

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

На правах рукописи



АЛЬСАФИ ХАНИН МАХМУД ДЖАБЕР

**Расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных
свойств композитов на основе природных минералов Республики Ирак**

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2026

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 доктор технических наук, профессор
Ташлыков Олег Леонидович

Официальные оппоненты: **Жидков Иван Сергеевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий
кафедрой 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, доцент, Акционерное
общество «Эридан», Свердловская область, г.
Березовский, инженер-конструктор группы
«Системные решения».

Защита состоится «28» мая 2026 г. в 12:00 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?d=12&rid=8441>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. На протяжении всей истории освоения человеком атомной энергии и других радиационных технологий вопросы обеспечения радиационной безопасности всегда были проблемной областью. По мере накопления статистических данных о влиянии облучения на человека вырабатывались новые подходы к минимизации доз облучения, пересматривались нормы радиационной безопасности в сторону их ужесточения. Вопросам обеспечения радиационной безопасности посвящены значительное количество работ многих ученых мира. В связи с этим не представляется возможным выделить кого-либо персонально. Даже краткое перечисление выдающихся ученых, внесших значительный вклад в решение данной проблемы, заняло бы не одну страницу.

Одним из основных принципов радиационной безопасности является нормирование. Предел дозы облучения за год, установленный в 1956 г. (для персонала 50 мЗв)¹, был снижен в 1990 г. в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) (Публикация 60)² в 2,5 раза. Поскольку радиационная защита, как и другие практические задачи, подчиняется «закону убывающей эффективности», требуется оптимизация радиационной защиты. Отсутствие наблюдаемой пороговой дозы и ограниченность доступных ресурсов явились основанием для разработки принципа ALARA (As Low As Reasonably Achievable - «настолько низко насколько разумно достижимо»).

Среди способов снижения дозы облучения (сокращение времени воздействия излучения, увеличение расстояния между источником излучения и работником, уменьшение интенсивности радиационного параметра) наиболее распространенным является экранирование с помощью радиационно-защитного материала (РЗМ).

В последние годы наблюдается бурный рост внимания ученых к разработке новых РЗМ с хорошими защитными свойствами и низкой токсичностью, что подтверждается анализом публикаций. По данным базы Scopus за период с 2020 г. по февраль 2026 г. опубликовано 13031 статей в области материалов для защиты от ионизирующего излучения.

¹ ICRP, 1959. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford, UK.

² Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публикация 60 МКРЗ: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1994. 207 с

Учитывая требования ICRP (Publication 103³) по усилению принципа оптимизации применительно к планируемым условиям облучения, особо следует выделить актуальность исследований радиационно-защитных свойств композитных РЗМ, разработанных на основе местных природных минералов в странах, где сооружаются объекты использования атомной энергии (ОИАЭ), для оценки потенциала их использования в составе радиационной защиты объектов.

Исследования в данном направлении ведутся в УрФУ около 20 лет под научным руководством профессора, доктора технических наук Ташлыкова О.Л. За этот период проведены расчетно-экспериментальные исследования по различным РЗМ в сотрудничестве с учеными многих стран: д-р Mohammad Ibrahim Abu-Alsayyed (Иордания), Mohammad Wasef Marashdeh and Mohammed Hassan Abu-Mhareb (Саудовская Аравия), Islam Nabil, Fawzy Hammad Sallem (Республика Египет), Nasser KA (Индия), Kawa Kaky (Ирак), Daria Tishkevich (Беларусь) и др. Проведены комплексные расчетно-экспериментальные исследования природных минералов и композитов, разработанных на их основе, Египта (Махмуд Карем Абделаазим Габер), Иордании (Аладаилах Мутаз Валид Али), Вьетнама (Та Ван Тхыонг), защищены диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Как показали проведенные исследования, использование местного природного сырья при сооружении объектов ядерной техники, включая хранилища радиоактивных отходов (РАО), имеют значительный потенциал в сокращении затрат на их сооружение.

Для Республики Ирак актуальность таких исследований дополнительно возрастает в связи с необходимостью ликвидации последствий значительного радиоактивного загрязнения территории страны в результате военных действия с использованием боеприпасов с обедненным ураном, а также разрушения исследовательских ядерных реакторов. Значимость этих исследований резко возрастает в связи с ограниченностью финансовых ресурсов страны.

Данное исследование направлено на решение этих проблем путем разработки инновационных материалов для защиты от радиации с использованием местных иракских природных ресурсов – песка, глины для создания трех категорий материалов, защищающих от гамма-излучения: легированное свинцом и титаном стекло, композиты на основе эпоксидной смолы и кальцинированной глины. Обоснование использования иракских природных минералов обусловлено как практическими, так и научными соображениями.

³ ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

Эти доступные, дешевые и высокоэффективные материалы могут быть использованы для сооружения хранилищ низкорадиоактивных отходов, значительное количество которых образовалось при использовании урановых боеприпасов, а также для ликвидации последствий бомбардировки ИЯР. Учитывая, что Ирак является одной из стран с большим количеством территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению остатками войны. Стратегической целью Министерства водных ресурсов Ирака является обеспечение водоснабжения удалённых территорий. Это иногда противоречит решениям Министерства окружающей среды Ирака, которое приостанавливает работы на некоторых радиационно-загрязнённых территориях в целях обеспечения безопасности. Использование разработанных защитных материалов представляет собой практичный и эффективный вариант, позволяющий продолжить реализацию жизненно важных проектов без ущерба для безопасности работников и населения.

Разработка новых РЗМ с высокой защитной способностью является актуальной задачей развития атомной энергетики и применения радиационных технологий, отвечающих приоритетным направлениям научно-технического и технологического развития Российской Федерации – Раздел 8: Энергоэффективность, энергосбережение и атомная энергетика.

Целью диссертационной работы является разработка новых эффективных и приемлемых по стоимости радиационно-защитных материалов на основе природных минералов Республики Ирак для использования при сооружении биологической защиты объектов ядерной техники, включая хранилища РАО, и других радиационно-опасных объектов.

Объект исследования – радиационная безопасность объектов ядерной техники.

Предмет исследования – радиационно-защитные свойства природных минералов Республики Ирак и композитных радиационно-защитных материалов, изготовленных на их основе.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обзор и анализ состояния радиационной безопасности объектов ядерной техники и субъектов Республики Ирак.
2. Подбор месторождений природных ресурсов, наиболее перспективных для рассматриваемой области исследования, сбор минералов и их транспортировка из Ирака в УрФУ.

3. Проведение комплексных расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных характеристик природных минералов Республики Ирак для оценки потенциальной возможности их использования в радиационной защите объектов ядерной техники, в том числе при обращении с радиоактивными отходами.
4. Разработка состава, технологии производства, изготовление образцов и проведение расчётно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств стекла из иракского песка
5. Разработка состава, технологии производства, изготовление образцов и проведение расчётно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств композитных РЗМ на основе матрицы из эпоксидной смолы с наполнителем в виде глины.
6. Разработка состава, технологии производства, изготовление образцов и проведение расчётно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств композитных РЗМ на основе матрицы из глины, в том числе с наполнителем в виде промышленных отходов.
7. Проведение расчётно-экспериментальных исследований влияния давления и температуры в процессе изготовления на радиационно-защитные свойства образцов на основе матрицы из глины.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведены комплексные расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных характеристик природных минералов Республики Ирак для оценки потенциальной возможности их использования в радиационной защите объектов ядерной техники, в том числе при обращении с радиоактивными отходами.
2. Разработаны новые рецептуры стекол, в том числе бессвинцовых, на основе песка из месторождений Республики Ирак (провинция Анбар), изготовлены образцы и проведены расчетно-экспериментальные исследования их радиационно-защитных свойств.
3. Впервые разработаны составы, изготовлены образцы и проведены расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств композитных РЗМ на основе полимерной матрицы (эпоксидной смолы) с наполнителями в виде природных минералов Республики Ирак.
4. Впервые разработаны составы, изготовлены образцы и проведены расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств композитных РЗМ, изготовленных на основе двух видов глины из

месторождений Республики Ирак, в том числе с добавками промышленных отходов (стекольных и гранитных).

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Результаты исследований радиационно-защитных свойств природных минералов Республики Ирак будут использованы для оценки их потенциального применения при сооружении радиационной защиты объектов ядерной техники, хранилищ радиоактивных отходов и ликвидации последствий разрушения ядерных реакторов Тувайтского исследовательского центра.

- Результаты расчётно-экспериментальных исследований зависимости радиационно-защитных свойств образцов от давления и температуры могут быть использованы при организации промышленного производства защитных блоков на основе матрицы из глины.

- Результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния добавок тяжелых металлов в стеклянную матрицу на основе иракского песка на радиационно-защитные свойства могут быть использованы при разработке и производстве стекла на основе песка Республики Ирак.

- разработанная и апробированная методология проведения расчетно-экспериментальных исследований будет использована в качестве основы при проведении исследований других минералов и композитных радиационно-защитных материалов на их основе.

- Результаты оценки положительного влияния различных наполнителей на радиационно-защитные свойства композитов, изготовленных на основе местных природных минералов Республики Ирак, позволяют в определенной мере решать задачу утилизации промышленных отходов.

Методология и методы диссертационного исследования.

В диссертационной работе использовались современное оборудование и методы экспериментальных исследований: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) использовалась для изучения микроструктуры и состава образцов; химический состав анализировался с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДАКС); кристаллические структуры образцов определялись методом рентгеновской дифракции; Фурье-преобразовательная инфракрасная спектроскопия позволила идентифицировать функциональные группы и межмолекулярные химические связи, а также наблюдать изменения в материале. Результаты экспериментальных измерений защитных характеристик образцов были подтверждены теоретическими расчетами с помощью программного обеспечения XCOM, основанного на базе данных ядерной библиотеки Национального института стандартов и технологий (NIST), а также

моделированием методом Монте-Карло с использованием кода MCNP-5 и базы данных ядерной библиотеки ENDF/B-VI.

Личный вклад автора заключается в выборе и обосновании направлений исследований; подборе месторождений, сборе, транспортировке природных иракских минералов в Россию, подготовке их к исследованию; изготовлении образцов радиационно-защитных материалов (РЗМ), разработке экспериментальных методик; непосредственном участии в научных экспериментах; разработке установок; математической обработке экспериментальных данных; компьютерном моделировании с использованием метода Монте-Карло; подготовке публикаций, докладов на конференциях, научно-технических семинарах; обсуждении результатов работы с организациями, занимающимися созданием/внедрением разработанных технологий. Все представленные материалы были получены автором лично или в соавторстве.

Положения, выносимые на защиту:

1. Актуальность использования местных природных минералов и композитных материалов, изготовленных на их основе, для сооружения радиационной защиты объектов ядерной техники, хранилищ радиоактивных отходов, ликвидации последствий радиоактивного загрязнения территорий Республики Ирак.

2. Результаты диссертационной работы определяют потенциальную возможность использования местных природных минералов при сооружении радиационной защиты объектов ядерной техники, хранилищ радиоактивных отходов Республики Ирак.

3. Композитные РЗМ на основе матрицы из глины с использованием в качестве наполнителя гранитного и стеклянного порошка, имеют значительный потенциал в снижении стоимости биологической защиты при сооружении хранилищ для радиоактивных отходов в Республике Ирак.

4. Композитные РЗМ на основе матрицы из эпоксидной смолы с наполнителем в виде глины позволяют создавать защитное покрытие с высокими защитными и гидроизоляционными свойствами для несущей строительной конструкции хранилищ РАО.

5. Использование песка из месторождений Республики Ирак позволяет производить стекла, в том числе без содержания свинца, с высокими радиационно-защитными свойствами и более низкой себестоимостью, чем зарубежные аналоги.

Степень достоверности полученных результатов базируется на всестороннем анализе ранее выполненных работ по предмету исследования, использовании современных исследовательских инструментов, методов моделирования и расчета, проверенного программного обеспечения, современных поверенных приборов и измерительных комплексов, хорошей сходимости 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 9-ти конференциях, в том числе: The 15th International Symposium on Radiation Physics «ISRP-15», Kuala Lumpur, Malaysia, 6 - 10 December 2021; Международная конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных «РНИКС-2021», г. Екатеринбург; 27 сентября - 1 октября 2021; XXXIII Российская молодёжная научная конференция с международным участием «Проблемы теоретической и экспериментальной химии», г. Екатеринбург, 2023; X Международная молодежная научная конференция Физика. Технологии. Инновации «ФТИ-2023», г. Екатеринбург, 15 – 19 мая 2023 г; International Conference on Sustainable Technologies in Civil and Environmental Engineering «ICSTCE, 22023», Pune, India, 15 – 16 June 2023; IX Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» «BICMM-2023», г. Байкальск, 11–14 сентября 2023; Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2023», г. Екатеринбург, 25- 28 сентября 2023 г; XI Международная молодежная научная конференция Физика. Технологии. Инновации. «ФТИ-2024», г. Екатеринбург, 20 – 25 мая 2024 г.; XXI-я Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», г. Волгодонск, 23-24 октября 2025 г.

Соответствует паспорту специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность:

п.2 – Разработка методик экспериментальных методик и экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники;

п.3 – Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения

надежности оборудования и систем и обеспечения их ядерной и радиационной безопасности;

п.6 – Разработка методов обоснования ядерной и радиационной безопасности и экологической приемлемости технологий и объектов ядерной техники;

п.7– Разработка методов проведения исследований, проектирования, а также научно-обоснованных технических решений в области атомного реакторостроения, машин, агрегатов, технологии материалов атомной промышленности.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 8 опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации и Аттестационным советом Уральского федерального университета, и проиндексированных в международных базах цитирования WoS и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений/обозначений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 181 страницах, включая 55 рисунков, 19 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 148 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 представлены основные этапы развития ядерной науки и техники Ирака, от создания Тувайтского исследовательского центра до разрушения ядерных объектов в результате военных действий. Анализ состояния радиационной обстановки показали, что во всех регионах Ирака обнаружено более 300 территорий, загрязненных радиоактивными веществами, имеющими различное происхождение, которые представляют прямую угрозу для здоровья населения. В настоящее время Ирак сталкивается с проблемами в обращении с РАО, образовавшимися за десятилетия ядерных исследований, а также в результате разрушения объектов ядерной техники и применения боеприпасов с обедненным ураном во время военных действий. В районе, прилегающем к разрушенному реактору, удельная активность Cs-137 и Co-60 достигает 15 и 10 кБк/кг, соответственно. Международные инспекции неоднократно указывали на

проблемы длительного хранения бочек с РАО, изготовленных из углеродистой стали, на открытой площадке, что привело к ускоренному разрушению металла и повышенному риску миграции загрязнителей в почву.

Для стабилизации ситуации правительством предложен ряд мер, основными из которых являются организация временных бетонных модулей хранения и подготовка проекта по созданию централизованного хранилища для РАО Ирака. Ускорению реализации этих мер способствует снижение стоимости сооружения таких объектов за счет максимально возможного использования местных природных минералов в составе РЗМ. Ирак обладает природными ресурсами, которые могут быть использованы в составе РЗМ (например, глина, песок). При проведении автором диссертации расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств этих материалов использован опыт УрФУ при проведении аналогичных работ для Египта, Иордании и Вьетнама.

Во второй главе приведено описание материалов, экспериментальных установок, методов моделирования, компьютерных программ, использованных в ходе диссертационной работы, технологий изготовления образцов радиационно-защитных композитов (стекло, полимер и кальцинированная глина), а также методик исследования их характеристик.

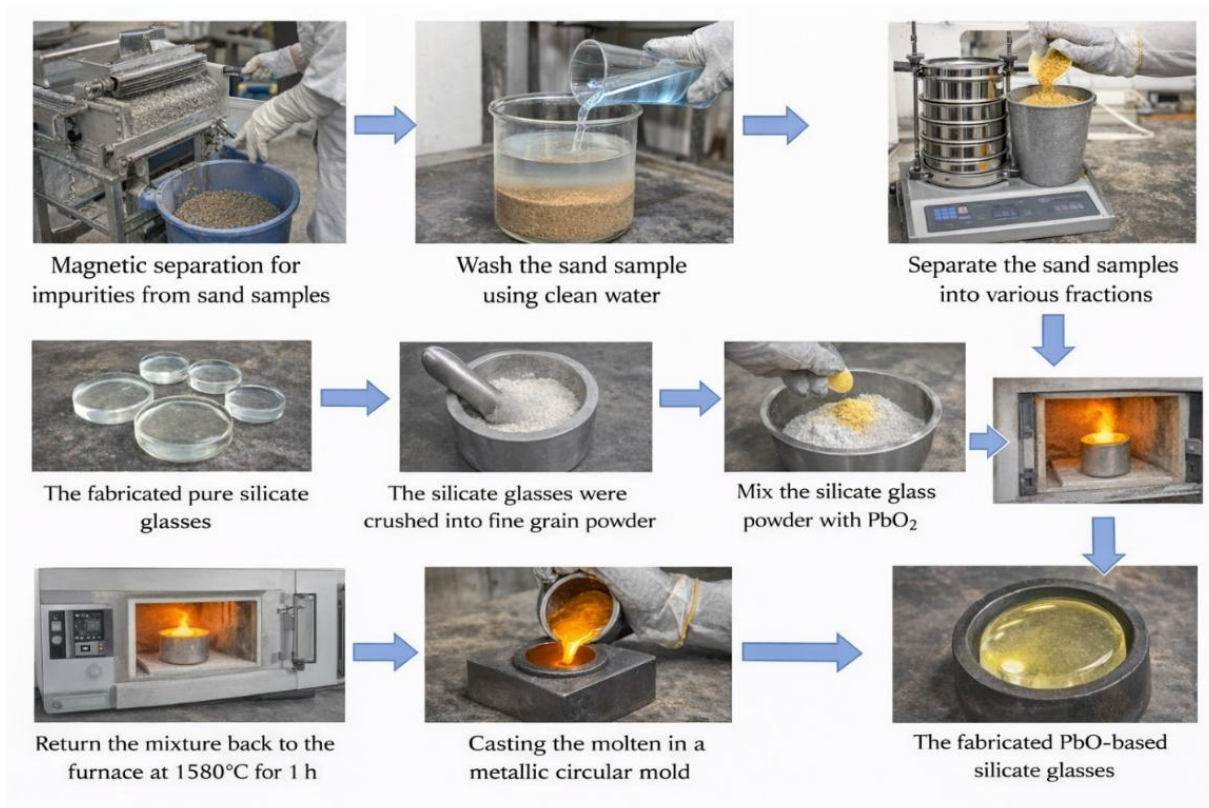


Рисунок 1. Процессы изготовления стекол на основе PbO_2 и TiO_2 , начиная с получения необработанного иракского белого песка

Для изготовления двух серий стекла использовался иракский белый песок, из провинции Анбар (район Рамади), в западной пустыне Ирака. В первой серии образцов в качестве добавки был использован PbO , во второй – TiO_2 (рис. 1).

Для изготовления полимерных композитов на основе глины (рис. 2) и композитов на основе кальцинированной глины (рис. 3) использовались минералы из различных регионов Ирака, отличающиеся по химическому составу и стоимости. Глине, взятой из провинции Вавилон присвоено название «глина 1», глине, собранной в мухафазе Дивания, – «глина 2».

Выбор глины из месторождения провинции Вавилон (глина 1) для исследования обусловлен ее составом и пластичностью, что делает ее пригодной для нанесения покрытий и изготовления композиций на основе кальцинированной глины. Образцы глины 2 отобраны из-за ее более широкого распространения и более низкой цены по сравнению с глиной 1.

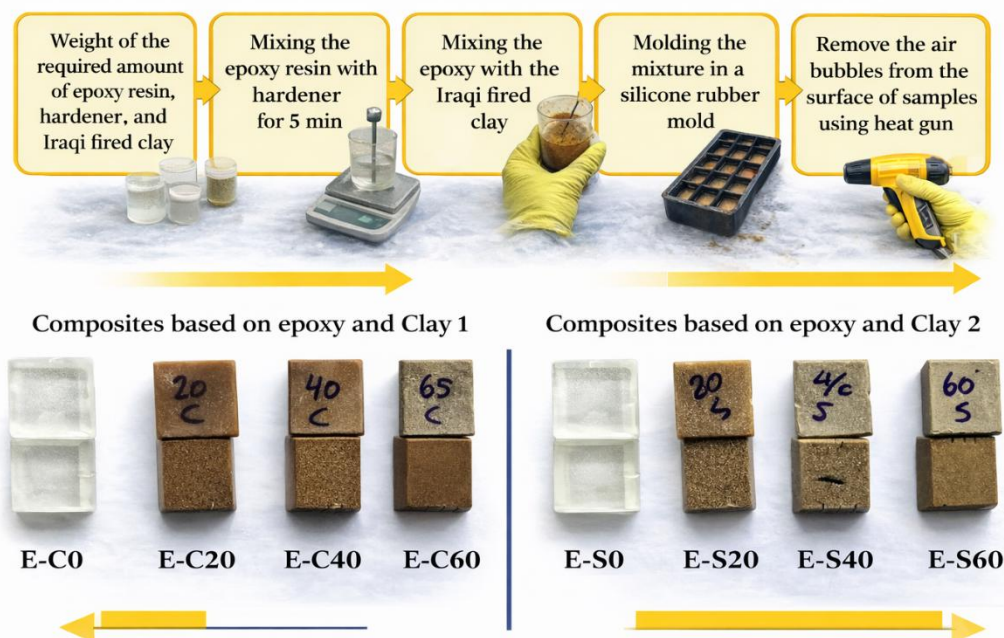


Рисунок 2. Получение полимеров на основе эпоксидной смолы и глины 1 и глины 2

Полимерные композиты на основе эпоксидной смолы и глины слабо поглощают гамма-излучение высоких энергий, однако обладают высокой механической прочностью, термической и химической стойкостью. Существенным преимуществом этих композитов является возможность их использования в качестве гидроизоляционного покрытия на стенах и полах хранилищ РАО, выполненных из бетона или кальцинированной глины. Эти полимерные композиты также могут быть полезны для решения проблемы нехватки водных ресурсов в Ираке, предотвращая утечку воды из каналов.

Для анализа морфологии, топографии, элементного химического состава и однородности разработанных материалов использовался сканирующий

электронный микроскоп (СЭМ) Tescan MIRA3 (СЭМ, Брно, Чехия), рис. 4. Исследования с помощью СЭМ проводились при содействии В. Ю. Яркова. Изображения получены при напряжении электронного пучка 30 кВ.

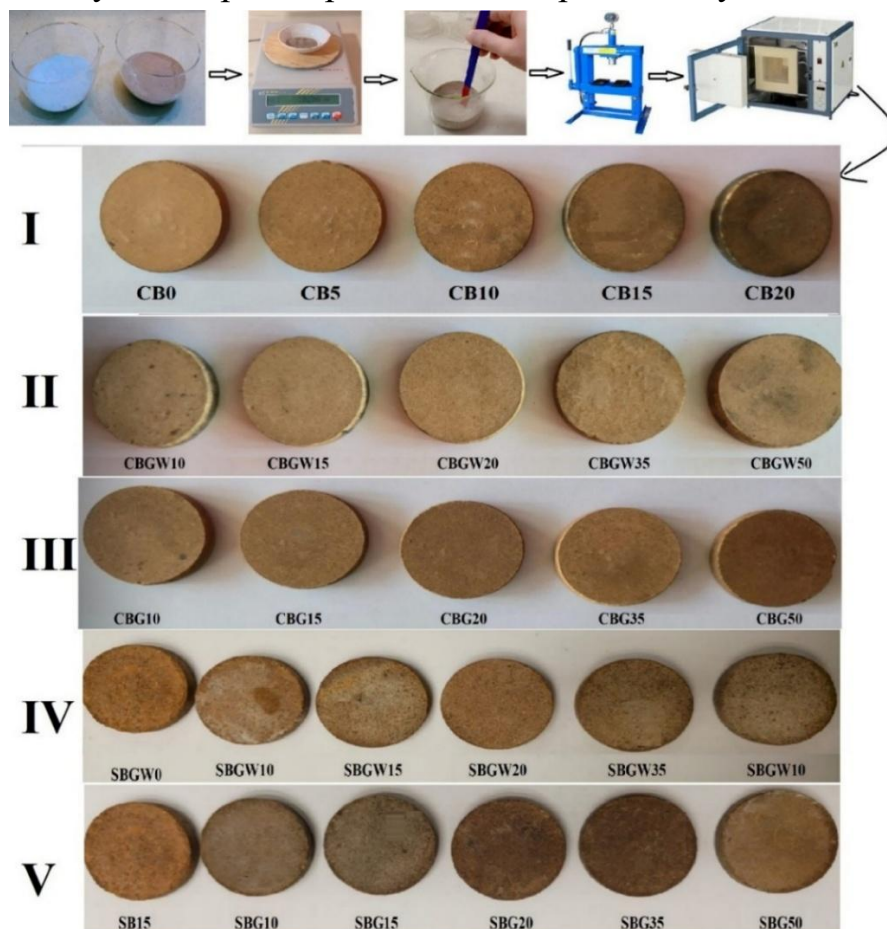


Рисунок 3. Технологические процессы изготовления образцов на основе глины, отходов стекла и гранита.



Рисунок 4. сканирующий электронный микроскоп MIRA3 (СЭМ, МИРА, Чехия).



Рисунок 5. Рентгеновская дифракционная машина Shimadzu (XRD-6000)

Кристаллическая структура материалов была определена с помощью рентгеновского дифрактометра (Shimadzu, XRD-6000) – рис. 5. Рабочее напряжение и ток рентгеновской трубки, подключенной к дифрактометру,

составляли 40 кВ и 30 мА соответственно. Диапазон сканирования был расширен до интервала 2θ от 10° до 80° с шагом $0,04^\circ$. Рентгенодифракционный анализ разработанных материалов проводился автором диссертации в Центре экологических исследований Технологического университета (Багдад, Ирак).

Экспериментальное определение линейного коэффициента ослабления. Гамма-дифракционный анализ исследуемых образцов проводился в Египетском управлении по ядерным материалам (Каир) с использованием спектрометров, оснащенных двумя детекторами NaI (Tl) (рис. 6). Линейный коэффициент ослабления определялся по закону Ламберта-Бера. Интенсивность гамма-излучения, испускаемого источником, регистрировалась детектором как без защитного материала I_o , так и после прохождения через исследуемые образцы (I_t). Узкий пучок формировался с помощью свинцового коллиматора. Толщина исследуемых материалов x измерялась микрометром с точностью $\pm 0,001$ мм. Зависимость $\ln(I_o/I_t)$ от толщины материала определялась по формулам:

$$LAC \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_o}{I_t} \right) \quad (1)$$

$$\Delta LAC = \frac{1}{x} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_o}{I_o} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_t}{I_t} \right)^2 + \ln \left(\frac{I_o}{I_t} \right)^2 \left(\frac{\Delta x}{x} \right)^2} \quad (2)$$

Слой половинного ослабления изготовленных образцов HVL (см) определяет толщину подготовленных образцов, которая уменьшает интенсивность потока прошедших фотонов (I_t) до 50% от I_o . Для определения HVL подготовленных образцов использовалось уравнение 3.

$$HVL(\text{cm}) = \frac{\ln(2)}{LAC(\text{cm}^{-1})} \quad (3)$$

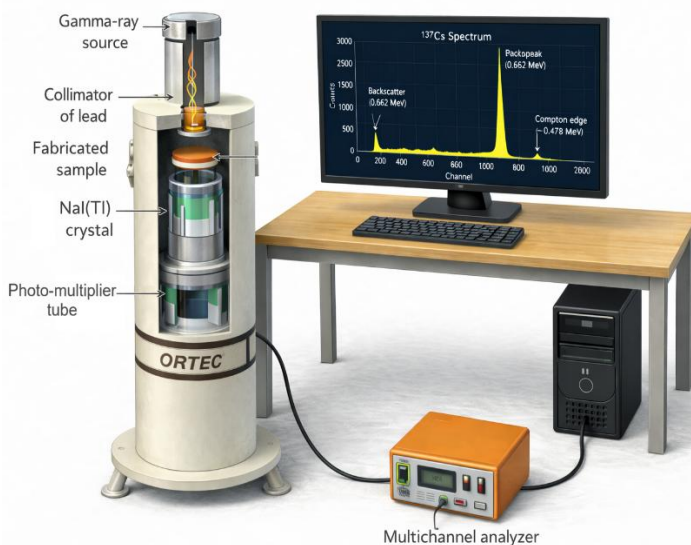


Рисунок 6. Установка с детектором NaI(Tl)

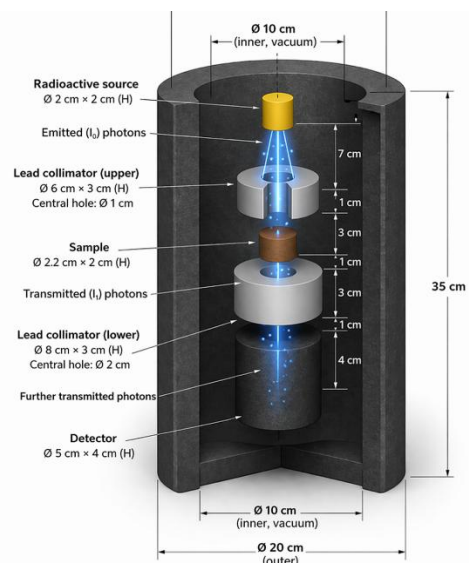


Рисунок 7. 3D геометрия, использованная в моделировании с помощью кода MCNP-5

Моделирование линейного коэффициента ослабления разработанных стекол проводилось с помощью кода MCNP-5, поддерживаемого базовыми библиотеками ENDF/B-VI.8, содержащими сечения взаимодействия гамма-фотонов (ICS) практически со всеми химическими элементами в выбранном диапазоне энергий гамма-излучения. Входной файл (рис. 7) содержал все необходимые данные, относящиеся к геометрии (радиоактивный источник, внешний защитный материал, коллиматоры, образцы и детектор).

В третьей главе представлены результаты расчётно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств композитных материалов, разработанных на основе природных минералов Республики Ирак (песка, глины 1 и глины 2).

Свинцовое силикатное стекло, изготовленное из богатых кремнием иракских песков, обладает хорошими защитными свойствами. При энергии гамма-излучения 0,662 МэВ слой половинного ослабления стекла с содержанием 35 мас.% PbO и коммерческого защитного стекла RS323G19 равны и составляют 2,48 см (рис. 8). Стоимость изготовления стекол на основе иракского песка примерно на 30% ниже стоимости коммерческого защитного стекла RS323G19.

Разработанные образцы стекол с добавлением 12 мас.% TiO₂ имеют слой половинного ослабления на 7% меньше, чем у коммерческих защитных стекол RS253 и RS253G18 при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ. Стоимость изготовления стекол с TiO₂ на 31% ниже, чем у стекол RS253 и RS253G18.

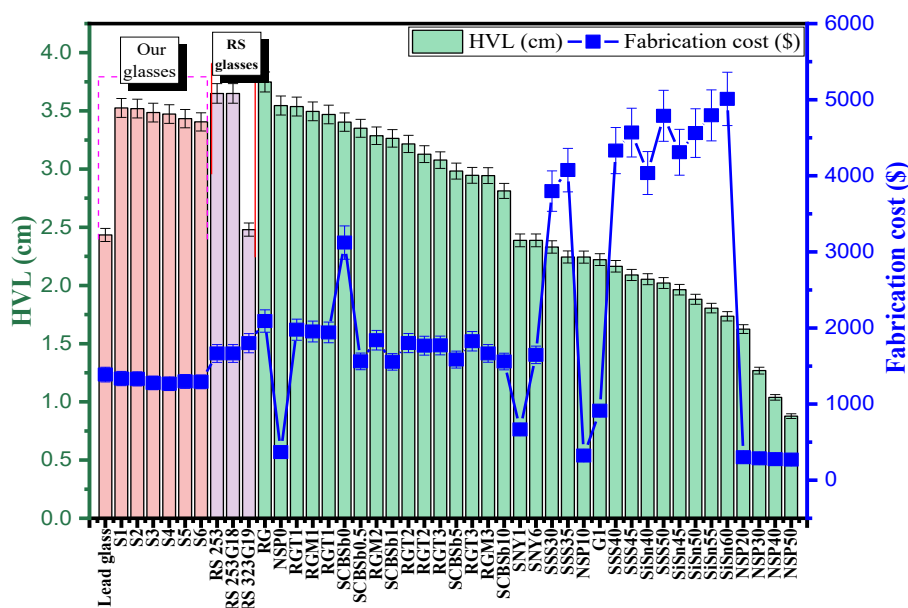


Рисунок .8. Толщины слоя половинного ослабления (HVL, см) и себестоимость (\$) разработанных образцов стекла по сравнению с аналогичными материалами в других типах силикатного стекла по данным научных источников

В главе также представлены результаты исследования радиационно-защитных свойств полимерных композитов на основе эпоксидной смолы с добавлением глины 1 и глины 2. Как показано на рис. 9, при энергии 662 кэВ значения HVL для E-C0, E-C20, E-C40, E-C60, E-S20, E-S40 и E-S60 равны 7,65, 6,92, 6,38, 5,55, 7,18, 6,79 и 6,04 см, соответственно. Полученные результаты показывают, что добавление глины 1 и глины 2 в количестве 60 мас.% в состав композита на основе эпоксидной смолы уменьшает слой половинного ослабления при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ на 28% и 21%, соответственно. Стоимость изготовления полученных композитов на основе глины 1 и глины 2 практически одинакова (рис. 9).

Значения HVL для разработанных образцов E-C60 и E-S60 выше, чем значения HVL для выбранных композитов 4W4B (3,96 см), 5W3B (3,38 см), 6W2B (2,92 см), 7W1B (2,31 см), EW-50m (3,71 см), EW-40m-10n (3,47 см), ERB-2 (5,35 см), ER-SnO 40% m (4,84 см), ER-SnO 40% n (4,53 см), ER-SnO 40%(m+n) (4,44 см), ER-SnO 60% m (3,77 см), ER-SnO 60% (3,32 см) и ER-SnO 60%(m+n) (3,28 см) (рис. 10). Меньшие значения HVL в сравниваемых композитах объясняется высокой концентрацией дорогостоящих и плотных соединений WO_3 и SnO в виде нано- и микрочастиц.

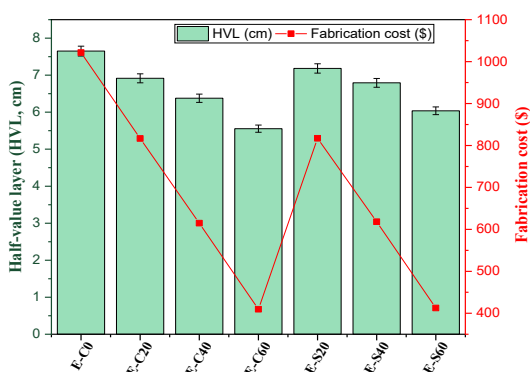


Рисунок 9. Слой половинного ослабления (HVL, см) и стоимость изготовления (\$) композитов на основе эпоксидной смолы

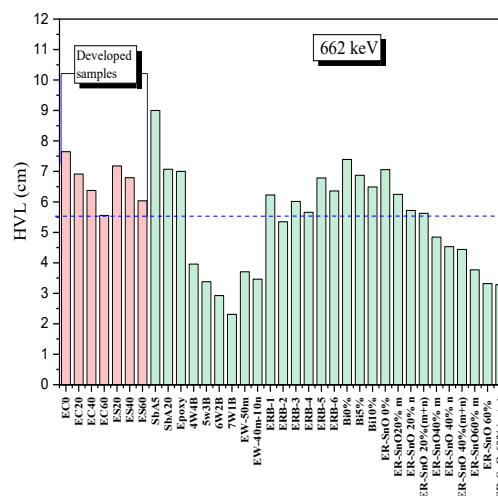


Рисунок 10. Сравнение слой половинного ослабления HVL (см) разработанных эпоксидных глины 1 и 2 с другими эпоксидными компаундами

В третьей главе также рассмотрены радиационно-защитные свойства композитов с матрицей на основе глины 1 и 2, изготовленных с добавлением борной кислоты, отходов стекольного производства и гранита. Значительным преимуществом этих композитов является получение прочной структуры композита при температурах термобработки примерно 500 °C (кальцинированная глина) вместо 1000 °C для получения керамической

структуры. При этом затраты на электроэнергию (в условиях опытного изготовления образцов) снижаются в 2-2,5 раза. Это значительно снижает стоимость производства композитов. Для обожженной (кальцинированной) глины 1 с добавками B_2O_3 (20 мас.%) слой половинного ослабления для гамма-квантов при энергии 0,662 МэВ увеличивается на 11%, (рис. 11). Для той же энергии не происходит существенного уменьшения слоя половинного ослабления композита из кальцинированной глины 1 или глины 2 с добавлением отходов стекла.

Слой половинного ослабления композитов на основе кальцинированной глины 1 и глины 2 с добавками гранита в количестве 50 мас.% уменьшается для гамма-излучения при энергии 0,662 МэВ на 18% и на 32%.

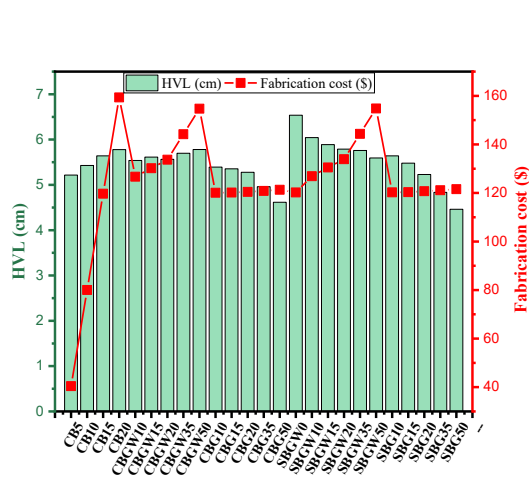


Рисунок 3.11. Сравнение значений слой половинного ослабления HVL и стоимости изготовления всех разработанных композитов на основе минералов глины 1 и глины 2.

Среди разработанных композитов из обожженной глины (рис. 12) SBG50 имеет наименьший HVL (4,46 см) при энергии 0,662 МэВ, наибольшее значение HVL имеет образец SBGW0 (6,54 см). Значение HVL для образца SBG50 меньше, чем значения HVL, указанные для композитов на основе вьетнамских белой и красной глин, полученных Та Ван Тхыонг⁴. С другой стороны, значение HVL для SBG 50 выше, чем значения HVL, указанные для R.C+30%PbO (3,18 см), R.C+30%Bi₂O₃ (3,05 см), R.C+30%Bi₂O₃+30%CdO (3,52 см), R.C.+30% (3,00 см), Porc-1 (3,75 см), Porc-2 (3,57 см), Porc-3 (3,43 см), Porc-4 (3,27 см) и (Porc-5 3,12

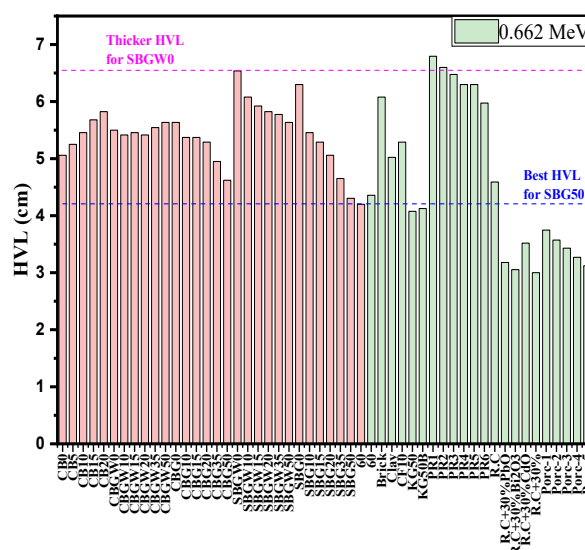


Рисунок 12: Сравнение значений слой половинного ослабления HVL разработанной глины с HVL других кальцинированных глин, выбранных по литературным данным.

⁴ Ta Van Thuong, Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. Novel bricks based lightweight Vietnam's white clay minerals for gamma ray shielding purposes: An extensive experimental study. Nuclear Engineering and Technology 56 (2024) 666–672 <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.11.002>

см), соответственно. Меньшие значения HVL этих образцов объясняются высоким содержанием в них дорогостоящих PbO , CdO , CuO , и Bi_2O_3 .

В качестве примера оценки применимости разработанных композитов для сооружения защиты при хранении РАО (цезий-137 и кобальт-60 суммарной активностью $1,48 \cdot 10^{12}$ Бк) было проведено моделирование защитного контейнера (рис. 13) с использованием метода Монте-Карло (MCNP-5). Для защитного ограждения контейнера (хранилища) использовались комбинации композитов на основе глин 1 и 2 с добавлением гранита (основной слой 40 см) и композитов на основе эпоксидной смолы с добавлением глины (слой гидроизоляции 10 см).

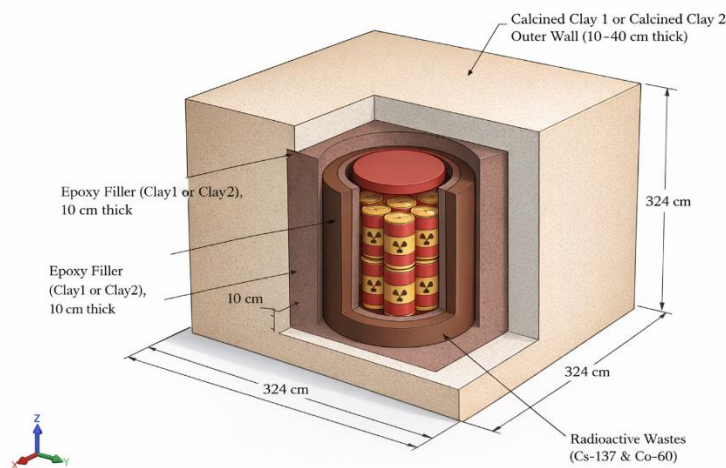


Рисунок 13. 3D-модель контейнера для радиоактивных отходов

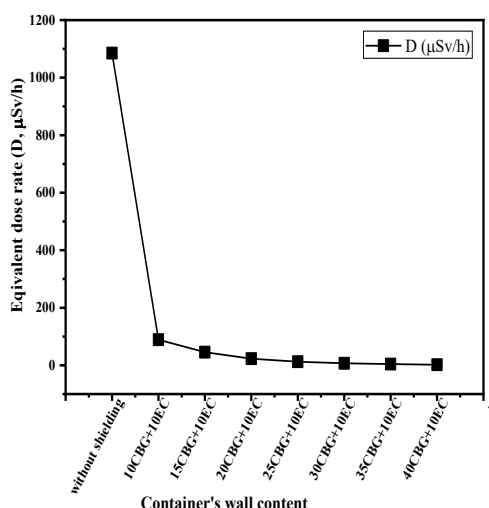


Рисунок 14. Эквивалентная мощность дозы (D, мкЗв/ч) от разработанного контейнера, рассчитанная на основе содержания обожженной глины 1 и глины на основе эпоксидной смолы 1.

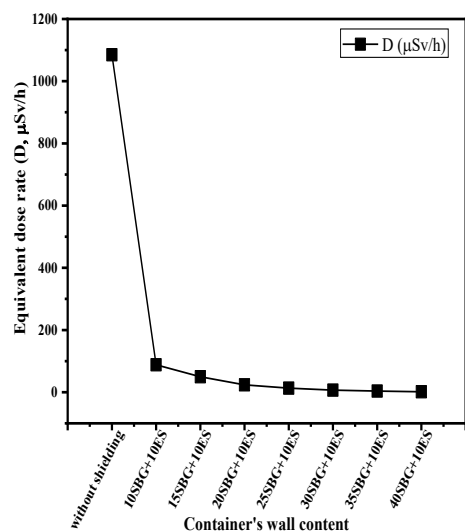


Рисунок 15. Эквивалентная мощность дозы (D, мкЗв/ч) от разработанного контейнера, рассчитанная на основе содержания обожженной глины 2 и глины 2 на основе эпоксидной смолы.

Комбинации композитов CBG50 (глина 1 с содержанием 50 мас% гранита) и E-S60 (эпоксидная смола с содержанием 60 мас% глины 1) обеспечивают снижение эквивалентной мощности дозы от радиоактивных отходов до 1,85 мкЗв/ч (Рис. 14); SBG50 (глина 2 с содержанием 50 мас% гранита) и E-S60 (эпоксидная смола с содержанием 60 мас% глины 2) – до 1,47 мкЗв/ч (рис. 15). Значение эквивалентной мощности дозы от радиоактивных отходов без экранирования в той же точке детектирования составляет 1085 мкЗв/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время Ирак сталкивается с серьезными проблемами в обращении с РАО, образовавшимися за десятилетия ядерных исследований, а также в результате разрушения объектов ядерной техники и применения боеприпасов с обедненным ураном во время военных действий, которые представляют угрозу для здоровья населения. Условия хранения РАО ухудшились, контейнеры подверглись коррозии. Для стабилизации ситуации правительством Ирака предложен ряд мер, включая сооружение временных бетонных модулей для хранения и подготовку проекта по созданию централизованного хранилища для РАО. Результаты диссертационных исследований новых радиационно-защитных материалов, разработанных на основе природных минералов, свидетельствуют о значительном потенциале снижения затрат при их использовании для сооружения хранилищ РАО, что особенно актуально в условиях ограниченных финансовых ресурсов Ирака.

В результате выполненной работы получены следующие результаты:

1. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств композитов (стекло, полимер, обожженная (кальцинированная) глина)), изготовленных на основе природных минералов Ирака показали, что они имеют значительный потенциал в их использовании при сооружении хранилищ для локализации РАО.
2. Разработанные и изготовленные образцы стекла на основе иракского песка и соединений PbO (≈ 35 мас.%) имеют одинаковые с коммерческими защитными стеклами RS323G19 слои половинного ослабления (2,48 см), при меньшей на 30% стоимости изготовления стекол (при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ).
3. Разработанные и изготовленные образцы стекла на основе иракского песка и соединений TiO₂ (≈ 12 мас.%) имеют слой половинного ослабления на 7% меньше и стоимость изготовления стекол на 31% ниже, чем коммерческие защитные стекла RS253 и RS253G18, при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ.
4. Разработанные и изготовленные образцы полимерных композитов на основе эпоксидной смолы с добавлением глины 1 и глины 2 могут быть

использованы в качестве гидроизолирующего слоя, наносимого на поверхность основной защиты. Увеличение (до 60 мас.%) концентрации глины 1 и глины 2 в композитах на основе эпоксидной смолы уменьшает их слой половинного ослабления на 28% и 21%, соответственно, при одинаковой примерно стоимости изготовления.

5. Добавлении B_2O_3 (до 20 мас.%) при изготовлении образцов РЗМ на основе глины 1 и глины 2 привело к увеличению слоя половинного ослабления на 11% при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ, но позволило получать плотные, однородные защитные материалы с меньшими затратами на изготовление за счет более низких температур термообработки.

6. При энергии гамма-излучения 0,662 МэВ не происходит существенного уменьшения слоя половинного ослабления или снижения стоимости изготовления композита из обожженной глины 1 или глины 2 с добавлением отходов стекла. Однако, данные композитные материалы могут быть востребованы, как способ утилизации отходов стекольной промышленности.

7. При увеличении содержания гранита до 50 мас.% в образцах разработанных радиационно-защитных материалов на основе кальцинированной (обожжённой) глины 1 и глины 2, слой половинного ослабления при энергии гамма-излучения 0,662 МэВ уменьшается на 18% (глина 1) и на 32% (глина 2).

8. Результаты моделирования в качестве примера защитного контейнера для хранения РАО (цезий-137 и кобальт-60) с применением разработанных композитных РЗМ показывают эффективность использования в качестве радиационной защиты разработанных композитов на основе глин 1 и 2 с добавлением гранита (основной слой 40 см) и композитов на основе эпоксидной смолы с добавлением глины (слой гидроизоляции 10 см) глины.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в развитии следующих направлений: исследование прочностных характеристик разработанных композитных РЗМ для использования в строительстве, оптимизация состава РЗМ и параметров технологических процессов производства строительных блоков для хранилищ РАО в промышленных масштабах, оптимизация геометрических характеристик блоков, оценка оптимальных объемов хранилищ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Albarzan B. The influence of titanium dioxide on silicate-based glasses: an evaluation of the mechanical and radiation shielding properties / B Albarzan, M.Y

- Hanfi, A.H Almuqrin, M.I Sayyed, **H.M Alsafi**, K. A Mahmoud // Materials. - 2019. - V.14, №.12 - Pp. 3414. 0,85/0,21 п.л (Scopus, WoS)
2. Al-Saeedi F.H.F. Fabrication, characterization, and gamma-ray shielding performance for the lead-based Iraqi white silicate glasses: A closer examination / Al-Saeedi F.H.F, **H. M Alsafi**, O. L. Tashlykov, M. I Sayyed, H Al-Ghamdi, E. V Kolobkova, F.L. Kapustin, Aljawhara H. Almuqrin, K. A Mahmoud // Optik. -2022.- V.260. - Pp. 169103. 0,68/0,2 п.л. (Scopus, WoS)
 3. Sayyed M. I. Effects of MoO₃ on the structural, physical, mechanical, optical, and ionizing shielding of borate-germanate-telluride glass system. / M. I Sayyed, M.H.A. Mhareb, M.K. Hamad, A.J. Kadhim, **H.M. Alsafi**, K.A Mahmoud, K.M. Kaky // Ceramics International. — 2024. — Vol. 50, № 22. — Pp. 46008-46017. 1.05 п.л./0,33 п.л (Scopus, WoS), (Q1)
 4. Marashdeh, M. W. Boosting the thermal properties and gamma-ray protection performance of epoxy-based fired Iraqi clay: Experimental and theoretical evaluation. / M.W. Marashdeh, **H.M. Alsafi**, O.L. Tashlykov, K.A Mahmoud // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. - 2025. - Vol. 18, № 4. - Pp. 101925. 1,00 п.л./0,33 п.л. (WoS), (Q2)
 5. **Alsafi H.M.** Sustainable ceramics for gamma-ray protection applications, employing inexpensive natural clay and recycled glass waste. / **H.M. Alsafi**, M.W. Marashdeh, O.L. Tashlykov, K.A. Mahmoud. // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. — 2025. — Vol. 10, № 4. — Pp. 101027. 1,30 п.л./0,33 п.л. (Scopus, WoS), (Q1)
 6. **Alsafi H.M.** Developing a new light weight material-based epoxy reinforced by soil for γ -ray protection applications: Detailed examinations for structural, thermal, and γ -ray shielding properties. / **H.M. Alsafi**, M. W. Marashdeh, O.L. Tashlykov, K.A. Mahmoud. // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2026. 1,09 п.л./0,33 п.л. (Scopus, WoS), (Q2)
 7. Alsafi H.M. Enhancing the structural, morphological, and radiation shielding properties of calcined soil using granite and boric acid. / **H. M. Alsafi**, Mohammad W. Marashdeh, O.L. Tashlykov, K. A. Mahmoud. // The European Physical Journal Plus. — 2026. — Vol. 141, № 2. — Pp. 190. 1,70 п.л./0,33 п.л. (Scopus, WoS), (Q2)
 8. Alsafi H.M. New calcined soil with boric acid and glass waste additive for radiation protection purposes: Experimental investigations for morphological, structural, and gamma-ray attenuation properties. // **H. M. Alsafi**, Mohammad W. Marashdeh, V.Yu Yarkov, O.L. Tashlykov, K. A. Mahmoud. // Ceramics International. — 2026. 1,47 п.л./0,33 п.л. (Scopus), (Q1)

Другие публикации:

9. Azeez A. J. Determining the radium concentration in vegetables and fruits in Al-Najaf, Iraq // A. J Azeez, , A.A Marzaali, A.A Abojassim, H.A.A.B Mraity, M.D Shareef, **H Alsafi** // Journal of Animal and Feed Research. — 2022. — Vol. 12, № 4. — P. 217-221. 0,56 п.л./0,33 п.л. (Scopus, WoS)
10. Albayati, S.A. Laser Cladding Treatment to Enhance the Corrosion Resistance and Surface Hardness by Electrophoretic Coatings to A283 Steel / S.A Albayati, A. Bahari, H.A Hussien, **H.M Alsafi**, A. Aljelif, M. Mousavi, S. Soufian // Diyala Journal of Engineering Sciences. — 2022. — Vol. 15, № 4. — P. 52-61. 0,52 п.л./0,20 п.л.
11. Kadhim A.Y. Assessment the health Risks of Radionuclides ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K that influencing on Wheat: Case study in Al-Qadisiyah, Iraq. / A.Y Kadhim, M.G Al-Ghrabi, **H.M Alsafi** // E3S Web of Conferences. -2023. -Vol. 405. - P. 02021. 0,69 п.л./0,43 п.л. (Scopus)
12. Mahmoud K.A. Investigation of the radiation shielding properties for ZnO and NiO and their based composites. / K.A. Mahmoud, **H. Alsafi**, O.L Tashlykov, A.M. Abouelsoad // Nexus Future Materials. — 2025. — Vol. 1. — P. 86-91. 0,34 /0,13 п.л.
13. Mushnikov, N. V. Interrelation between Crystal and Magnetic Structures in $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ Compounds. Physics of Metals and Metallography. / N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, P.B. Terentyev, V.S. Gaviko, **H.M Alsafi**, M.A. Semkin, A. N Pirogov. // Physics of Metals and Metallography. — 2025. — Vol. 126, № 3. — P. 248-255. 0,69 п.л./0,50 п.л. (Scopus, WoS)
14. Mahmoud K.A. Structural and Mechanical Characterization of $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-Fe}_2\text{O}_3$ Glasses Modified With ZnO Combined With Monte Carlo Simulation of the Photon Interaction Parameters. / K.A. Mahmoud, Mon Bryan Z. Gilic, **H.M. Alsafi** // Nexus Future Materials. — 2026. — Vol. 3. — P. 294-301. 0,79 п.л./0,50
15. **Alsafi H. M.** Ferro-antiferromagnetic transition driving by Tb-Mn interaction / **H. M. Alsafi**, P. A. Borisova, V. P. Glazkov, E. G. Gerasimov. // В сборнике: Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2021), Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г. Тезисы докладов. – Екатеринбург, 2021. – С. 75–76. (0,0725/0,018 п.л.)
16. **Alsafi H. M.** ferro-antiferromagnetic transformation $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ at low temperatures / **H. M. Alsafi**, A.N. Pirogov // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2022: тезисы докладов IX Международной молодежной научной конференции, Екатеринбург, 16-20 мая 2022 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – С. 187–188. (0,0789 п.л. / 0,0394 п.л.)
17. **Alsafi H. M.** Magnetic structure of $\text{Tb}(\text{Ni}_{0.9}\text{Mn}_{0.1})_2\text{Si}_2$ / **H. M. Alsafi**, E.G. Gerasimov, A.E. Teplykh, P.B. Terentev, N.V. Mushnikov, A.N. Pirogov // VIII Euro-

- Asian Symposium «Trends in Magnetism» EASTMAG–2022, August 22–26, 2022, Kazan. Book of abstracts. Volume II. – Казань, 2022. – С.206 (0,0653/0,0109 п.л.)
18. **Alsafi H. M.** Magnetic structures in $(\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Mn}_2\text{Si}_2$ / P.A. Borisova, V.P. Glazkov, **H. M. Alsafi**, E.G. Gerasimov, A.E. Teplykh, P.B. Terentev, N.V. Mushnikov, A.N. Pirogov // VIII Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» EASTMAG–2022, August 22–26, 2022, Kazan, Russia. BOOK OF ABSTRACTS. VOLUME II. – Казань, 2022. – С. 181–182. (0,0836 п.л. / 0,0105 п.л.)
19. **Alsafi H. M.** Crystal stricture and magnetic transition in $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ compounds / **H. M. Alsafi**, E. G. Gerasimov, P. A. Borisova, V. P. Glazkov, E. V. Dujeva, A.N. Pirogov. // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тез. докл. XXXIII Рос. молодеж. науч. конф. с международ. участием, посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. В. Ф. Барковского, Екатеринбург, 24–27 апр. 2023 г. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2023. – С. 181–182. (0,0872/ 0,012 п.л.)
20. **Alsafi H. M.** The effect of Tb and Mn on the interchange interaction for $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ and $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ / **H. M. Alsafi**, E. G. Gerasimov, P. A. Borisova, V. P. Glazkov, E. V. Dujeva, A.N. Pirogov. // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2023: тезисы докладов X Международной молодежной научной конференции, Екатеринбург, 15–19 мая 2023 г. – Екатеринбург : УрФУ, Издательство АМБ, 2023. – С. 128–129. (0,0757 п.л. / 0,0126 п.л.)
21. **Alsafi H. M.** Neutron diffraction studies of $\text{La}_{1-x}\text{Y}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ compound: evidence of dominant antiferromagnetic components within the Mn planes / **H. M. Alsafi**, E. G. Gerasimov, A. N. Pirogov. // В сборнике: Магнитные материалы. Новые технологии. Материалы IX Байкальской Международной конференции. Байкальск, 2023 г. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2023. – С. 198. (0,0375/0,0125 п.л.)
22. **Alsafi H. M.** Magnetic structure $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$, when $x=0.6$ and 0.8 / **H. M. Alsafi**, E. G. Gerasimov, P.B. Terentev, P. A. Borisova, V. P. Glazkov, E. V. Dujeva, N.V. Mushnikov, and A.N. Pirogov. // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2023), Тезисы докладов, г. Екатеринбург, 25–28 сентября 2023 г. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2023. – С. 118. (0,0815 п.л. / 0,0102 п.л.)
23. **Альсафи Х.М.** Разработка керамики на основе иракского грунта с добавлением борной кислоты и отходов стекла для защиты от гамма-излучения / **Х.М. Альсафи**, О.Л. Ташлыков, К.А. Махмуд. // XXI Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики»: тезисы докладов. Волгодонск, 23 октября 2025 г. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2025. – С. 10–11. (0,157 п.л. / 0,053 п.л.)

Список принятых сокращений

ОИАЭ – объект использования атомной энергии

РЗМ – радиационно-защитный материал

РАО – радиоактивные отходы

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия

HVL – слой половинного ослабления