

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Сухоручкина Андрея Константиновича на диссертационную работу Карева Андрея Евгеньевича «Аппаратурно-методический комплекс для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.26.02 - Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ядерный топливно-энергетический комплекс).

Актуальность темы диссертационной работы

Известно, что доза внутреннего облучения человека, обусловленная ингаляционным поступлением радиоактивного вещества, зависит от физико-химических свойств радионуклидов и, в частности, от дисперсного состава аэрозоля.

Обычно результаты измерения дисперсного состава аппроксимируют, с той или иной степенью приближения, зависимостью, имеющей вид логарифмически-нормального распределения активности аэрозоля по диаметрам частиц. Далее параметры (АМАД и СГО) этого распределения применяют в расчете осаждения нуклида в отделах респираторного тракта и/или дозы облучения человека.

Разработанный в диссертации А.Е. Карева аппаратурно - методический комплекс моделирует осаждение активности в отделах дыхательного тракта при любой форме распределения активности аэрозоля по диаметрам частиц. Этим устраняется смещение в оценке дозы, обусловленное гипотезой о логарифмически-нормальном распределении активности.

Следовательно, можно говорить, что диссертация А.Е. Карева направлена на реализацию следующих положений и рекомендаций МКРЗ (Публикации 55, 60, 101, 103):

«Измерение или оценка доз являются основополагающими для деятельности в целях радиационной безопасности. Ни эквивалентная доза в

органе, ни эффективная доза не могут быть измерены непосредственно. Значения этих величин получают с помощью моделей, обычно учитывающих влияние... метаболических процессов и дозиметрических факторов”.

«Модели и данные ... должны быть настолько реалистичными, насколько возможно».

Своевременность решаемой в диссертации задачи подтверждается также фактом существования радиохимических производств, потенциально опасных именно по фактору внутреннего облучения персонала.

Таким образом, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Диссертантом изучены и критически анализируются известные данные по нескольким направлениям науки и практики, относящимся к задачам диссертационной работы. В частности, представлены обзоры:

- нуклидного состава радиоактивных аэрозолей на предприятиях топливного цикла;
- методов и устройств по определению дисперсного состава аэрозолей;
- характеристик устройств, моделирующих осаждение аэрозолей в респираторном тракте человека;
- научных работ в области вычислительной гидрогазодинамики;
- физико-химических свойств радиоактивных газо-аэрозольных смесей и способов анализа их фазового состава;
- методов улавливания радиоактивного рутения из газовой фазы.

Расчеты параметров и конструкций импактора и реакционной камеры выполнены апробированными методами гидрогазодинамики по сертифицированным программам, достоверность расчетов и точность изготовления установки подтверждена путем лабораторных испытаний на специальном стенде.

В производственных условиях проведены параллельные отборы проб аэрозолей двумя импакторами: (1) разработанным в диссертации и (2) известным импактором Андерсена. Анализ проб показал хорошее соответствие результатов измерений, их некоторая расхожимость физически закономерна и объяснима.

Структура диссертации и логика изложения соответствуют поставленной задаче, выводы и рекомендации диссертации реалистичны.

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации диссертации следует считать обоснованными.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных автором результатов подтверждена следующими способами:

- применением теоретических методов, алгоритмов и программ, ранее проверенных в исследованиях других авторов;
- лабораторными исследованиями характеристик разработанных устройств, их калибровкой и изучением физических закономерностей получаемых результатов;
- сравнением результатов измерений, выполненных на существующих установках и на устройствах, разработанных в диссертации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

Разработан новый аппаратно-методический комплекс, включающий:

- импактор (импактор-фантом респираторного тракта человека);
- устройство химического преобразования газовой составляющей в аэрозольную фракцию и осаждения полученных аэрозольных частиц на фильтр;
- методологию оценки активности аэрозольных частиц, осажденных в отделах респираторного тракта, на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора.

Новизна разработки подтверждена двумя патентами (RU 2480730 от 27.04.13 и RU 2509375 от 10.03.14).

Кроме того, в диссертации получены новые данные по радиоактивному загрязнению воздушной среды на нескольких участках в цехах радиохимического производства, определен дисперсный состав аэрозолей и дозы потенциального внутреннего облучения персонала в штатных условиях производства.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Практическая ценность результатов заключается в том, что разработанные в диссертации пробоотборные устройства и разработанная методология обработки экспериментальных данных позволяют:

- оценить активность аэрозольных частиц, осажденных в различных отделах дыхательного тракта, независимо от типа распределения активности аэрозолей по размерам частиц;
- оценить вклад газовой составляющей в суммарную активность газо-аэрозольной смеси.

Это существенно повышает точность оценки дозы внутреннего облучения, что служит главной предпосылкой правильной организации системы обеспечения радиационной безопасности, включающей меры коллективной и индивидуальной защиты органов дыхания.

Измерения дисперсного состава и активности аэрозолей, выполненные автором диссертации в цехах радиохимических производств, достоверны и устраняют излишний консерватизм в оценках дозы внутреннего облучения в штатных условиях.

Следует подчеркнуть, что дозовые коэффициенты (т.е. доза на единицу активности), полученные в диссертации для штатных условий, во многих случаях пригодны и для расчета дозы в аварийных ситуациях.

Разработанный автором диссертации алгоритм пересчета результатов импакторных измерений в величину активности, осажденной в отделах

респираторного тракта, имеет также самостоятельное научно-практическое значение в следующих обстоятельствах:

- при проектировании новых приборов;.
- при интерпретации результатов последующего индивидуального контроля внутреннего облучения, например, на установке СИЧ или анализе биопроб;
- в медицинских целях при расчете поглощенной дозы в отдельных органах.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Разработанный в диссертации аппаратно-методический комплекс может служить прототипом устройств - мониторов радиоактивного загрязнения воздушной среды следующего поколения.

При этом разработанные и освоенные автором диссертации методы расчета могут быть использованы при определении оптимального числа и параметров ступеней импактора (в диссертации указано, что с увеличением числа ступеней точность оценок увеличивается).

Результаты измерений дисперсного состава и активности аэрозолей в цехах радиохимического производства и примененные в диссертации методы обработки этих результатов должны быть использованы в целях совершенствования системы радиационного контроля и системы радиационной защиты (вентиляции) на предприятии в целом.

Разработанный аппаратно-методический комплекс можно рекомендовать к постоянному использованию в системе контроля радиохимического производства, включая нештатные (аварийные) ситуации.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по главам, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 141 страницу машинописного текста, включая 65 рисунков, 47 таблиц и

приложения на четырех страницах. Список литературы содержит 87 библиографических ссылок, в том числе 51 - в отечественных изданиях и 36 – в зарубежных.

Во **введении** представлены цели и задачи работы, актуальность, основные результаты, полученные в диссертации.

В **первой главе** представлены краткие, но содержательные обзоры по шести направлениям науки и практики, отмеченным выше.

Показано, что устройства, представляющие механический аналог респираторного тракта человека и используемые в научных целях, малопригодны к применению в производственных условиях ввиду технической сложности и трудоемкости обслуживания.

Поэтому распределение активности аэрозоля произвольной дисперсности по респираторному тракту человека целесообразно определять путем специальной обработки импакторных измерений.

Вторая глава посвящена разработке метода оценки распределения активности аэрозольных частиц по отделам респираторного тракта на основе экспериментальных данных, полученных с помощью импактора. На примере каскадного импактора Андерсена автор показывает, что импакторы сами по себе не могут служить моделью респираторного тракта Публикации 66 МКРЗ даже в случае аэрозоля, имеющего простое логнормальное распределение активности по диаметрам частиц.

Сущность разработанного метода выражена соотношением (в диссертации формула (2.39), в автореферате - (4)):

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

где DE_A – доля активности аэрозоля произвольной дисперсности, осажденная в отделе респираторного тракта;

$DE(d_{ae_i})$ - доля осаждения монодисперсных аэрозолей диаметром d_{ae_i} в данном отделе респираторного тракта;

A_i - активность радионуклида на i -й ступени, Бк; $\sum A$ - суммарная активность радионуклида на всех ступенях импактора, Бк.

Значения величины в квадратных скобках выражения (*) вычислены в диссертации в соответствии с Публикацией 66 МКРЗ для всех отделов респираторного тракта (табл. 2.3б), значения A_i и $\sum A$ получают по результатам измерений.

Несколько упрощая, физические предпосылки разработанного в диссертации метода можно выразить следующим образом:

- аэрозоль сложного дисперсного состава представляется как смесь монодисперсных аэрозолей, аэродинамические диаметры которых соответствуют диаметрам отсечки используемого импактора;
- каждая ступень импактора осаждает все аэрозоли, диаметры которых лежат в диапазоне диаметров отсечки этой ступени.

Сопоставление зависимостей доли осажденных аэрозолей, рассчитанных предложенным методом, с аналогичными зависимостями из Публикации 66 МКРЗ показывает хорошее соответствие в диапазоне АМАД от 0,1 до 10 мкм (с погрешностью от 0,1% до 26%). Это свидетельствует об обоснованности принятых предположений и выражения (*).

Третья глава посвящена разработке импактора для реализации метода, представленного в главе 2.

Представлен расчет параметров устройства, при которых обеспечивается осаждение из воздушного потока аэрозольных частиц с аэродинамическим диаметром в заданных диапазонах. Для получения зависимостей эффективности осаждения от диаметра частиц проведено численное моделирование в программном комплексе вычислительной гидродинамики Star-CCM+. Экспериментальные исследования проводились на специально собранном стенде с применением полидисперсных аэрозолей NaCl и шестиканальных оптических счетчиков.

Описано применение разработанного импактора на различных предприятиях атомной отрасли (завод 45 ФГУП «ПО «Маяк», Химико-

металлургический и Сублиматный заводы АО «СХК»). В результате проведенных исследований автором были рассчитаны дозовые коэффициенты с учетом фактических физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей на рабочих местах, что позволило устранить систематическое завышение оценки ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения (в 3,8 раз для Сублиматного завода, в 1,6 для ХМЗ, и в 2 раза для ФГУП «ПО «Маяк»). Результаты работ подтверждены актами о внедрении, которые представлены в приложении к диссертации.

Четвертая глава посвящена разработке способа преобразования газовой составляющей газо-аэрозольной смеси в аэрозоль для ее эффективного улавливания на фильтр и последующего измерения активности. Предлагаемый способ включает в себя отсечку аэрозольной составляющей с помощью импактора, после чего газовая фракция поступает в химический реактор с присоединенной к нему емкостью с реагентом. В качестве реагента для преобразования газа в аэрозоль в случае гексафторида урана предлагается использовать водный раствор аммиака, в случае тетраоксида рутения – этанол. В результате расчетов автором определен необходимый расход 1,3 л/ч реагента при максимальной ожидаемой концентрации газа (в предположении, что на вход устройства поступает чистый газообразный тетраоксид рутения RuO_4).

В **пятой главе** описано численное моделирование воздушных потоков в устройстве для реализации способа оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей, в результате которого установлены оптимальные характеристики реакционной камеры, при которых достигается ламинарность воздушного потока, и, соответственно, минимизируется процент аэрозольных частиц, осаждающихся на стенках химического реактора. Описано применение разработанного устройства на Сублиматном заводе и Заводе разделения изотопов АО «СХК» для улавливания газообразного гексафторида урана.

Разработанный автором аппаратно-методический комплекс может применяться в различных ситуациях облучения, включая аварийные, позволяет повысить точность оценки дозы внутреннего облучения за счет получения экспериментальных данных о дисперсном составе, фазовом составе газо-аэрозольных смесей, а также о распределении активности аэрозольных частиц по отделам дыхательного тракта.

В целом диссертация представляет законченную работу, выполненную на хорошем научном уровне.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.

По тексту диссертации можно сделать следующие замечания.

1. Имеет место опечатка: рис. 2.5 обозначен в диссертации как рис. 1.
2. Следовало бы указать, что при оценке дозовых нагрузок на персонал не учитывалось наличие средств индивидуальной защиты органов дыхания.
3. Измерения дисперсного состава и активности аэрозолей в цехах радиохимических производств устраняют излишний консерватизм в оценках дозы, и это хорошо, поскольку на низком фоне легче распознать возможные неблагоприятные изменения радиационной обстановки.

В диссертации указано, но следовало бы подчеркнуть, что результаты этих измерений относятся к штатным условиям производства. Иначе может сложиться не вполне обоснованное представление об отсутствии необходимости совершенствования радиационной защиты, например, в случае горячих камер в соответствии с ОСПОРБ 99/2010 п. 3.9.7.

Замечания 1 и 2 носят характер редакционных правок, замечание 3 – это мнение рецензента по вопросу, который не выносится на защиту и частично выходит за пределы данной работы. В целом, все замечания не касаются основного содержания работы и не влияют на окончательную оценку диссертации.

Диссертация сравнительно небольшого объема содержит много полезных сведений.

Автор изучил физико-химические аспекты науки о радиоактивных аэрозолях, изучил и успешно применил современные методы газогидродинамических расчетов и расчетов доз внутреннего облучения, разработал эффективный алгоритм расчета осаждения аэрозолей произвольной дисперсности в отделах респираторного тракта человека, разработал новый аппаратно-методический комплекс, реализующий этот алгоритм. Есть основания полагать, что данный комплекс будет востребован при последующих исследованиях состояния радиационной безопасности на различных объектах использования атомной энергии.

Выводы диссертации соответствуют ее содержанию.

Автореферат диссертации верно и полно отражает основные результаты, положения и выводы диссертации.

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 7 опубликованы в журналах из списка ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ, два патента, тезисы восьми докладов на российских и международных конференциях.

Диссертация А.Е. Карева является законченной научно-исследовательской работой, выполнена в хорошем научном стиле и заслуживает положительной оценки.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Таким образом, диссертация А.Е. Карева является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи создания аппаратно-методического комплекса для оценки ингаляционного поступления радиоактивных газо-аэрозольных смесей, имеющей значение для развития отрасли знаний по обеспечению радиационной безопасности объектов использования атомной энергии, что соответствует требованиям

пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.02 - Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ядерный топливно-энергетический комплекс).

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,

начальник лаборатории ядерной и радиационной безопасности

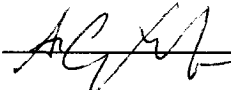
Управления по нераспространению и физической защите

НИЦ «Курчатовский институт».

123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

Тел. 7 (499) 196-95-39,

эл. почта: Sukhoruchkin_AK@nrcki.ru

А.К. Сухоручкин  28 мая 2018 г

Подпись А.К. Сухоручкина заверяю

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

 С.Ю. Стремоухов

