

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Припачкин Дмитрий Александрович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭРОЗОЛЬНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЯДЕРНОГО
ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

Специальность 1.4.4 – Физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва-2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

Научный консультант:

Будыка Александр Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, ученый секретарь Госкорпорации «Росатом»

Официальные оппоненты:

- | | |
|-------------------------------|--|
| Аграновский Игорь Евгеньевич | доктор физико-математических наук, профессор, Грифитский университет г. Брисбен (Австралия) |
| Гинзбург Александр Самуилович | доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН |
| Ковалишин Алексей Анатольевич | доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по ядерным технологиям ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» |
| Жуковский Михаил Владимирович | доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН |

Защита состоится «08» февраля 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.1.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru/shared/announcements> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.03.,
к.ф.-м.н.



Рындя С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Опыт, накопленный более чем за 70 лет развития атомной промышленности, показал, что и измерения, и моделирование поведения таких сложных объектов как радиоактивные аэрозоли, образующееся на предприятиях ядерного топливного цикла (ЯТЦ), до сих пор остаются актуальными проблемами, нерешёнными полностью даже для широко используемых в отрасли технологий. Совершенствование существующих и появление принципиально новых технологий приводит к появлению аэрозолей с неисследованными физико-химическими свойствами и, следовательно, с неизвестным влиянием на человека. В этой связи не вызывает сомнения важность обеспечения защищенности жизнедеятельности человека и технологических процессов от воздействия аэрозолей. Назовем состояние такой защищенности *аэрозольной безопасностью*. Ее количественный уровень, достижение которого при использовании разнообразных методов и средств обеспечивает необходимую защиту от воздействия аэрозолей, может быть зафиксирован в нормативно-правовых и методических документах в виде системы взаимоувязанных физико-химических параметров (предельно допустимая концентрация или допустимая объемная активность, агрегатное состояние дисперсной фазы аэрозолей, дисперсный, химический и нуклидный состав, и др.), которые должны быть научно обоснованы.

Инновационные ядерные технологии, лежащие в основе получения новых видов ядерного топлива, разработки и эксплуатации новых типов реакторов на быстрых нейтронах (РБН), массового производства радиофармпрепаратов, глубокой переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), сопровождаются появлением новых источников радиоактивных аэрозолей, которые, будут определять требования к аэрозольной безопасности на предприятиях ЯТЦ в XXI веке.

Существующие в РФ системы измерений физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей можно разделить на три типа: для измерений на территории предприятий, в атмосфере и в зоне дыхания человека. Все эти типы систем измерений не обеспечивают единства измерений параметров для адекватного описания поведения радиоактивных аэрозолей и оценки их опасности.

Как и системы измерений, моделирование поведения радиоактивных аэрозолей можно также разделить по масштабу на три типа: моделирование аэрозолей в технологических процессах, в атмосфере и в зоне и органах дыхания человека.

В тех случаях, когда прямые измерения физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей в технологических системах невозможны, для описания их переноса используют модели сосредоточенных параметров или вычислительной гидродинамики.

При моделировании переноса радиоактивных аэрозолей в атмосфере используют различные модели атмосферной диффузии. Однако даже самые современные модели зависимы от константного обеспечения и корректных исходных данных, которые, как правило, получают экспериментально.

Для описания поведения аэрозолей в органах дыхания используют два подхода: фантомоподобные модели или прямое моделирование двухфазных сред (дисперсионная среда (воздух) + частицы дисперсной фазы (твердые или жидкие)) с помощью кодов вычислительной гидродинамики на основе трехмерной модели дыхательных путей. Эти модели используются для оценки возможных медицинских и радиологических последствий от поступления и отложения в отделах дыхательного тракта аэрозольных частиц различной физико-химической природы, а также для решения задач дозиметрии внутреннего облучения.

Перечисленные типы системы измерений физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей и моделирования их переноса не объединены и развиваются обособлено, поэтому только их совместное использование позволит повысить точность определения физико-химических параметров аэрозолей и прогнозирования поведения дисперсной фазы в дисперсионных средах в широком диапазоне масштабов моделирования. Это позволит решить на качественно новом уровне ряд научных и прикладных задач в области аэрозольной и радиационной безопасности в атомной отрасли.

Совместное использование систем измерений и моделирования возможно только в рамках единого методологического подхода (концепции), базирующегося на физико-химических основах аэрозольной безопасности, обосновывающего полноту объема и качество физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей. Поэтому для обеспечения аэрозольной безопасности на предприятиях ЯТЦ, в рамках решения важной научной проблемы, необходимо развить

существующие и разработать новые физико-химических основы, учитывающие особенности, изложенные выше.

Целью диссертационной работы является развитие физико-химических основ аэрозольной безопасности на предприятиях ядерного топливного цикла, базирующихся на принципе взаимного дополнения моделирования и измерения физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей на всех этапах их переноса, влияющих на безопасность технологических систем, персонала и населения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Разработан подход к оценке характеристик радиоактивных аэрозолей на основе последовательного использования моделей дисперсионной среды на основе сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики с учетом фазового состояния и механизмов взаимодействия аэрозольных частиц с поверхностями в технологических системах ядерных реакторов.
- Разработан механизм сопряжения гидродинамической модели дисперсионной среды с моделью атмосферного переноса частиц дисперсной фазы в пределах пограничного слоя атмосферы. Выполнена оценка и верификация коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии для аэрозольных частиц.
- Разработана механистическая модель подоблачного вымывания частиц твердой дисперсной фазы из атмосферы, учитывающая эффективность взаимодействия аэрозольных частиц и капель дождя. Выполнена оценка коэффициента подоблачного вымывания и кросс-верификация с другими моделями.
- Выполнена верификация системы численного моделирования поведения частиц дисперсной фазы в пределах пограничного слоя атмосферы на основе измеренных характеристик выбросов радиоактивных аэрозолей и газов в атмосферу.
- Разработаны численные модели и конструкции пробоотборных устройств для исследования и измерения физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей на основе исследованных механизмов осаждения аэрозольных частиц на препятствиях для переходных чисел Рейнольдса в режиме высокоскоростной фильтрации.
- Разработан способ оценки дисперсного состава альфа-активных аэрозолей на основе альфа-спектрометрических измерений

отдельных размерных фракций частиц без использования вакуумирования и радиохимической подготовки проб.

- Разработан метод оценки распределения активности частиц дисперсной фазы по отделам дыхательного тракта человека для полимодальных спектров вдыхаемых частиц.

Научная новизна работы

1. Показано, что последовательное использование моделей дисперсионной среды на основе сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики для моделирования поведения дисперсной фазы в технологических пространствах позволяет с учетом агрегатного состояния частиц дисперсной фазы оценить дисперсный состав радиоактивных аэрозолей, определяющих источник выброса в атмосферу при авариях на ядерных реакторах.
2. Установлено, что совместное использование оптимизированных моделей дисперсионной среды и измеренной зависимости мощности дозы гамма-излучения от фиксируемых отложений радиоактивных аэрозольных частиц на внутренних поверхностях в трубопроводах технологических систем, позволяет оценить дисперсный состав и распределение активности в частицах дисперсной фазы, поступающих при выбросах в атмосферу.
3. Теоретически и экспериментально установлено влияние коэффициентов турбулентной диффузии на перенос частиц дисперсной фазы при их малых концентрациях в пределах пограничного слоя атмосферы.
4. Методом численного моделирования установлено, что коэффициент вымывания, рассчитанный по модели, рассматривающей совокупность капель дождя как фильтрующую среду с плотностью упаковки ниже 10^{-5} , зависит не только от типа осадков и их интенсивности, но и от физико-химических характеристик аэрозольных частиц и механизмов их взаимодействия с дождевыми каплями.
5. Экспериментально определена эффективность разделения аэрозольных частиц на размерные фракции в зависимости от объемной скорости прокачки через однокаскадный инерционный разделитель, которая используется для альфа-спектрометрических измерений отдельных размерных фракций частиц.

6. Экспериментально исследовано влияние конструкции коллиматора для спектрометрии отдельных размерных фракций аэрозольных частиц на эффективность регистрации альфа-излучения и энергетическое разрешение альфа-спектра. Определены оптимальные параметры коллиматора для измерений активности отдельных размерных фракций частиц дисперсной фазы.

Практическая значимость работы

1. Разработан и верифицирован на основе экспериментальных данных и реальных выбросов радиоактивных аэрозолей в атмосферу программный комплекс «ПАРАД», основанный на сопряжении гидродинамической модели дисперсионной среды с лагранжевой моделью атмосферного переноса частиц дисперсной фазы в пределах пограничного слоя атмосферы. Система внедрена и используется экспертными группами в аварийных центрах научно-технической поддержки ГК «Росатом» для решения вопросов моделирования переноса радиоактивных аэрозолей в атмосфере и для обучения студентов в области безопасности ядерных технологий и экологии.
2. Конструкции пробоотборных устройств, предложенные в диссертации, основаны на закономерностях влияния физико-химических параметров аэрозолей на особенности их осаждения на различных препятствиях как при переходных числах Рейнольдса, так и в турбулентных потоках. Конструкции индивидуального импактора и инерционного импактора защищены патентами РФ.
3. Предложенный подход к оценке физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей, поступающих из технологических систем в атмосферу, позволил исследовать ряд аварийных инцидентов и установить нуклидный состав, агрегатное состояние и значения активностного медианного аэродинамического диаметра с относительной погрешностью до 10-50 %.
4. Последовательное использование моделей дисперсионной среды на основе сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики в технологических системах позволило оценить и обосновать безопасность ядерных энергетических установок. В частности, результаты использовались для продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС с реактором РБМК.

5. Способ оценки дисперсного состава радиоактивных аэрозолей на основе разделения аэрозольных частиц на размерные фракции с помощью однокаскадного инерционного разделителя позволил получены оценки физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей в производственных условиях. Способ защищен патентом РФ.
6. Разработана установка для спектрометрии отдельных размерных фракций аэрозольных частиц альфа-активных аэрозолей с использованием специальных коллиматоров и позволяющая проводить измерения без использования вакуумирования и радиохимической подготовки проб.
7. Предложен метод оценки распределения активности частиц дисперсной фазы по отделам дыхательного тракта человека для полимодальных спектров вдыхаемых частиц. Метод используется для оценки поступления техногенных радиоактивных аэрозолей в организм человека при дыхании.

На защиту выносятся:

1. Способ оценки характеристик радиоактивных аэрозолей на основе последовательного использования моделей дисперсионной среды на основе сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики с учетом фазового состояния и механизмов взаимодействия аэрозольных частиц с поверхностями в технологических системах ядерных реакторов.
2. Способ оценки характеристик распределения активности по размерам частиц дисперсной фазы, формирующихся в технологических системах и поступающих в атмосферу, основанный на моделировании их переноса в гидродинамических потоках с помощью оптимизированной модели дисперсионной среды и измерений характеристик гамма-излучения отложений на внутренних поверхностях технологических систем.
3. Способ сопряжения гидродинамической модели дисперсионной среды с моделью атмосферного переноса частиц дисперсной фазы в пределах пограничного слоя атмосферы для расчета коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии аэрозольных частиц.

4. Механистическая модель подоблачного вымывания твердых частиц дисперсной фазы из атмосферы, на основе представления капель дождя как сильно разреженной фильтрующей среды (плотность упаковки $< 10^{-5}$).
5. Модели каскадов индивидуального импактора и фильтров, разработанные на основе исследованных закономерностей влияния физико-химических параметров аэрозолей на особенности их осаждения на различных препятствиях при переходных числах Рейнольдса и в турбулентных потоках.
6. Способ оценки дисперсного состава альфа-активных аэрозолей на основе альфа-спектрометрических измерений отдельных размерных фракций частиц без использования вакуумирования и радиохимической подготовки проб и программное средство для его реализации.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены на следующих российских и международных конференциях: 10th World Filtration Congress, Leipzig, Germany, 2008; Всероссийская конференция по физической химии и нанотехнологиям «НИФХИ-90», Москва, 2008; Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Москва, 2010; V Международная конференция "Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания", Обнинск, 2011; 10-я Юбилейная российская научная конференция "Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях", Москва - Обнинск, 2015; Безопасность исследовательских ядерных установок (в сотрудничестве с МАГАТЭ), Димитровград, 2017; Future of atomic energy - Atomfuture 2017, Obninsk, 2017; Двенадцатые Петряновские и Третьи Фуксовские чтения, Москва, 2019; Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС, Обнинск, 2021; Тринадцатые Петряновские и четвертые Фуксовские чтения, Нижний Новгород, 2021; X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022», Санкт-Петербург, 2022.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 87 печатных работ, в том числе 40 опубликованы в ведущих рецензируемых журналах входящих в перечень ВАК РФ, из которых 22 работы входят в журналы, индексируемые базами Web of Science и Scopus. По результатам диссертационной работы получены 4 патента РФ, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, подготовлено 1 учебное пособие.

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных лично автором. Вклад автора состоит в постановке задач исследования, в разработке и исследовании моделей дисперсионных сред и устройств; разработке подхода к моделированию переноса дисперсной фазы и моделей вымывания дисперсной фазы в призматическом слое атмосферы; разработке способов оценки характеристик дисперсного состава радиоактивных аэрозолей, создании и апробации алгоритма и программных средств; обработке, анализе, обобщении полученных результатов; подготовке к публикации полученных результатов как лично так и совместно с соавторами.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов и списка литературы. Работа изложена на 257 страницах печатного текста и содержит 133 рисунки и 43 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, показана научная новизна, научная и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор научной литературы, где изложены вопросы, связанные с моделированием поведения аэродисперсных систем и измерениями физико-химических параметров дисперсной фазы. Показано, что развитие по этим направлениям происходило скачкообразно и обособленно. Выявлены основные направления развития методов моделирования и измерений, которые относятся к физико-химическим основам и создающим базис для совместного развития моделей поведения и методов измерений

характеристик радиоактивных аэрозолей необходимых для обоснования аэрозольной безопасности на предприятиях ЯТЦ.

Во второй главе предложена концепция аэрозольной безопасности на предприятиях ЯТЦ на основе принципа взаимного дополнения моделирующих и измерительных систем на всех этапах переноса радиоактивных аэрозолей, состоящая из трех уровней: 1) объекты (предприятия), 2) окружающая среда (атмосфера), 3) зона дыхания человека (персонал и население) (рисунок 1). В рамках концепции предложено, что развитие физико-химических основ аэрозольной безопасности на предприятиях ЯТЦ должно базироваться как на уже имеющихся измерительных и расчетных возможностях, так и включает *новые элементы* в областях моделирования и измерений физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей.

К новым элементам в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценке их физико-химических характеристик в технологических пространствах на объектах (предприятиях) относятся: последовательное использование моделей дисперсионной среды на основе сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики в технологических системах с учетом фазового состояния и механизмов взаимодействия аэрозольных частиц с поверхностями. Оптимальной является такая модель дисперсионной среды, в которой значение линейной скорости её потока в каждом расчетном объеме, полученное по коду сосредоточенных параметров, совпадает со средним значением линейных скоростей в области пространства, ограниченной размерами расчетного объема, полученных по коду вычислительной гидродинамики. Количественно этот критерий можно представить формулой (1):

$$\Delta_{min} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{|V_j^K - V_j^{CFD}|}{V_j^{CFD}} \quad (1)$$

где: V_j^K - значение модуля скорости в расчетных объемах по коду

сосредоточенных параметров; $V_j^{CFD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^{CFD}$ - среднее значения модуля скорости по коду вычислительной гидродинамики. M – количество расчетных объемов в оптимальной модели дисперсионной среды; N – количество расчетных объемов в коде вычислительной гидродинамики в области, ограниченной расчетным объемом для оптимальной модели дисперсионной среды. Критерий (1) предложен впервые.

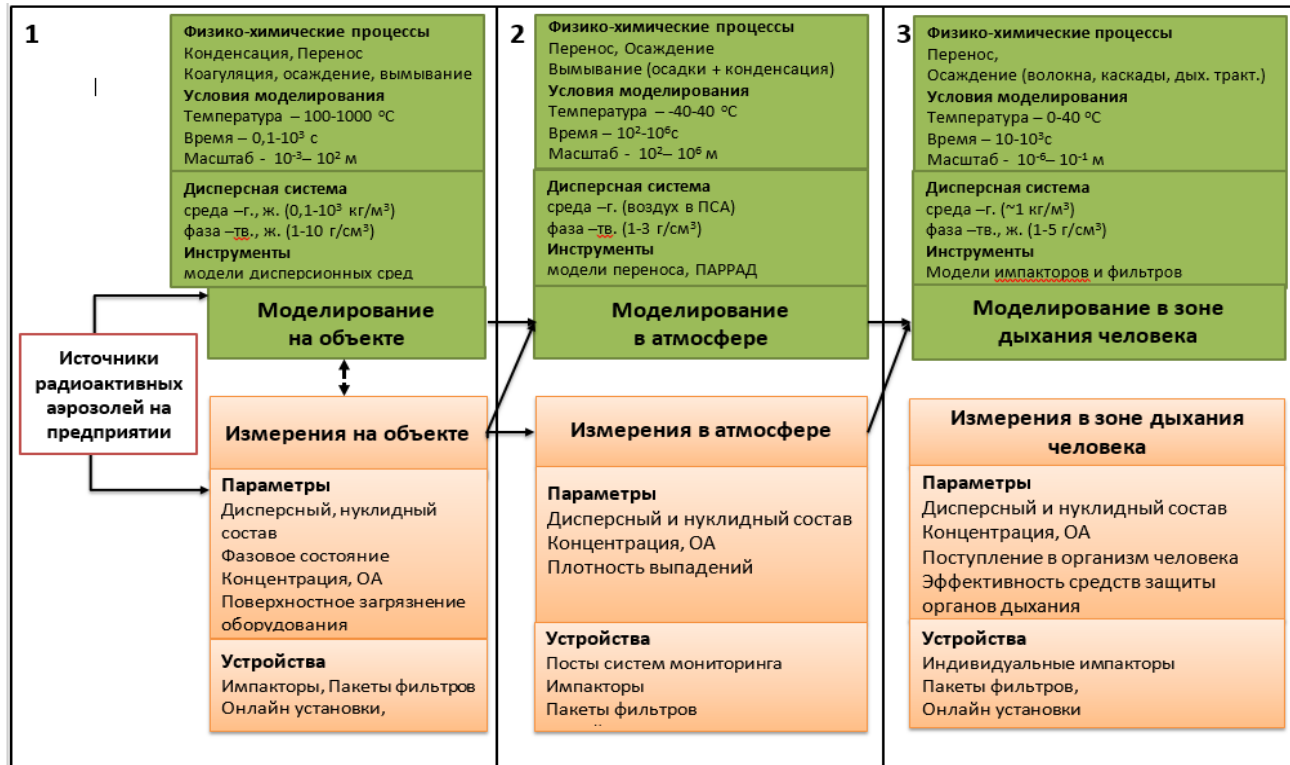


Рисунок 1 К концепции аэрозольной безопасности

Также к *новым элементам в этой области моделирования* относится принцип построения оценки параметров источника выброса радиоактивных аэрозолей на основе использования теплофизического кода сосредоточенных параметров, позволяющего моделировать физико-химические процессы, влияющие на формирование и перенос аэрозольных частиц, и измерений мощности эквивалентной дозы (МЭД) от загрязненных радиоактивными аэрозольными частицами поверхностей трубопроводов. В этом случае для оценки параметров радиоактивных аэрозолей, поступающих в атмосферу при выбросах через систему трубопроводов, предложено использовать многовариантные расчеты с варьированием исходных физико-химических параметров образующейся дисперсной фазы и последующую оценку корреляции между распределением активности частиц, осевших на поверхности участков трубопроводов, и измерениями МЭД.

В качестве *нового элемента в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в атмосфере* нами разработан и предложен программный комплекс ПАРРАД, который представляет собой сопряжение гидродинамической модели пограничного слоя атмосферы WRF-ARW[1] с лагранжевой моделью атмосферного переноса радиоактивных аэрозолей из кода НОСТРАДАМУС[2]. Сопряжение моделей в ПАРРАД реализовано за счет вычисления коэффициентов вертикальной K_z (2) и горизонтальной $K_{x,y}$ (3) турбулентной диффузии[3] на основе адаптированных зависимостей:

$$K_z = \begin{cases} \frac{k \cdot u_* \cdot z}{\Phi_m(z)} \left(1 - \frac{0,9 \cdot z}{H}\right)^2, & z \leq H \\ \frac{k \cdot u_* \cdot H}{\Phi_m(z)} \cdot 10^{-2}, & z > H \end{cases} \quad (2)$$

$$K_x = c \cdot \left(\frac{\sigma_u(z)}{\sigma_w(z)}\right)^4 \cdot K_z, \quad K_y = c \cdot \left(\frac{\sigma_u(z)}{\sigma_w(z)}\right)^4 \cdot K_z \quad (3)$$

где:

$$c = 4 \cdot 10^{-0.157 \cdot z_0} + (0.4 \cdot z_0^{-\frac{1}{7}} + 0.055 \cdot z_0^{\frac{4}{3}}) \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{H}{L} + \left|\frac{H}{L}\right|\right)$$

z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, u_* – динамическая скорость, k – постоянная Кармена, H – высота пограничного слоя, L – масштаб длины Монина-Обухова.

В ПАРРАД нами разработана и включена модель вымывания осадками радиоактивных аэрозолей. С учетом размера дождевой капли D , частицы диаметром d и интенсивности дождя I коэффициент подоблачного вымывания для предложенной модели A имеет вид:

$$A = \frac{3}{2} E(D, d) \cdot I \cdot \frac{1}{D} \dots \dots \dots (4)$$

где: $E(D, d)$ - эффективность захвата аэрозольной частицы каплей дождя, связанная с коэффициентом захвата η следующим образом:

$$E(D, d) = 1 - e^{-\gamma \eta} \quad (5)$$

Здесь $\gamma = \frac{4 \cdot \alpha \cdot H}{\pi \cdot D}$ – коэффициент, зависящий от макроскопических параметров фильтрующей среды; $\alpha = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot n(D)}{6}$ – плотность упаковки дождевых капель; H – размер аэрозольного облака по вертикали; η – коэффициент захвата за счет инерции, диффузии и зацепления аэрозольной частицы дождевой каплей.

К *новым элементам в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в зоне дыхания человека* относятся численные модели и конструкции пробоотборных устройств, разработанные на основе закономерностей осаждения аэрозольных частиц на препятствиях для переходных чисел Рейнольдса (Re) в режиме высокоскоростной фильтрации.

Для разработки эффективных аналитических фильтров и каскадов импакторов выполнено моделирование полей течений (дисперсионных сред) и переноса дисперсной фазы в созданных нами моделях фильтров и импакторов. Для расчета полей течений использовали ламинарную модель для стационарного и несжимаемого течения с $Re < 1000$ при нормальных условиях и турбулентную двухпараметрическую $k - \varepsilon$ модель для $Re \geq 1000$.

Коэффициент захвата частиц η (6) был рассчитан по методу граничной (предельной) траектории. Выбирая последовательно точки входа в расчетный объем, определяли ординату Y , которая соответствовала граничной траектории, т.е. траектории, ограничивающей область, в которой происходит осаждение частиц. Так, для цилиндрического волокна радиусом R_f коэффициент захвата можно определить, как отношение

$$\eta = \frac{Y}{R_f} \quad (6)$$

Каждый каскад импактора характеризуется своим эффективным аэродинамическим диаметром разделения (ECAD) или d_{50} , что соответствует аэродинамическому диаметру частицы, вероятность (эффективность) осаждения которой на рассматриваемом каскаде равна 50 %. Для расчета d_{50} используется выражение:

$$d_{50} = \sqrt{St_{50}} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot a}{C_{Kn} \cdot \rho_p \cdot V}} \quad (7)$$

где: St_{50} – число Стокса, соответствующее аэродинамическому диаметру частицы с эффективностью осаждения 50 %; a – диаметр сопла; μ – динамическая вязкость несущей среды; ρ_p – плотность частиц аэрозоля; V – линейная скорость движения частиц в сопле, C_{Kn} – поправка Каннингема.

Метод численного моделирования для оценки d_{50} каскада построен на последовательном пропуске N_1 монодисперсных частиц через расчётный объем (дисперсионную среду). Затем рассчитывается траектория движения каждой частицы. Расчет продолжается до тех пор, пока частица не столкнется с коллектором или выйдет за пределы расчетного объема. Определив количество частиц, вышедших за пределы объема N_2 , можно найти эффективность осаждения частиц E по следующей формуле:

$$E_1 = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \quad (8)$$

Коэффициент захвата η (6) для моделей фильтрующих сред и эффективность осаждения E_1 (8) частиц на каскадах импактора были получены для ряда моделей, близких к реальным системам:

1) двухмерная модель фильтра, состоящая из отдельных рядов параллельных цилиндров; 2) двухмерная модель фильтра, состоящая из отдельных рядов параллельных пар цилиндров; 3) трехмерная модель из двух рядов параллельных равноудаленных цилиндров, повернутых под прямым углом относительно друг друга с расстоянием между рядами $H \sim h$; 4) трехмерная модель каскада импактора с круглым разгонным соплом и раскрытым на угол $\varphi=30^\circ$ входом в разгонное сопло; 5) трехмерная модель каскада персонального импактора с разгонным соплом с диаметром $W=1$ мм и параметрами $S/W=2$, $T/W=1$.

В качестве примера на рисунках 2 и 3 приведены трехмерные модели из двух рядов параллельных равноудаленных цилиндров и модель каскада с круглым разгонным соплом.

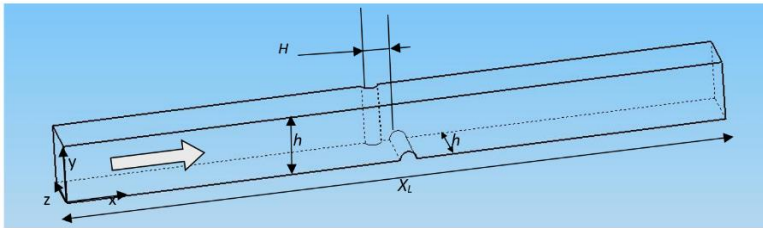


Рисунок 2 Трехмерная модель из двух рядов параллельных равноудаленных цилиндров, повернутых под прямым углом относительно друг друга

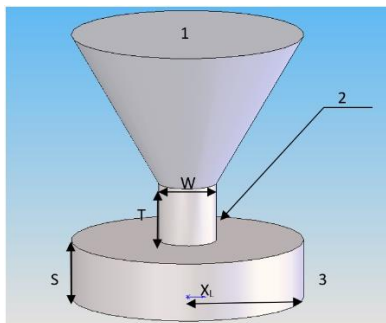


Рисунок 3 Трехмерная модель каскада с круглым разгонным соплом и раскрытым на угол $\varphi=30^\circ$ входом в разгонное сопло. W -диаметр сопла, T -длина сопла, S -расстояние от выхода из сопла до коллектора, X_L - расстояние от оси сопла до внешнего края коллектора, 1-вход среды, 2-«стенка с прилипанием», 3-выход из расчетной области

К предлагаемым новым элементам в области измерений и оценки физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей в технологических пространствах, атмосфере и зоне дыхания человека относятся: каскадный импактор с расширенным диапазоном селективного осаждения размерных фракций частиц (от 0,3 до 15 мкм с эффективностью осаждения не менее 95 %), индивидуальный импактор (от 0,1 до 15 мкм с эффективностью не менее 99%) и установка (онлайн установка) для непрерывных радиометрических или спектрометрических измерений отдельных размерных фракций аэрозолей.

Перечисленные устройства можно использовать для оценки активностного медианного аэродинамического диаметра (АМАД),

который, в частности, определяет дозовый коэффициент для оценки дозы внутреннего облучения персонала и населения.

В главе представлены разработанные методы определения АМАД и стандартного геометрического отклонения (СГО), как параметры логарифмически-нормального распределения (ЛНР) частиц дисперсной фазы по размерам с помощью импактора с расширенным диапазоном селективного осаждения размерных фракций частиц с относительной погрешностью не более 30% при относительной погрешности измерения активности частиц дисперсной фазы на каждом каскаде не более 10% и однокаскадного разделителя для проведения непрерывных спектрометрических измерений отдельных размерных фракций аэрозолей.

При использовании однокаскадного разделителя фракционирование дисперсной фазы по размерам происходит за счет последовательного изменения скорости прокачки дисперсионной среды через разделитель, приводящее к изменению $d_{50}(7)$. Частицы дисперсной фазы осаждаются на фильтр и их альфа-активность измеряется в течение равных промежутков времени с помощью полупроводникового α -спектрометра на базе ионно-имплантированного Si-детектора. На рабочей поверхности детектора со стороны фильтра устанавливается коллиматор для улучшения энергетического разрешения.

За счет последовательного сравнения величин альфа-активности на каждом шаге измерений с величиной активности, зарегистрированной на предыдущем шаге и проводится сравнение значений активности отдельных размерных фракций аэрозольных частиц. На основании расчетных относительных значений активности η_i и теоретических значений η_i^T вычисляется функция невязки $Q(\mu, \sigma)$. Параметры дисперсного состава АМАД (μ) и СГО (σ) определяются на основании рассчитанной функции невязки $Q(\mu, \sigma)$ по ее минимальным значениям.

$$Q(\mu, \sigma) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\eta_i - \eta_i^T)^2}, \quad (9)$$

где: $i=1..N$, $N=4$ – порядковый номер фиксированного значения расхода газового потока.

Численное моделирование показало, что при выбранном минимальном количестве фиксированных значений расхода газового потока (не менее четырех) относительная теоретическая ошибка определения АМАД и СГО снизилась в два раза, с 11% при двух фиксированных значениях расхода до 5%, при четырех. Предложенный

метод обеспечивает требование к относительной погрешности определения АМАД на уровне 30 %.

Кроме методов определения АМАД и СГО для унимодальных ЛНР активности частиц дисперсной фазы по размерам, предложен метод оценки распределения активности частиц дисперсной фазы по отделам дыхательного тракта человека для полимодальных спектров вдыхаемых частиц. Модель осаждения частиц дисперсной фазы в дыхательных путях человека, согласно Публикации 66 МКРЗ [4], можно представить в виде набора последовательно расположенных фильтров, соответствующих определённому отделу дыхательного тракта (ET_1 – передняя часть носа; ET_2 – задняя часть носового хода, носовая часть глотки, ротовая часть глотки и гортань; $ВВ$ – от трахеи до главных бронхов и бронхов включительно; bb – от бронхиол до терминальных бронхиол включительно; AI – альвеолярно-интерстициальная область). Эффективность осаждения E_i частиц размером d в этих отделах можно рассчитать по эмпирической формуле Рудольфа [4]:

$$E_i(d) = 1 - e^{-aR(d)^p} \quad (10)$$

где: i – номер отдела дыхательного тракта, a , $R(d)$ и p – параметры, характеризующие i -ый отдел.

Относительная активность (доля) осажденных частиц полимодального спектра в i -ом отделе дыхательного тракта DE_i рассчитана с использованием следующего выражения:

$$DE_i = \int_0^{\infty} E(d)_i \cdot \phi_i \cdot \prod_{k=0}^{i-1} (1 - E(d)_k) \cdot p_A(d) \delta d \quad (11)$$

где: ϕ_i – объемная фракция, характеризующая долю воздуха, доходящего до данного отдела дыхательных путей; $p_A(d)$ – доля активности частиц полимодального спектра, приходящаяся на размерный интервал δd .

В формуле (11) величина $p_A(d)\delta d$ получена за счет «разбиения» с помощью импактора исходного вдыхаемого радиоактивного аэрозоля на доли активности. Эти доли соответствуют определённым размерам частиц d_j , осевшим на каскадах импактора. Затем с учетом (10) рассчитали $E(d)_i$ и по (11) получили оценку DE_i для каждого отдела дыхательного тракта. Для ЛНР 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%.

В третьей главе обосновано использование предложенных новых элементов в областях моделирования и измерений физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей в технологических пространствах, атмосфере и зоне дыхания человека, а также представлена апробация разработанных методов для оценки АМАД радиоактивных аэрозолей.

Изучено поведение частиц дисперсной фазы в элементах барабана-сепаратора (БС) реактора РБМК-1000, который представляет собой аксиально-симметричное устройство, состоящее из отдельных секций, каждая из которых соединена с опускной трубой и имеет следующие габариты: длина корпуса 30984 мм, высота 3908 мм при внутреннем диаметре корпуса 2600 мм (рисунок 4).

Для обоснования оптимальной модели дисперсионной среды, разработанной для БС с помощью кода MELCOR, были выполнены гидродинамические расчеты полей течений модельной среды (*азота* (N_2)) в пространстве БС под наклонным дырчатым листом (НДЛ) при температуре 300 К (27°C) для давлений 1 и 10 атм и массового расхода среды на выходе из БС (в опускную трубу ОТ) 0,1 кг/с, 0,5 кг/с и 1 кг/с с помощью кода STAR-CD.

Режимы течений для гидродинамических расчетов выбраны исходя из того, что рассматриваемые условия в БС близки к аварийным по давлению и скоростям, хотя и отличаются от них по температуре и типу дисперсионной среды. Из-за выбранных режимов температуры в БС фазовый переход аэрозольных соединений не учитывается.

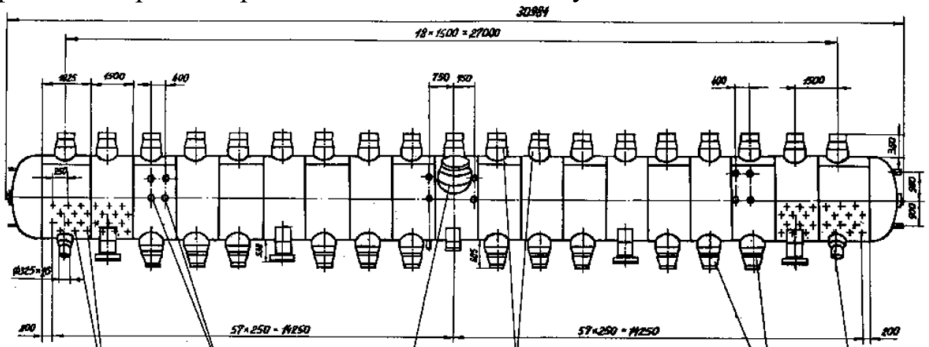


Рисунок 4 Барабан-сепаратор для реактора РБМК-1000

Для создания трехмерной модели для расчетов по STAR-CD было рассмотрено не все пространство БС под НДЛ, а только часть его, соответствующую отдельной секции (рисунок 5а). Поле течения

модельной дисперсионной среды (азота) для давления в БС 10 атм. при расходе в опускную трубу 1 кг/с представлено на рисунок 5б.

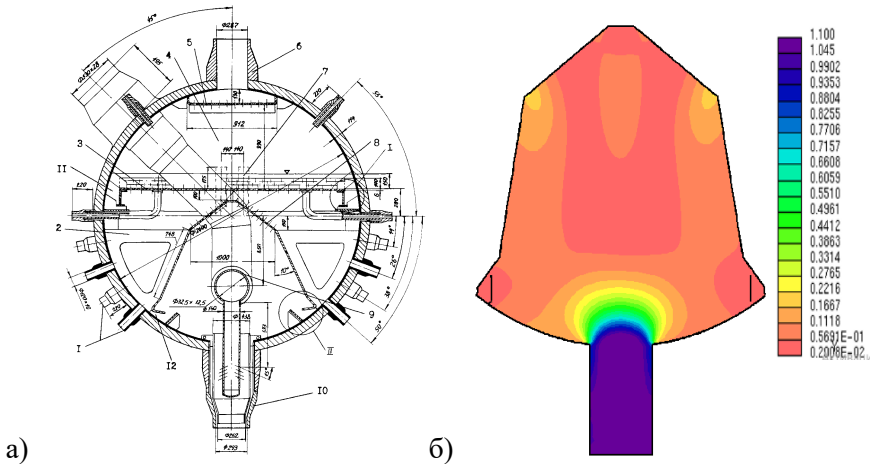


Рисунок 5 Поперечное сечение БС (а) и поле течения дисперсионной среды (модуль скорости) в пространстве БС под НДЛ при давлении 10 атм (б)

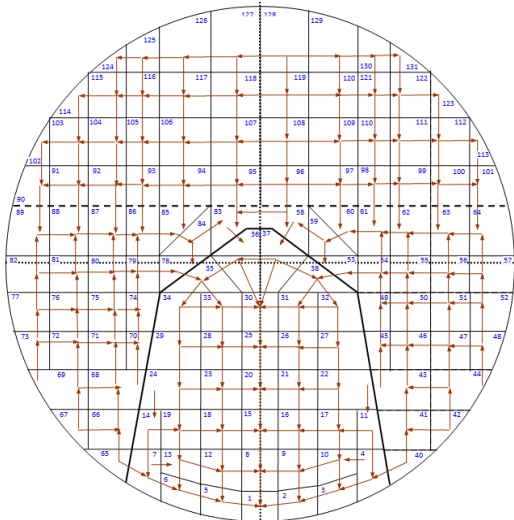


Рисунок 6 Модель дисперсионной среды для БС

В коде MELCOR была создана модель дисперсионной среды в БС, предназначенная для моделирования переноса радиоактивных аэрозолей в паровой среде (в основном аэрозоли продуктов деления (ПД)) и осаждения аэрозольных частиц на поверхностях в БС. Модель дисперсионной среды содержит 130 контрольных объемов, соединенных 234-мя связями (рисунок 6).

Определен критерий оптимальности предложенной нами модели

дисперсионной среды для пространства БС под НДЛ: значение модуля скорости V_m в расчетных объемах, полученное по коду MELCOR, не должно отличаться от среднего значения модуля \bar{V}_S скорости в пространствах ограниченных расчетными объемами по коду STAR-CD более чем в 2 раза.

Показано, что при давлении в БС 1 и 10 атм и расходе азота в опускную трубу 0,1 кг/с, 0,5 кг/с и 1 кг/с линейные скорости V_m и \bar{V}_S различаются не более чем в 2 раза, что соответствует предложенному нами критерию оптимальности модели дисперсионной среды.

Оценены эффективности задержки в БС частиц дисперсной фазы радиоактивных аэрозолей в аварийном режиме.

В качестве аварийного процесса, приводящего к обезвоживанию БС, (дисперсионная среда - водяной пар 100%) была рассмотрена условная (запроектная) авария с разрывом раздаточного группового коллектора (РГК) до обратного клапана (ОК) и неподачей воды системы аварийного охлаждения реактора (САОР) в этот РГК. Предполагалось, что в БС поступают аэрозоли ПД в виде соединений цезия ($CsOH$, CsI , средняя плотность частиц 4 г/см^3 , в твердой фазе) и водных растворов этих соединений (средняя плотность частиц 1 г/см^3 , в жидкой фазе). Массовое распределение дисперсной фазы по размерам частиц, поступающих в БС, описываются ЛНР с массовым медианным аэродинамическим диаметром (ММАД) от 0,1 до 10 мкм со СГО - 2. Начальные давления и температуры в БС составляли 1,6 атм. и 200°C , соответственно.

Показано, что частицы с плотностью 1 г/см^3 , ММАД – 1 и 10 мкм осаждаются преимущественно в нижней части БС (рисунок 7) главным образом за счет гравитационного и диффузионного осаждения. Гравитационное осаждение превалирует для частиц с ММАД – 10 мкм, а диффузионное – для частиц с ММАД – 1 мкм (рисунок 7).

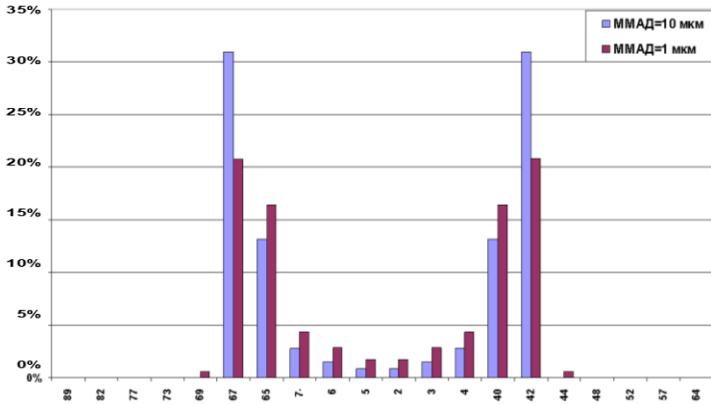


Рисунок 7 Распределение дисперсной фазы по внутренней поверхности БС (у - доля дисперсной фазы на поверхности, х - расчетные объемы, рисунок б)

Оценки распределения массы аэрозолей ПД в БС с жидкой (плотность частиц 1 г/см^3) и твердой (плотность частиц 4 г/см^3) дисперсной фазой для ММАД от 0,1 до 10 мкм для рассматриваемой аварии показали, что в БС эффективность задержки частиц с жидкой дисперсной фазой варьируется от 1 до 60 %, а с твердой – от 2 до 80 %.

Необходимо отметить, что температуры и давления в аварийных условиях на АЭС могут быть существенно выше температур плавления химических соединений радиоактивных аэрозолей, что будет приводить к фазовым переходам. Поэтому для моделирования поведения дисперсной фазы в этих условиях были использованы модели, учитывающие фазовые переходы. Для аэрозолей цезия, являющихся наиболее типичными соединениями, образующимися на АЭС, было выполнено моделирование с помощью кода MELCOR процессов массопереноса газо-аэрозольных соединений цезия в условиях эксперимента FAL-ISP 1[5], схожих с условиями при авариях на АЭС.

Для моделирования переноса дисперсной фазы в условиях фазового перехода была разработана модель дисперсионной среды для экспериментальной установки (рисунок 8), основная на моделях переноса дисперсной фазы [6] и фазового перехода [7].

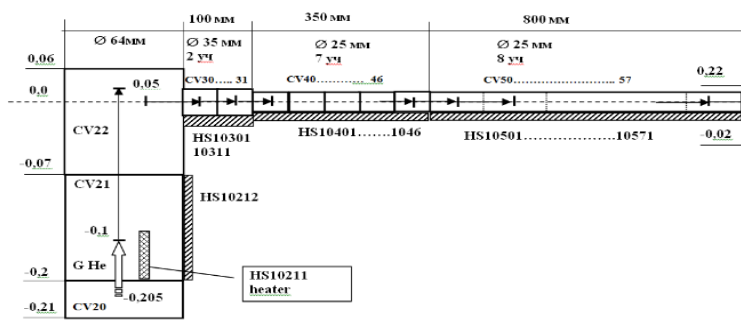


Рисунок 8 Модель дисперсионной среды в эксперименте FAL-ISP 1

Состав газа (несущей дисперсионной среды) – смесь водяного пара с гелием (He) в соотношении 1:0,15, начальная температура дисперсионной среды – 540 К. От объема CV22 (рисунок 8) горизонтально отходит термоградиентная труба, в которой реализуется фазовый переход рассматриваемых соединений. В расчетах было принято, что Cs и I выходят из имитаторов твэлов в виде паров и образуют соединения CsOH (341,4 мг) и CsI (52,8 мг).

Результаты моделирования показали, что на начальном участке термоградиентной трубы (0 – 0,12 м) осаждение соединений цезия минимально. Это связано с тем, что при температурах поверхности и среды более 850 К (рисунок 9а) соединения цезия находятся в паровой фазе, а осаждение паров на этом участке трубы неэффективно из-за слабой диффузии.

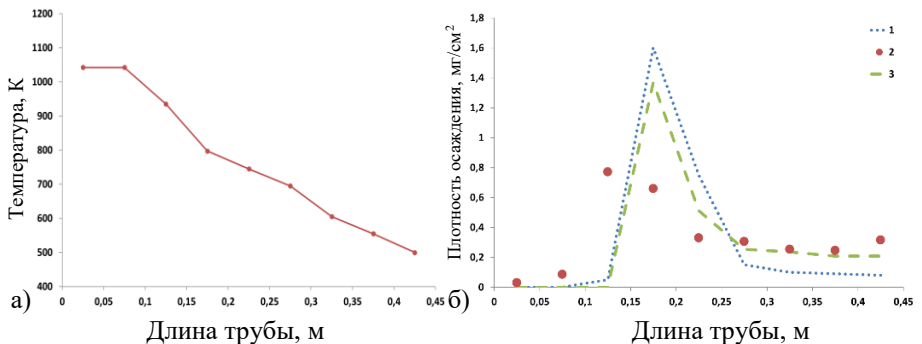


Рисунок 9 Результаты моделирования и экспериментальные данные. Температура термоградиентной трубы (а) и плотность осаждения соединений цезия (б). 1- результаты [5], 2- эксперимент, 3- моделирование

Резкий рост плотности осаждения соединений цезия на участке трубы (0,12 – 0,22 м) связан с началом процесса конденсации паров соединений цезия на этом участке трубы, при этом происходит осаждение аэрозольных частиц и паров. Пары конденсируются на поверхностях и аэрозольных частицах.

На участке трубы (0,22-0,42 м) результаты моделирования плотности осаждения соединений цезия хорошо совпадают с экспериментом. Это связано с тем, что температура поверхности и среды снижается до 600 К, что ниже температуры плавления соединений CsI и CsOH. Это приводит к полному переходу соединений цезия в этом месте трубы в аэрозольную форму (рисунок 9б).

Полученные результаты были использованы для моделирования переноса дисперсной фазы радиоактивных аэрозолей в процессе условной аварии на блоке АЭС с реактором РБМК – разрыв раздаточного группового коллектора до обратного клапана с дополнительным отказом в поступлении воды из системы аварийного охлаждения реактора и аварии с полным длительным обесточиванием энергоблока АЭС и отказом на включение дизель-генераторов аварийного энергоснабжения.

Для обоснования новых элементов в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в атмосфере была разработана расчетная область на основе WRF-ARW (дисперсионная среда) и получены распределения коэффициентов горизонтальной $K_{x,y}$ и вертикальной K_z диффузии, используемых в ПАРРАД, для различных условий в пограничном слое атмосферы и типов подстилающей поверхности (z_0). В качестве примера на рисунке 10 представлены значения K_z .

При сравнении коэффициентов вертикальной диффузии из ПАРРАД, с рассчитанными на основе параметризаций микрофизических процессов в пограничном слое атмосферы, из модели WRF-ARW было получено, что масштабы коэффициента вертикальной диффузии во времени и пространстве близки для рассмотренных параметризаций, однако сами значения коэффициентов заметно различаются. Так для параметризации YSU[8] (рисунок 11б) значения коэффициента вертикальной диффузии максимальны (500 м²/с) и в 3-5 раз больше наблюдаемых характерных значений для таких условий в атмосфере.

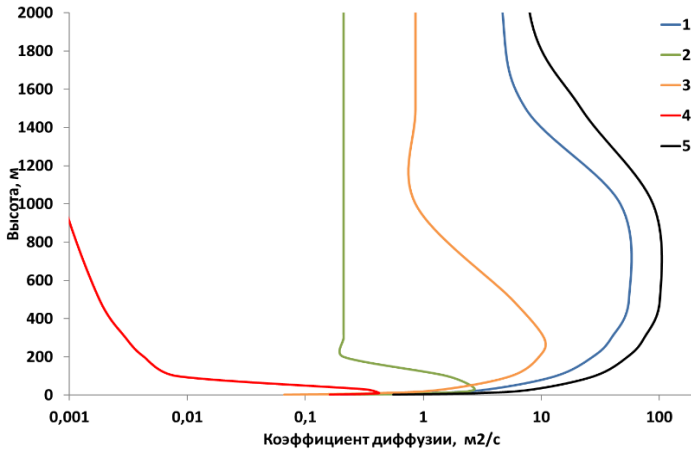


Рисунок 10 Коэффициент вертикальной диффузии для различных категорий устойчивости атмосферы и z_0 . 1 - В(неустойчивая), $z_0=0,15$ м; 2 - Е(устойчивая), $z_0=0,5$ м; 3 - D(нейтральная), $z_0=0,0001$ м; 4 - F (устойчивая), $z_0=0,5$ м; 5 - А(неустойчивая), $z_0=0,8$ м .

Характерные значения коэффициента вертикальной диффузии согласно [9], для неустойчивых состояний атмосферы (А, В, С) $\sim 10^2$ м²/с, нейтральной атмосферы (D) ~ 10 м²/с и устойчивых состояний (Е, F) ~ 1 м²/с. Наиболее близким к наблюдаемым значениям коэффициента вертикальной диффузии является значения, полученные по ПАРАД (рисунок 11а).

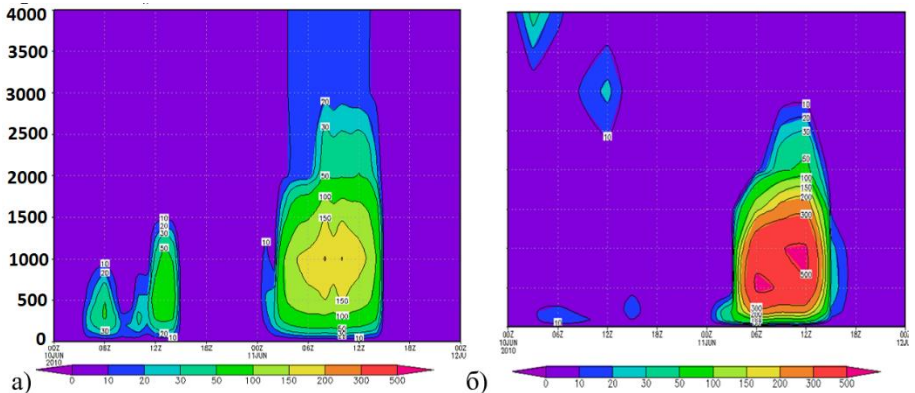


Рисунок 11 Профиль вертикального коэффициента диффузии за 10 и 11 июня 2010 г в точке наблюдения. (а) -ПАРАД; б –WRF с YSU [8]

Проведено сравнение модели переноса в атмосфере, используемой в ПАРРАД с известными моделями FLEXPART [10] и HYSPLIT [11] на эксперименте ACURATE [12]. Для сопоставления результатов моделирования (значения концентрации трассера, полученные по моделям, в местах расположения измерительных станций) была использована метрика RANK (12)[13]. Чем выше значение метрики, тем ближе результаты моделирования к данным измерений. RANK изменяется в диапазоне от 0 до 3, где 3 соответствует наилучшей модели.

$$RANK = R^2 + \left(1 - \left|\frac{FB}{2}\right|\right) + \left(1 - \frac{KS}{100}\right). \quad (12)$$

В выражении (12): R – коэффициент корреляции Пирсона, FB – нормированная средняя систематическая ошибка, KS – параметр Колмогорова-Смирнова.

Было получено, что для модели из ПАРРАД значение RANK=2,5, что выше, чем для FLEXPART - 2 и HYSPLIT - 1,9.

Для обоснования разработанной модели подоблачного вымывания осадками частиц дисперсной фазы из атмосферы в ПАРРАД были выполнены оценки коэффициента подоблачного вымывания Λ для частиц плотностью 1 г/см³, размерами от 0,1 до 100 мкм и сравнены с результатами по другим моделям (рисунок 12). По сравнению с интегральными моделями [15] и [17], предложенная нами модель является более чувствительной к аэродинамическим характеристикам частиц дисперсной фазы и дождевых капель и относится к классу микрофизических моделей, согласуется [14,16] и за счет универсальности представления фильтрующей среды может использоваться для моделирования

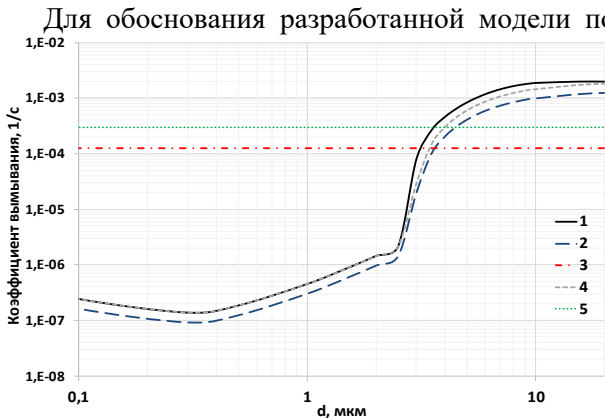


Рисунок 12 Зависимость коэффициента Λ от d при интенсивности дождя 5 мм/ч. 1- Предложенная в работе модель, 2- Бакланов [14], 3- Махонько[15], 4-Loosmore [16], 5-код NAME [17]

предложенная нами модель является более чувствительной к аэродинамическим характеристикам частиц дисперсной фазы и дождевых капель и относится к классу микрофизических моделей, согласуется [14,16] и за счет универсальности представления фильтрующей среды может использоваться для моделирования

взаимодействия аэрозольных частиц и капель для плотностей упаковки, даже выше, чем в наблюдаемых осадках.

Для обоснования новых элементов в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в зоне дыхания человека проведено моделирование полей течений несущей дисперсионной среды с частицами дисперсной фазы в моделях волокнистых фильтров и каскадах индивидуального импактора, а также представлено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Для обоснования предложенных моделей фильтров было выполнено моделирование полей течений в условиях влияния инерционности среды ($Re \neq 0$) и получены оценки сопротивления тонковолокнистого фильтра при увеличении скорости набегающего потока для моделей отдельных рядов параллельных равноудаленных цилиндров, рядов параллельных равноудаленных пар цилиндров и модели из двух рядов параллельных равноудаленных цилиндров, повернутых под прямым углом относительно друг друга (рисунок 13).

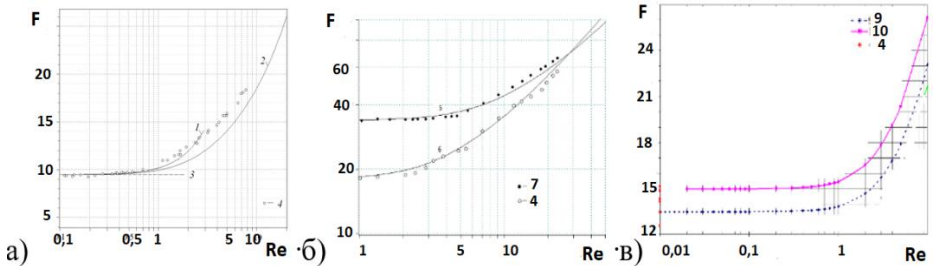


Рисунок 13 Зависимости безразмерной силы сопротивления единицы длины цилиндра F диаметром 5 мкм от Re : в ряду с $a/h = 0.1419$ (а), в ряду с $a/h = 0.2066$, составленном из пар волокон (б) и повернутых под прямым углом относительно друг друга (в). 1 – приближение [39]; 2, 5 и 6, 9 и 10 – моделирование для $a/h = 0.1419$, $a/h_1 = 0,41$ и $0,82$, $a/h = 0,2$, $H/h = 0,8$ и $H/h = 0,408$; 3 – сила F при $Re = 0$; 4, 7 – эксперимент [18].

В области чисел $Re < 0,1-0,3$ результаты численного моделирования поля течения находятся в хорошем согласии с результатами эксперимента и аналитическими формулами. При $Re > 1$ наблюдается незначительное расхождение расчетных и экспериментальных результатов (рисунок 13а). Для модели рядов параллельных

равноудаленных пар цилиндров получено хорошее согласие результатов численного моделирования с данными эксперимента (рисунок 13б).

Для модели из двух рядов параллельных равноудаленных цилиндров, повернутых под прямым углом относительно друг друга, с ростом Re возрастает инерционность среды, что приводит к росту силы сопротивления. Чем больше величина H/h , тем меньше сказывается инерционность среды. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом при $Re \sim 0$ (0,01) для $H/h = 0,8$ (рисунок 13в).

Таким образом, рассмотренные модели позволяет получать оценки гидродинамических характеристик течений дисперсионной среды в фильтрах вблизи волокон с достаточно хорошей степенью точности.

Для этих же моделей фильтров получены оценки коэффициента инерционного захвата волокнами дисперсной фазы для течений с $Re < 1$ и $Re \geq 1$ с учетом конечного размера частиц (рисунок 14). Расчеты коэффициентов инерционного захвата выполнены для модельного фильтра с теми же параметрами, для которых проводились эксперименты [18] по измерению сил сопротивления (рисунок 13) и осаждению частиц дибутилфталата с плотностью $\rho = 1,045 \text{ г/см}^3$.

Для значений параметра зацепления $R = 0,2 - 0,4$ расхождение сплошных и пунктирных кривых в диапазоне $St = 0,7 - 10$ очень незначительное, поскольку числа Re , соответствующие этим значениям St , не превышают единицы (рисунок 14а).

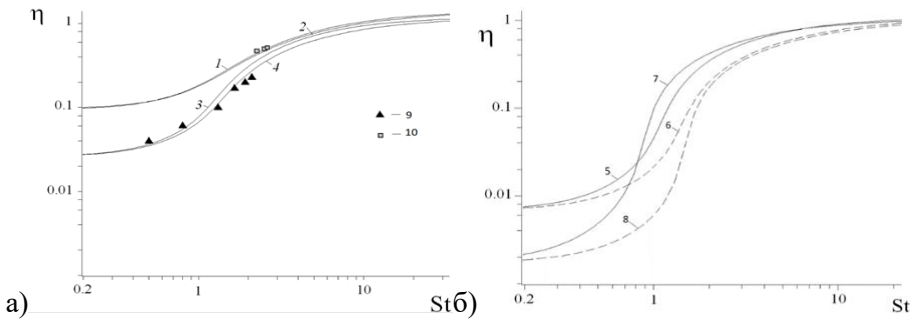


Рисунок 14 Зависимости коэффициента захвата η от числа St для $2a = 10$ мкм и $a/h = 0.1419$: (1, 3, 5, 7) – с учетом Re , (2, 4, 6, 8) – стоксово течение. (1, 2) – $r_p = 2$ мкм, (3, 4) – $r_p = 1$ мкм, (5, 6) – $r_p = 0,5$ мкм, (7, 8) – $r_p = 0,25$ мкм 9, 10 – эксперимент [18]

Совершенно иная картина наблюдается для $R = 0,05 - 0,1$. Здесь в области $St \sim 1$ коэффициенты захвата отличаются более, чем на порядок величины.

Таким образом, видно, сколь существенно сказывается учет истинного поля течения при $Re \sim 1$ на значение величины коэффициента захвата η . В этом случае величина η зависит не только от St и R , но и от числа Re , значение которого в каждой точке на кривой разное (рисунке 14б).

Впервые было показано, что в модельных фильтрах для $R \leq 0,1$ в режиме аналитической фильтрации коэффициент инерционного захвата частиц, а значит, и эффективность осаждения, зависят не только от числа Стокса, но и от числа Рейнольдса.

Для обоснования модели каскада с круглым разгонным соплом с раскрытым на угол $\varphi=30^\circ$ входом и каскада персонального импактора в результате моделирования были получены поля течения дисперсионной среды в режимах $Re>1000$ (рисунок 15) и оценки эффективности осаждения частиц дисперсной фазы от параметра \sqrt{St} (рисунок 16).

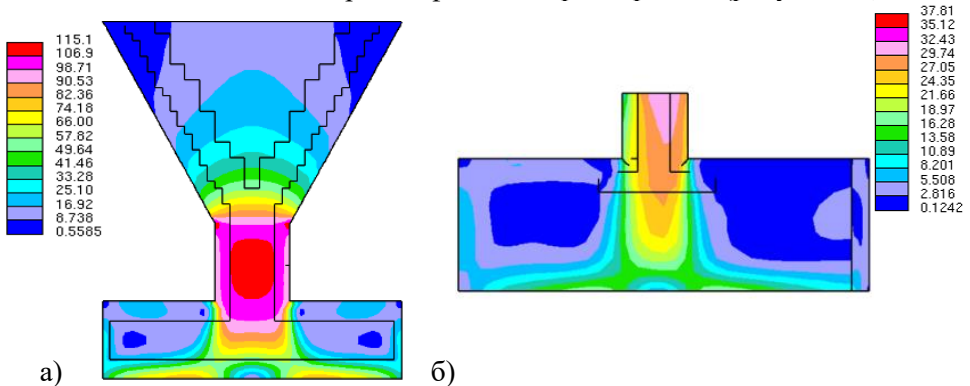


Рисунок 15 Поле течения дисперсионной среды (модуль скорости) в модели каскада импактора с круглым разгонным соплом и раскрытым на угол $\varphi=30^\circ$ входом ($Re=6600$) (а) и каскада персонального импактора ($Re=1800$) (б).

Найденная эффективность осаждения E для частиц с плотностью 1 и $4,8 \text{ г/см}^3$ хорошо согласуются с расчетами [19] для $Re=1000$ (ошибка в пределах 5%), а оценки E полученные для каскада персонального импактора (Re от 1500 до 3500) совпадают в пределах погрешности с данными наших экспериментов (рисунок 16).

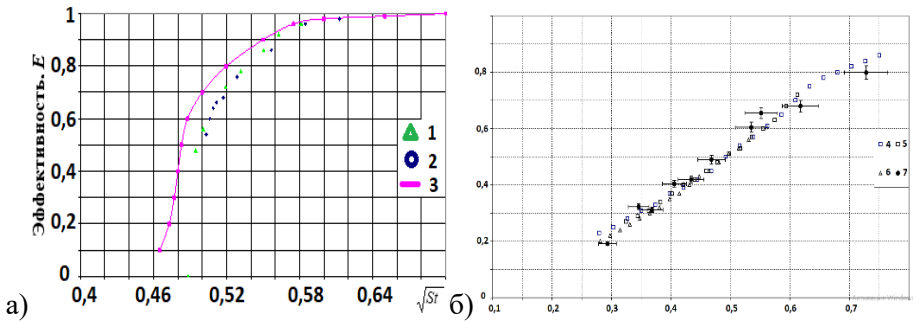


Рисунок 16 Зависимость эффективности осаждения E от параметра \sqrt{St} для каскада импактора с круглым разгонным соплом и раскрытым на угол $\varphi=30^\circ$ входом ($Re=1000$) (а) и каскада персонального импактора (б). Обозначения: 1 и 2 - частицы плотностью 1 и $4,8 \text{ г/см}^3$, соответственно. 3-данные [19], 4,5,6 - $Re=3300, 2400$ и 1800 , соответственно. 7 – экспериментальные данные

Для обоснования методов оценки физико-химических характеристик частиц дисперсной фазы в технологических пространствах, атмосфере и зоне дыхания человека на основе устройств для селективного отбора проб и измерения их активности была показана возможность использования предложенных методов для оценки характеристик дисперсного состава радиоактивных аэрозолей.

Для оценки АМАД и СГО с помощью импакторов с расширенным диапазоном осаждения размерных фракций частиц рассмотрено два режима с объемной скоростью 20 и 50 л/мин для 7 вариантов исходного спектра аэрозольных частиц. Генератором исходного спектра аэрозольных частиц был эталон [20]. Полученные оценки АМАД и СГО сравнивали с результатами, измеренными АИП-2 [21]. По отклонению оценки АМАД от значений исходного спектра определяли величину ошибки метода. Среднее значение ошибки восстановления исходных значений АМАД до 1 мкм при расходе 20 и 50 л/мин составляет 7 и 20 % соответственно, что в 3 раза меньше, чем при использовании импактора АИП-2. Следовательно, предложенный метод определения АМАД и СГО позволяет восстанавливать характеристики дисперсного состава радиоактивных аэрозолей с приемлемой точностью.

Показано, что можно оценить АМАД (μ) и СГО (σ) радиоактивного аэрозоля ^{239}Pu с помощью однокаскадного разделителя для установки непрерывных спектрометрических измерений отдельных размерных

фракций аэрозолей. Отбор проб частиц дисперсной фазы проводился при четырех значениях расхода: 50, 40, 30 и 20 л/мин. Радиоактивные аэрозольные частицы фракционировали с помощью однокаскадного разделителя на четыре размерные фракции с последующим их осаждением на фильтре. Активность частиц на фильтре измеряли при нормальных условиях (101,3 кПа, 20 °С). Для энергетической калибровки спектрометра использовали фильтр с дочерними продуктами радона (ДПР) по аналогии с [22] и специальный аэрозольный источник (САИ) [20] ^{239}Pu (5,157 МэВ) и ^{238}Pu (5,499 МэВ) с активностью 119 Бк.

Из акрилонитрилбутадиенстирола (плотностью $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$) с помощью технологии 3D-печати изготовлены три варианта коллиматоров. Толщина стенки между ячейками в коллиматорах $\sim 300 \text{ мкм}$, диаметр коллиматоров 50 мм (рисунок 17).

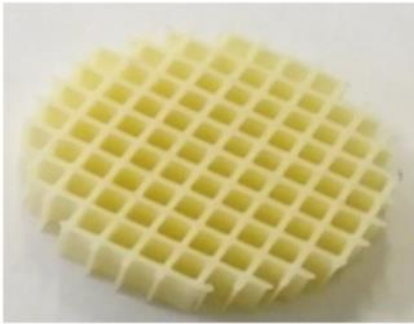


Рисунок 17 Коллиматор.

Размер ячейки -5 мм, высота – 10 мм.

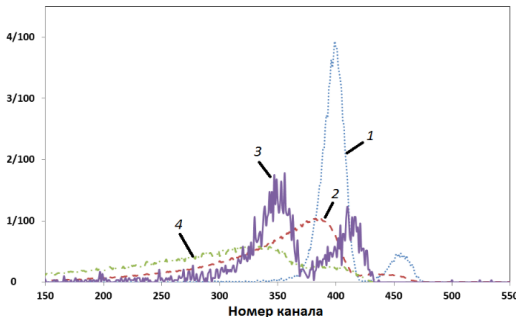


Рисунок 18 Относительный спектр альфа-излучения источников Pu-239. Образцовый спектрометрический альфа-источник с коллиматором №2(1) и без (2). САИ с коллиматором №2 (3) и без (4) Время экспозиции 4 ч

Показано, что использование коллиматора улучшает разрешение (Рисунок 18). Величина FWHM для ^{239}Pu и коллиматора составила 135 кэВ, а без него - 470 кэВ. Использование коллиматора (рисунок 17) при измерении

образцового спектрометрического α -источника (активностью 388 Бк и диаметром источника 67 мм) с тем же радионуклидным составом, что и у САИ, также позволило повысить энергетическое разрешение. Значение FWHM для α -пика ^{239}Pu , измеренного с коллиматором, составляет 120 кэВ, а без 450 кэВ (рис.18). Для оценки эффективности регистрации

α -частиц спектрометром был использован специальный аэрозольный источник (САИ). Применение коллиматоров приводит к уменьшению на порядок эффективности регистрации альфа-частиц (без коллиматора – 0,017, с коллиматором №2 – 0,0017). Поэтому для минимизации погрешности при измерении активности пробы с использованием коллиматоров необходимо увеличивать время измерения или отбора пробы. Даже в этом случае предложенный метод остается более оперативным, чем измерения с использованием вакуума.

Наилучшие характеристики при измерениях альфа-спектров по энергетическому разрешению и времени измерения были получены при использовании коллиматора с высотой (h) 10 мм и шириной ячейки (a) 5 мм (рисунок 17), параметры которого близки к сотовому коллиматору (с размером соты 6,3 мм и высотой 6 мм) [23].

В таблице 1 представлены результаты измерений с использованием коллиматора (рисунок 17) суммарной активности осевших на фильтре частиц A_{Σ} при четырех значениях объемного расхода V_i газового потока дисперсионной среды через разделитель, значения активности A_i для каждой размерной фракции, относительной активности частиц $\eta_i = A_i/A_{\Sigma}$ и значения эффективного диаметра разделения d_{50} , полученные при предварительной калибровке разделителя.

Таблица 1 Исходные данные для оценки АМАД и СГО

Объемный расход (V_i), л/мин	50	40	30	20
D_{50} (ECAD), мкм	3,5	4,4	5,2	6
Суммарная активность (A_{Σ}), Бк	4481	26886	94101	127709
Активность фракции (A_i), Бк	4481	22405	67215	33608
Относительная активность ($\eta_i = A_i/A_{\Sigma}$)	0,04	0,18	0,53	0,26

По данным из таблицы 1, были определены АМАД и СГО. Значения η_i , полученные для каждой выделенной фракции аэрозольных частиц, подставляются в формулу (9). Значение теоретической относительной активности η_i^T рассчитывали согласно следующей зависимости (13):

$$\eta_i^T = \sum_{j=1}^L E_i(x_j) \cdot f(x_j, \mu, \sigma) \cdot (x_j - x_{j-1}) \quad (13)$$

где: x_j – переменное значение аэродинамического диаметра аэрозольных частиц в интервале значений от 0,01 до 100 мкм; L – количество разбиений интервала значений x_j аэродинамического диаметра аэрозольных частиц; $E_i(x_j)$ – эффективность разделения (осаждения) частиц с аэродинамическим диаметром x_j ; $f(x_j, \mu, \sigma)$ – плотность ЛНР активности аэрозольных частиц по размерам (1/м).

С использованием выражения (13) для η_i^T в (9), определяем μ и σ , при которых функция невязки $Q(\mu, \sigma)$ минимальна (менее $1 \cdot 10^{-4}$). В рассмотренном примере это происходит при: $\mu=5,5$ мкм и $\sigma=2$ (рисунок 19). Следовательно, указанные значения АМАД и СГО являются искомыми значениями для радиоактивного аэрозоля, содержащего ^{239}Pu .

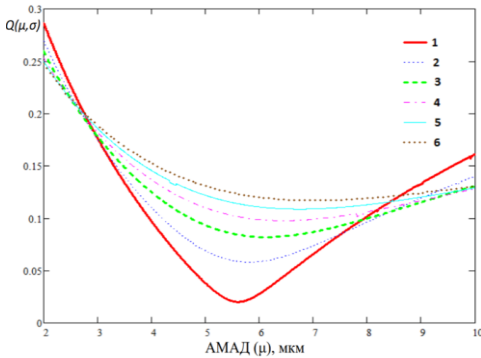


Рисунок 19 $Q(\mu, \sigma)$ от μ при $\sigma=2$ (1), $\sigma=3$ (2), $\sigma=4$ (3), $\sigma=5$ (4), $\sigma=6$ (5) и $\sigma=7$ (6)

расчеты долей осаждения радиоактивных аэрозолей с АМАД = 1 мкм и СГО = 2,5. Импактор для разделения исходного спектра имеет 7 каскадов [24]. В таблице 2 представлены результаты оценки доли активности частиц дисперсной фазы исходного спектра, осевших в отделе ET_1 в соответствии с (11). Аналогичным образом рассчитываются доли осаждения аэрозоля в других отделах. При сравнении результатов расчета с данными из Публикации 66 МКРЗ [4] (рисунок 20) получено, что средняя ошибка определения доли активности в отделах дыхательного тракта человека не превышает 7% для исходного ЛНР частиц.

Таблица 2 Расчет доли активности аэрозоля с АМАД = 1 мкм и СГО = 2,5 в ET_1

Каскад	D_{50} , мкм	Границы интервала, мкм		Отдел ET_1			p_A	$\overline{DE} \cdot p_A$
		d1	d2	DE(d1)	DE(d2)	\overline{DE}		
0	23	100	23	0,25	0,29	0,27	3,12E-04	8,43E-05
1	9	23	9	0,29	0,41	0,35	7,98E-03	2,81E-03
2	5,8	9	5,8	0,41	0,43	0,42	1,91E-02	8,02E-03
3	4,7	5,8	4,7	0,43	0,41	0,42	1,81E-02	7,59E-03
4	3,3	4,7	3,3	0,41	0,37	0,39	5,13E-02	2,00E-02

Предложенный способ оценки дисперсного состава радиоактивных аэрозолей с помощью однокаскадного разделителя позволяет определить АМАД и СГО с требуемым уровнем точности.

Для оценки распределения активности частиц дисперсной фазы по отделам дыхательного тракта человека для полимодальных спектров выдыхаемых частиц выполнены

5	1,1	3,3	1,1	0,37	0,17	0,27	3,64E-01	9,88E-02
6	0,4	1,1	0,4	0,17	0,04	0,11	3,65E-01	3,94E-02
7	-	0,4	0,1	0,04	0,02	0,03	1,74E-01	5,56E-03
DE_i								1,82E-01

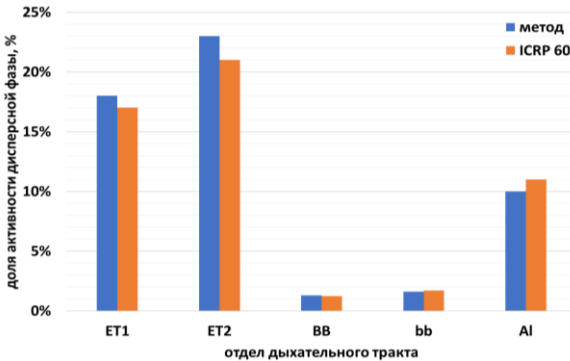


Рисунок 20 Распределение активности дисперсной фазы по отделам дыхательного тракта

Если распределение исходного вдыхаемого человеком спектра частиц дисперсной фазы отличается от ЛНР, (например, является бимодальным), то предложенный метод, используя фактическое распределение, позволяет оценить, доли активности в отделах дыхательного тракта с

большой точностью, чем методы, опирающиеся на логарифмически нормальную аппроксимацию спектра (программа ИМВА[25]).

В четвертой главе рассмотрено прикладное использование предложенных в работе *новых элементов в областях моделирования и измерений физико-химических параметров радиоактивных аэрозолей* для анализа последствий ряда радиационных аварий и инцидентов, связанных с образованием и выбросами в атмосферу радиоактивных аэрозолей. Рассмотрено как отдельное, так и комплексное использование *новых элементов*. Кроме этого, показано использование методов оценки дисперсного состава промышленных альфа-активных аэрозолей.

Достоверно неизвестно, сколько было выброшено (по активности) радиоактивных аэрозолей в атмосферу *в результате аварии на атомной подводной лодке К-431 в бухте Чажма (1985г.)* Однако можно с помощью моделирования переноса дисперсной фазы в ПАРРАД и сопоставления результатов моделирования с измерениями мощности эквивалентной дозы (МЭД) от радиоактивного следа ^{60}Co на п-ве Дунай (1 - 5 км от места аварии), оценить количество ^{60}Co выброшенного в атмосферу.

Моделирование переноса дисперсной фазы для оценки источника выброса ^{60}Co проводили для следующих условий: дисперсионная среда -

пограничный слой атмосферы, поля ветра (с учетом рельефа местности и типа подстилающей поверхности) и осадков получены по модели WRF-ARW, дисперсная фаза - распределением по размерам радиоактивных аэрозольных частиц ^{60}Co с ММАД - 0,2 мкм и СГО равным 2 в предположении, что активность равномерно распределена по массе аэрозольной частицы. При моделировании МЭД от выпавших на поверхность аэрозольных частиц использована величина МЭД на 1 м от поверхности земли. Наилучшее совпадение результатов моделирования с данными измерений было получено при суммарной активности ^{60}Co в выбросе на уровне $7 \pm 3 \cdot \text{ТБк}$, т.е. около 10 % от накопившегося в конструкционных материалах реактора на АПЛ (таблица 3).

Таблица 3 Результаты моделирования и измерения МЭД (п-ов Дунай)

Параметры	Расстояния до места аварии, км				
	1,2	2	3	4	5
МЭД макс., мкР/ч	1360 / 1120	420 / 460	310 / 320	230 / 230	150 / 130
Расхождение, %	- 21	+ 10	+ 3	0	- 15
Ширина следа, м	700 / 600	750 / 550	800 / 600	670 / 800	620 / 850
Расхождение, %	- 17	- 36	- 33	+ 19	+ 37

Примечание. Числитель – измерения, знаменатель – моделирование

Сопоставимость результатов моделирования МЭД с данными измерений позволила в дальнейшем восстановить траектории перемещения радиоактивного аэрозольного облака по территории Приморья, получить оценки загрязнения п-ва Дунай, Уссурийского залива, территории края и приграничной зоны Китая (рисунок 21).

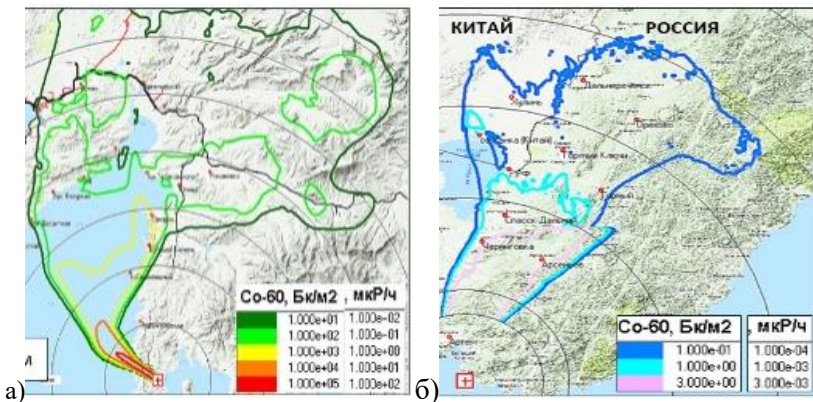


Рисунок 21 Плотность выпадений и МЭД от аэрозолей ^{60}Co на акватории Уссурийского залива (а), территории Приморья и Китая (б)

До сих пор сохраняется неопределённость в отношении причин формирования сильно неоднородной картины загрязнения местности в результате аварии на ЧАЭС (1986 г) частицами дисперсной фазы ^{137}Cs за счет вымывания их локальными осадками из атмосферы. Использование ПАРРАД и предложенной нами модели подоблачного вымывания аэрозолей позволило оценить условия формирования таких загрязнений. Результаты моделирования сравнивали с измерениями выпадений ^{137}Cs в 1986 г. на территории Белоруссии (Гомельская и Могилевская области) и России (Брянская область). Для восстановления картины переноса аэрозолей ^{137}Cs в атмосфере была использована следующая модель дисперсионной среды: – атмосферный воздух в приделах пограничного слоя атмосферы на основе модели WRF-ARW. Суммарная активность ^{137}Cs в выбросе составляла от 20 до 100 ПБк. Результаты моделирования получены для четырех групп частиц с осреднёнными коэффициентами вымывания Λ для высоты выброса (H_1) в диапазоне от 100 до 1000 метров и активности ^{137}Cs (Q_1).

Наилучшее совпадение результатов моделирования с данными измерений плотности выпадений ^{137}Cs [26] получено для $\Lambda \sim 10^{-5}$ 1/с (рисунок 22), что свидетельствует о том, что загрязнение местности в районе Могилевско-Гомельско-Новозыбковского пятна за счет вымывания обусловлено в основном аэрозольными частицами от 1 до 10 мкм с плотностью от 2,5 до 5 г/см³, что не противоречит данным [27].

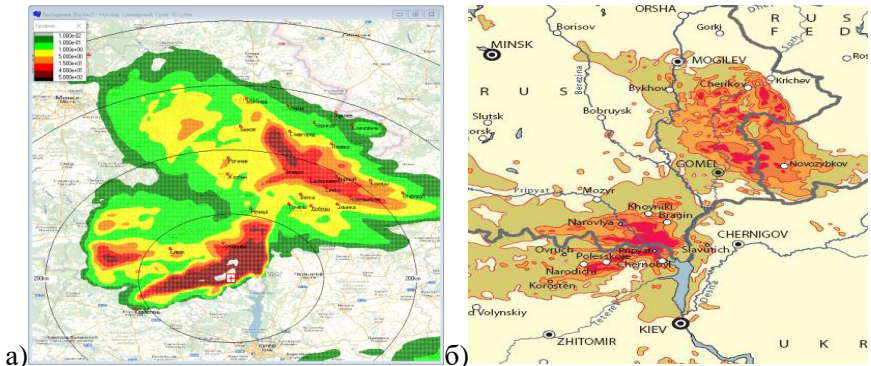


Рисунок 22 Некоторые результаты моделирования и данные измерений плотности выпадений ^{137}Cs . Моделирование: $\Lambda - 10^{-5}$ 1/с, $H_1 - 500$ м, $Q_1 - 100$ ПБк (а). Данные измерений (б) на 1986 [26]

Оперативные оценки мощности и состава выброса при аварии на АЭС Фукусима (2011 г.) были выполнены с помощью оптимальной модели дисперсионной среды для кода СОКРАТ [28]. Моделирование переноса радиоактивных веществ в атмосфере проводилось с помощью ПАРРАД для дисперсионной среды - воздух в пределах пограничного слоя атмосферы по модели WRF-ARW (поля метеорологических параметров за 15 марта 2011).

На основании сопоставления результатов моделирования с измерениями МЭД установлено, что в ночное и утреннее время 15 марта в атмосферу поступило не более 5-6 % РБГ (газ), 0,5 % йода (газы+аэрозоли) и 0,3% цезия (аэрозоли) от находящегося в топливе на блоке №2 и в бассейне ОЯТ на блоке №4. Это позволило оценить мощность эквивалентной дозы (МЭД, мкЗв/час) от поверхности земли после прохождения радиоактивного облака (рисунок 23).

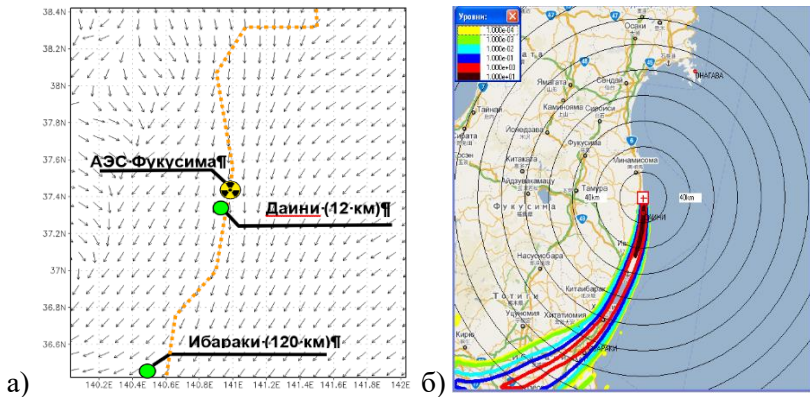
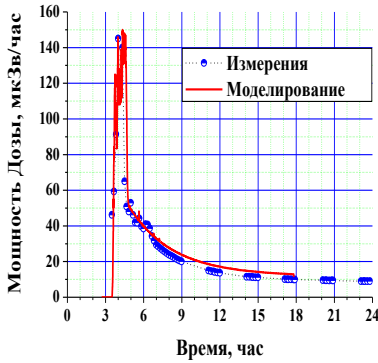
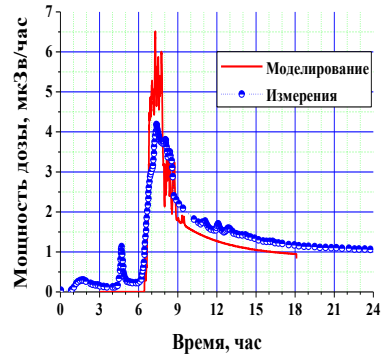


Рисунок 23 Поле приземного ветра (а) и МЭД (б) 15 марта 2011

В результате моделирования установлено, что в районе площадки АЭС Фукусима-2 (Даини) после прохождения радиоактивного газо-аэрозольного облака МЭД составляла 10-20 мкЗв/час, а в префектуре Ибаракис 1-2 мкЗв/час, что соответствует измерениям МЭД в этих точках (Рисунок 24).



а)



б)

Рисунок 24 МЭД АЭС Фукусима-2 Дайни (а) и Ибараки (б)

Получено, что во второй половине 15 марта 2011 в атмосферу в северо-западном направлении от АЭС было выброшено не более 10-15 % РБГ, йода, теллура и цезия из реактора на блоке №2. Для подтверждения этого были выполнены расчеты плотности выпадений аэрозолей, содержащих ^{137}Cs , и сравнение с данными данным МЕХТ и Департамента Энергетики (DOE) США (таблица 4)

Таблица 4 Плотность выпадений ^{137}Cs

Точка контроля	Выпадения, Ки/км ²		
	ПАРАД	МЕХТ, Япония	DOE, США
АЭС Дайни	11	13	12
Ибараки	3	1,3	<8
Точка № 32	102	173	120
г.Фукусима	6	9	12
Иитате	50	30	54

Сравнение результатов моделирования плотности выпадений ^{137}Cs с данными измерений показывает, что оценки совпадают по порядку величины во всех точках измерения выпадений. При этом отклонение результатов моделирования от расчетов по данным мониторинга варьируется от 15 % до 40 %. Полученные оценки выпадений показывают, что моделирование переноса аэрозольных частиц ^{137}Cs в течение 15 марта корректно, а их изначальное количество в выбросе достаточно для формирования наблюдаемых уровней выпадений.

Комплексное использование предложенных в работе новых элементов было реализовано для анализа инцидента на ЭЗТМ в г.

Электросталь (2013 г.), в результате которого в атмосферу были выброшены радиоактивные аэрозольные частицы ^{137}Cs , образовавшиеся в результате расплавления соединений цезия в индукционной печи. При этом радиоактивные частицы распространились на большие расстояния, что позволило зафиксировать наличие ^{137}Cs на территории нашей страны и соседних стран. В рамках анализа данного инцидента решалась задача по восстановлению источника выброса за пределы здания и его доли вовлеченной в трансграничный перенос в атмосфере.

На первом этапе была выполнена оценка источника выброса за пределы здания и загрязнения воздуховода. Для моделирования переноса дисперсной фазы в воздуховоде была использована оптимальная модель дисперсионной среды для СОКРАТ [28] с учетом фазового перехода паров цезия в твердую фазу. Результаты моделирования сопоставлены с данными реальных измерений МЭД γ -излучения вдоль воздуховода, что позволило получить оценки распределения осевших радиоактивных частиц дисперсной фазы ^{137}Cs по длине воздуховода и дисперсного состава аэрозоля, поступившего в атмосферу.

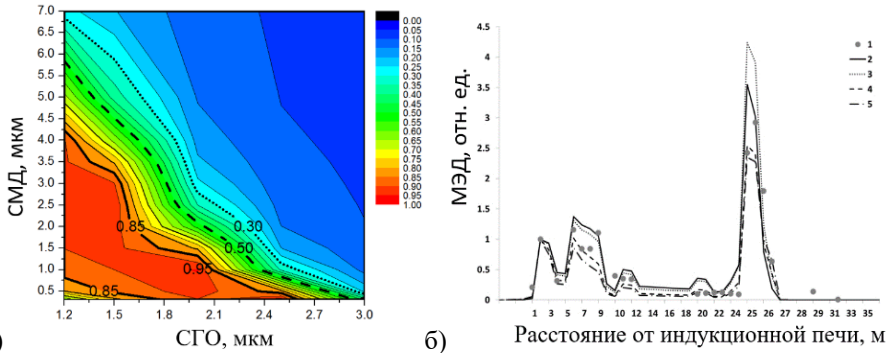
Установлено, что источник формировался следующим образом. Пары радиоактивного цезия в воздушном объеме тигля индукционной печи конденсировались на холодных частичках пыли (293 К), присутствующих в рабочем помещении. Считалось, что образовавшиеся радиоактивные аэрозольные частицы имеют шарообразную форму, а размеры описываются ЛНР с параметрами: счетный медианный аэродинамический диаметр (СМАД) от 0,3 до 7 мкм и СГО от 1,2 до 4.

В качестве критерия, определяющего соответствие между осаждением частиц дисперсной фазы в воздуховоде и измерениями МЭД от воздуховода, использовали линейный коэффициент корреляции. В результате многовариантных расчетов были получены выборки с относительным распределением массы дисперсной фазы вдоль воздуховода, которые сравнивались с относительным распределением измеренных значений МЭД, и диаграмма коэффициента корреляции (рисунок 25а). Распределения с СМАД и СГО и коэффициентом корреляции 0,94 – 0,96 представлены на рисунке 25б.

Локальные пики МЭД и в расчётах, и в измерениях соответствуют изгибам воздуховода (рисунке 25б). Из-за того, что пары цезия конденсировались на поверхности аэрозольных пылевых частиц, отношение суммарной поверхности S частиц пыли на выходе и входе

воздуховода соответствует отношению активности $A_{\text{выход}}$ выброса в атмосферу к активности источника выброса до входа в воздуховод $A_{\text{ист}}$

$$\kappa = \frac{S_{\text{выход}}}{S_{\text{вход}}} = \frac{A_{\text{выход}}}{A_{\text{ист}}} \quad (14)$$



а) б) **Рисунок 25** Коэффициент корреляции (а), МЭД и распределение частиц с СМД и СГО (б): 6,3 мкм и 1,2 (2); 4 мкм и 1,5 (3); 1,6 мкм и 2 (4); 0,5 мкм и 2,5 (5)

Получено, что для спектров с коэффициентом корреляции 0,94 – 0,96 коэффициент ослабления источника выброса κ (14) воздуховодом составлял от 20 до 70 %.

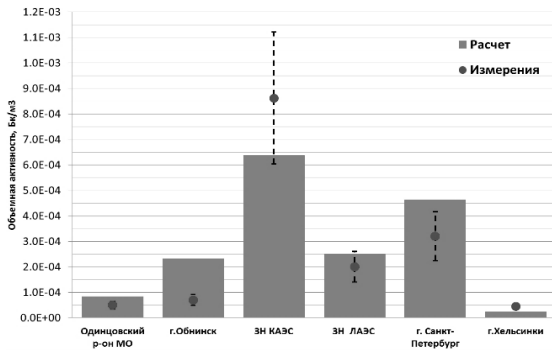


Рисунок 26 Объемная активность ^{137}Cs в точках отбора проб, результаты моделирования (■) и измерения (●)

атмосфере, использовали ПАРРАД. Получено, что активность частиц

Полагая, что ^{137}Cs распределён по поверхности частиц получено, что выброшенные за пределы здания радиоактивные аэрозоли цезия ($2,2 \cdot 10^{11}$ Бк), характеризуются АМАД $\sim 5 \pm 2$ мкм и СГО $\sim 2 \pm 0,5$.

Для оценки доли источника выброса, вовлеченной в трансграничный перенос аэрозолей ^{137}Cs в

^{137}Cs вовлеченных в трансграничный перенос составил около $7,4 \cdot 10^{11}$ Бк с учетом погрешности измерений (около 30 %). Это хорошо согласуется с данными измерений объемной активности ^{137}Cs на местности (рисунок 26).

Применение импактора с расширенным диапазоном позволило оценить дисперсный состав радиоактивных аэрозолей в цехах предприятия по переработке ОЯТ (таблица 5). Результаты проведенных исследований показали, что АМАД аэрозолей в цехах изменяется в широких пределах, но в целом преобладает грубодисперсная фракция. Получено, что АМАД во всех пробах существенно больше 1 мкм, что отличается от значения, используемого в рамках стандартной модели оценки доз внутреннего облучения по требованиям НРБ-99/2009.

Таблица 5 Результаты оценки параметров АМАД и СГО

№	Объемная активность		АМАД, мкм	СГО
	Бк/м ³	В ед. ДОА (^{239}Pu)		
1	0,62	19,4	2,9	5,2
2	15,22	475,5	5,9	2
3	0,32	10,0	5,7	2,9
4	1,99	62,3	26,2	3,2
5	0,021	0,6	13	3,8
6	0,281	8,8	3,4	1,6

С помощью разработанного нами специального программного средства «ALFA_AEROSOL_EXPRESS» для спектрометрии отдельных размерных фракций аэрозольных частиц рассчитаны АМАД и СГО для радиоактивных аэрозолей америция, плутония и урана, отобранных в реальных производственных условиях (таблица 6). Так как условия отбора и производственные условия схожи, распределения активности по размерам аэрозольных частиц для различных радионуклидов оказались близки.

Таблица 6 Исходные данные для расчетов

Скорость прокачки, л/мин	Активность, Бк			
	^{241}Am	^{239}Pu	^{235}U	^{238}Pu
10	92	105	119	60
20	81	78	89	51
30	69	62	63	40
40	63	41	33	28
АМАД, мкм	3,1	4,2	4,4	3,9
СГО	1,6	1,4	1,3	1,4

Из этого следует, что исходный аэрозольный источник у четырех различных радионуклидов общий и все они содержатся на одном носителе, образованном при диспергировании. Полученные результаты могут использоваться для планирования регламентных работ на предприятиях по производству, хранению и переработке ядерного топлива.

Выводы

1. Разработаны физико-химические основы аэрозольной безопасности на предприятиях ядерного топливного цикла, базирующиеся на принципе взаимного дополнения моделирования и измерения физико-химических параметров аэрозолей:
 - в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в технологических пространствах на объектах предусмотрено последовательное использование моделей дисперсионных сред на основе сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики для моделирования переноса радиоактивных аэрозолей в технологических пространствах;
 - в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в атмосфере рекомендуется использовать квазистационарные модели переноса, учитывающие поля метеорологических параметров, дисперсный состав аэрозоля, многогрупповое взаимодействие частиц аэрозоля и дождевых капель, рельеф местности и поверхностное распределение типов подстилающей поверхности;
 - в области моделирования переноса радиоактивных аэрозолей и оценки их физико-химических характеристик в зоне дыхания человека следует использовать методы вычислительной гидродинамики для разработки эффективных аналитических фильтров и каскадов импакторов;
 - в области измерений и оценки физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей в технологических пространствах, атмосфере и зоне дыхания человека следует использовать каскадный импактор с расширенным диапазоном селективного осаждения размерных фракций частиц дисперсной фазы, персональный импактор, установку (онлайн-установку) непрерывных радиометрических или спектрометрических измерений отдельных размерных фракций аэрозолей, а также способы оценки характеристик дисперсного состава

радиоактивных аэрозолей с помощью этих устройств, метод оценки долей осаждения частиц дисперсной фазы радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека.

2. Разработан механизм оценки характеристик дисперсного состава радиоактивных аэрозолей на основе построения оптимальных моделей дисперсионных сред при последовательном использовании сосредоточенных параметров и вычислительной гидродинамики в технологических системах, учитывающий фазовые переходы и механизмы взаимодействия этих частиц с поверхностями. Критерий оптимальности модели дисперсионной среды строится на том, что значение модуля линейной скорости в дисперсионной среде в расчетных объемах по коду сосредоточенных параметров не должно отличаться от среднего значения модуля линейной скорости в пространствах, ограниченных расчетными объемами по коду вычислительной гидродинамики, более чем в 2 раза. Апробация выполнена для технологических систем и аварийных режимов реактора РБМК-1000.
3. Разработан механизм сопряжения гидродинамической модели WRF-ARW (модель дисперсионной среды) с лагранжевой моделью переноса дисперсной фазы в пределах пограничного слоя атмосферы. Сопряжение обеспечивается за счет использования метеорологических характеристик из модели WRF-ARW при вычислении коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. Апробация механизма выполнена с использованием данных метеонаблюдений для контрольных точек на местности с различными типами подстилающей поверхности. Коэффициенты диффузии, используемые для моделирования переноса дисперсной фазы и рассчитанные на основе данного механизма сопряжения, по порядку величины совпадают с наблюдаемыми значениями для различных категорий устойчивости атмосферы. Этот механизм сопряжения заложен в разработанный программный комплекс ПАРРАД.
4. Предложена модель подоблачного вымывания аэрозолей из атмосферы, учитывающая физико-химические характеристики аэрозольных частиц при их взаимодействии с дождевыми каплями, и рассматривающая совокупность капель дождя как сильно разреженную фильтрующую среду с плотностью упаковки ниже 10^{-5} . Рассчитаны эффективности захвата монодисперсных аэрозольных частиц

дождевыми каплями с учетом механизма диффузии, зацепления и инерционного захвата.

5. Разработаны численные модели фильтров и каскадов импактора для исследования механизмов осаждения аэрозольных частиц на препятствиях для переходных чисел Рейнольдса в режиме высокоскоростной фильтрации и в турбулентных потоках.
6. Предложен способ оценки дисперсного состава альфа-активных аэрозолей на основе альфа-спектрометрических измерений отдельных размерных фракций частиц без использования вакуумирования и радиохимической подготовки проб.
7. Разработаны теоретические основы для метода оценки отложений радиоактивных аэрозолей в отделах дыхательного тракта человека для полимодальных спектров размеров вдыхаемых частиц. Показано, что для реализации метода подходят устройства, предложенные в качестве новых элементов в области измерений.
8. Разработаны конструкции пробоотборных устройств, в основе которых лежат исследованные закономерности влияния физико-химических параметров аэрозолей на особенности их осаждения на различных препятствиях как при переходных числах Рейнольдса, так и в турбулентных потоках. Конструкции персонального импактора и инерционного импактора с расширенным диапазоном защищены патентами РФ.
9. Разработаны методы оценки АМАД в зоне дыхания человека, позволяющие обеспечить определение АМАД в диапазоне: $0,1 \div 15$ мкм с относительной погрешностью не более 30% при относительной погрешности измерения активности частиц дисперсной фазы на каждом каскаде не более 10 %.
10. С помощью разработанной методологии, моделей и программных средств оценены характеристики радиоактивных аэрозолей для ряда радиационных аварий и инцидентов:
 - сопоставление результатов моделирования и измерений мощности дозы от выпадений частиц дисперсной фазы ^{60}Co (б.Чажма, 1985) позволило оценить масштабы выброса и загрязнения территорий;
 - сопоставление результатов моделирования и измерений выпадений дисперсной фазы ^{137}Cs в районе Могилевско-Гомельско-Новозыбковского пятна (ЧАЭС, 1986) позволило оценить характеристики частиц, сформировавших эти загрязнения, в результате вымывания локальными дождями из атмосферы;

- сопоставление результатов моделирования и измерений мощности дозы от поверхности земли и выпадений дисперсной фазы ^{137}Cs позволило оценить масштабы выброса (Фукусима, 2011) аэрозолей цезия в атмосферу;
- сопоставление результатов моделирования и измерений МЭД от воздуховода (Электросталь, 2013) позволило оценить параметры частиц дисперсной фазы, содержащих ^{137}Cs , выброшенных в атмосферу за пределы здания и вовлеченных в трансграничный перенос.

Список используемой литературы

1. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, 2008, 520p.
2. Беликов В.В., Головизнин В.М., Катышков Ю.В., и др. НОСТРАДАМУС – компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Труды ИБРАЭ, Моделирование Распространения Радионуклидов в окружающей среде. М. Наука, 2008. с. 41-103.
3. Бызова Н.Л., Шнайдман В.А., Бондаренко В.Н. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным. Метеорология и гидрология. №11, 1987, с. 75-83.
4. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection / ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). – 1994.
5. Beard A., Bennet P. CSNI ISP 34 (FALCON). FAL/ISP (92), 1992.
6. F. Gelbard: MAEROS User Manual NUREG/CR-1391 SAND80-0822 (December 1982).
7. H. Jordan, J.A. Gieseke, P. Baybutt, TRAP-MELT User's Manual, Battelle Columbus Lab., Report NUREG/CR-0632, BMI-2017, 1979.
8. Hong, S.–Y., Y. Noh, J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Mon. Wea. Rev., 134, 2318–2341.
9. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхмана. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 607 с.
10. Brioude J., Arnold D., Stohl A. et al. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1. Geosci Model Dev 6:1889–1904.
11. Draxler R.R. HYSPLIT4 User's Guide. – NOAA Tech. Memo, 1999. www.arl.noaa.gov/documents/reports/arl-230.pdf
12. Draxler R.R. Demonstration of a global modeling methodology to determine the relative importance of local and long-distance sources. – Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, p. 776-789.
13. Draxler R.R., Heffter J.L., Rolph G.D. DATEM. Data Archive of Tracer Experiments and Meteorology 23 July 2002–
<https://www.arl.noaa.gov/documents/datem/document/datem.pdf>.

14. Balklanov, A., Sørensen J.H. Parameterization of radionuclide deposition in atmospheric long-range transport modelling, *Phys. Chem. Earth (B)*, 2001, 26, p. 787–799.
15. Махонько К.П., Дмитриева Г.В. Способность различных типов осадков к вымыванию продуктов деления из атмосферы и характеристики вымывания. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1966, т. 2, № 3, с. 297-304.
16. Loosmore G. A., Cederwall R. T. Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data. *Atmospheric Environment*, 2004, 38, p. 993–1003.
17. Webster H., Thomson D. The NAME wet deposition scheme Forecasting Research. Technical Report №584,2014, 41 p.
18. Kirsh A.A., Stechkina I.B. Theory of aerosol filtration with fibrous filters. In *Fundamental of Aerosol Science*. Ed. D.T. Shaw. N.Y., Wiley, 1978, 165-256.
19. Rader D.J., Marple V.A. Effect of ultra-Stokesian drag and particle interception on impaction characteristics. *Aerosol Sci. and Tech.* 1985, 4, p. 141.
20. Ruzer L.S., Fertman D.E., Kuznetsov Y.V., et al. *Radioactive Aerosol Standards//Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects.*— London–New York: CRC PRESS Boca Raton, 2005.
21. Патент RU 2239815 C1 от 10.11.2004. Авторы: Цовьянов А.Г., Бадьин В.И., Молоканов А.А. и др.
22. Pöllänen R., Peräjärvi K., Siiskonen T., et al. In-situ alpha spectrometry from air filters at ambient air pressure. – *Radiation Measurements*, 2013, V.53-54, p.65 – 70.
23. Pöllänen R., Peräjärvi K., Siiskonen T., et al. High-resolution alpha spectrometry at ambient air pressure – Towards new applications. – *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Sect. A*, 2012, V.694, p. 173 – 178.
24. Цовьянов А.Г., Кухта Б.А., Карев А.Е. Патент RU 2509375 10.03.2014.
25. Birchall A., Jarvis N.S., Peace M.S. The IMBA Suite: Integrated Modules for Bioassay Analysis. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol.79, 107-110, 1998.
26. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси, Москва-Минск, 2009г., с.с. 22-81.
27. Budyka A.K., Ogorodnikov B.I. Radioactive aerosols generated by Chernobyl. - *Russian J. Physical Chem. A*, 1999, V. 73, № 2, p.310-319.
28. Алипченков, В.М.; Киселёв, А.Е.; Сорокин, А.А.; и др. Верификация моделей осаждения продуктов деления в первом контуре ЯЭУ в расчетном комплексе СОКРАТ/ВЗ, *Известия РАН. Энергетика*, 2013, 3, с.с. 53-59.

Основные публикации по теме диссертации

1. *Припачкин Д.А.* Модельно-измерительный подход к совершенствованию механизмов обоснования радиационной безопасности аэрозолей. Атомная энергия. 2021. Т. 130. № 6. С. 333-337.
2. *Припачкин Д.А., Будака А.К.* Влияние параметров аэрозольных частиц на их вымывание из атмосферы дождевыми каплями. Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 203-209.
3. *Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А., и др.* Разработка и применение интегрированной системы математических моделей переноса радионуклидов после гипотетической аварии с целью минимизации радиоэкологических последствий. Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 313-326.
4. *Панченко С.В., Припачкин Д.А., Крышев А.И. и др.* Опыт использования моделей рассеяния примеси в городской среде. Атомная энергия. 2020. Т. 128. № 5. С. 282-288.
5. *Припачкин Д.А., Хусейн Ю.Н., Будака А.К. и др.* Способ определения параметров дисперсного состава радиоактивных аэрозолей. Патент на изобретение RU 2676557 C1, 09.01.2019.
6. *Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А.* Восстановление радиоактивного загрязнения окружающей среды в приморском крае вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чахма. Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 3. С. 144-150.
7. *Огородников Б.И., Капустин И.А., Припачкин Д.А. и др.* Оценка распределения радиоактивных аэрозолей по размерам методом многослойных фильтров и с помощью диффузионной батареи. АНРИ. 2019. № 1 (96). С. 8-16.
8. *Припачкин Д.А., Арон Д.В., Будака А.К., и др.* Влияние коллиматора на характеристики полупроводникового альфа-спектрометра при измерении радиоактивных аэрозолей. Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 2. С. 109-112.
9. *Arutyunyan R.V., Pripachkin D.A., Dolganov K.S.* Assessment of parameters of radioactive aerosol release through air duct system using the SOCRAT/V3 code. Nuclear Technology. 2018. Т. 203. № 1. С. 92-100.
10. *Афремов Д.А., Жуков И.В., Припачкин Д.А. и др.* Оценка осаждения радиоактивных аэрозолей на внутренних поверхностях пароводяных коммуникаций при запроектных авариях на АЭС с РБМК. Атомная энергия. 2017. Т. 123. № 2. С. 110-112.
11. *Рубинштейн К.Г., Сафронов А.Н., Припачкин Д.А., и др.* Сравнение результатов моделей переноса ^{85}Kr в атмосфере с данными натурального эксперимента ACURATE. Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 41-57.
12. *Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сороковикова О.С. и др.* Система ПАРРАД и ее испытания на реальных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 169-173.

13. *Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А.* Условия и исходные данные для восстановления радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на население вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма. *Атомная энергия*. 2016. Т. 12. № 6. С. 351.
14. *Рубинштейн К.Г., Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А. и др.* Описание радиационной обстановки и оценки даты выброса ^{137}Cs в атмосферу с помощью модели переноса радионуклидов совместно с прогнозами мезомасштабной гидродинамической модели. *Метеорология и гидрология*. 2016. № 5. С. 32-43.
15. *Припачкин Д.А., Будыка А.К., Юзеф Х.Н. и др.* Метод определения дисперсного состава радиоактивных аэрозолей на основе инерционных разделителей. *АНРИ*. 2016. № 3 (86). С. 57-63.
16. *Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Припачкин Д.А. и др.* Метод оценки осаждения частиц радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2016. № 5. С. 23-31.
17. *Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сороковикова О.С. и др.* Трансграничный перенос при малых выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. *Атомная энергия*. 2014. Т. 117. № 2. С. 109-112.
18. *Афремов Д.А., Жуков И.В., Припачкин Д.А.* Моделирование переноса цезия и иода в эксперименте FAL-ISP 1. *Атомная энергия*. 2014. Т. 117. № 5. С. 297-299.
19. *Припачкин Д.А., Будыка А.К., Ризин А.И. и др.* Экспериментальное исследование дисперсного состава аэрозолей методом многослойных фильтров и с помощью каскадного устройства. *Атомная энергия*. 2013. Т. 114. № 3. С. 174-177.
20. *Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Припачкин Д.А. и др.* Оценка выброса радионуклидов при аварии на АЭС «ФУКУСИМА-1» (ЯПОНИЯ) 15 марта 2011 г. *Атомная энергия*. 2012. Т. 112. № 3. С. 159-163.
21. *Rubinstein K.G., Arutunyan R.V., Pripachkin D.A. et al.* Calculation of surface tracer concentration by set of hydrodynamic weather forecast model and lagrangian model of atmospheric dispersion. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 2012. Т. А1. С. 43.
22. *Кириш В.А., Припачкин Д.А., Будыка А.К.* Инерционное осаждение аэрозольных частиц из ламинарного потока в волокнистых фильтрах. *Коллоидный журнал*. 2010. Т. 72. № 2. С. 206-210.
23. *Будыка А.К., Хмелевский В.О., Припачкин Д.А. и др.* Моделирование и экспериментальное исследование осаждения аэрозольных частиц в персональном импакторе. *АНРИ*. 2009. № 3 (58). С. 27-37.
24. *Будыка А.К., Припачкин Д.А., Цовьянов А.Г. и др.* Импактор Патент на полезную модель RU 63535 U1, 27.05.2007.
25. *Будыка А.К., Припачкин Д.А., Цовьянов А.Г. и др.* Индивидуальный импактор. *и др.* Патент на изобретение RU 2290624 C1, 27.12.2006.