ОТЗЫВ

официального оппонента, Загайнова Валерия Анатольевича, на диссертационную работу Халаф Хям Назми Бадр на тему:

«Взаимодействие продуктов распада радона с аэрозольными частицами и аналитическими фильтрами Петрянова»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность работы.

Цель и задачи, поставленные в диссертации, без сомнения актуальны, поскольку проблемы экологии и защиты здоровья человека, работающего с радиоактивными веществами, имеют безусловный приоритет. 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. Распределение радиоактивных аэрозолей по размерам далеко не всегда может быть описано простым унимодальным логнормальным распределением. Характерным примером многомодового размерного распределения радиоактивных аэрозолей является размерное распределение продуктов распада радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn). При этом размеры аэрозольных частиц определяются как первичными процессами образования дочерних продуктов распада (ДПР) радона и торона, так и их взаимодействием с молекулами воздуха, парами воды и нерадиоактивными аэрозольными частицами, присутствующими в воздухе. В результате возникает неопределенность описания процессов взаимодействия аэрозольных частиц, содержащих радиоактивные ДПР радона и широко применяемых для измерения объемной активности (ОА) радиоактивных аэрозолей фильтров Петрянова. Точно также возникает неопределенность интерпретации результатов измерения ОА ДПР радона при расчете поглощенных и эквивалентных доз облучения различных отделов респираторного тракта при ингаляционном поступлении радиоактивных аэрозолей. Проведенные в диссертационной работе Халаф Хям Назми Бадр исследования физических процессов взаимодействия продуктов распада радона с нерадиоактивными аэрозольными частицами и фильтрами Петрянова, а также разработанное устройство для измерения размерного распределения радиоактивных аэрозолей в широком диапазоне, охватывающим четыре порядка величины, позволяют решить актуальную комплексную задачу о распределении частиц по размерам и может дать полную информацию о характеристиках дисперсной системы.

Практическая значимость.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что предлагаемая методика может использоваться для оценки дисперсного состава аэрозольных частиц, содержащих радиоактивные атомы. Получаемая информация позволяет повысить точность определения дозовой нагрузки при ингаляционном облучении респираторного тракта как для персонала, так и для населения. Практическая значимость обусловлена тем, что разработанный универсальный прибор может успешно применяться для оценки дисперсного состава атмосферы, содержащей радиоактивные частицы, в частности, продукты распада радона, в области от десятых долей нанометра до десятков микрометров. Разработанный метод, реализованный в приборе, путем получения достоверной информации о размерном распределении аэрозольных частиц позволяет провести уточнение дозовых коэффициентов при облучении респираторного тракта человека на конкретных рабочих местах, с учетом специфики размерного распределения аэрозолей по активности. Кроме этого, следует учесть, что для радиоактивных веществ доступен диапазон размеров, который недоступен для других методов диагностики частиц: метод диффузионный динамический с последующим укрупнением частиц и метод электрической подвижности. Важным с практической точки преимуществом разработанного прибора является то, что его применение не требует предварительной информации об ожидаемом размерном распределении радиоактивных аэрозолей. Конструкция прибора разработана таким образом, что, вследствие последовательного осаждения соответствующих размерных групп радиоактивных аэрозолей на улавливающих элементах различных секций прибора, принципиально исключает возможность получения искаженной информации о размерном распределении радиоактивных аэрозолей, наблюдаемом для более простых схем измерений.

Научная новизна.

Первым пунктом научной новизны рассматриваемой диссертационной работы является; «*Для искусственных источников аэрозолей показано, что частицы, дающие максимальный вклад в токсическое действие аэрозолей и радиационное воздействие за счет присоединения к аэрозольным частицам продуктов распада радона, относятся к различным размерным группам, отлагающимся в различных отделах респираторного тракта*». С данным пунктом научной новизны непосредственно связано и первое защищаемое положение: «*Для высокотемпературных бытовых источников аэрозолей радиационное воздействие за счет присоединением ДПР радона обусловлено частицами с медианным диаметром 130 нм, а токсическое действие – частицами в диапазоне 2–5 мкм*». До настоящего времени совместный анализ негативного воздействия на человека радиационного и токсического факторов, обусловленных различными, традиционно используемыми в обыденной практике источниками аэрозолей не проводился. В рассматриваемой диссертационной работе впервые проанализированы

динамические процессы образования и перераспределения аэрозольных частиц вследствие действия различных бытовых термических источников аэрозолей. Численное размерное распределение аэрозольных частиц изучено в диапазоне от 5 нм до 10 мкм, что соответствует диапазону респирабельных аэрозолей. При этом основными аэрозольными частицами, преимущественно взаимодействующими с продуктами распада радона и, соответственно, оказывающими радиационное воздействие на человека, оказываются мелкодисперсные аэрозоли со средним диаметром около 130 нм. Такие аэрозоли могут глубоко проникать в респираторный тракт человека и облучать бронхиальный и альвеолярный отделы легких. Вместе с тем, несмотря на их высокую численную концентрацию, массовая таких аэрозолей невелика. В основном масса аэрозольных частиц, образовавшихся в результате действия типовых термических источников аэрозолей и содержащих максимальное количество продуктов горения, сконцентрирована в области средне- и крупнодисперсных аэрозолей в диапазоне 2–10 мкм. Для таких размеров частиц характерно отложение в верхних дыхательных путях с последующим выведением в желудочно-кишечный тракт. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных высокоточных средств измерений для измерения дисперсности аэрозольных частиц, внесенных в Государственный реестр средств измерений РФ, и корректными методами расчетов, соответствующих основным законам физики аэрозолей. Полученные в результате исследований данные являются новыми и представляющими несомненный интерес для специалистов смежных областей наук.

Вторым пунктом научной новизны является: «*Показано, что эффективность улавливания фильтрами Петрянова радиоактивных аэрозолей ДПР радона определяется мультимодальным характером их размерного распределения по активности*». Данному пункту научной новизны соответствует защищаемое положение: «*Эффективность фильтров Петрянова для аэрозолей ДПР радона обусловлена процессами образования неприсоединенных продуктов распада и их взаимодействием с аэрозолями, относящимся к модам Айткена и аккумуляции, имеющим различную проницаемость через фильтр*». Как известно из литературы, в том числе и из данных, ранее полученных в лабораториях Уральского федерального университета и Института промышленной экологии УрО РАН, размерное распределение радиоактивных аэрозолей ДПР радона имеет мультимодальный характер. Для аэрозолей ДПР радона может наблюдаться до 4–5 размерных групп в диапазоне от 0,3 нм до 10–20 мкм в зависимости от внешних условий. При этом соотношение активностей между различными размерными группами аэрозольных частиц могут отличаться до двух порядков величины. В этих условиях интерпретация результатов измерений ОА ДПР радона стандартными фильтрами Петрянова может быть весьма неоднозначной. В рассматриваемой диссертационной работе проведены инструментальные исследования проницаемости радиоактивных аэрозолей

через фильтры Петрянова при различных концентрациях нерадиоактивных аэрозольных частиц в воздухе. К положительным моментам проведенных исследований, подтверждающих их корректность и обоснованность выводов, можно отнести то, что, во-первых, общая концентрация и размерное распределение нерадиоактивных аэрозольных частиц постоянно контролировалось в процессе эксперимента, во-вторых, проводился контроль размерного распределения радиоактивных аэрозолей как в исследуемой атмосфере, так и в атмосфере, прошедшей через различные типы аэрозольных фильтров. Такое непосредственное изучение проницаемости именно радиоактивных аэрозолей в широком диапазоне дисперсности является новым и результаты данных исследований представляют несомненную научную и практическую ценность как для разработчиков аэрозольных аналитических фильтров, так и для их пользователей.

Третий пункт научной новизны сформулирован как: «*Предложен, научно обоснован и исследован метод определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей в диапазоне 0,5 нм – 20 мкм при единичном отборе пробы без предварительной информации об ожидаемом размерном распределении активности аэрозолей*». Данному пункту научной новизны соответствует защищаемое положение: «*Комбинированная система, состоящая из последовательно соединенных диффузионной батареи, каскадного импактора и многослойного пакета фильтров, позволяет определить размерное распределение активности в диапазоне от 0,5 нм до 20 мкм при единичном отборе проб и отсутствии предварительной информации об ожидаемой дисперсности аэрозолей*». Широкий диапазон размерного распределения аэрозолей не позволяет получить требуемую информацию по дисперсности радиоактивных аэрозольных частиц путем использования какого-либо одного прибора или инструмента. Для ультрадисперсных аэрозолей в диапазоне 0,5–200 нм применяются диффузионные батареи, для средне и крупнодисперсных аэрозолей диаметрами 0,5–20 мкм используются каскадные импакторы, для аэрозолей промежуточных размеров 0,2–2 мкм успешно используется метод многослойных фильтров. Очевидно, что ни один из представленных методов не позволяет охватить весь необходимый размерный диапазон респирабельных радиоактивных аэрозолей. Более того, наличие в отбираемой пробе частиц с размерами порядка 1 нм, что характерно для ДПР радона и торона, может существенно исказить результаты измерений, выполненных при помощи каскадного импактора или метода многослойных фильтров, за счет диффузионного осаждения аэрозольных частиц малых размеров на улавливающие элементы. В классической теории каскадных импакторов или многослойных фильтров такой эффект не учитывался. Наличие влияния диффузионного осаждения ультрадисперсных ДПР радона и торона на результаты измерений каскадными импакторами и многослойными фильтрами ранее было показано в совместных работах, выполненных в Уральском федеральном университете и Институте промышленной экологии

УрО РАН. В рецензируемой работе представлено оригинальное устройство, сочетающая преимущества различных методов определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей. Представленная система обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами. Во-первых, рабочий диапазон разработанной системы составляет от 0,5 нм до 20 мкм, что охватывает весь спектр размеров радиоактивных аэрозолей, представляющий практический интерес. Во-вторых, конструкция предложенной системы принципиально исключает возможность влияния радиоактивных аэрозолей, относящихся к определенной размерной группе (ультрадисперсные или, наоборот, крупнодисперсные), на отклик элемента, имеющего другой рабочий диапазон. В-третьих, измерения размерного распределения радиоактивных аэрозолей могут проводиться без необходимости наличия какой-либо дополнительной, хотя бы качественной, информации об ожидаемом спектре размеров аэрозолей. Достоверность полученных результатов и работоспособность разработанной системы подтверждены серией экспериментов при различных концентрациях аэрозолей и соответственно, различным соотношением активностей различных размерных групп ДПР радона.

Диссертация Халаф Хям Назми Бадр включает в себя введение, пять глав, выводы, список сокращений и список использованных источников из 129 наименований. Работа изложена на 153 страницах, содержит 16 таблиц и 55 рисунков.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных по свойствам аэрозолей и методам определения их основных характеристик. Рассмотрены источники образования аэрозолей, дан анализ типичных размеров аэрозольных частиц различного происхождения. Рассмотрены характеристики радиоактивных аэрозолей различного происхождения. В результате проведенного анализа литературных данных и научной информации сформулирована постановка задач исследования диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию используемых методов измерения дисперсного состава нерадиоактивных и радиоактивных аэрозолей, а также методов измерения эквивалентной равновесной объемной активности радона.

В третьей главе представлены результаты изучения свойств аэрозольных частиц от различных источников. Основное внимание уделено источникам аэрозолей, наиболее часто встречающихся в быту: табачные и электронные сигареты, сигареты IQOS, курение благовоний, термическая обработка пищи, парафиновые свечи, противомоскитные спирали. Представлены данные по численному и массовому распределению аэрозольных частиц от различных источников с учетом динамики их накопления и удаления во время действия источника и после прекращения его действия. Проведены расчеты, описывающие скорость присоединения ДПР радона к искусственным аэрозольным частицам. Показано, что аэрозольные частицы, ответственные за радиационное или токсическое

воздействие на человека относятся к различным размерным группам (радиационное обусловлено частицами с медианным диаметром 130 нм, а токсическое – частицами в диапазоне 2–5 мкм) и отлагаются в различных отделах респираторного тракта.

В четвертой главе представлены результаты изучения взаимодействия радиоактивных аэрозолей, содержащих ДПР радона, с фильтрами Петрянова. Проведено экспериментальное исследование радиометрической эффективности трех типов аналитических фильтров. Изучены функции пропускания фильтров Петрянова при различных концентрациях нерадиоактивных аэрозольных частиц, приводящим к сдвигам в распределении активностей ДПР радона как между активностями в цепочке распада $^{218}Po \rightarrow ^{214}Pb \rightarrow ^{214}Bi$, так и между различными размерными группами аэрозольных частиц. В главе продемонстрировано, что эффективность фильтров Петрянова для аэрозолей ДПР радона обусловлена их мультимодальным размерным распределением.

В пятой главе описана конструкция универсального устройства для определения размерного распределения радиоактивных аэрозолей, позволяющего одномоментно определять размерное распределение радиоактивных аэрозолей во всем диапазоне респирабельной фракции от 0,5 нм до 20 мкм. Представлены убедительные экспериментальные доказательства корректности работы данного устройства при различных концентрациях аэрозольных частиц и различных размерных распределений по активности радиоактивных аэрозолей, содержащих ДПР радона.

Выводы объективно отражают содержание диссертации, в них показана новизна и научная обоснованность работы.

Несмотря на то, что в работе поставлены и решены актуальные научные задачи при ознакомлении с текстом диссертационной работы Халаф Хям Назми Бадр возник ряд вопросов и замечаний:

1. Как известно, фоновые концентрации нерадиоактивных аэрозольных частиц существенно зависят от общих параметров атмосферы, и, в первую очередь, от температуры и влажности. Из представленных в диссертационной работе данных следует, что практически все эксперименты как по изучению радиоактивных, так и нерадиоактивных аэрозолей проводились при температуре 24±1 °С и относительной влажности 40–45 %. С чем связан выбор таких условий эксперимента и как изменение данных условий может повлиять на результаты проводимых экспериментов?
2. В третьей главе диссертационной работы производится расчет скорости присоединения молекулярных кластеров ДПР радона к нерадиоактивным аэрозольным частицам. При этом делается предположение, что дифференциальное распределение скорости присоединения $X(d)$ будет с достаточной точностью характеризовать распределение активности ДПР радона по размерам аэрозольных частиц. Является ли такое

предположение универсальным для всей цепочки короткоживущих ДПР радона $^{218}Po \rightarrow ^{214}Pb \rightarrow ^{214}Bi$?

3. В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты измерений сдвига равновесия между отдельными ДПР радона (^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi) как для аэрозольной, так и для не присоединенной фракций. Представляет интерес сопоставление экспериментально обнаруженного сдвига равновесия со сдвигом, рассчитанным в соответствии с классической теорией, представленной в работе Юлиуса Порстендорфера (ссылка [50] в диссертационной работе), тем более, что размерное распределение и концентрации нерадиоактивных частиц контролировались в процессе эксперимента. К сожалению, такое сравнение в диссертационной работе проведено не было.
4. Из текста пятой главы неясно, почему было принято решение уменьшить количество сетчатых экранов в диффузионной батарее до 12, используя при этом экраны с различными улавливающими характеристиками?
5. Есть замечания, связанные с формулировкой цели и задачи – более уместно планировать получить конкретные результаты, нежели изучать явления.

Сделанные замечания не снижают высокую и положительную оценку диссертационной работы Халаф Хям Назми Бадр. Материалы диссертации со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора. Результаты диссертационной работы опубликованы в 9 публикациях, индексированных в системах научного цитирования Web of Science и Scopus и доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В целом, диссертационная работа Халаф Хям Назми Бадр на тему «Взаимодействие продуктов распада радона с аэрозольными частицами и аналитическими фильтрами Петрянова» является законченным научным исследованием, по своей актуальности, новизне и практической значимости соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики по физико-математическим наукам, а также требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Халаф Хям Назми Бадр заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, профессор
кафедры общей физики (№ 6) Института
общей профессиональной подготовки
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»,

Загайнов В. А.

115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Научная специальность 02.00.04 – Физическая химия
Отрасль наук – физико-математические
Телефон +7-9037209853, E-mail: vzagaynov@yandex.ru

01 февраля 2021 г.

Личную подпись Загайнова Валерия Анатольевича **заверяю**

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ