

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Рогозиной Марины Александровны  
«Аппаратура и методика определения дисперсности аэрозолей продуктов  
распада радона», представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и  
методы экспериментальной физики».

### Актуальность работы.

На значительном количестве производств, связанных с использованием или переработкой радиоактивных веществ, внутреннее облучение персонала является доминирующим по сравнению с внешним радиационным воздействием. При этом для корректной оценки отложения радионуклидов в респираторном тракте, необходимого для дальнейшей оценки доз внутреннего облучения, важную роль играет размерное распределение радиоактивных аэрозолей. В настоящее время достаточно хорошо развиты методы определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей, основанные на их инерционном осаждении на улавливающие элементы (каскадные импакторы). Диапазон применимости данных устройств лежит в интервале АМАД (аэрозольного медианного аэродинамического диаметра) от 0,3 до 20 мкм. Для аэрозолей меньшего размера (диапазон 0,3 – 200 нм), когда доминирующую роль в процессах осаждения играют термодинамические процессы, обусловленные броуновским движением частиц, проработанные и научно обоснованные технические решения определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей практически отсутствуют. Вместе с тем, имеется целый ряд ситуаций, когда радиоактивные аэрозоли в данном диапазоне размерностей могут играть существенную роль в формировании дозовой нагрузки на респираторный тракт и общее облучение человека. В первую очередь это относится к ингаляционному поступлению дочерних продуктов распада радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) и торона ( $^{220}\text{Rn}$ ). Для этой группы радионуклидов радиоактивные аэрозоли образуются в виде изолированных

атомов  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{216}\text{Po}$  и  $^{212}\text{Pb}$ , которые впоследствии участвуют в формировании групп аэрозолей в диапазоне 1 – 40 и более нанометров. Общая доля активности радиоактивных аэрозолей в диапазоне 0,3 – 100 нм может достигать 10 – 30 %. Отдельный интерес может представлять образование нанодисперсных радиоактивных аэрозолей при распаде таких инертных радиоактивных газов как  $^{88}\text{Kr}$  и  $^{138}\text{Xe}$ , а также при образовании атомов и кластеров отдачи при  $\alpha$ -распаде  $^{239}\text{Pu}$ . Диссертационная работа Рогозиной М.А. посвящена разработке аппаратуры и методики определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей по активности в диапазоне 0,3 – 200 нм, для которого отсутствуют надежные методы измерений. Разработанные в диссертационной работе подходы позволяют закрыть существующие «белые пятна» в вопросе определения размерного распределения нано размерных радиоактивных аэрозолей. В связи с этим **актуальность** диссертационной работы Рогозиной М.А. не вызывает сомнений.

#### **Практическая значимость работы.**

В п. 3.13.3. «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности» ОСПОРБ-99/2010 указано, что *«Контроль за радиационной обстановкой в зависимости от характера проводимых работ включает: ... определение объемной активности газов и аэрозолей в воздухе рабочих помещений, их нуклидного состава, дисперсности и типа при ингаляции»*. Диссертационная работа Рогозиной М.А. позволяет решить проблему оценки размерного распределения радиоактивных аэрозолей в практически значимом диапазоне 0,3 – 200 нм, не охваченном стандартными средствами измерений. В связи с этим, **практическая значимость** рассматриваемой диссертационной работы также не вызывает сомнений.

#### **Научная новизна диссертационной работы.**

Первым пунктом научной новизны, рассматриваемой диссертационной работы является: *«Впервые разработана одноканальная диффузионная батарея каскадного типа с последовательным расположением двадцати улавливающих элементов и дифференциальным подходом к получению данных,*

*в сочетании с методом максимизации ожидания для обработки результатов позволяющая получить размерное распределение аэрозольных частиц по активности при единственном пробоотборе». До настоящего времени использование диффузионных батарей преимущественно происходило по двум основным вариантам. В первом варианте проводится подсчет прошедших частиц после определенного количества каскадов диффузионной батареи. В другом случае проводится параллельный отбор проб на набор диффузионных батарей с различным количеством улавливающих элементов. В любом из этих двух методов интересующая исследователя информация (активность на определенном элементе батареи) получается как разность двух достаточно больших измененных величин. При этом приходится учитывать такие источники погрешностей, как изменение состава исследуемой атмосферы при использовании последовательного метода или различия в скорости прокачки воздуха при параллельном методе. Разработка диффузионной батареи со значительным количеством улавливающих элементов, отдельном определении активности на каждом элементе в сочетании с эффективным математическим аппаратом для обработки данных позволили автору создать принципиально новое устройство, дающее возможность определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей в диапазоне от десятых долей до десятков и сотен нанометров.*

Вторым пунктом научной новизны диссертационной работы является пункт: *«Для разработанного прибора обоснованы оптимальные методы интерпретации данных с целью получения размерного распределения аэрозольных частиц».* Получение корректных результатов по размерному распределению аэрозолей при использовании диффузионной батареи является сложной и нетривиальной задачей. Решение интеграла Фредгольма первого рода относится к классу некорректных инверсных проблем, и, в принципе, может существовать бесконечное количество решений, удовлетворяющих имеющимся экспериментальным данным. Универсальные методы решения интеграла Фредгольма первого рода отсутствуют, поскольку на результаты

существенную роль оказывает функция отклика прибора. В связи с этим, методы решений, дающие хороший результат в одном случае, могут быть абсолютно неработоспособны для устройства другого типа. Перед автором работы стояла задача обоснования оптимального метода восстановления размерного распределения радиоактивных аэрозолей для конкретного устройства с заданной функцией отклика прибора. В работе, после проведения целого ряда модельных расчётов, убедительно продемонстрировано, что для разработанной модели диффузионной батареи оптимальными методами восстановления размерного распределения радиоактивных аэрозолей являются метод максимизации ожидания и метод наименьших квадратов.

Третьим пунктом научной новизны работы является: *«Впервые обнаружена мода с медианным по активности термодинамическим диаметром 0,3 нм в полученных в лабораторных условиях размерных распределениях аэрозольных частиц, содержащих продукты распада радона-222. В полевых условиях для аэрозольных частиц, содержащих продукты распада радона-220, впервые выделены моды с медианным по активности термодинамическим диаметром 0,3 и 1,5 нм»*. До настоящего времени считалось, что наименьший размер радиоактивных аэрозолей продуктов распада  $^{222}\text{Rn}$  составляет около 1 – 2 нм и соответствует молекулярным кластерам, образующимся при взаимодействии атомов  $^{214}\text{Po}$  или  $^{214}\text{Pb}$  (так называемая «неприсоединенная фракция»). Разработанная М.А. Рогозиной диффузионная батарея с уникальными характеристиками позволила получить автору принципиально новые научные результаты, касающиеся размерного распределения продуктов распада  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$ . При проведении измерений с помощью диффузионной батареи, укомплектованной ультратонкими сетчатыми экранами автору впервые удалось доказать, что в атмосфере могут присутствовать и аэрозоли с медианным по активности термодинамическим диаметром (АМТД) порядка 0,3 нм, что, по-видимому, соответствует изолированным радиоактивным атомам полония и свинца. Здесь следует отметить, что образование таких ультрадисперсных аэрозолей при

нормальных условиях возможно только при радиоактивном распаде какого-либо радиоактивного газа, в данном случае радона. Также до настоящего времени считалось, что для относительно долгоживущих продуктов распада  $^{220}\text{Rn}$ , в первую очередь  $^{212}\text{Pb}$ , наличие неприсоединенной фракции характерно только для лабораторных условий, а в реальных ситуациях, таких как жилища или рабочие места, ее наличием можно пренебречь. Исследования, проведенные автором на достаточно уникальном объекте – пункте хранения монацитового концентрата, впервые позволили показать, что вклад неприсоединенной фракции продуктов распада  $^{220}\text{Rn}$  может быть весьма значительным и достигать десятков процентов. Полученные новые данные должны послужить основой для пересмотра дозовых коэффициентов при ингаляционном поступлении продуктов распада  $^{220}\text{Rn}$ . Еще более интересным в плане научной новизны представляется обнаружение в реальных условиях наличие в атмосфере ультрадисперсных радиоактивных аэрозолей с АМГД 0,3 нм. Результаты данных исследований доложены на международной конференции и опубликованы в авторитетном научном издании «Radiation Protection Dosimetry».

#### **Обоснованность защищаемых положений диссертационной работы.**

*Первым положением, выносимым на защиту, является: «Разработанная одноканальная диффузионная батарея каскадного типа с последовательным расположением двадцати улавливающих элементов и дифференциальным подходом к получению данных позволяет с помощью метода максимизации ожидания получить информацию о многомодальном размерном распределении аэрозольных частиц по активности в диапазоне применимости понятия «термодинамический диаметр аэрозолей».*

Обоснованность данного защищаемого положения подтверждается многочисленными вариантами математического моделирования прохождения аэрозольных частиц через диффузионную батарею. При этом в процессе моделирования рассматривалось многомодальное размерное распределение аэрозолей. Результаты восстановления размерного распределения по

расчетному оседанию аэрозолей на элементах диффузионной батареи находятся в хорошем соответствии с исходными модельными спектрами. В работе рассмотрено влияние основных факторов, влияющих на точность восстановления исходного распределения: погрешности измерения активности на элементах батареи, температуры, скорости отбора и др. Продемонстрировано, что влияние данных факторов не оказывает существенного влияния на результаты восстановления спектров. Корректность используемого метода максимизации ожидания подтверждена его применением к исходным экспериментальным данным, опубликованным в работе «*Vargas A., Michielsen N., Le Moing C., Rio M., Tymen G., Ortega X. Determination of Po-218 nanometer size distribution in a controlled environment by two new systems // The natural radiation environment VII: VIIIth Int. Symp. On the NRE. 2005. Vol. 7. P. 361-370*». Результаты, полученные Рогозиной М.А. при использовании метода максимизации ожидания, полностью соответствовали данным расчетов в указанной статье, выполненным другими методами.

Вторым положением, выносимым на защиту, является: «*Размерное распределение аэрозольных частиц продуктов распада радона-222 и радона-220 содержит в наноразмерной области до пяти мод с медианными по активности термодинамическими диаметрами 0,3; 1,5; 8; 50 нм и крупнодисперсную моду с АМТД порядка 600 нм*». Обоснованность данного защищаемого положения подтверждается многочисленными сериями измерений, выполненных при помощи диффузионной батареи с различными параметрами улавливающих элементов. Результаты измерений в области перекрытия диапазонов применимости различных сетчатых экранов находятся в хорошем согласии между собой. Полученные данные согласуются с известными литературными данными по размерному распределению радиоактивных аэрозолей продуктов распада радона.

Третьим защищаемым положением рассматриваемой диссертационной работы является: «*Ширина раскрытия ячеек и толщина проволоки улавливающих элементов, составляющих диффузионную батарею, могут*

*быть подобраны так, чтоб обеспечить возможность селективной регистрации аэрозолей продуктов распада радона с размером порядка одного атома».* Обоснованность данного защищаемого положения подтверждается результатами экспериментов и математической обработкой данных, выполненных лично автором диссертационной работы. Экспериментальные данные по измерению ультрадисперсных радиоактивных аэрозолей продуктов распада радона отличаются хорошей воспроизводимостью. Использование различных методов восстановления данных по размерному распределению в области 0,1 – 5 нм привело к одинаковым результатам. Наличие изолированных атомов продуктов распада радона в атмосфере не является противоречивым с физической точки зрения и использование нестандартных сетчатых экранов, разработанных автором, в сочетании с адекватными методами восстановления размерного распределения аэрозолей позволяет надежно проводить подобные измерения.

Диссертация М.А. Рогозиной представляет собой печатную рукопись объёмом 155 страниц, состоящую из списка сокращений и условных обозначений, введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 104 источника, в том числе 87 иностранных. Работа иллюстрирована 37 рисунками и 19 таблицами. Диссертация Рогозиной М.А. аккуратно организована, характеризуется научной строгостью, четкостью и последовательностью изложения материала. Текст диссертации хорошо иллюстрирован графиками, таблицами и иными материалами в соответствии с современными требованиями. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации и полученные в ней результаты. Основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в 8 работах, опубликованных в ведущих российских и зарубежных изданиях.

По диссертации Рогозиной М.А. имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В качестве замечания по второму защищаемому положению следует отметить, что в соответствии с рекомендациями МКРЗ (Публикация 66)

верхней границей использования понятия *медианный по активности термодинамический диаметр* (АМТД) является значение, не превышающее 500 нм. Для аэрозолей диаметром 500 нм и более необходимо использовать такой параметр, как *медианный по активности аэродинамический диаметр* (АМАД).

2. В таблице 4.2 в качестве диаметра 50 % пропускания диффузионной батареи из 20 элементов, для основных используемых в работе типов сетчатых экранов, указаны величины 17 нм для обычной батареи и 2 нм для батареи, предназначенной для измерения ультрадисперсных радиоактивных аэрозолей. Вместе с тем, верхний предел восстановления размерного распределения для обычной батареи составляет ~200 – 400 нм (рис. 6.2 и 6.5), а для батареи, предназначенной для измерения ультрадисперсных радиоактивных аэрозолей ~20 – 30 нм (рис. 6.1 и 6.4). В связи с этим возникает вопрос – насколько корректными являются результаты восстановления размерного распределения аэрозолей в области, превышающей диаметр 50 % пропускания диффузионной батареи на порядок и какова погрешность результатов восстановления в данном диапазоне?
3. Из таблицы 4.4 вытекает, что доля активности, улавливаемая латунными сетчатыми экранами, в 1,6 раза выше, чем улавливаемая стальными сетками. В связи с этим возникает вопрос – насколько велика может быть погрешность оценки общей доли и формы распределения наноразмерных аэрозолей, обусловленная влиянием материала сетчатых экранов.
4. Как известно, диффузионные батареи с сетчатыми экранами могут эффективно улавливать не только мелкие частицы, но и достаточно крупнодисперсные аэрозоли с АМАД порядке единиц микрометров. Рассматривалось ли потенциальное влияние улавливания подобных частиц диффузионной батареей с учетом того, что крупная частица способна нести на себе достаточно большую активность?

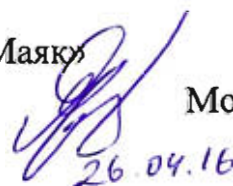


Вышеизложенные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую высокую и положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение.**

Диссертация написана ясным научным языком, стилистически грамотно, содержит все необходимые разделы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Диссертационная работа Рогозиной М.А. на тему «Аппаратура и методика определения дисперсности аэрозолей продуктов распада радона», представленная к защите по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» выполнена на высоком научном уровне, соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики», а её автор Рогозина Марина Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

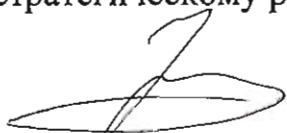
Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
советник генерального директора ФГУП «ПО Маяк»  
по науке и экологии



Мокров Ю. Г.

456780, г. Озёрск, Челябинская обл., пр. Ленина, д. 31.  
Научная специальность 25.00.36 – "Геоэкология"  
Телефон (351 30) 2 53 34, E-mail: Mokrov@po-mayak.ru

Личную подпись Ю.Г. Мокрова заверяю.  
Заместитель генерального директора ФГУП «ПО «Маяк»  
по стратегическому развитию, канд. техн. наук

  
«    » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Д. Н. Колупаев

