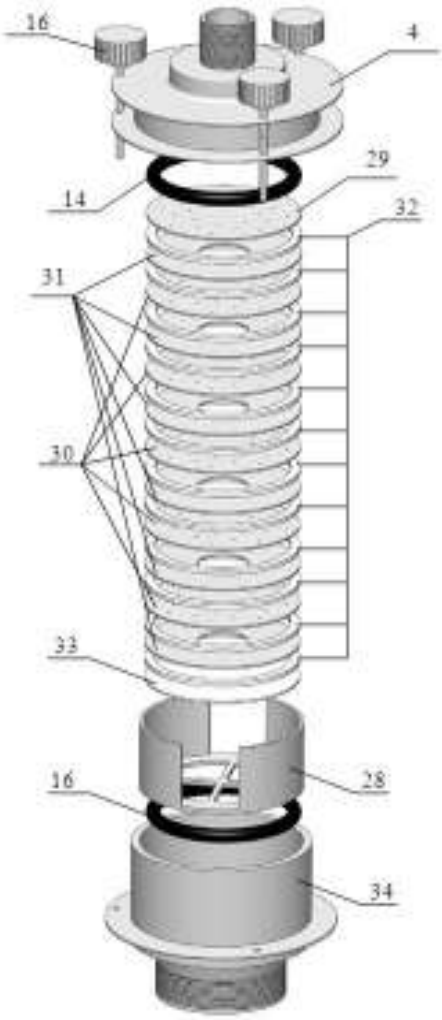


Рисунок 5.7 Схема компоновки нижней части реактора

Рисунок 5.8 Схема компоновки импактора

Это приводит к тому, что незначительная часть воздуха от основного потока (от 0,8% при объемной скорости прокачки 20 л/мин до 1% при 50 л/мин) направляется через штуцер 8 из реактора 2 в емкость для реагента 3, где насыщается парами реагента, после чего возвращается в реактор 2 через штуцер 9.Таким образом, в узкой цилиндрической горловине реактора 10 (рисунок 5.6) скорость течения газа выше, а давление на стенки меньше, чем в широкой верхней конической части реактора 7, в результате чего наблюдается перепад давления между штуцерами 8 и 9. За счет этого незначительная часть основного потока воздуха (от 0,8% при объемном расходе $3{,}3\cdot10^{-4}$ м^3/с до1,0% при объемном расходе $8{,}3\cdot10^{-4}$ м^3/с) направляется через штуцер 8 из реактора 2 в емкость для реагента 3, где насыщается парами реагента, после чего возвращается в реактор 2 через штуцер 9. В цилиндрической горловине реактора 10 воздушный поток смешивается с парами реагента. В реакторе 2 происходит образование аэрозольных частиц по реакции

между молекулами контролируемого газа и реагента. Образовавшиеся аэрозольные частицы оседают на фильтре 12 (рисунок 5.7).

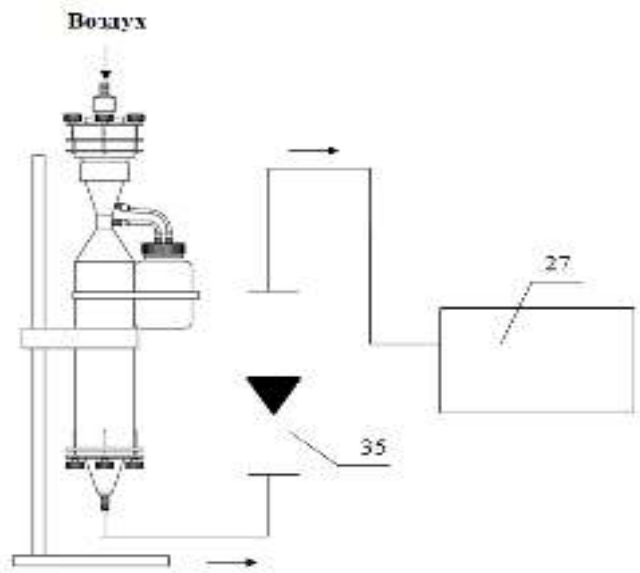


Рисунок 5.9 Схема подключения устройства

Рисунок 5.10 Внешний вид устройства

Длительность отбора пробы – в зависимости от уровней объемной активности отбираемой радиоактивной газо-аэрозольной смеси в воздушной среде. По завершении пробоотбора побудитель расхода 27 (рисунок 5.9) отключается, импактор 1 отсоединяется от реактора 2 (рисунок 5.5) и аккуратно разбирается, из него вынимаются каскадные элементы 5, кроме того, вынимается фильтр 12 из нижней части реактора (рисунок 5.7).

После окончания всех измерений проводят дезактивацию корпуса устройства и емкости с реагентом мыльным раствором. После измерения фильтры с пробой сохраняют для контрольных измерений или выбрасывают в мусоросборник для радиоактивных отходов.

Объемную активность аэрозольной фракции радионуклида рассчитывают по формуле:

$C_{аэр} = A_{аэр}/V_t$ (5.1)

где $C_{аэр}$ – объемная активность аэрозольной фракции радионуклида, Бк/м^3; $A_{аэр}$– суммарная активность радионуклида на всех каскадных элементах импактора, Бк; V_t – объем пробы, м^3.

Объемную активность газовой фракции радионуклида рассчитывают по формуле:

$C_Г = A_Г/V_t$ (5.2)

Где $C_Г$ – объемная активность газовой фракции радионуклида, Бк/м^3; $A_Г$–активность радионуклида, накопленная фильтром на выходе устройства, Бк;V_t – объем пробы, м^3.

Суммарная объемная активность радионуклида в воздухе $C_{общ}$, измеренная с помощью устройства рассчитывается по формуле:

$C_{общ} = C_{аэр} + C_Г$ (5.3)

Долю объемной активности, приходящуюся на газовую фракцию, $\Delta C_Г$ определяют по формуле:

$\delta C_Г = C_Г/(C_Г + C_{аэр})$ (5.4)

5.3 Экспериментальные исследования характеристик устройства

5.3.1 Измерение объемной скорости потока через устройство

С помощью цифрового расходомера TSI (модель 4199) измерялся объемный расход в точках 1 и 2 (рисунок 5.3) при различных значениях объемного расхода через устройство. Результаты измерений представлены в таблице 5.3, из которой следует, что объемная скорость потока через штуцер 2 в 100-120 раз меньше, чем объемная скорость воздуха в верхней цилиндрической части реактора 1. Это приводит к тому, что незначительная часть воздуха от основного потока (от 0,8% при объемной скорости прокачки 20 л/мин, до 1% при 50 л/мин) направляется через штуцер 2’ из реактора в емкость для реагента, где насыщается парами реагента, после чего возвращается в реактор через штуцер 2.

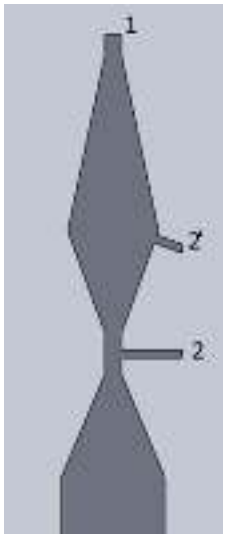


Рисунок 5.11 Точки замера значений объемного расхода

Таблица 5.3 Результаты измерений объемной скорости потока в точке 1 и точке 2 (рисунок 5.11)

Расход в точке 1, Q_1, л/мин	Расход в точке 2, Q_2, л/мин	Q_1/Q_2
24	0,2	120
26	0,21	121
28	0,24	118
30	0,26	114
32	0,28	113
34	0,3	111
36	0,33	110
38	0,35	109
50	0,5	100

5.3.2 Исследование зависимости скорости расхода реагента от различных параметров

Экспериментально была определена зависимость скорости расхода реагента (этанола) от температуры окружающей среды и объемной скорости прокачки воздуха через реактор. Графики зависимости скорости расхода реагента от температуры и от объемной скорости пробоотбора представлены на рисунках 5.12, 5.13.

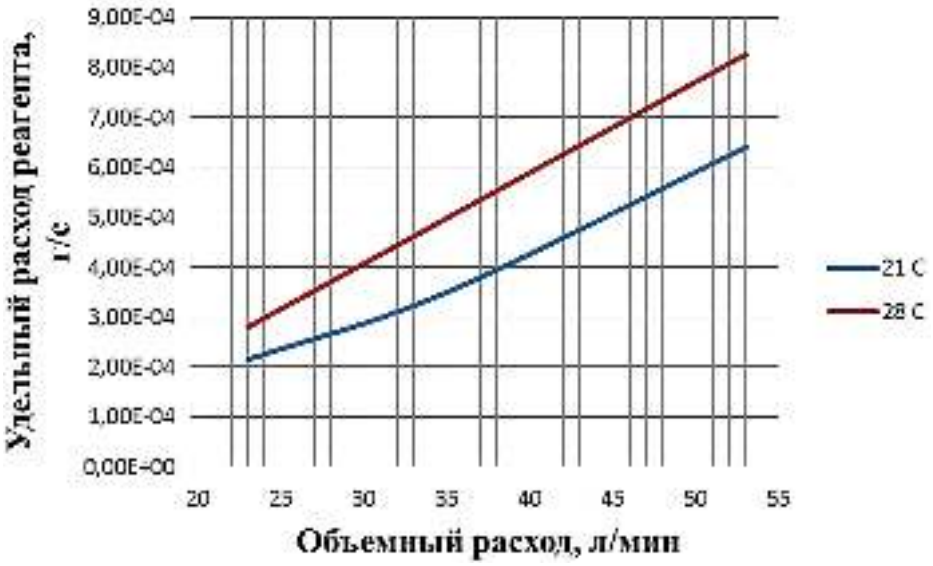


Рисунок 5.12 График зависимости удельного расхода реагента от объемного расхода при различной температуре окружающей среды (21^0С и 28^0С)

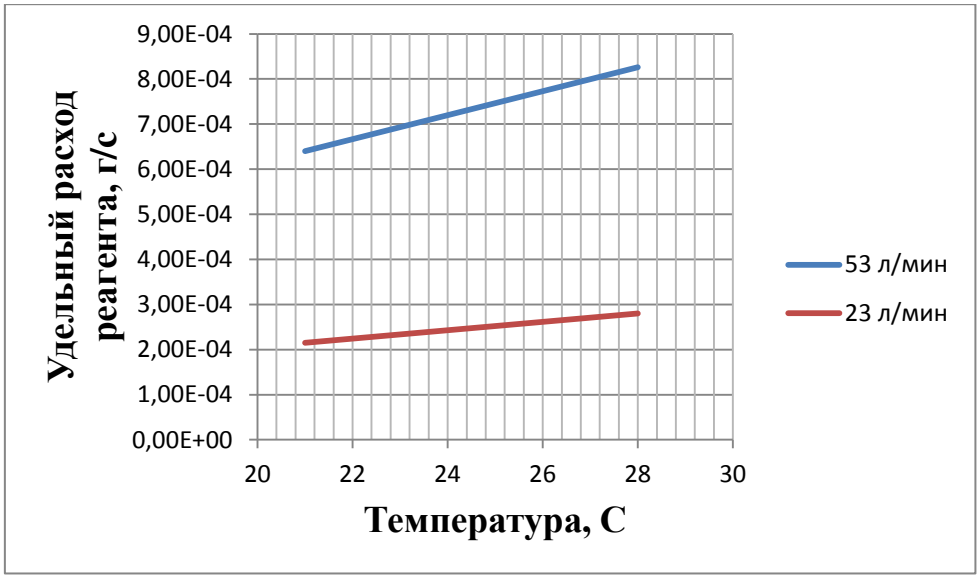


Рисунок 5.13 График зависимости удельного расхода реагента от температуры окружающей среды при различных значения объемного расхода (23 л/мин и 53 л/мин)

5.4 Применение устройства на СЗ и ЗРИ АО «СХК» для оценки доли газообразной фракции ГФУ

Отбор проб газообразного ГФУ проводился с помощью разработанного устройства на СЗ и ЗРИ АО «СХК» в период с 30.01.17 по 6.02.17. Результаты исследований представлены в отчете [34]. Вместо импактора для отсечки аэрозольной фракции на входе устройства устанавливалось 2 фильтра АФА-РСП-20. В качестве реагента использовался 10% водный раствор аммиака. Газообразная фракция улавливалась фильтром АФА-РСП-20, установленным на выходе из устройства. После транспортировки в лабораторию фильтры подвергались радиохимической пробоподготовке, полученные счетные образцы измерялись на альфа-спектрометрах Alpha-DUO и Мультирад-АС. Результаты измерений представлены в табл.5.4.

Доля газообразного ГФУ у десублиматоров 212, 210 на нулевой отметке варьировалась от 1,2 до 5,2%. Доля ГФУ на отметке +6,3 м у реактора гидрофторирования составила 0,9%.

Доля наноаэрозолей, определенная по активности на втором фильтре (устанавливался после первого аэрозольного фильтра, чтобы исключить проскок), оказалась незначительной и варьировалась от 0,2 до 2,9%.

В здании 1004 ЗРИ расположены конденсационно-испарительные установки (КИУ), предназначенные для питания разделительных каскадов завода сырьем ГФУ, для конденсации ГФУ отбора и отвала завода, а также для очистки ГФУ питания, отбора и отвала от примесей.

На ЗРИ в зд.1004 коллектор № 2 т.12 (закачка обогащенного UF_6 в емкости) были установлены последовательно расположенные импактор АИП-2 (проба № 6 табл.5.4) и химический реактор. Доля газообразного ГФУ по результатам альфа-радиометрии составила 0,52% (в графе «фильтр 1» таблицы 5.4 указана суммарная активность альфа-излучающих радионуклидов по каскадам импактора).

На основании данных таблицы 5.4 был рассчитан вклад газообразной фракции ГФУ в годовое значение ОЭД для СЗ и ЗРИ. Дозовый коэффициент для ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей 2,2Е-6 Зв/Бк для производства № 2 СЗ был получен в ходе выполнения работ с применением разработанного импактора-фантома, описанных в разделе 3.6.2 (см. табл.3.2.1). Дозовый коэффициент 2,7Е-5 Зв/Бк для аэрозолей ЗРИ получен в ходе выполнения работ, представленных в отчете [34]. Т.к. дозовые коэффициенты для газообразной фракции ГФУ в базе данных МКРЗ [80] отсутствуют, для консервативной оценки в расчете использовались наибольшие дозовые

коэффициенты для смеси нуклидов $^{234}U+^{235}U+^{238}U$ (соответствующие АМАД 0,03 мкм, см.рисунок 5.14) с типом при ингаляции Б. Результаты расчета представлены в таблице 5.5

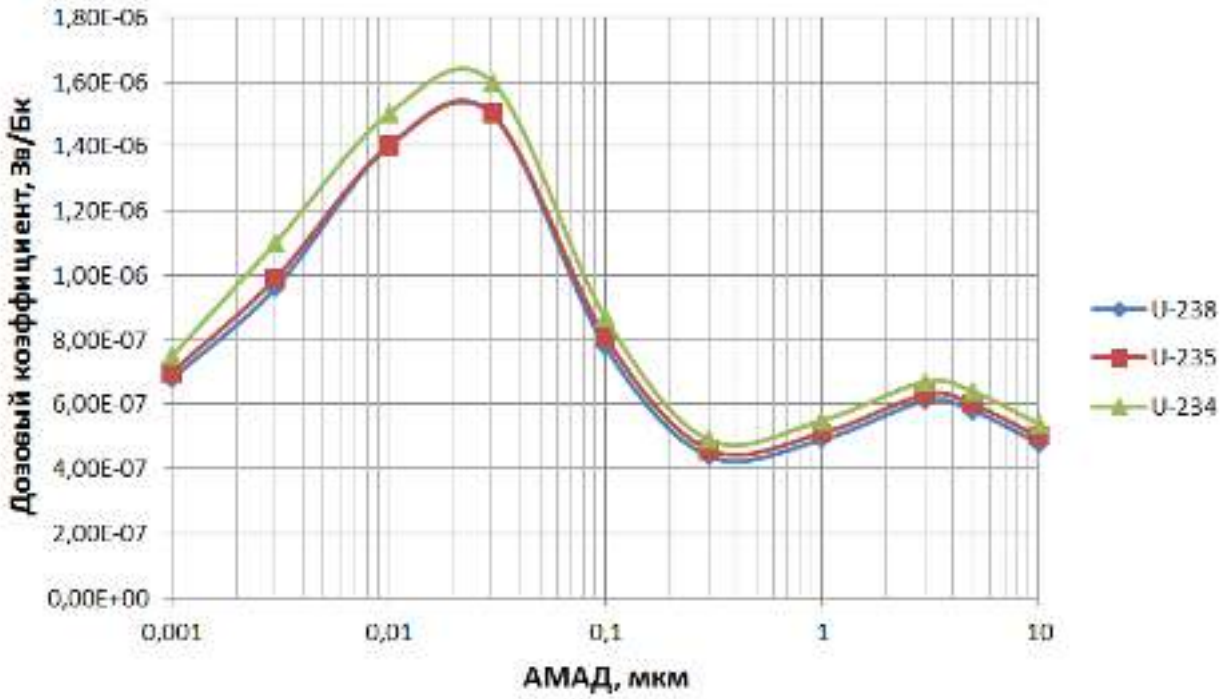


Рисунок 5.14 Зависимость дозового коэффициента от АМАД для изотопов урана (тип при ингаляции Б), по данным из базы МКРЗ [80].

Таблица 5.4 Результаты определения объемной активности газообразного UF_6 на СЗ (п.1-5) и ЗРИ (п.6)

№	Точка	Отм.	Описание	Начало отбора	Конец отбора	Продолжительность, ч	Средний объемный расход, л/мин	Объем прокачки, м3	Тср, С	Нср, %	Активность $U^{234}+U^{235}+U^{238}$ на фильтре, Бк			**Доля ГФУ**	Объемная активность ГФУ, Бк/м3	Доля активности на 2-м фильтре
											1	2	3			
1	212н	0	Десублиматоры 211/1,2	30.01.17 10:30	30.01.17 16:20	6	22,9	8,0	20,5	33,7	7,0 ± 0,8	0,22 ± 0,03	0,40 ± 0,04	**5,2% ± 0,8%**	0,050 ± 0,006	2,9%
2	212н	0	Десублиматоры 211/1,2	31.01.17 12:40	31.01.17 18:40	6	20,0	7,2	19,3	36,6	33 ± 3	0,58 ± 0,07	0,41 ± 0,06	**1,2% ± 0,2%**	0,056 ± 0,009	1,7%
3	212н	0	Десублиматоры 211/1,2	01.02.17 16:25	02.02.17 11:40	19	26,0	30,0	24,5	27,5	8,0 ± 0,9	0,086 ± 0,010	0,29 ± 0,03	**3,5% ± 0,5%**	0,010 ± 0,001	1,0%
4	226	6,3	Реактор гидрофторирования 226	03.02.17 14:30	04.02.17 18:00	28	40,5	66,8	-	-	53 ± 6	0,12 ± 0,02	0,51 ± 0,06	**0,9% ± 0,2%**	0,008 ± 0,001	0,2%
5	210/3	0	Десублиматор 210/3	06.02.17 12:15	07.02.17 12:35	24	35,9	52,3	16,2	36,4	53 ± 6	0,20 ± 0,03	0,69 ± 0,07	**1,3% ± 0,2%**	0,013 ± 0,001	0,4%
6	зд.1004 т.12		Коллектор № 2*	10.02.17 10:30	15.02.17 10:00	119	22	157	28,6	12,4	13,4 ± 2,1	-	0,070 ± 0,015	**0,52% ± 0,14%**	4,5E-04 ± 9E-05	-

*Для пробы № 6 приведены данные по альфа-радиометрии

Таблица 5.5 Вклад газообразной фракции ГФУ в годовое значение ОЭД на СЗ и ЗРИ

Проба	Точка	Отм	Фракция	ОА, Бк/м3	Доз.коф, Зв/Бк	ОЭД, мЗв в год	Вклад в ОЭД
1-3	212н	0	аэрозоль	1,95	2,20E-06	10,3	98,6%
			газ	0,04	1,55E-06	0,14	**1,4%**
4	226	6,3	аэрозоль	0,80	2,20E-06	4,20	99,3%
			газ	0,008	1,55E-06	0,03	**0,7%**
5	210/3	0	аэрозоль	1,0	2,20E-06	5,37	98,7%
			газ	0,013	2,20E-06	0,07	**1,3%**
6	ЗРИ коллектор №2	-	аэрозоль	0,09	2,70E-05	5,53	99,97%
			газ	4,46E-04	1,55E-06	0,002	**0,03%**

Как видно из таблицы 5.5, вклад газообразной фракции ГФУ в годовую ОЭД незначителен и составляет в среднем 1,1% для производства № 2 СЗ и 0,03% для ЗРИ.

На рисунке 5.15 представлено распределение активности по аэродинамическим диаметрам в пробе 6 (табл.5.4) **без учета первого каскада**, на который приходится 92,7% активности (т.е. если бы спектр был восстановлен по **всем** каскадам импактора, на графике присутствовала бы еще третья мода с аэродинамическим диаметром более 26 мкм). Значение АМАД составило 17,1 мкм βg = 16,9. Столь крупные значения АМАД и β_g в зд.1004 могут быть обусловлены характером рабочего процесса, в частности частым движением мостового крана, который перемещает емкости с ГФУ, вызывая периодический подъем грубодисперсной фракции аэрозолей, чему также может способствовать сухой воздух: среднее значение влажности, определенное по климатическому датчику оптического счетчика HandHeld 3016, снимавшего показания все время, пока велся пробоотбор на импактор составило 12,4% при Т = 28,6 ^{0}С.

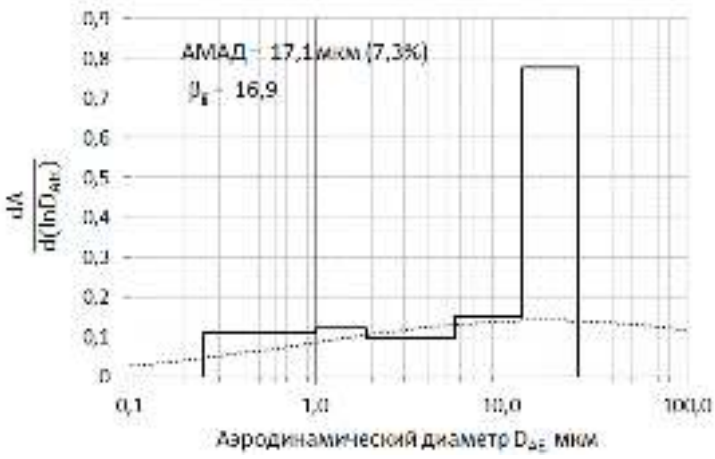


Рисунок 5.15 Распределение активности по аэродинамическим диаметрам аэрозольных частиц, коллектор № 2 т.12 зд.1004 ЗРИ (проба 6, табл.4.5), β

Рассчитанные доли активности радиоактивных аэрозолей, осажденных в отделах дыхательного тракта при данных характеристиках распределения (АМАД$_1$ = 17,1 мкм, βg_1 = 16,9 (7,3%); АМАД$_2$ = 38 мкм βg_2 = 1,3 (92,3%)) представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.6 Доля активности аэрозолей DE_A, осажденная в респираторном тракте (для распределения на рисунке 5.14)

ET1	ET2	BB	bb	AI
27,3%	27,7%	0,10%	0,10%	0,30%

Как видно, наибольший процент активности аэрозольных частиц осаждается в верхних дыхательных путях.

5.5 Выводы по главе 5

1. Разработано устройство для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе раздельного анализа фазового и дисперсного состава данной смеси, позволяющее снизить неопределенность при оценке дозы внутреннего облучения.

2. Показано, что минимизация осаждения аэрозолей на внутренней поверхности реакционной камеры химического реактора достигается за счет уменьшения вероятности возникновения вихрей на входе в реакционную камеру и создании в ней ламинарного потока. В результате численного моделирования установлено оптимальное значение угла расширения диффузора (расширяющийся канал течения среды) - 15^0, при котором достигается ламинарность потока в реакционной камере.

3. Получены экспериментальные зависимости скорости расхода реагента (этанола) от температуры окружающей среды и объемной скорости прокачки воздуха через химический реактор.

4. Доля газообразного гексафторида урана, определенная с помощью разработанного устройства на СЗ и ЗРИ АО «СХК», варьируется от 0,52% до 5,2%. Рассчитанный вклад газообразной фракции ГФУ в годовое значение ОЭД оказался незначителен и составляет в среднем 1,1% для СЗ и 0,03% для ЗРИ.

5. Крупные значения АМАД и β_g (17,1 мкм βg = 16,9) в зд.1004 ЗРИ могут быть обусловлены характером рабочего процесса, в частности частым движением мостового крана, который перемещает емкости с ГФУ, вызывая периодический подъем грубодисперсной фракции аэрозолей, чему также может способствовать сухой воздух: среднее значение влажности, определенное по климатическому датчику оптического счетчика HandHeld 3016, снимавшего показания все время, пока велся пробоотбор на импактор составило 12,4% при T = 28,6 ^{0}C.

6. Рассчитаны доли активности радиоактивных аэрозолей, осажденных в отделах дыхательного тракта при данных характеристиках распределения (АМАД$_1$ = 17,1 мкм, βg_1 = 16,9 (7,3%); АМАД$_2$ = 38 мкм βg_2 = 1,3 (92,3%)) в зд.1004 ЗРИ: ET1 - 27,3%; ET2 - 27,7%; BB - 0,1%; bb - 0,1%; AI - 0,3%. Наибольший процент активности аэрозольных частиц осаждается в верхних дыхательных путях.

Заключение

1. Разработан аппаратурно-методический комплекс для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе экспериментального определения объемной активности:

– аэрозольной фракции с учетом распределения активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта и
– газовой фракции путем ее преобразования в аэрозольную фракцию,

позволяющий повысить точность оценки дозы внутреннего облучения лиц из персонала и населения при ингаляционном поступлении радиоактивных газо-аэрозольных смесей в различных ситуациях облучения (включая аварийные) за счет получения экспериментальных данных о дисперсном составе, о распределении активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта, о фазовом составе (соотношение объемных активностей газ/аэрозоль) газо-аэрозольной смеси.

2. Разработан метод оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах дыхательного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора. Предложенный метод позволяет оценить активность аэрозольных частиц, осажденных в различных отделах дыхательного тракта согласно дозиметрической модели Публикации 66 МКРЗ, независимо от типа распределения активности аэрозолей по размерам частиц.

3. Разработана конструкция импактора-фантома респираторного тракта человека для реализации метода оценки активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта. Получены численные и экспериментальные зависимости эффективности осаждения от аэродинамического диаметра аэрозольных частиц для каскадов устройства.

4. Разработано устройство, состоящее из размещенных последовательно импактора и химического реактора, для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей на основе анализа фазового (соотношение объемных активностей газ/аэрозоль) и дисперсного состава данной смеси. Установлена принципиальная возможность применения этанола в качестве реагента для преобразования газовой фракции газо-аэрозольных смесей, содержащих рутений, в аэрозольную фракцию.

5. Производственные исследования, проведенные на различных участках технологической цепочки Н завода 45 ФГУП «ПО «Маяк» с помощью разработанного импактора-фантома, позволили установить реальные характеристики ингаляционного поступления радионуклидов в организм персонала и устранить систематическое завышение оценки

ожидаемой эффективной дозы в 2 раза (акт о внедрении результатов диссертационной работы на ФГУП «ПО «Маяк» № 193-5-5.5/3297 от 9.12.2015).

6. Дозовые коэффициенты, рассчитанные с учетом физико-химические характеристик радиоактивных аэрозолей, установленных в результате производственных исследований, выполненных на химико-металлургическом и сублиматном заводах АО «СХК» с помощью импактора-фантома, позволили устранить систематическое завышение оценки ожидаемой эффективной дозы для персонала химико-металлургического завода в 1,6 раз (акт о внедрении результатов диссертационной работы на АО «СХК» № 106-08/470 от 3.04.2015) и для персонала сублиматного завода – в 3,8 раз.

Приложение 1 Пат. 2480730. РФ. Устройство для измерения дисперсности и контроля объемной активности газовой и аэрозольной фракции радиоактивного рутения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2480730

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ И ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ АЭРОЗОЛЬНОЙ И ГАЗОВОЙ ФРАКЦИЙ РАДИОАКТИВНОГО РУТЕНИЯ

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное учреждение "Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И.Бурназяна" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2011147487**

Приоритет изобретения **23 ноября 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***27 апреля 2013 г.***

Срок действия патента истекает **23 ноября 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Приложение 2 Пат. РФ 2509375. Импактор-фантом респираторного тракта человека

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2509375

ИМПАКТОР-ФАНТОМ РЕСПИРАТОРНОГО ТРАКТА ЧЕЛОВЕКА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное учреждение "Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012121978**

Приоритет изобретения **29 мая 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***10 марта 2014 г.***

Срок действия патента истекает **29 мая 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Приложение 3 Акт внедрения результатов диссертационной работы на ХМЗ «СХК»

СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Акционерное общество
«СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»
(АО «СХК»)
Курчатова ул., 1, г. Северск Томской обл., 636039
Телеграф: Северск, Иртыш, 126121
Факс: (3822) 72-44-46
E-mail: shk@seversk.tomskinet.ru
http://www.atomsib.ru
ОКПО 07622928, ОГРН 1087024001965
ИНН/КПП 7024029499/702450001

03.04.2015 № 106-08/ 940

На № _____ от _____

Диссертационный совет Д 462.001.02
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна
ФМБА России

126182, г. Москва, ул. Живописная, д.46

Акт
о внедрении результатов диссертационной работы Карева А.Е.
«Аппаратурно-методический комплекс для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей»

Настоящим актом удостоверяется, что устройство, импактор-фантом респираторного тракта человека, разработанное в ходе выполнения диссертационной работы Карева А.Е. «Аппаратурно-методический комплекс для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей», обладает актуальностью, представляет практический интерес и применялось для исследования дисперсного состава радиоактивных аэрозолей производственной среды на химико-металлургическом заводе АО «СХК». Результаты представлены в отчете «О выполнении работ комплексное обследование радиоактивных аэрозолей производств ХМЗ «СХК». Договор № 27/02-0399 от 28.03.2014 г.» (Инв. № Ц-602).

Технический директор ОАО «СХК» В.Н. Крутых

Долгиполов Ю.В. (3923) 52-86-78
2 экз.

ВХОД № 982
ДАТА 16.04.15
КОЛ-ВО ЛИСТОВ 1
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна ФМБА России

Приложение 4 Акт внедрения результатов диссертационной работы на ФГУП ПО «Маяк»

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ
"МАЯК"
ФГУП «ПО «МАЯК»

Отдел радиационной безопасности

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

09.12.2015 № 193-5-5.5/3297

На № _____ от _____

Акт о внедрении
результатов диссертационной работы Карева А.Е.
«Аппаратурно-методический комплекс для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей»

Настоящим актом удостоверяется, что устройство, импактор-фантом респираторного тракта человека, разработанное в ходе выполнения диссертационной работы Карева А.Е. «Аппаратурно-методический комплекс для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей», успешно зарекомендовало себя при исследовании дисперсного состава радиоактивных аэрозолей производственной среды на заводе № 45 ФГУП «ПО «Маяк». Результаты представлены в отчете «Исследование особенностей формирования аэродисперсных систем на предприятии ФГУП «ПО «Маяк», НИР «Защита», исх. № 5-02/2091 от 05.11.2014.

Главный инженер
ФГУП «ПО «Маяк» 09.12.2015 Д.Ю. Белкин

Список литературы

1. Аладова Е. Е. Влияние физико-химических свойств промышленных альфа-активных аэрозолей на результаты биофизического мониторинга персонала, работающего в контакте с плутонием: дис. канд. биол. наук: 03.00.01. - М., 2005. - 127 с.

2. А.с. № 565430 кл. 01J 8/04. Способ очистки газов / О.С. Ананян, С.А. Блинников, И.Е. Нахутин, А.С. Поляков, А.И. Кулаков, А.С. Такмазян (СССР). – Опубл. 30.03.1978, бюл. № 12. – 2 л.

3. Антипин Е.Б. Научные основы обеспечения радиационно-гигиенической безопасности персонала предприятий атомной промышленности в современных условиях: дис. д-ра мед. наук: 14.02.01. - М., 2011. – 264 с.

4. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Припачкин Д.А., Семенов В.Н., Сороковикова О.С., Фокин А.Л., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Смирнова М.М. Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония) 15 марта 2011 г. Атомная энергия. 2012. Т. 112. № 3. сс. 159-163.

5. Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сороковикова О.С. Трансграничный перенос при малых выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. Атомная энергия. 2014. Т. 117. № 2. С. 109-112

6. Архипов В.А. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность / В.А. Архипов, У.М. Шереметьева. - Томск, 2007. - 136 с.

7. Борисов Н.Б. Исследование газообразных фракций радиоактивного йода // Атомная энергия. - 2004. - Т. 97. - Вып. 5. - С. 349-355.

8. Специфические свойства аэрозолей полония / Н.Б. Борисов, Л.И. Борисова, С.Л. Чуркин, И.В. Петрянов-Соколов // Коллоидный журнал. - 1995. - Т.57. - №1. - С.11-14.

9. Наблюдение за газоаэрозольными компонентами радиоиода и радиорутения в первые недели после аварии на ЧАЭС / Н.Б. Борисов, Б.И. Огородников, Г.А. Кауров и др. // Науч.-техн. реф. сборник. - М.: НИИТЭХИМ, 1992. - Вып.1. - С.17-24.

10. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. - М.: Химия, 1990. - 288 с.

11. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / С.П. Беляев, Н.К. Никифорова, В.В. Смирнов, Г.И. Щелчков. - М.: Энергоиздат, 1981. - С.232.

12. Будыка А.К. Волокнистые фильтры для контроля загрязнения воздушной среды / А.К. Будыка, Н.Б. Борисов. - М.: ИздАТ, 2008. – 359с.

13. Будыка А.К. Радиоактивные аэрозоли Чернобыльского генезиса / А.К. Будыка, Б.И. Огородников // Журнал физической химии.- 1999. - Т. 73. - № 2. - С. 375.

14. Будыка А.К. Определение дисперсного состава радиоактивных аэрозолей в технологических системах исследовательских реакторов / А.К. Будыка, Г.А. Федоров // Изотопы в СССР. - 1987. - Вып. 1(72). - С. 113.

15. Воскресенская Ю.А. Улавливание рутения из газовой фазы при переработке отработавшего нитридного уран-плутониевого топлива быстрых реакторов / Ю.А. Воскресенская, О.А. Устинов, С.А. Якунин // Атомная энергия. – 2013. - Т. 115. - Вып. 3. - С.155 – 157.

16. А.с. № 181889 кл. 42n 10/01, МПК G 09b. Модель трахеобронхоальвеолярного дерева / С.А. Глухов, В.М. Юревич, В.П. Зотин (СССР). – Опубл. 21.04.1966, бюл. №10. - 2 л.

17. ГОСТ Р 54597-2011/ИСО/TR 27628:2007 Воздух рабочей зоны. Ультрадисперсные аэрозоли, аэрозоли наночастиц и наноструктурированных частиц. Определение характеристик и оценка воздействия при вдыхании. – Утв. и введ. 2011-12-7. - М.: Стандартинформ, 2012. - 33 с.

18. ГОСТ Р ИСО 7708-2006 Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле. – М.: Стандартинформ, 2006.

19. Гусев Н.Г. Защита от ионизирующих излучений: в 2 т. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – Т.2 - 352 с.

20. Залмазонов Ю.Е. Устройство, моделирующее дыхательные пути человека / Ю.Е. Залмазонов, В.В. Сидоров, О.А. Чуткин // Вопросы атомной науки и техники. – 1973. – Вып. 21. С. 25-28. – (Сер. « Ядерное приборостроение»).

21. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Доклады АН СССР. – 1941. - Т. 31. - № 2. - С. 99-101.

22. Королев В.Ю. О распределении частиц при дроблении // Информатика и ее применения. – 2009. - Т.3. - № 3. - С.60-68.

23. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / 3-е изд., перераб. - Л.: Химия,1987. - 264 с.

24. Кутьков В.А., Кухта Б.А. Радиологические свойства радиоактивных аэрозолей, АНРИ, 2006, № 4(47), стр. 2- 22

25. К вопросу о химических формах йода в отходах АЭС / Ю.В. Кузнецов, Г.М. Суходолов, А.Н. Елизарова, В.Н. Чватов // Радиохимия, 1981. - № 6. - С. 923-926.

26. Лызлов А.Ф. Применение оптико-радиографического метода для исследования промышленных альфа-активных аэрозолей / А.Ф. Лызлов, Р.В. Мелентьева, Л.М. Щербакова // Вопросы радиационной безопасности. – 2001. - № 3. - С. 63-78.

27. Лысенко С.А. Методика определения концентрации респирабельной фракции атмосферного аэрозоля по данным трехчастотного лидарного зондирования / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко // Оптика атмосферы и океана. - 2010. - Т. 23. - N 2. - С. 149-155.

28. Маслов А.А. Технология урана и плутония: учеб. пособие. - Томск: Изд-во Томского политех. унив., 2007. – 97 с.

29. Методика выполнения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с применением системы гамма-спектрометрической LabSOCS. Свидетельство об аттестации №770/07 от 25.06.2007 г.

30. МВИ № 71-U-B/99-03 Методика выполнения измерений объемной активности изотопов урана (234, 238) в природных водах с минерализацией до 5 г/дм^3 альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой.

31. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения: метод. указ. МУ 2.6.1.065-2014. Общие требования / Минатом, ФМБА МЗ РФ. – 2000. - 53 с. ССЫЛКА НА ТОМ!

32. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с Научными Приложениями / Научный Комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации.- М., 2003. – Т. I: Источники, Русскоязычная версия. – 196 с.

33. Отчет о выполнении работ «Исследование особенностей формирования аэродисперсных систем на предприятии ФГУП ПО «Маяк» НИР «Защита», исх. № 5-02/2091 от 5.11.2014 – 78 с.

34. Отчет о выполнении работ «Комплексное обследование радиоактивных аэрозолей производств СЗ и ЗРИ АО "СХК" (Договор № 11/6230-Д от 26.10.2016) – 55 с.

35. А.с. № 409297 кл. 21f 9/02. Способ очистки газов от рутения / И.Е. Нахутин, А.С. Поляков, О.С. Ананян, А.И. Кулаков, А.С. Такмазян (СССР). – Опубл. 30.11.1973, бюл. №48. – 2 л.

36. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): гигиенические нормативы: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 07.07.2009, № 47. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009. - 68 с.

37. ФГБУ «НПО «Тайфун» Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году, 2016. – 348 с.

38. Огородников Б.И. Дисперсность радиоактивных аэрозолей на рабочих местах // Атомная техника за рубежом. – 2000. - №11. - С.12.

39. Огородников Б.И., Пазухин Э.М. Радиоактивные аэрозоли объекта "Укрытие" (обзор). Часть 4.1 Источники и генерация радиоактивных аэрозолей в 1986 г. – 32 с.

40. Патент РФ RU 2239815 C1, МПК G01N15/02. Каскадный импактор / А.К. Бадьин, А.А. Молоканов, Д.А. Припачкин, Ризин А.И., Фертман Д.Е., А.Г. Цовьянов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр - Институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства (ГНЦ-ИБФ). - Заявл. 11.02.2003; опубл. 10.11.2004.

41. Патент РФ RU 2331121 C2, МПК G21C19/48. Применение раствора или водяной пасты, содержащих полимеры для улавливания рутения, содержащегося в газовых выбросах, и устройство для его осуществления / Курто Брюно (FR), Морель Фабрис (FR), Пажи Жорж (FR), Редоннэ Кароль (FR); заявитель и патентообладатель Компани женераль де матьер нюклеэр (FR). – Заявл. 06.02.2004; опубл. 10.08.2008.

42. Образование и выделение газообразной фракции полония из его твердых препаратов / И.В. Петрянов, Н.Б. Борисов, С.Л. Чуркин и др. // Доклады АНСССР. – 1992. - Т.322. - № 3. - С.557.

43. Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. – М.: Гидрометеоиздат, 1979.- 263 с.

44. Поляков С. Анализ эффективности пылеулавливания вихревого аппарата ВЗП-М 200 с помощью программного комплекса ANSYS CFX // Технологии ANSYS CFX. – 2008. -№ 7. – С .2-6.

45. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию.- М.: Мир,1987. – 278 с.

46. Русанов А.А. Импакторы для определения дисперсности промышленных пылей / А.А. Русанов, С.С. Янковский. – М.: ЦНИИТЭ Энефтехим, 1970. -41с.

47. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.– 351 с.

48. Холзунов А.Г.Основы расчета пневматических приводов. – М.: «Машиностроение», 1964. – 86 с.

49. Чижиумов С.Д. Основы гидродинамики. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. -106с.

50. Червинская А. В. Аэрозольная терапия// Физиотерапевт.— 2009.— № 2.— С. 38—54.

51. Юн. А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. - М.: URSS, 2009. - 272 с.

52. Birchall A. LUDEP: A lung dose evaluation program. Radiation Protection Dosimetry /Bailey M. R., James A. C. // Oxford Journals -1991.-Vol.38. - №1. –P. 167-174.

53. Birchall A. The IMBA Suite: Integrated Modules for Bioassay Analysis / JarvisN.S., PeaceM.S. // Radiation Protection Dosimetry -1998.-Vol.79. – P.107-110

54. Davies C.N. The Trajectories of Heavy, Solid Particles in a Two—Dimensional Jet of Ideal Fluid Impinging Normally upon a Plate / C.N. Davies, M. Aylward // Proc. Phys.Soc. – 1951.- Vol.64. – P. 889-911.

55. Dorrian M.-D. Particle size distributions of radioactive aerosols in workplaces / M.D. Dorrian, M.R. Bailey // Radiat. Prot. Dosimetry. - 1995. - V. 60. - N 2. - P.119-133.

56. Fuchs N.A. Aerosol impactors (a review) // In Fundamental of Aerosol Science. Ed.D.T. Shaw. N.Y., Wiley. - 1978. - P. 1-81.

57. Flynn S.J. Computational fluid dynamics (CFD) investigation of the gas–solid flow and performance of Andersen cascade impactor / Z.B. Tong, R.Y. Yang, H. Kamiya, A.B. Yu, H.K. Chan // Powder Technology. – V. 285, November 2015, P. 128–137

58. Comparison of Experimental and Numerical Studies of the Performance Characteristics of a Pumped Counter flow Virtual Impactor / Gourihar Kulkarni, Mikhail Pekour and other // Aerosol Science and Technology. – 2011. – 45. - P.382 – 392.

59. Heyder J. Deposition of Inhaled Particles in the Human Respiratory Tract and Consequences for Regional Targeting in Respiratory Drug Delivery // Proc Am Thorac Soc. - 2004. -1(4). – P.315-320.

60. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. - New York: John Wiley & Sons, 1999. – 504 p.

61. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection / ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). – 1994.

62. JP 2-69658 A, G01N31/00, 8.3.1990.

63. Kolmogorov A.N. Equations of turbulent motion of an incompressible fluid // Izvestia Academy of Sciences, USSR; Physics 6. – 1942. -P.56 – 58.

64. Kwon S.B. Effects of jet configuration on the performance of multi-nozzle impactors / S.B. Kwon, M.C. Kim, K.W. Lee // Journal of Aerosol Science. – 2002. - V. 33. - Issue 6. – P. 859–869.

65. Marple V.A. A Fundamental Study of Inertial Impactors, Ph.D. dissertation, University of Minnesota, Part. Tech. Lab. Pub. No. 144. – 1970.- 186 p.

66. Marple, V.A. History of Impactors - The First 110 Years // Aerosol Science and Technology. – 2004. - Vol.38. - №3. - P. 247 – 292.

67. Marple V.A. Characteristics of laminar jet impactors, Environ / V.A. Marple, B.Y.H. Liu //Sci. Technol.- 1974.-Vol.8.- P.648-654.

68. Marple V.A. Inertial Impactors: Theory, Design and Use / V.A. Marple, K.Willeke // Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling and Analysis (B.Y.H. Liu, editor), Academic Press, New York, 1976.- P. 411-446.

69. May K.R. The cascade impactor. An instrument for sampling coarse aerosols // J.Sci. Instr.- 1945. - vol.22. - N1. -P. 187 – 195.

70. McFarland A.R. Development of a low pressure impactor / A.R.McFarland, H.S. Nye, C.H.Erickson // Environment Prot.Techn.Ser., EPA-650/2-74-014.-Washington.-1973.-P.57.

71. Minsoo Son Development of a novel aerosol impactor utilizing inward flow from a ring-shaped nozzle /Seungho Lim, Giwoon Sung, Taesung Kim, Yeonchul, Kibong Choi, Weon Gyu Shin // Jornal of Aerosol Science. – 2015. - № 85. – P.1-9

72. Mitchel R.J. Cascade impactor / R.J.Mitchel, J.M.Pilcher // Industrial and Engineering Chemistry.-1959.-N 9.-P.1.-P.1039-1042.

73. Papastefanou C. Radioactive Aerosols: Vol. 8: Radioactivity in the Environment. - Elsevier, UK, 2008.–186 p.

74. Parker C. Reist Introduction to Aerosol Science. -New York: Macmillan Publishing Company, 1984. -P. 129-130.

75. Rader D.J. Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics / D.J. Rader, V.A. Marple // Aerosol Science and Technology. - 1985. - Vol.4 . - . Issue 2. - P.141 – 156.

76. Shishan Hu. CFD Study on Compound Impaction in a Jet-in-Well Impactor / Shishan Hu, Satyanarayanan Seshadri, and A.R. McFarland // Aerosol Science and Technology. – 2007. - № 41. - P.1102–1109.

77. Sanjay Singh Development of a variable configuration cascade impactor for aerosol size distribution measurement // Atmospheric Environment. – 2010. - № 44. – P. 795 – 802.

78. STAR-CCM+ V6.02, users guide, 2011 (электронный ресурс).

79. Tammet H. Observation of condensation of small air ions in the atmosphere / H. Tammet, J. Salm, H. Iher // Lecture Notes in Physics. - 1988. - V. 309. - P. 239-240.

80. The ICRP Database of Dose Coefficients: Worker and Members of the Public, Elsevier, 2001 (электронный ресурс).

81. The United States pharmacopoeia: 32 ed. - 2009.

82. Tojo G. Oxidation of Primary Alcohols to Carboxylic Acids. A Guide to Current Common Practice / G. Tojo, M. Fernandez. – New York, USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. - P. 61-78.

83. UNSCEAR 2013 Report: Sources, effects and risks of ionizing radiation. – 2014. - Volume I. - 311 p.

84. US 5192528, 9 марта 1993

85. Vincent J.H. Aerosol sampling. Science, standarts, instrumentation and applications. - New York: John Wiley & Sons Ltd, 2007. - 636 p.

86. Vinchurkar S. CFD simulations of the Andersen cascade impactor: model development and effects of aerosol charge / Vinchurkar S., Worth Longest P., Peart J. // Aerosol Science . – 2009. – Vol.40. – P.807-822

87. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, California, 1994.