

**УТВЕРЖДАЮ**



Директор ФГБУН Институт  
промышленной экологии Уральского  
отделения Российской Академии наук  
к.ф.-м.н.

*Ярмошко И. В.*

"27" мая 2022 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

о научно-практической значимости диссертационной работы Цовьянова Александра Георгиевича на тему «Радиационно-гигиенические и радиобиологические аспекты безопасности при производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива», представленной на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 15.1 – «Радиобиология»

**Актуальность работы.** Развитие атомной энергетики традиционно не может обходиться без совершенствования используемого ядерного топлива. Если первый советский реактор Ф-1 и последовавшие за ним первые «боевые» реакторы работали на необогащенном уране, то следующие поколения реакторов приводили к необходимости постоянного увеличения степени обогащения топлива (от 2,6–3,0 % для реакторов РБМК-1000 до ~4,3 % для реакторов ВВЭР-1000). Необходимость использования топлива с относительно высоким уровнем обогащения и постепенное увеличение роли атомной энергетики в российском и общемировом энергетическом балансе (несмотря на негативные последствия аварий на Чернобыльской АЭС и Фукусиме) сопровождается все более выраженной тенденцией к сокращению доступных запасов природного урана. Вместе с тем, в России накоплено большое количества побочного продукта обогащения – обедненного урана. Кроме того, в результате сокращения оборонных программ и переработки облученного ядерного топлива накоплено достаточно большое количество плутония.

*С ознакомлением  
А.Г. Цовьянов  
20.05.2022.*

ВХОД №	4464
ДАТА	27.05.2022
КОЛ.ВО ЛИСТОВ:	1
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России	

При использовании в быстрых реакторах топлива из смеси плутония и обедненного урана появляется возможность переработки практически неисчерпаемых запасов обедненного урана при воспроизведстве использованного количества плутония. На начальном этапе такого проекта рассматривался вариант использования смешанного оксидного уран-плутониевого топлива (МОХ-топливо), однако в последнее время была показана перспективность применения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП топлива). Появление и разработка новых ядерных технологий всегда сопровождается рядом технологических проблем, в том числе и проблем, связанных с обеспечением радиационной защиты персонала. К таким проблемам относятся задачи оценки радиационной обстановки на рабочих местах от источников внешнего и внутреннего облучения, оценки дозовых нагрузок на персонал и расчетные оценки ожидаемых уровней стохастических эффектов, в первую очередь – ожидаемую вероятность возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний. Каждая из представленных задач при оценке радиационной безопасности при производстве СНУП топлива является комплексной и требует серьезной научной проработки. В связи с этим, диссертационная работа Цовьянова А. Г. представляется, несомненно, актуальной.

Целью работы, как это следует из текста диссертации, является выявление и научное обоснование радиационно-гигиенической и радиобиологической значимости в оценке воздействия радиационных факторов на персонал, работающий со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом.

В диссертационной работе для достижения данной цели был решен ряд самостоятельных задач, нацеленных на единый конечный результат.

1. Детально исследованы характеристики полей  $\gamma$ -излучения на рабочем месте, определен их спектральный состав и пространственное распределение. Была оценена неоднородность облучения работника и выявлены наиболее облучаемые органы и энергетическая характеристика

полей, ответственных за формирование этих доз. Аналогичный цикл работ был проведен для оценки характеристик полей нейтронного излучения. Дозовые нагрузки на персонал от нейтронного излучения были сделаны с учетом оценок энергетического и углового распределения плотности потока нейтронов. Данные исследования позволили ранжировать рабочие места по производству СНУП топлива по степени радиационной опасности.

2. Определена дисперсность радиоактивных аэрозолей на различных рабочих местах, оценена их транспортабельность в респираторном тракте при ингаляционном поступлении. Оценены физико-химические характеристики аэрозолей как при их попадании в атмосферу, так и при их ингаляционном поступлении в респираторный тракт человека с последующим частичным переносом в желудочно-кишечный тракт.
3. Разработана модель поведения аэрозольных частиц, позволяющая определить первичные депо отложений при различном химическом составе: торакальная фракция – поступление в нижний отдел дыхательных путей; экстраторакальная – в ЖКТ. Показано, что значительное содержание радиоактивного вещества в экстраторакальной фракции – до 60–80 %, желудочный путь поступления радиоактивных элементов становится сопоставим с легочным.
4. На основании представленных выше задач сделаны оценки ожидаемых радиационно-индуцированных последствий для персонала при различных сценариях облучения.

Все данные задачи, направленные на решение общей цели, были успешно решены.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в получении новой научной информации по целому ряду направлений.

Во-первых, для нового производства и технологических цепочек, а именно, производства СНУП топлива, впервые получена исчерпывающая информация по характеристикам радиационных факторов на рабочем месте. Оценены пространственно-угловые и энергетические характеристики полей

внешнего гамма-нейтронного излучения. Получены данные по объемной активности аэрозолей на рабочем месте в зависимости от характера выполняемых на них технологических операций. Впервые получены данные по размерному распределению радиоактивных аэрозолей, образующихся в процессе производства СНУП топлива, и определены параметры их транспортабельности при ингаляционном поступлении.

Во-вторых, впервые для нового типа производства разработан необходимый подход и сделана комплексная радиационно-гигиеническая оценка многофакторного воздействия различных источников ионизирующего излучения: внешнее  $\gamma$ -излучение в широком энергетическом диапазоне, нейтронное излучение с различными средними энергиями спектра, радиоактивные аэрозоли с различной дисперсностью.

В-третьих, впервые показано, что по радиобиологическому воздействию СНУП топливо представляет новый класс радиотоксичного вещества, характеризующегося специфичным первичным метаболизмом при ингаляционном поступлении в организм, отличного от известных. Оценены параметры динамики поступивших в организм форм радиоактивных веществ.

В-четвертых, на основе впервые полученных для нового производства характеристик многофакторного радиационного воздействия сделаны оценки вероятности возникновения ожидаемых стохастических эффектов (радиационно-индукционных онкологических заболеваний).

В-пятых, в ходе выполнения диссертационной работы автором были разработаны оригинальные конструкции каскадных импакторов, позволяющих определять размерное распределение радиоактивных аэрозолей в широком диапазоне. Новизна разработанных конструкций подтверждена двумя патентами.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена использованием хорошо зарекомендовавших себя методов проведения радиационного контроля, использованием средств измерений и лабораторных методик, имеющих метрологическую аттестацию и включенных в Государственный

рессир средств измерений. Надежность оценки радиационной обстановки при производстве СНУП топлива обеспечена многократными измерениями с комбинацией данных контроля внешнего облучения и результатов лабораторных исследованиями. При повторных или независимых параллельных измерениях отмечается хорошая воспроизводимость результатов.

Результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах, защищены патентами и доложены на научных конференциях.

**Теоретическое и практическое значение работы.** Теоретическое значение работы в первую очередь обусловлено детальной проработкой применения комплекса различных инструментальных методов для общей оценки радиационной обстановки при наличии многофакторного радиационного воздействия. Большое теоретическое значение имеет оценка первичного метаболизма аэрозольных частиц, образующихся при производстве СНУП топлива, при их ингаляционном поступлении. Особый интерес может представлять оценка распределение частиц различного химического состава по депо фиксации: торакальная фракция – поступление в нижние отделы дыхательных путей преимущественно в оксидных формах, экстраторакальная фракция – поступление в ЖКТ преимущественно в нитридной форме. В качестве теоретически значимого результата нельзя не отметить оценку классов транспортабельности радиоактивных аэрозолей, образующихся при производстве СНУП топлива. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшего совершенствования моделей клиренса радиоактивных аэрозолей сложного состава, поступивших в респираторный тракт.

Практическая значимость диссертационной работы Цовьянова А. Г. обусловлена получением исчерпывающей информации по радиационному воздействию на персонал, занятый производством СНУП топлива, позволившей произвести ранжирование рабочих мест по степени радиационной опасности. Полученные данные позволяют оптимизировать как

программы радиационного мониторинга на рабочем месте, так и программы индивидуального дозиметрического контроля внешнего и внутреннего облучения. Практическая значимость рассматриваемой диссертационной работы подтверждается широким внедрением ее результатов на АО «Сибирский химический комбинат». В качестве еще одного пункта практической значимости рецензенты не могут не отметить разработку и широкое внедрение в практику каскадных импакторов, разработанных автором диссертационной работы. В особенности хочется отметить каскадный импактор АИП-2, используемый различными предприятиями и научными учреждениями для контроля дисперсности радиоактивных аэрозолей. В частности, такой каскадный импактор используется в научных исследованиях Института промышленной экологии УрО РАН уже более 12 лет.

Диссертационная работа начинается с введения и литературного обзора, посвященного анализу современного состояния обеспечения радиационной безопасности при производстве ядерного топлива. В обзоре рассмотрены и проанализированы основные радиационные и химические факторы, действующие на персонал на различных этапах производства ядерного топлива. Сделан детальный аналитический обзор по аппаратурному обеспечению радиационного контроля при оценке доз внешнего и внутреннего облучения персонала и методам оценки доз внешнего и внутреннего облучения, которые, в итоге, могут быть использованы при организации радиационного контроля и разработке защитных мероприятий создаваемого производства.

Вторая глава посвящена описанию материалов и методов исследований. Дано описание методов определения дисперсности радиоактивных аэрозолей с характеристиками различных типов каскадных импакторов, используемых в работе, и способов исследования распределения соединений элементов по типам при ингаляции радиоактивных аэрозолей. Описаны методики определения радионуклидного состава исследуемых проб и реакционных свойств аэрозолей СНУП топлива. Во второй главе также описаны методы и

средства исследования дозовых и энергетических характеристик полей фотонного и нейтронного излучений. Дополнительно описаны методы индивидуальной дозиметрии всех видов излучения. Данна методика оценки ожидаемых доз внутреннего облучения. Вторая глава дает исчерпывающую информацию о том, какими методами, в каком объеме и с какой точностью были получены исходные экспериментальные данные, использованные в диссертационной работе.

В третьей главе дана радиационно-гигиеническая оценка факторов производственной среды, влияющих на безопасность персонала – исследование полей фотонного и нейтронного излучения, а также оценка неравномерности внешнего облучения персонала. Сделана оценка степени потенциальной опасности внешнего облучения всего технологического комплекса. Проведена классификация различных технологических циклов, разделенных по степени опасности – безопасная, относительно опасная, опасная, чрезвычайно опасная.

В четвертой главе приведены результаты исследований физико-химических свойств аэрозолей СНУП, определяющих эффективную дозу облучения персонала. Приведены результаты определения дисперсного состава радиоактивных аэрозолей, а также их динамики и пространственного распределения. Даны результаты распределения соединений элементов по типам при ингаляции радиоактивных аэрозолей. В главе подробно описаны результаты изучения физико-химических свойств образцов СНУП топлива, выдержанного при различных условиях, рассмотрены радиобиологические аспекты ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей в производстве СНУП топлива, построена референтная модель СНУП аэрозоля. А так же рассмотрен первичный метаболизм СНУП аэрозолей при ингаляционном поступлении в организм человека.

Пятая глава диссертационной работы посвящена оценкам риска отдаленных последствий и обоснованию требований по проведению медицинского наблюдения персонала. Дан анализ ожидаемых значений

эквивалентных и эффективных доз внешнего и внутреннего облучения. Для персонала проведен расчет прогнозных значений пожизненного атрибутивного риска смертности от злокачественных новообразований в зависимости от пола и возраста работника на начало облучения, при ежегодном внешнем гамма-облучении в дозе  $2,1 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  и внешнем нейтронном облучении в дозе  $0,4 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ .

В конце текста диссертации даны основные выводы и приведен список использованных источников литературы.

Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста и содержит введение, 5 глав, заключение и выводы, а также список литературы, включающий 124 источника, из них 28 на иностранном языке; содержит 55 рисунков, 46 таблиц. По теме диссертации опубликовано 5 статей в журналах рекомендуемых ВАК, из которых 4 публикации в изданиях, индексируемых в системах научного цитирования Scopus и Web of Science. По результатам работы получено два патента на изобретения, зарегистрированные в Роспатенте.

Принципиальных замечаний по тексту диссертационной работы Цовьянова А. Г. не имеется. Вместе с тем при ознакомлении с текстом диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний, которые в отзыве сгруппированы по главам.

1. В первой главе, представляющей литературный обзор, отсутствует разделение текста на отдельные подразделы. В результате, например, на стр. 26–28 подряд, без всякого перехода рассматриваются вопросы восстановления спектров нейтронов с помощью спектрометра Боннера, проблемы индивидуальной дозиметрии в смешанных гамма-нейтронных полях, методы получения нитридов металлов, проблема химического анализа на азот и вопросы радиобиологии и токсикологии радиоактивных веществ. Подобное изложение материала вызывает существенные трудности в его восприятии.

2. Во второй главе в формуле (2.4), описывающей алгоритм восстановления спектра нейtronов дозиметром ДКС-96 с дополнительными полиэтиленовыми шарами-замедлителями, отсутствует расшифровка обозначений, что не позволяет понять каким образом и с какой точностью могут быть получены характеристики энергетического распределения нейtronов. В этой же главе в табл. 2.19 представлены дозовые коэффициенты из базы МКРЗ (The ICRP Database of Dose Coefficients: Worker and Members of the Public, Elsevier, 2001), используемые в расчетах. Возникает вопрос – почему в работе не были использованы дозовые коэффициенты Публикации 141 МКРЗ (Occupational Intake of Radionuclides. Part 4), рассчитанные по более современным биokinетическим и дозиметрическим моделям?
3. В главе 3 на рис. 3.8 приведено отношение показаний термolumинесцентных дозиметров к опорному значению индивидуального эквивалента дозы рассчитанному по средней энергии спектра нейtronов. По этому рисунку возникли два вопроса. Первый вопрос. На рисунке указаны результаты для двух типов термolumинесцентных дозиметров нейtronов ДВГН-01 и Harshaw-8806. Однако в тексте диссертационной работы про использование дозиметров Harshaw-8806 больше нигде не упоминается. С чем связано появление информации по дозиметрам Harshaw-8806? Второй вопрос. Почему отсутствуют данные по энергетической зависимости электронных прямопоказывающих дозиметров EPD-N2, хотя из текста диссертации явно вытекает, что они экспонировались одновременно с дозиметрами ДВГН-01? Учитывая то, что дозиметры EPD-N2 не обладают повышенной чувствительностью к «мягкой» части нейтронного спектра, часто присутствующей на рабочих местах вследствие многократного рассеяния нейtronов, их показания могут лучше соответствовать значению условно истинной мощности дозы, рассчитанного из спектра нейtronов.

4. В четвертой главе указано, что длительность отбора проб радиоактивных аэрозолей на отдельных участках технологического процесса составляла от нескольких часов до нескольких суток. Можно ли считать, что объемная активность аэрозолей и их дисперсность оставалась неизменными в течение пробоотбора? Если это не так, то какие операции – наработка СНУП топлива или планово-профилактические работы могут давать максимальный вклад в изменчивость во времени объемной активности и дисперсности аэрозолей?
5. В пятой главе на рис. 5.1 заметен выраженный скачок на зависимости радиационного риска для женщин при возрасте на момент облучения 40 лет. Чем вызвано такое увеличение риска, отсутствующее у мужчин? Также неспонятно, почему материалы пятой главы, представляющие несомненный научный интерес, не нашли свое отражение в положениях, выносимых на защиту и в пунктах научной новизны?
6. Список литературы составлен не по ГОСТ Р 7.0.97–2016, как это требуется в настоящее время. Ссылки на патенты [79–86] даны только в виде номеров без указания названия и авторов. В ряде ссылок фамилии авторов полностью набраны заглавными буквами.

Данные замечания не являются принципиальными и не умаляют высокий научный уровень и практическую значимость рассматриваемой работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Цовьянова Александра Георгиевича на тему «Радиационно-гигиенические и радиобиологические аспекты безопасности при производстве смешанного нитридного уран-плутоневого топлива», представленная на соискание ученоей степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.1 – «Радиобиология» является научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных научных исследований и их обобщения получены данные по характеристикам основных радиационных факторов, действующих на персонал при

производстве СНУП топлива: пространственно-угловом и энергетическом распределении полей гамма и нейтронного излучения, объемной активности и дисперсности радиоактивных аэрозолей и типам при ингаляции радиоактивных аэрозолей. Построена референтная модель СНУП аэрозоля. Рассмотрен первичный метаболизм СНУП аэрозолей при ингаляционном поступлении в организм человека. Даны оценки ожидаемого уровня стохастических эффектов, обусловленных радиационным воздействием на рабочем месте.

По актуальности темы, научной новизне и практической значимости диссертационная работа Цовьянова Александра Георгиевича на тему «Радиационно-гигиенические и радиобиологические аспекты безопасности при производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива» полностью соответствует требованиям п. 9–11 и п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024, от 01.10.2018 № 1168, от 20.03.2021 № 426, от 11.09.2021 № 1539), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.1 – «Радиобиология».

Отзыв на диссертационную работу Цовьянова Александра Георгиевича на тему «Радиационно-гигиенические и радиобиологические аспекты безопасности при производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива» заслушан, обсужден и утвержден на заседании ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, протокол №5 от 26.05.2022 г.

Главный научный сотрудник лаборатории  
урбанизированной среды ИПЭ УрО РАН,  
доктор технических наук, профессор,  
специальность 05.26.02 – Безопасность  
в чрезвычайных ситуациях (ядерный  
топливно-энергетический комплекс),  
620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20,  
тел. 89122418308, e-mail: michael@ecko.uran.ru

М. В. Жуковский

Старший научный сотрудник лаборатории  
урбанизированной среды ИПЭ УрО РАН,  
ученый секретарь ИПЭ УрО РАН,  
кандидат биологических наук,  
специальность 03.00.01 – Радиобиология  
620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20,  
тел. 8(343)3623393, e-mail: onischenko@ecko.uran.ru

А. Д. Онищенко

Подписи Жуковского Михаила Владимировича и Онищенко Александры  
Дмитриевны заверяю



Ведущий специалист по кадрам ИПЭ УрО РАН

Алешкина О. С.