

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»



На правах рукописи

Махмуд Карем Абделазим Габер

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ
РЕСПУБЛИКИ ЕГИПЕТ И НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент,
Ташлыков Олег Леонидович

Официальные оппоненты: **Чолах Сеиф Османович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры электрофизики Физико-технологического института;

Ремез Виктор Павлович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ООО «Научно-производственное предприятие ЭКСОРБ», г. Екатеринбург, директор;

Кобелев Антон Михайлович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», г. Екатеринбург, доцент кафедры автоматизированных систем противопожарной защиты

Защита состоится «23» июня 2022 г. в 14:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=3576>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Сесекин Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. С 1950-х годов предельная годовая доза облучения для персонала составляла 50 мЗв. В 1990 году согласно рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ, Публикация № 60) предел дозы облучения был снижен до 20 мЗв в год с возможностью усреднения.

Доза облучения прямопропорциональна значению мощности дозы излучения, времени пребывания в радиационном поле и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения до работника. Соответственно, снизить дозу облучения можно сокращением времени выполнения работ в условиях воздействия ионизирующего излучения, увеличением расстояния от источника излучения до работника и снижением мощности дозы излучения. Последний способ предполагает проведение дезактивации оборудования и помещений, использование различных экранов из материалов, эффективно ослабляющих излучение и т.д. Экранирование является самым распространенным способом снижения дозовых затрат персонала.

Наибольшую проблему на практике вызывает организация защиты от гамма-излучения, поскольку защита от альфа- и бета-излучения не составляет проблем, а нейтронное облучение возможно только при работающем реакторе.

Для защиты от гамма-излучения наиболее эффективны тяжелые материалы (свинец, вольфрам, обедненный уран и т.д.), из которых наибольшее распространение получил свинец. Однако он имеет ряд недостатков, в частности, высокую пластичность, что вызывает проблемы при креплении вертикальной защиты из свинца при толщине более 5 мм. Свинец является токсичным материалом, что ограничивает его применение и усложняет утилизацию свинцовосодержащих радиационно-защитных материалов (РЗМ).

В связи с этим в последние годы активизировались исследования по поиску новых составов нетоксичных (в том числе, бессвинцовых) композитных РЗМ, имеющих высокие защитные свойства.

Оптимизация состава защитных материалов является важной частью и на практике наиболее важной частью системы ограничения дозы, поскольку для достижения приемлемого уровня защиты недостаточно полагаться на пределы

дозы. В этой связи разработка новых РЗМ (бетон, кирпичи, сплавы и т.д.) имеющих высокую экранирующую способность, является **актуальной** задачей развития атомной энергетики и внедрения радиационных технологий, реализующих приоритетное направление развития науки, техники и технологий в Российской Федерации - пункт 8 Энергоэффективность, энергосбережение и атомная энергетика.

Целью диссертационной работы является разработка новых эффективных нетоксичных материалов (бетона, кирпичей, стекол и сплавов) с использованием природных минералов Республики Египет для радиационной защиты на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ).

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценка потенциальной возможности использования природных минералов Республики Египет в составе строительных материалов при сооружении радиационной (биологической) защиты ОИАЭ.
2. Расчетно-экспериментальные исследования влияния размеров фракций (зерен) базальтового наполнителя на радиационно-защитные свойства бетонов.
3. Расчетно-экспериментальные исследования влияния давления при изготовлении бетонов на их экранирующие свойства.
4. Разработка входных файлов и оценка их эффективности при моделировании методом Монте-Карло (расчетный код MCNP-5) для оценки экранирующих свойств разработанных материалов.
5. Разработка, изготовление и расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств кирпичей на основе диатомита, легированных промышленными отходами.
6. Разработка, оптимизация состава и расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных стекол (боратных, силикатных, теллуритовых и фосфатных).
7. Расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств сплавов, содержащих тяжелые элементы (W, Bi, Pb).
8. Оценка эффективности использования природных минералов Республики Египет и исследованных сплавов для дополнительного экранирования

радиоактивных отходов, размещаемых в защитном контейнере с использованием расчетного кода MCNP-5.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведены расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных характеристик природных минералов Республики Египет
2. Разработаны различные варианты геометрий при создании входного файла расчетного кода MCNP-5 для моделирования радиационно-защитных характеристик исследуемых материалов и проанализировано их влияние на учет фактора накопления.
3. Проведена оценка степени влияния отдельных эффектов взаимодействия излучения с исследуемыми материалами в различных диапазонах энергий гамма-излучения на их радиационно-защитные характеристики.
4. Впервые проведены расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств глиняных кирпичей на основе диатомита с добавками промышленных отходов.
5. Разработаны новые составы бессвинцовых стекол для экранирования от гамма-излучения проведены расчетно-экспериментальные исследования их радиационно-защитных свойств.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Результаты исследований радиационно-защитных характеристик природных минералов Республики Египет будут использованы при оценке потенциальной возможности их применения в составе строительных материалов объектов использования атомной энергии.
- Проведена оценка влияния размеров зерен базальта, как наиболее эффективного экранирующего наполнителя, на радиационно-защитные свойства бетонов.
- Проведена оценка влияния давления прессования при изготовлении на радиационно-защитные свойства бетонов с базальтовым наполнителем.
- Результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния добавок тяжелых металлов в глиняную матрицу на основе диатомита на радиационно-

защитные свойства могут быть использованы при разработке и изготовлении глиняных кирпичей для быстровозводимой защиты.

- Разработаны возможные варианты входного файла расчетного кода MCNP-5 для определения радиационно-защитных характеристик исследуемых материалов.
- Результаты расчетно-экспериментальных исследований более двухсот составов радиационно-защитных стекол (боратных, силикатных, теллуритовых и фосфатных) представляют собой полезную базу данных для продолжения исследований и практического выбора стекол для экранирования.
- Проведенная оценка стоимости более двухсот вариантов составов радиационно-защитных стекол может использоваться в качестве базы данных для оптимизации радиационной защиты в виде стекол.

Методология и методы диссертационного исследования.

Экспериментальные измерения радиационно-защитных характеристик исследуемых материалов проводились с использованием детекторов NaI (Tl) и HPGe в Управлении по ядерным материалам (Каир, Египет), химический состав – с помощью индукционной плазменно-оптической эмиссионной спектроскопии (ICP-OES). Экспериментальные измерения экранирующих свойств были подтверждены теоретическими расчетами с помощью программ XCOM, Phy-X/PSD и VXCOR на основе баз данных ядерной библиотеки NIST, а также моделированием методом Монте-Карло с использованием расчетного кода MCNP-5 с базой данных ядерной библиотеки ENDF/B-VI.

Личный вклад автора заключается в выборе и обосновании направлений исследований; разработке методик экспериментов; в непосредственном участии в выполнении научных экспериментов, разработке установок, математической обработке экспериментальных данных, компьютерном моделировании с помощью метода Монте-Карло, подготовке основных публикаций, докладов на конференциях. Все представленные материалы получены автором лично или в соавторстве.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка радиационно-защитных свойств природных минералов Республики Египет на основе результатов расчетно-экспериментальных

исследований позволяет рассматривать базальтовые породы (базальт-1 и базальт-2) в качестве потенциальных наполнителей в бетоне при сооружении объектов использования атомной энергии.

2. Разрабатываемая геометрия при создании входного файла расчетного кода MCNP-5 при моделировании прохождения гамма-излучения через исследуемый материал оказывает влияние на учет фактора накопления.

3. Влияние размера зерен базальтового наполнителя на радиационно-защитные свойства бетона.

4. Влияние давления прессования на радиационно-защитные свойства бетона с базальтовым наполнителем.

5. Разработанные кирпичи на основе диатомита с тяжелым наполнителем имеют значительный потенциал в их использовании для быстровозводимой защиты в радиационно-опасных помещениях.

6. Использование оксидов тяжелых металлов позволяет изготавливать бессвинцовые радиационно-защитные стекла с высокими экранирующими показателями.

7. Использование исследованных тяжелых сплавов и дополнительного экранирования в виде базальта позволяет повысить емкость защитных контейнеров для радиоактивных отходов (РАО) при соблюдении условий радиационной безопасности.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием известных, зарекомендовавших себя методов моделирования и расчета, проверенного программного обеспечения, поверенных приборов и измерительных комплексов, хорошей сходимостью результатов, полученных экспериментально, с результатами моделирования с использованием расчетного кода MCNP-5, программы XCOM, а также с результатами, полученными другими авторами.

Апробация результатов работы.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на 10-ти конференциях, в том числе: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

Атомная энергетика», г. Екатеринбург, 2018; The VI International Young Researchers' Conference-Physics, Technologies, Innovation (PTI-2019), Yekaterinburg, 2019; Международная научно-техническая школа-семинар по ядерным технологиям для молодых учёных, специалистов, студентов и аспирантов, г. Нижний Новгород, 2019; The VII International young researchers' conference-physics, Technology, innovations (PTI-2020), Yekaterinburg, 2020; The XX International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD), Mexican Society of Irradiation and Dosimetry, Mexico City, Mexico, 2020; The 3rd International Forum on Advances in Radiation Physics (IFARP-3), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021; The VIII International Youth Scientific Conference-Physics, Technology, Innovations (PTI-2021), Yekaterinburg, 2021; The 15th International Symposium on Radiation Physics (ISRP-15), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021; The 4th International Forum on Advances in Radiation Physics (IFARP-4), King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 2022.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования представлены в 26-ти публикациях, из них 22 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 21 статья – в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 4 тезиса в сборниках международных и российских научных конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений/обозначений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 180 страницах, включая 66 рисунков, 21 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 232 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлена научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов и публикациях по теме исследования.

В первой главе представлен обзор литературных данных об исследованиях, проведенных к настоящему времени по тематике, связанной с расчетно-

экспериментальными исследованиями композитных радиационно-защитных материалов (бетоны, стекла и сплавы). Обобщены достоинства и недостатки, радиационно-защитные характеристики потенциальных добавок для повышения экранирующей способности композитных материалов.

В обзоре обобщены данные по влиянию черных и цветных шлаков, отходов горнодобывающей промышленности и т.д. на свойства бетона.

В обзоре исследований обобщены данные по влиянию различных добавок с высокой плотностью (оксидов тяжелых металлов и т.д.) на экранирующие характеристики различных типов стекол (боратных, силикатных, теллуритовых и фосфатных), которые могут применяться в специальных технологиях для защиты от гамма-излучения. Выявлены неисследованные составы стекол.

Во второй главе содержится описание использованных в ходе диссертационной работы экспериментальных установок и методик проведения с их помощью исследований физических, ядерно-физических и химических характеристик исследуемых исходных (базальт-1; базальт-2; базальт-сил; известняк и риолит) и изготовленных композитных радиационно-защитных материалов (бетон, кирпичи, стекло и сплавы).

Определение химического состава подготовленных образцов природных минералов, необходимого для подтверждения экспериментальных результатов экранирования с помощью моделирования с использованием кода XCOM и MCNP-5, проводилось с использованием метода оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) в Управлении по ядерным материалам Египта (рис 1).

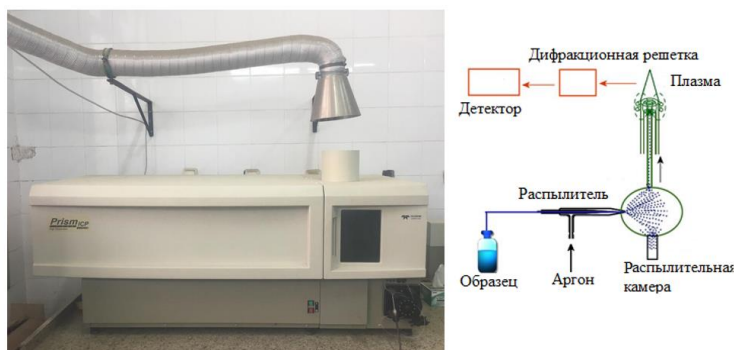


Рисунок 1. Определение химического состава материалов с помощью метода оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES)

Экспериментальное определение линейного коэффициента ослабления исследуемых образцов проводилось в Управлении ядерных материалов

Республики Египет (Каир) с помощью спектрометрических установок с использованием детекторов NaI (Tl) и HPGe (рис.2 и рис.3). Линейный коэффициент ослабления определялся в соответствии с законом Ламберта-Бера. Интенсивность гамма-излучения, испускаемого радиоактивным изотопом I , фиксировалась детектором 4 как без экранирующего материала I_0 , так и после прохождения через исследуемые образцы 3 экранирующего материала I . Узкий пучок формировался с помощью свинцового коллиматора 2. Толщина исследуемых материалов x измерялась микрометром с точностью $\pm 0,001$ мм. После этого находилась зависимость $\ln(I_0/I)$ от толщины материала.

$$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

$$\Delta\mu = \frac{1}{x} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^2 \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2} \quad (2)$$

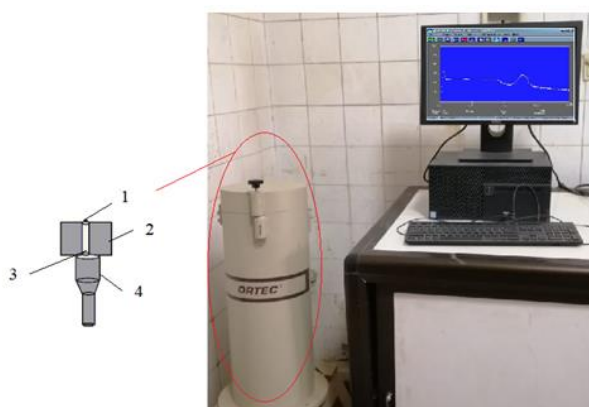


Рисунок 2. Установка с детектором NaI(Tl)

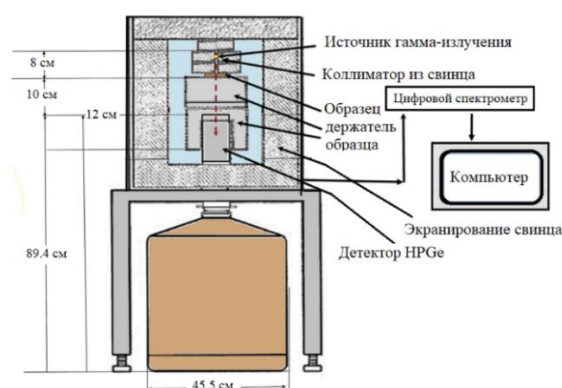


Рисунок 3. Установка спектрометрии HPGe

Для подготовки базальта к использованию в виде наполнителя в бетон образцы породы были раздроблены и разделены на три группы по размеру зерен с использованием устройства для просеивания HAVER EML 200 digital T. Размеры зерен для каждой группы G1, G2 и G3 (средние размеры зерен в группах 107, 71 и 25 мкм) были определены с помощью электронного сканирующего микроскопа (SEM) – рис. 4.

Ряд образцов стекол для проведения расчетно-экспериментальных исследований по определению радиационно-защитных свойств был изготовлен в лаборатории ХТИ УрФУ с помощью к.х.н. Власовой С.Г. (рис. 5).

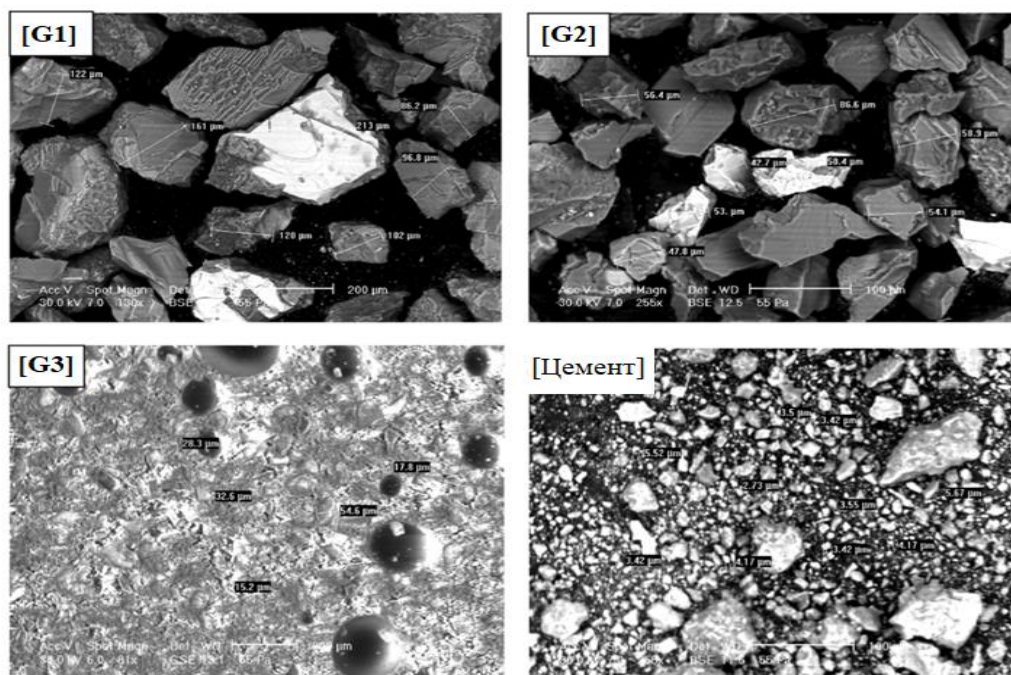


Рисунок 4. Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа



Рисунок 5. Основные этапы подготовки и оценки радиационно-защитных свойств изготовленного боратного стекла

В третьей главе представлена методика использования программы XCOM и ее возможности в определении радиационно-защитных характеристик исследуемых материалов.

В главе описана методология моделирования с помощью расчетного кода MCNP-5, использованная при определении радиационно-защитных

характеристик, в частности линейного коэффициента ослабления исследуемых материалов. Представлены результаты использования различных вариантов геометрии входного файла (без коллиматора, с одним и двумя коллиматорами) и анализ их влияния на полученные значения линейного коэффициента ослабления и их совпадение с результатами, определенными с помощью программы ХСОМ, учет влияния фактора накопления (рис.6).

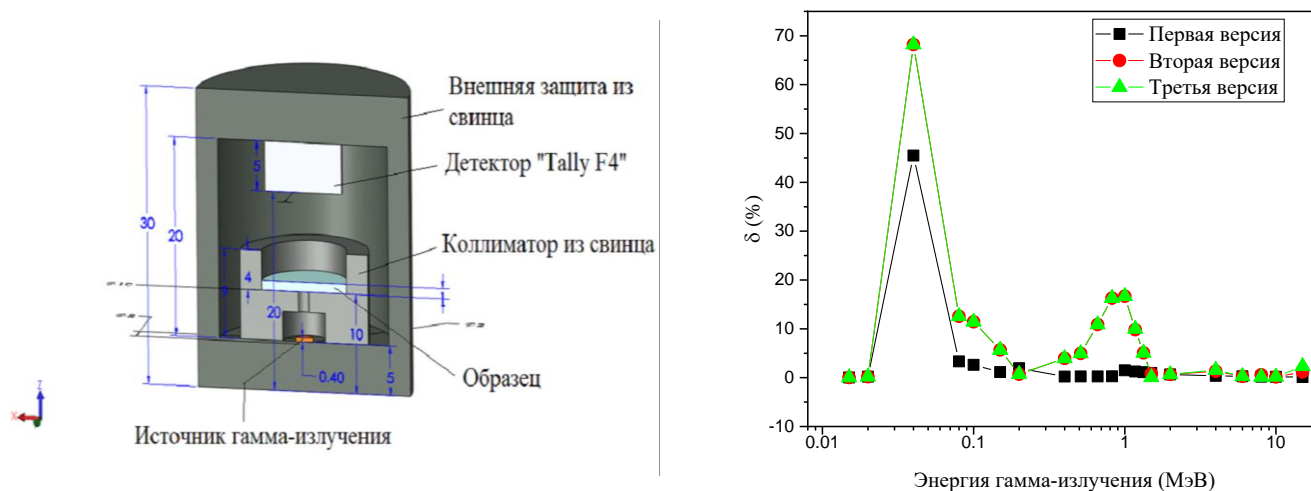


Рисунок 6. Геометрия входного файла MCNP-5 с одним коллиматором (а) и значения погрешности в зависимости от энергии излучения при трех вариантах геометрии (б)

В четвертой главе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований экранирующей способности изученных природных минералов Республики Египет (базальт-1, базальт-2, базальт-силл, известняк, риолит). Наибольший линейный коэффициент ослабления ($0,18986$ и $0,19358 \text{ см}^{-1}$) и наименьшие значения слоя половинного ослабления ($4,44$ и $4,40 \text{ см}$) при энергии $1,173 \text{ МэВ}$ имеют образцы базальт-2 и базальт-1 (рис 7).

Базальт-2, имеющий наилучшие защитные характеристики, использовался в качестве наполнителя в бетоны для исследования влияния размеров зерен базальта на радиационно-защитные свойства бетона. Первая серия бетона была приготовлена как смесь 15% цемента, 30% песка и 55% измельченного базальта-2 (G1, G2 и G3). Результаты показали, что коэффициент линейного ослабления изготовленных бетонов увеличивается с уменьшением размера зерен базальта-2 (рис 8).

Оценка влияния содержания базальта (средний размер зерен 25 мкм) на экранирующие характеристики бетона показала, что увеличение доли

базальтового наполнителя приводит к значительному уменьшению значений слоя половинного ослабления при всех изученных энергиях. При увеличении доли базальта от 0 до 100% значения $\Delta_{0,5}$ уменьшились на 35%, для энергии гамма-излучения 0,662 МэВ и на 38% для энергии 1,332 МэВ (рис 9).

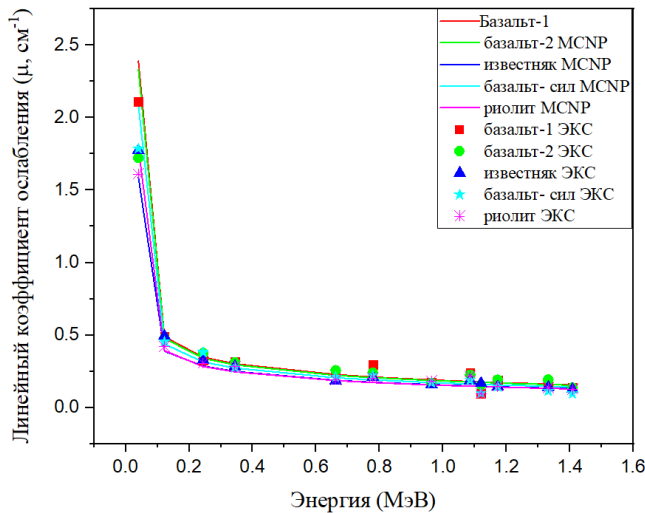


Рисунок 7. Линейный коэффициент ослабления для исследуемых пород

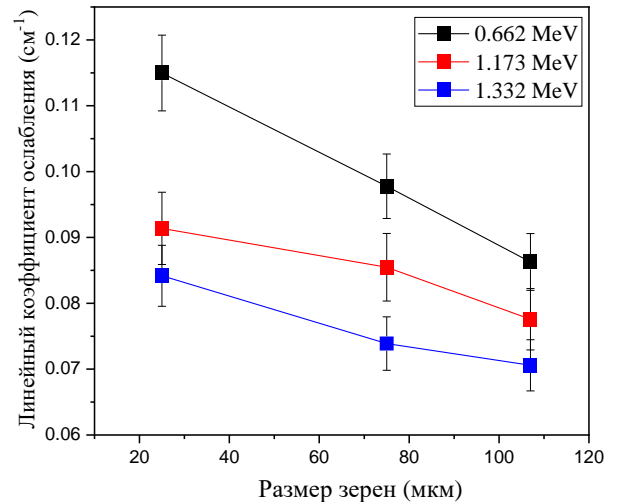


Рисунок 8. Зависимость линейного коэффициента ослабления от размера зерна

При исследовании влияния давления на защитные свойства бетона, изготовленного из цемента и базальта-2 со средним размером зерен 25 мкм (вода заменена метасиликатом натрия) было установлено, что увеличение давления прессования от 1,032 до 142,76 кг/см² уменьшает слой половинного ослабления бетона на 65% при энергии гамма-излучения 0,779 МэВ (рис 10).

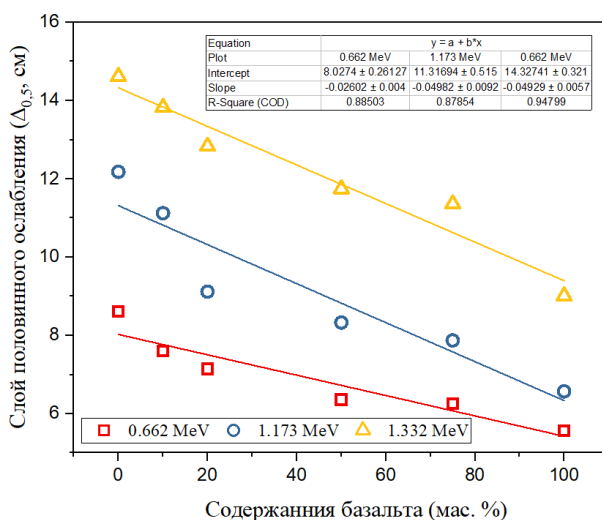


Рисунок 9. Зависимость слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) от содержания базальта

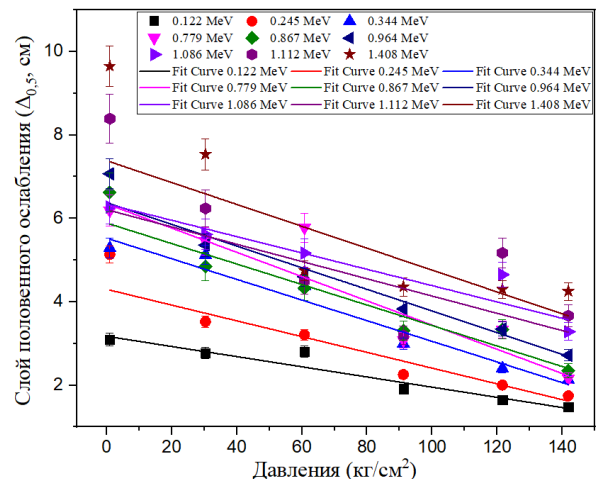


Рисунок 10. Изменение слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) в зависимости от давления

В главе также приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований кирпичей из диатомитовой глины с добавками тяжелых промышленных отходов.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по оценке защитной способности и стоимости более двухсот образцов боратных (91 образец), силикатных (40 образцов), теллуритных 33 (образца) и фосфатных (48 образцов) стекол. Оценка стоимости проведена для листа стекла размерами 1x1 м и толщиной $\Delta_{0,5}$. На рисунке 11 представлена стоимость и слой половинного ослабления исследуемых стекол, определенные для энергии гамма-излучения 0,662 МэВ.

Для образцов на основе боратных стекол значения $\Delta_{0,5}$ составляют от 0,758 см (образец G5, $50\text{Bi}_2\text{O}_3+30\text{PbO}+20\text{B}_2\text{O}_3$) при стоимости 186 \$ до 4,1 см для стекол BNLC0 ($81.8\text{B}_2\text{O}_3+13.8\text{Na}_2\text{O}_3+4.4\text{Li}_2\text{O}$) стоимостью 690 \$.

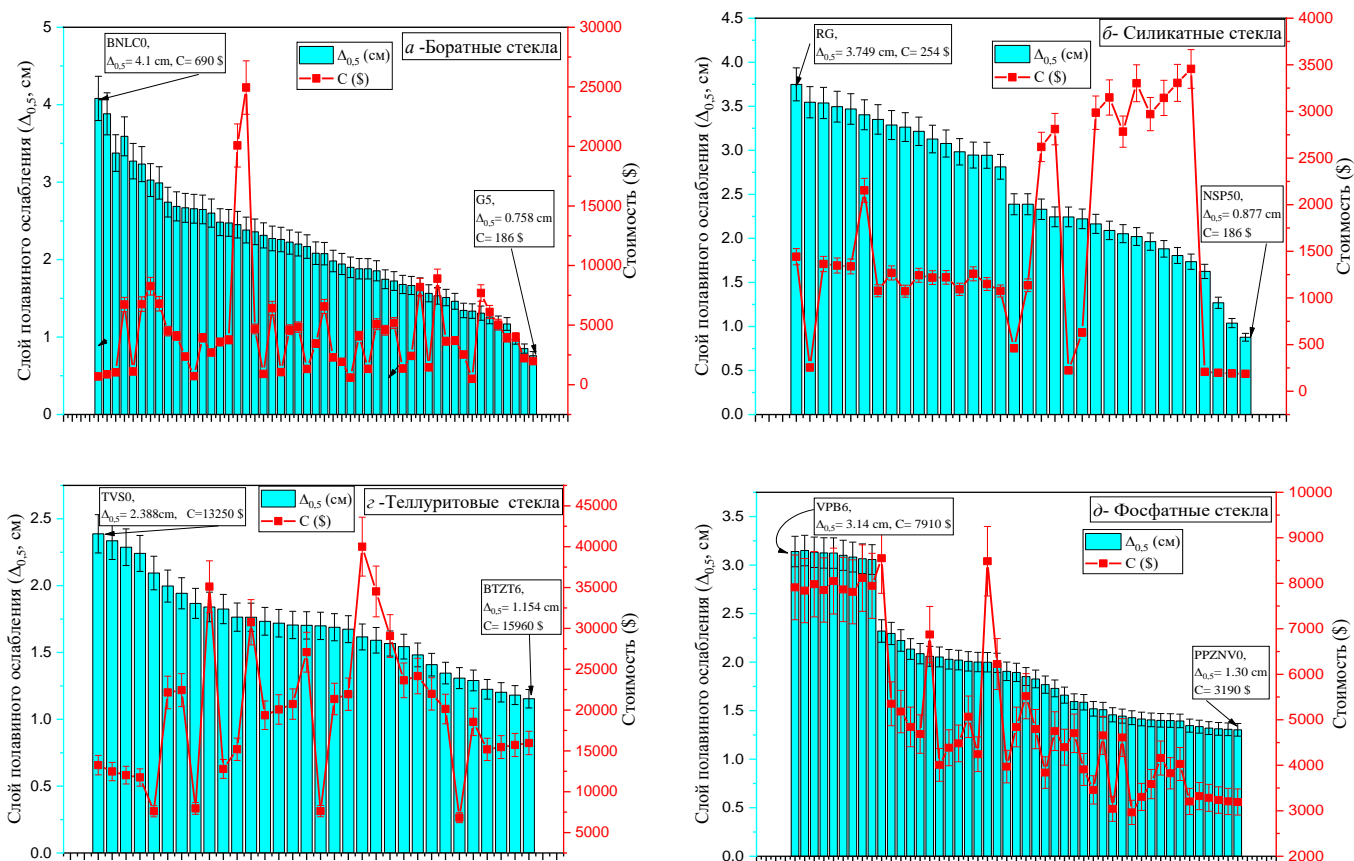


Рисунок 11. Слой половинного ослабления и стоимость боратных (а), силикатных (б), теллуритовых (г) и фосфатных (д) стекол

Для силикатных стекол наибольшее значение $\Delta_{0,5}$ составляет 3,75 см (образец RG, $13,8\text{Na}_2\text{O}+4\text{MgO}+1,7\text{Al}_2\text{O}_3+71\text{SiO}_2+8\text{CaO}+0,017\text{TiO}_2+0,05\text{Fe}_2\text{O}_3$)

стоимостью 254 \$. Наименьшее значение $\Delta_{0,5}$ составляет 0,87 см (образец NSP50, $21,21\text{Si}_2\text{O}+78,79\text{PbO}$) стоимость 186 \$.

Для теллуритовых стекол наибольшее значение $\Delta_{0,5}$ составляет 2,38 см (образец TVS0, $36,9\text{TeO}_2+63,1\text{V}_2\text{O}_5$) стоимостью 13250 \$, наименьшее – 1,15 см (образец VTZT6, $62,6\text{TeO}_2+22,8\text{Bi}_2\text{O}_3+1,6\text{ZnO}+13\text{Ta}_2\text{O}_5$) стоимостью 15960 \$.

Для фосфатных стекол наибольшее значение $\Delta_{0,5}$ составляет 3,14 см (VPB6, $54,1\text{V}_2\text{O}_5+42,3\text{P}_2\text{O}_5+3,6\text{B}_2\text{O}_3$) стоимость 7910 \$, наименьшее – 1,3 см (PPZNV0, $40\text{P}_2\text{O}_5+40\text{PbO}+10\text{ZnO}+10\text{Na}_2\text{O}_3$) стоимостью 3190 \$.

В шестой главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по оптимизации защитной способности сплавов, легированных тяжелыми элементами (W, Bi, Pb). Линейный коэффициент ослабления исследованных сплавов был определен при энергии γ -излучения 1 МэВ. Наибольшие значения μ ($0,675\text{ см}^{-1}$) достигнуты для сплава PZ1.

В седьмой главе представлены результаты теоретических исследований по повышению радиационно-защитной способности контейнеров, используемых для хранения РАО, образующихся при эксплуатации и снятии с эксплуатации АЭС. С помощью расчетного кода MCNP-5 исследовано влияние материала, толщины оболочки капсулы и слоя дополнительного наполнителя на мощность эквивалентной дозы, создаваемой РАО, размещенными в контейнере, на расстоянии 1 м от его стенок.

Рассматриваемая модель контейнера состоит из трех частей-объемов (рисунок 12). Наружная часть представляет собой бетонную стенку контейнера толщиной 15 см. В центре контейнера расположена металлическая цилиндрическая емкость (капсула) с толщиной стенок от 0,5 до 3 см, содержащая сорбент, насыщенный изотопами цезий-137 и кобальт-60. Пространство между капсулой и бетонными стенками контейнера, может быть заполнено различными наполнителями для дополнительного экранирования РАО.

Предполагается, что РАО, размещаемые в капсуле, состоят на 90% из Cs-137 и на 10% Co-60. Активность РАО составляет $2,5345\text{E}+13$ Бк. Удельная – $1,628\text{E}+6$ Бк/см³, общий объем капсулы – $4,51\text{E}+5$ см³. Энергия, депонированная в ячейках детектора на расстоянии 1 м от стенок контейнера, переводилась в мощность эквивалентной дозы (мкЗв/ч).

На рис. 13 представлена зависимость поглощенной дозы в ячейках детекторов на расстоянии 1 м от поверхности контейнера при полном отсутствии экранирования, при наличии только стенки капсулы, стенки капсулы и дополнительного наполнителя, а также при использовании капсулы из сплава PZ1 толщиной 3 см, 17 см наполнителя базальт-2 и 15 см бетона. В последнем случае это мощность эквивалентной дозы составила 6,63 мкЗв/ч.

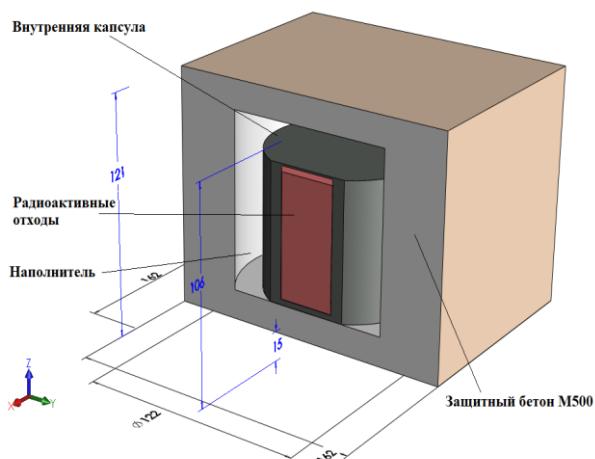


Рис 12. Модель контейнера

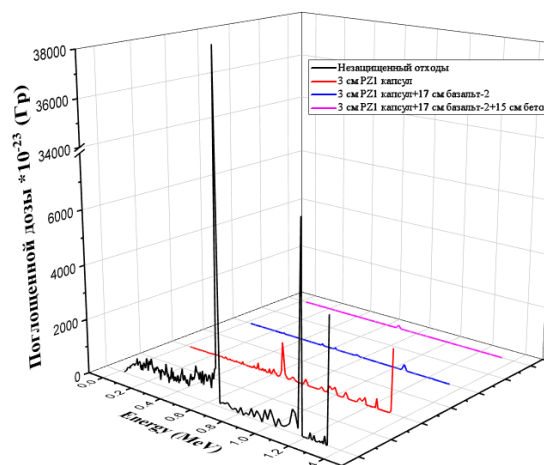


Рис 13. Зависимость поглощенной дозы, зарегистрированной в детекторах от энергии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены результаты исследований природных минералов Республики Египет, бетонов на их основе и некоторых композитных радиационно-защитных материалов (кирпичей, стекол и сплавов) с целью оценки потенциала их применения при сооружении объектов использования атомной энергии. Оценка экранирующих способностей исследуемых материалов проводилась экспериментально (детекторы NaI (Тl) и HPGe), с использованием компьютерного моделирования методом Монте-Карло, а также программы ХСОМ. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. На основании результатов расчетно-экспериментальных исследований и моделирования с помощью расчетного кода MCNP-5 выявлено, что породы базальт-1 и базальт-2 обладают наибольшей экранирующей способностью среди изученных природных минералов.

2. Исследование зависимости радиационно-защитных свойств бетона от размеров зерен наполнителя (базальт-2) показало, что уменьшение среднего размера зерен от 107 мкм до 25 мкм снижает значение слоя половинного ослабления бетона на 25%.
3. Увеличение содержания базальтового наполнителя от 0 до 100 мас.% (доля замещения песка в составе бетона) при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ снижает значение слоя половинного ослабления образцов бетона на 35%.
4. При увеличении давления при прессовании образцов бетона от 1,01 кг/см² до 142,67 кг/см² слой половинного ослабления образцов бетона уменьшается на 56%.
5. Кирпичи на основе диатомитовой глины, легированные тяжелыми отходами металлургического производства, имеют хорошие экранирующие способности по отношению к гамма-излучению и могут быть использованы для быстровозводимой защиты при выполнении работ в радиационно-опасных условиях.
6. В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований были улучшены радиационно-защитные свойства бессвинцовых стекол (боратных, силикатных, теллуритовых и фосфатных) для использования в качестве радиационной защиты.
7. Модификация стеклянной боратной системы на основе Bi_2O_3 путем добавления соединений La_2O_3 (улучшение оптических свойств), V_2O_3 (улучшение механических свойств) увеличила ее радиационно-защитные свойства на 43%.
8. Теллуритовые стекла имеют более высокую плотность, чем другие стекла, поэтому они обладают хорошими защитными свойствами, но повышенной стоимостью по сравнению с другими типами стекла.
9. Разработанные новые составы стекол (боратных, силикатных, теллуритовых и фосфатных) для экранирования от гамма-излучения могут быть использованы как альтернатива традиционным радиационно-защитным стеклам на основе свинца.

10. Наилучшая экранирующая способность и приемлемая стоимость достигнуты для образцов G5 (на основе боратных стекол) и NSP50 (на основе силикатных стекол).

11. Природные минералы Республики Египет и исследованные сплавы могут быть использованы для дополнительного экранирования радиоактивных отходов, размещаемых в защитном контейнере с соблюдением требований радиационной безопасности при хранении.

12. Результаты оценки стоимости более двухсот составов радиационно-защитных стекол представляют собой полезную базу данных для оптимизации радиационной защиты отдельных частей конструкций ОИАЭ, обеспечивающих визуальный контроль, а также для исследователей в данной области.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в развитии следующих направлений:

- оптимизация состава дополнительного экранирующая защитных контейнеров для размещения РАО, в том числе с использованием низкоактивных металлических РАО;
- расчетно-экспериментальные исследования полимерных радиационно-защитных материалов.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Mahmoud K.A. Comparative studies between the shielding parameters of concretes with different additive aggregates using MCNP-5 simulation code / **К.А. Mahmoud**, M.I. Sayyed, O.L Tashlykov // Radiation Physics and Chemistry. – 2019. – V. 165, – P. 108426. 0,98 п.л./0,49 п.л. (Scopus, WoS)
2. Mahmoud K.A. Gamma ray shielding characteristics and exposure buildup factor for some natural rocks using MCNP-5 code / **К.А. Mahmoud**, M.I Sayyed, O.L Tashlykov // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – V. 51, №. 7, – P. 1835-1841. 0,86 п.л./0,43 п.л. (Scopus, WoS)
3. Mahmoud K.A. Investigation of radiation shielding properties for some building materials reinforced by basalt powder / **К.А. Mahmoud**, O. L Tashlykov, A. F. El

Wakil, H.M.H Zakaly, I.E El-Aassy // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2174, – P. 020036. 0,47 п.л./0,21 п.л. (Scopus, WoS)

4. Mahmoud K.A. Aggregates grain size and press rate dependence of the shielding parameters for some concretes / **K.A Mahmoud**, O.L Tashlykov, A.F. El-Wakil, I.E El-Aassy // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – V. 118, – P. 103092. 0,81/0,41 п.л. (Scopus, WoS)

5. Mahmoud K.A. Gamma ray shielding capacity and buildup factors of CdO doped lithium borate glasses: theoretical and simulation study / **K.A Mahmoud**, F.I El-Agwany, Y.S. Rammah, O.L Tashlykov // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – V. 541, – P.120110. 0,48 п.л./0,21 п.л. (Scopus, WoS)

6. Mahmoud K.A. The role of cadmium oxides in the enhancement of radiation shielding capacities for alkali borate glasses / **K.A Mahmoud**, O.L Tashlykov, M.I Sayyed, E Kavaz // Ceramics International. – 2020. – V. 46, – №. 15, – P. 23337-23346. 0,84 п.л./0,42 п.л. (Scopus, WoS)

7. Mahmoud K.A. Application of the Monte Carlo simulation method to simulate the radiation shielding capacity of Lithium tungstate composites / **K.A Mahmoud**, O. L Tashlykov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2313, – P. 030060. 0,46 /0,23 п.л. (Scopus, WoS)

8. Rammah Y.S. Tm³⁺ ions doped phosphate glasses: Nuclear shielding competence and elastic moduli / Y.S. Rammah, **K.A. Mahmoud**, F.I. El-Agawany, O.L Tashlykov, E Yousef // Applied Physics A: Materials Science and Processing. – 2020. – V. 126, – №. 12, – P. 927. 0,86 п.л./0,43 п.л. (Scopus, WoS)

9. Sayyed M.I. Application of the MCNP 5 code to simulate the shielding features of concrete samples with different aggregates/ M.I. Sayyed, **K.A. Mahmoud**, S. Islam, O.L. Tashlykov, E. Lacomme, K.M. Kaky // Radiation Physics and Chemistry. – 2020. – V. 174, – P. 108925. 0,98 п.л./ 0,49 п.л. (Scopus, WoS)

10. Mahmoud K.A. Investigation of the gamma ray shielding properties for polyvinyl chloride reinforced with chalcocite and hematite minerals / **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov, E. Lacomme, M.I. Sayyed, Ö.F. Özpolat // Heliyon. – 2020. – V. 6, – №. 3, P. e03560. 0,75 п.л./0,37 п.л. (Scopus, WoS)

11. Bantan R.A.R. Application of experimental measurements, Monte Carlo simulation and theoretical calculation to estimate the gamma ray shielding capacity of various natural rocks / R.A.R. Bantan, M.I. Sayyed, **K.A. Mahmoud**, Y. Al-Hadeethi // *Progress in Nuclear Energy*. – 2020. – V. 126, – P. 103405. 0,710 п.л. / 0,40 п.л. (Scopus, WoS)
12. El-Agawany F.I. The radiation-shielding properties of ternary $\text{SiO}_2\text{--SnO--SnF}_2$ glasses: Simulation and theoretical study / F.I. El-Agawany, O.L. Tashlykov, **K.A. Mahmoud**, Y.S. Rammah // *Ceramics International*. – 2020. – V. 46, – №. 15, – P. 23369-23378. 0,86 п.л./0,43 п.л. (Scopus, WoS)
13. Ташлыков О.Л. Расчетно-экспериментальное исследование местных минералов и композиций на их основе для создания радиационных защит хранилищ радиоактивных отходов АЭС / О.Л. Ташлыков, **К.А. Махмуд** // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2020. – V. 28-30, – С. 57-66. 0,64 п.л./0,32 п.л.
14. Mahmoud K.A. The influence of BaO on the mechanical and gamma/fast neutron shielding properties of lead phosphate glasses / **K.A. Mahmoud**, F. I. El-Agawany, O.L. Tashlykov., E.M. Ahmed, Y.S. Rammah // *Nuclear engineering and technology*. – 2021. – V.53. – №.11. – P.3816-3823. 1,1 п.л/0,45 п.л. (Scopus, WoS)
15. Sayyed M.I. Enhancement of shielding capability of soda-lime-glasses by replacing SiO_2 with Sb_2O_3 : A potential material for radiation safety in nuclear / M.I. Sayyed, **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov, M.U. Khandaker, M.R.I. Faruque // *Applied Science*. – 2021. – V.11, – №.1, – P.326. 1,22 п.л./0,61 п.л. (Scopus, WoS)
16. Rammah Y.S. Gamma ray exposure buildup factor and shielding features for some binary alloys using MCNP-5 simulation code / Y.S. Rammah, **K.A. Mahmoud**, F.Q. Mohammed, M.I. Sayyed, O.L. Tashlykov, R. El-Mallawany // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2021. – V. 53, – №. 8, – P. 2661-2668. 0,86 п.л./0,43 п.л. (Scopus, WoS)
17. **Mahmoud K.A.** A new heavy-mineral doped clay brick for gamma-ray protection purposes / **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov, M.H.A. Mhareb, A.H. Almuqrin, Y.S.M. Alajerami, M.I. Sayyed // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2021. – V. 173, – P. 109720. 0,76 п.л./0,38 п.л. (Scopus, WoS)

18. Kurtulus R. A lanthanum-barium-borovanadate glass containing Bi_2O_3 for radiation shielding applications / R. Kurtulus, M.I. Sayyed, T. Kavas, **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov, M.U. Khandaker, D.A. Bradley // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2021. – V. 186, – P. 109557. 1,12 п.л./0,46 п.л. (Scopus, WoS)
19. Tashlykov O.L. Tailor Made Barium Borate Doped Bi_2O_3 Glass System for Radiological Protection / O.L. Tashlykov, M.I. Sayyed, **K.A. Mahmoud**, M.U. Khandaker, D.A. Bradley, S.G. Vlasova // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2021. – V. 187, – P. 109558. 0,86 п.л./0,33 п.л. (Scopus, WoS)
20. Tashlykov O.L. Repercussions of Yttrium oxides on radiation shielding capacity of sodium-silicate glass system: Experimental and Monte Carlo simulation study / O.L. Tashlykov, S.G. Vlasova, I.S. Kovyazina, **K.A. Mahmoud** // *The European Physical Journal Plus*. – 2021. – V. 136, – №. 4, – P. 428. 0,92 п.л./0,36 п.л. (Scopus, WoS)
21. **Mahmoud K.A.** Assessment of mechanical and radiation shielding capacity for a ternary $\text{CdO-BaO-B}_2\text{O}_3$ glass system: A Comprehensive Experimental, Monte Carlo Simulation, and Theoretical Studies / **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov, A.H. Almuqrin, M.I. Sayyed, S.G. Vlasova // *Progress in nuclear energy*. – 2022. – V.146, – P. 104169. 0,82 п.л / 0,32 п.л. (Scopus)
22. Koubisy M.S.I. Synthesis, FTIR, and mechanical as well as radiation shielding characteristics in Nd_2O_3 -doped bismuth lithium borate glasses / M.S.I. Koubisy, M. Afifi, **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov, A.F. Zatsepin, A.H. Almuqrin, M.I. Sayyed // *Ceramics International*. – 2022. – V. 48, – №. 9, – P.12829-12837. 0,84 п.л / 0,35 п.л. (Scopus)
- Другие публикации:**
23. Махмуд К.А. Исследование радиационно-защитных свойств строительных материалов, армированных базальтовым порошком / **К.А. Махмуд**, О.Л. Ташлыков, А.Ф. Елвакил, Е.Е.Еласси, Б.Х. Али, Х.М.Н Закали // VI Международная молодежная научная конференция, посвященная 70-летию основания Физико-технологического института (ФТИ-2019), 20-24 мая 2019 г - Екатеринбург, УрФУ, – 2019, – С. 729-730. 0,11 п.л / 0,05 п.л.
24. Mahmoud K. A. Application of the Monte Carlo code to simulate the radiation shielding capacity of lithium tungstate composites / **K.A. Mahmoud**, O.L. Tashlykov

// VII Международная молодежная научная конференция, посвященная 100-летию Уральского федерального университета (ФТИ-2020), 18-22 мая 2020 г- Екатеринбург, УрФУ, – 2020, – С. 88-89. 0,13 п.л / 0,09 п.л.

25. Hanfi M.Y. The role of Er_2O_3 in the TeO_2 -ZnO glass system: mechanical and gamma-ray shielding characteristics / M.Y. Hanfi, S.N. Nazrin, M.K. Halimah, **K. Mahmoud** // VIII Международная молодежная научная конференция (ФТИ-2021), 17-21 мая 2021- Екатеринбург, УрФУ, – 2021, – С.117-118. 0,12 п.л /0,09 п.л.

26. Махмуд К.А. Расчетные исследования радиационно- защитных свойств природных минералов Египта / **К.А. Махмуд**, О.Л. Ташлыков // Международная научно-техническая школа-семинар по ядерным технологиям для молодых учёных, специалистов, студентов и аспирантов, Екатеринбург, 17-21 сентября 2019 г. Екатеринбург, – 2019, – С. 34-35. 0,13 п.л / 0,1 п.л.