

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

Уральский энергетический институт
Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»



На правах рукописи

Та Ван Тхыонг

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ ВЬЕТНАМА**

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Ташлыков Олег Леонидович

Екатеринбург – 2024 г.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Прежде всего, я хотел бы выразить свою сердечную благодарность и признательность моему научному руководителю, профессору д-ру Ташлыкову Олегу Леонидовичу, консультантам по диссертации: профессору д-ру Щеклеину Сергею Евгеньевичу; научному сотруднику Карему Махмуду и моим коллегам по кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии за их постоянную поддержку.

Я хотел бы выразить свою благодарность моим дорогим родителям, моим братьям, родственникам и друзьям за их неизменную поддержку и вдохновение моими научными достижениями.

Я начал процесс обучения в Российской Федерации в 2013 году, сейчас уже прошло более 10 лет. Всю свою юность я провел в России, где получил много знаний, в том числе о культуре. За время обучения я очень вырос профессионально, приобрел практические и коммуникативные навыки, как и умение работать в команде. За все это я очень благодарен родному Уральскому федеральному университету (УрФУ)! Можно сказать, что я закалился Уральскими морозами!

Обещаю, что когда вернусь во Вьетнам, я всегда буду прилагать усилия для развития дружественных отношений между Вьетнамом и Российской Федерацией в целом, а также между вьетнамскими научно-исследовательскими организациями и Уральским федеральным университетом в частности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЯДЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВЬЕТНАМА	15
1.1 Общие сведения	15
1.2 Условия для развития атомной энергетики во Вьетнаме	16
1.2.1 Спрос на электроэнергию Вьетнама быстро растет.....	16
1.2.2 Подготовка к развитию атомной энергетики.....	18
1.2.3 Подготовка площадки для строительства АЭС.....	21
1.2.4 Урановый потенциал Вьетнама.....	26
1.2.5 Инвестиции и финансы	27
1.3 Создание ядерной инфраструктуры	28
1.3.1 Руководство МАГАТЭ по развитию ядерной инфраструктуры.....	29
1.3.2 Миссии МАГАТЭ по комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР)	33
1.4 Ситуация с развитием ядерной инфраструктуры во Вьетнаме.....	34
1.4.1 Период до 2009 г.	34
1.4.2 Период 2010–2015 гг.	35
1.4.3 Период после 2016 г.	41
1.5 Основные пути возникновения радиационных нагрузок на персонал АЭС.....	44
1.6 Заключение и рекомендации.....	49
1.7 Основные выводы к главе 1	53
ГЛАВА 2 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ КАМЕННЫХ МИНЕРАЛОВ ВЬЕТНАМА.....	55
2.1 Общие сведения	55
2.2 Материалы и методы	56
2.2.1 Сбор, подготовка камней и исследование их физических свойств	56
2.2.2 Оценка экранирующих свойств образцов камней.....	59
2.2.3 Определение химического состава образцов камней Вьетнама	63
2.2.4 Моделирование методом Монте-Карло и теоретическая оценка экранирующей способности образцов.....	65
2.3 Результаты и обсуждение.....	69
2.3.1 Физические и химические свойства	69
2.3.2 Анализ радиационно-защитных характеристик	72

2.4 Выводы главы 2.....	86
ГЛАВА 3 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НОВЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРАСНОЙ И БЕЛОЙ ГЛИНЫ ВЬЕТНАМА	87
3.1 Общие сведения	87
3.2 Материалы и методы исследования	89
3.2.1 Изготовление новых образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама под различным давлением и их характеристика.....	89
3.2.2 Экспериментальная оценка экранирующих свойств образцов от γ -излучения	91
3.3 Результаты и их обсуждение.....	93
3.3.1 Исследование минералогического состава	93
3.3.2 Физические свойства изготовленных композитов	94
3.3.3 Исследования защитных свойств от гамма-излучения....	96
3.3.4 Исследование химического состава образцов глины Вьетнама с помощью электронного микроскопа	113
3.3.5 Оценка радиационно-защитных характеристик образцов глины Вьетнама с помощью программы ХСОМ.....	116
3.3.6 Сравнение с другими результатами.....	118
3.4 Выводы главы 3.....	121
ГЛАВА 4 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРАСНОЙ И БЕЛОЙ ГЛИНЫ ВЬЕТНАМА С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ	123
4.1 Общие сведения	123
4.2 Материалы и методы исследования	126
4.2.1 Изготовление образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама с наполнителем в виде промышленных металлических отходов и их характеристика.....	126
4.2.2 Экспериментальная оценка характеристик ослабления γ - излучения.....	128
4.3 Результаты и обсуждение.....	130
4.3.1 Образцы из красного глинистого минерала.....	130
4.3.2 Образцы из белого глинистого минерала.....	143
4.4 Выводы главы 4.....	159
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ОТДЕЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВЬЕТНАМА	161
5.1 Основная информация о проекте Центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ) Вьетнама	161

5.1.1 Общие сведения	161
5.1.2 Цели и задачи проекта ЦЯНТ Вьетнама	165
5.1.3 Географическое положение проекта ЦЯНТ	166
5.1.4 Основные объекты ЦЯНТ	168
5.1.5 Технологии и основные характеристики нового ИЯР Вьетнама	171
5.2 Подготовка руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама	174
5.2.1 Общие требования к ОВОС для ИЯР	174
5.2.2 Методы, применяемые при ОВОС	177
5.2.3 Регулирующие органы и правовая основа для подготовки и экспертизы отчета по ОВОС	179
5.2.4 Формат и содержание Руководства по подготовке и экспертизе отчета по ОВОС	184
5.2.5 Вопросы, которые необходимо учитывать в связи с радиологическим аспектом при подготовке и экспертизе отчета об ОВОС	185
5.2.6 Результаты и их обсуждение	192
5.3 Планы и результаты подготовки людских ресурсов в области атомной энергетики Вьетнама до и после останковки проекта АЭС Ниньтхуан	195
5.3.1 Резюме результатов обучения в соответствии с утвержденными проектами по обучению кадров	195
5.3.2 План приема и распределения на работу вьетнамских выпускников в России перед останковкой проекта АЭС Ниньтхуан	196
5.4 Разработка и подготовка к изданию специализированной учебной русско-вьетнамской литературы для подготовки специалистов для атомной отрасли Вьетнама	202
5.4.1 Общие сведения	202
5.4.2 Постановка проблемы	204
5.4.3 Требования к переводным изданиям	206
5.4.4 Методы перевода специальной русско-вьетнамской учебной литературы для подготовки специалистов для атомной отрасли Вьетнама	207
5.5 Выводы к главе 5	219
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	222
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	225
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	228

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы. С 2011 г. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) включила в свой стратегический план приоритет «выявление и поощрение исследований, необходимых для поддержки радиологической защиты». Радиационная безопасность, в первую очередь, касается персонала объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) и пациентов, проходящих лучевую диагностику и терапию.

С учетом расширяющейся практики, связанной с радиацией, в течение последних нескольких десятилетий в радиационной защите были разработаны система концепции, принципов и методов для снижения радиологических рисков и контроля за ними. Вопросам обеспечения радиационной безопасности и разработке радиационно-защитных материалов (РЗМ) посвящены работы многих российских и зарубежных ученых, даже краткий перечень которых занял бы большую часть данного раздела.

В настоящее время среди способов снижения дозы облучения от источника наиболее широко распространено экранирование. Наиболее значимой практической задачей является защита от фотонного излучения (рентгеновского и гамма-излучения), поскольку организация защиты от α - и β -излучения в подавляющем большинстве случаев не представляет сложности, а воздействие нейтронов на человека возможно только при работающем реакторе. Наиболее эффективны для защиты от γ -излучения экраны из тяжелых материалов (свинец, вольфрам, обедненный уран и т.д.), из которых наиболее распространен свинец. Однако свинец является токсичным веществом, что ограничивает его применение и затрудняет утилизацию РЗМ, содержащих свинец. Кроме того, свинец имеет высокую пластичность, что затрудняет установку вертикальной свинцовой защиты толщиной более 5 мм.

Требованиями, предъявляемыми к РЗМ, являются конструкционная прочность материала, радиационная и термическая стойкость, химическая

инертность, высокая теплопроводность, низкий коэффициент линейного расширения, низкая стоимость, доступность и т.д.). Многие из этих требований противоречивы, и в природе не существует материалов, которые одновременно удовлетворяли бы всем требованиям, хотя можно найти материалы или их комбинации, которые в значительной степени удовлетворяют этим требованиям (оптимизация состава).

В связи с расширяющимися в последние годы масштабами сооружения ОИАЭ, использования радиационных технологий в мире и необходимостью оптимизации затрат на сооружение и изготовление биологической защиты на таких объектах, во многих странах активизировались исследования по поиску и разработке новых нетоксичных композитных бессвинцовых составов с высокими защитными свойствами.

Оценка возможности использования местных природных минералов при сооружении биологической защиты объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) является актуальной задачей, поскольку способствует минимизации затрат на сооружение ОИАЭ. Развитие ядерной энергетики и внедрение радиационных технологий, в том числе в странах, входящих в орбиту деятельности Росатома, относятся к направлениям исследований, реализация которых является высшим приоритетом для развития науки, техники и технологий в РФ (пункт 8 «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика»).

Активное участие России в создании ядерной инфраструктуры и сооружении объектов использования атомной энергии во Вьетнаме вызывает значительную потребность в изучении вьетнамскими специалистами технической, нормативной документации, научных публикаций на русском языке. Владение языком страны-поставщика ядерных технологий является важным фактором повышения уровня профессиональной подготовки вьетнамских специалистов. В связи с этим разработка специализированных русско-вьетнамских словарей и учебных изданий является актуальной задачей. В настоящее время такие издания отсутствуют.

В настоящее время Вьетнам активно сотрудничает с Росатомом (РФ) по развертыванию проекта строительства Центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ) с новым исследовательским ядерным реактором (ИЯР). На данный момент проект находится на стадии выбора подрядчиков для разработки технико-экономического обоснования (ТЭО), в том числе: техническое обследование и оценка площадки, утвержденные в инвестполитике; подготовка отчета по ТЭО, включая базовый дизайн и отчет о предварительном анализе безопасности; подготовка отчета об оценке воздействия на окружающей среде (ОВОС).

Подготовка ОВОС для нового ИЯР Вьетнама является актуальной задачей. Следовательно, разработка руководств по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС является важной задачей для регулирующих органов, подрядчиков и т.п. при реализации проекта. Автор диссертации в составе группы специалистов из Института по атомной энергии Вьетнама (VINATOM – Vietnam Atomic Energy Agency) принимал участие в разработке «Руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС» для проекта ЦЯНТ Вьетнама. Кроме того, анализ перспектив развития атомной энергетики и ядерной инфраструктуры Вьетнама также представлен в этой диссертации.

Целью диссертационной работы является разработка отдельных мероприятий по созданию ядерной инфраструктуры Вьетнама и оценке потенциальной возможности использования местных природных минералов при сооружении радиационной защиты объектов использования атомной энергии во Вьетнаме.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка, изготовление и расчетно-экспериментальное исследование экранирующих свойств радиационно-защитных материалов (РЗМ) на основе красной и белой глины Вьетнама и оценка влияние давления при их изготовлении.

2. Разработка, оптимизация состава и расчетно-экспериментальное исследование экранирующих свойств композитных радиационно-защитных материалов (РЗМ) на основе красной и белой глины Вьетнама с наполнителем в виде промышленных металлических отходов.
3. Оценка потенциальной возможности использования природных минералов Социалистической Республики Вьетнам в составе строительных и радиационно-защитных материалов при сооружении радиационной (биологической) защиты ОИАЭ.
4. Анализ основных требований и применимых методов при проведении оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), правовой базы Вьетнама в области ОВОС; соответствующих руководств МАГАТЭ и ведущих стран мира (РФ, США и др.) в области использования атомной энергии для разработки руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС.
5. Сбор и доставка в УрФУ образцов природных минералов из месторождений Вьетнама.
6. Исследование и оценка условий для развития ядерной энергетики во Вьетнаме и анализ состояния ядерной инфраструктуры Вьетнама, необходимой для строительства первой АЭС и ЦЯНТ.
7. Разработка и издание русско-вьетнамского словаря терминов в области использования атомной энергии и учебника «Основы ядерной энергетики» на русском и вьетнамском языках.

Ряд работ по сбору образцов природной породы Вьетнама и сбору материалов для разработки руководства по подготовке и экспертизе ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама и экспериментальным исследованиям радиационно-защитных свойств вьетнамских природных материалов был проведен автором диссертации во время участия на международной конференции во Вьетнаме, а также в сотрудничестве с Институтом по атомной энергии Вьетнама

(VINATOM), Институтом промышленной экологии УрО РАН в Екатеринбурге (РФ) и Управлением по ядерным материалам в Каире (Египет).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведены расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных характеристик природных минералов Социалистической Республики Вьетнам для оценки потенциала их использования при сооружении биологической защиты объектов использования атомной энергии.
2. Проведены расчетно-экспериментальные исследования и моделирование радиационно-защитных свойств вьетнамских природных минералов с использованием расчетного кода MCNP-5, программы ХСОМ в различных диапазонах энергий γ -излучения.
3. Впервые проведены расчетно-экспериментальные исследования влияния давления при изготовлении новых композитных радиационно-защитных материалов (РЗМ) на основе красных и белых глинистых минералов Вьетнама на их экранирующие свойства.
4. Впервые проведены расчетно-экспериментальные исследования влияния добавок промышленных металлических отходов на радиационно-защитные свойства композитных радиационно-защитных материалов с матрицей в виде красной и белой вьетнамской глины.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- Результаты расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных характеристик природных минералов Социалистической Республики Вьетнам будут использованы при оценке возможности их применения при сооружении биологической защиты объектов использования атомной энергии.
- Результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния давления при изготовлении новых композитных образцов РЗМ на основе красных и белых глинистых минералов Вьетнама на их

экранирующие свойства будут использованы при изготовлении кирпичей для быстровозводимой защиты.

- Результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния добавок промышленных металлических отходов в глиняную матрицу на основе красных и белых глинистых минералов Вьетнама на радиационно-защитные свойства будут использованы при производстве РЗМ для быстровозводимой защиты.
- Результаты анализа состояния ядерной инфраструктуры Вьетнама будут использованы в качестве основы для сравнения, оценки и анализа достигнутых вех и дополнительных условий, необходимых для сооружения ОИАЭ во Вьетнаме.
- Результаты разработки руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама будут способствовать повышению качества экспертизы и объективности оценки, а также эффективной реализации других проектов, связанных с ядерной отраслью Вьетнама в будущем.
- Разработанные «Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике» и русско-вьетнамский учебник «Основы ядерной энергетике» будут использованы при реализации одного из 19 элементов ядерной инфраструктуры (людские ресурсы) путем повышения эффективности подготовки вьетнамских специалистов.

Методология и методы диссертационного исследования.

Экспериментальные исследования радиационно-защитных характеристик материалов проводились с использованием детекторов NaI (Тl), химический состав образцов камней было определено с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Olympus X-5000. Экспериментальные измерения экранирующих свойств были подтверждены теоретическими расчетами с помощью программы XCOM на основе баз данных ядерной библиотеки NIST, а также компьютерного моделирования методом Монте-Карло с использованием расчетного кода MCNP-5 с базой данных ядерной библиотеки ENDF/B-VI. В работе

использованы экспериментальные и теоретические методы исследований, поверенные измерительные приборы и установки (гидравлический пресс SD0821ROSSVIK, цифровой плотномер МН-300А, гамма-радиометр РКГ-АТ1320, рентгеновский дифрактометр Empyrean, электронный микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU и др.). Эпоксидная смола и отвердитель были поставлены компанией SlabDoc (Иваново, Россия). В качестве глинистой матрицы композитов использовались минералы красной и белой глины, собранные во вьетнамской деревне Батчанг, входящей в округ Зялам города Ханой.

Личный вклад автора заключается в выборе и обосновании направлений исследований, разработке экспериментальных методик, в непосредственном участии в выполнении научных экспериментов, изготовлении образцов радиационно-защитных материалов, разработке установок, математической обработке экспериментальных данных, компьютерном моделировании с использованием метода Монте-Карло, подготовке основных публикаций и докладов на российских и международных конференциях. Все представленные материалы получены автором самостоятельно или в соавторстве.

Положения, выносимые на защиту:

1. Влияние давления на экранирующие свойства радиационно-защитных материалов на основе красной и белой глины Вьетнама.
2. Влияние на экранирующие свойства композитных радиационно-защитных материалов на основе красной и белой глины Вьетнама наполнителя в виде промышленных металлических отходов.
3. Результаты расчетно-экспериментальных и теоретических исследований радиационно-защитных свойств природных каменных материалов Вьетнама.
4. Оценка потенциальной возможности использования природных минералов Вьетнама в составе строительных и радиационно-защитных материалов при сооружении биологической защиты ОИАЭ.

5. Результаты разработки отдельных составляющих элементов ядерной инфраструктуры Вьетнама, в том числе: разработка руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама; разработка и подготовка к изданию специализированной учебной русско-вьетнамской литературы для подготовки специалистов для атомной отрасли Вьетнама.

Степень достоверности полученных результатов базируется на всестороннем анализе ранее выполненных работ по предмету исследования, обеспечивается использованием известных, зарекомендовавших себя методов моделирования и расчета, проверенного программного обеспечения, поверенных и аттестованных контрольно-измерительных приборов, современных средств и методов проведения исследований, 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 диссертационной работы докладывались и обсуждались на 16-ти научно-технических конференциях, в том числе: Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», г. Екатеринбург (2020, 2022, 2023); III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и автоматизация в современном обществе», г. Санкт-Петербург (2020); VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург (2021); IX Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург (2022); XVII Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2021», г. Обнинск (2021); XVIII Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2022», г. Обнинск (2022); Научно-техническом семинаре «Вклад академической

и вузовской науки в формирование кадрового потенциала Госкорпорации Росатом», г. Заречный (2022); Шестом всемирном конгрессе «Альтернативная энергетика и экология» (WCAEE-2022), Montenegro, Budva (2022); XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”, Rostov-on-Don (2022); VI Международной (XIX Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск», г. Обнинск (2023); Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk (2023); X Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург (2023); Vietnam Conference on Nuclear Science and Technology (VINANST-15), Nha Trang (2023); Nuclear Education Week & International Youth Nuclear Forum OBNINSK NEW, Obninsk (2023).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования представлены в 20-ти публикациях, из них 6 статей в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 1 статья опубликована в рецензируемом научном издании, рекомендованном ВАК РФ; 13 публикаций в сборниках тезисов и трудов международных и российских научных конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений/обозначений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 240 страницах, включая 86 рисунков, 19 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 165 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЯДЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВЬЕТНАМА

1.1 Общие сведения

Энергия – фундаментальный компонент инфраструктуры. Энергия играет очень важную роль в общей стратегии социально-экономического развития страны в период индустриализации и модернизации. Развитие энергетики должно быть основано на макроэкономической долгосрочной перспективе и в соответствии с принципами 3Е: экономическое развитие (Economic Development), энергетическая безопасность (Energy Security) и защита окружающей среды (Environmental Protection).

Адекватное и надежное энергоснабжение, особенно электричество, необходимо не только для экономического развития, но и для социально-политической стабильности страны. Острая нехватка энергии, как сейчас, так и в будущем, часто приводит к нестабильности и потенциальным конфликтам внутри стран и между ними. Следовательно, обеспечение безопасной и надежной энергии по разумной цене является важным политическим, экономическим и социальным требованием, а также проблемой.

После аварии на АЭС «Фукусима-дайти» в Японии в 2011 году многие страны были обеспокоены будущим развития атомной энергетики в мире. Однако в целях диверсификации источников энергии, многие страны, по-прежнему, считают атомную энергию основным источником энергии с большой мощностью, стабильностью и надежностью для работы в непрерывном фоновом режиме в энергосистеме, без образования парниковых газов, с удобными условиями поставки и хранения топлива, поэтому она по-прежнему составляет значительную долю в структуре источников энергии ядерных стран, в частности, и мира, в целом. Таким образом, атомная энергия по-прежнему считается стратегическим источником энергии в развитых странах мира с множеством преимуществ для обеспечения национальной энергетической безопасности и устойчивого развития.

Вьетнам обладает богатыми энергоресурсами, включая уголь, нефть и газ, гидроэнергию. Однако, одновременно с ростом населения, развитием промышленности энергопроизводство сталкивается со многими проблемами (истощение ресурсов ископаемого топлива, неустойчивые цены на нефть с восходящей тенденцией, растущая зависимость Вьетнама от импорта энергоисточников).

Чтобы удовлетворять спрос на энергию безопасным и стабильным способом, Вьетнам проводит политику максимального использования традиционных энергоресурсов и развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ), сочетая ее с энергосбережением и увеличением импорта электроэнергии, а также подготовки к развитию атомной энергии.

1.2 Условия для развития атомной энергетики во Вьетнаме

1.2.1 Спрос на электроэнергию Вьетнама быстро растет

Потребление электроэнергии во Вьетнаме в целом быстро растет в целях социально-экономического развития. Общая электрическая мощность Вьетнама в 2023 г. достигла 80555 МВт, что почти на 2800 МВт больше, чем в 2022 г.; объем производства и импорта электроэнергии для всей системы в 2023 г. составил 280,6 млрд кВт·ч, что на 4,56% больше, чем в 2022 г.; выработка электроэнергии в 2023 г. достигла 251,25 млрд кВт·ч. Общая мощность солнечной и ветровой энергии достигла 27% (21664 МВт) от общей мощности системы, но выработка электроэнергии составила всего 5%. Инфраструктура энергетической отрасли стремительно развивается. В настоящее время Вьетнам занимает первое место в Юго-Восточной Азии по мощности электростанций¹.

На рис. 1.1 представлены данные Электроэнергетической корпорации Вьетнама (EVN) по выработке электроэнергии за последнее время.

¹ Управление по регулированию электроэнергетики Вьетнама — Мощность энергоисточников Вьетнама в 2023 году. URL: <https://www.erav.vn/tin-tuc/t13909/cong-suat-nguon-dien-viet-nam-nam-2023-dat-khoang-80-555mw-dung-dau-asean.html> (дата обращения: 02.04.2024).

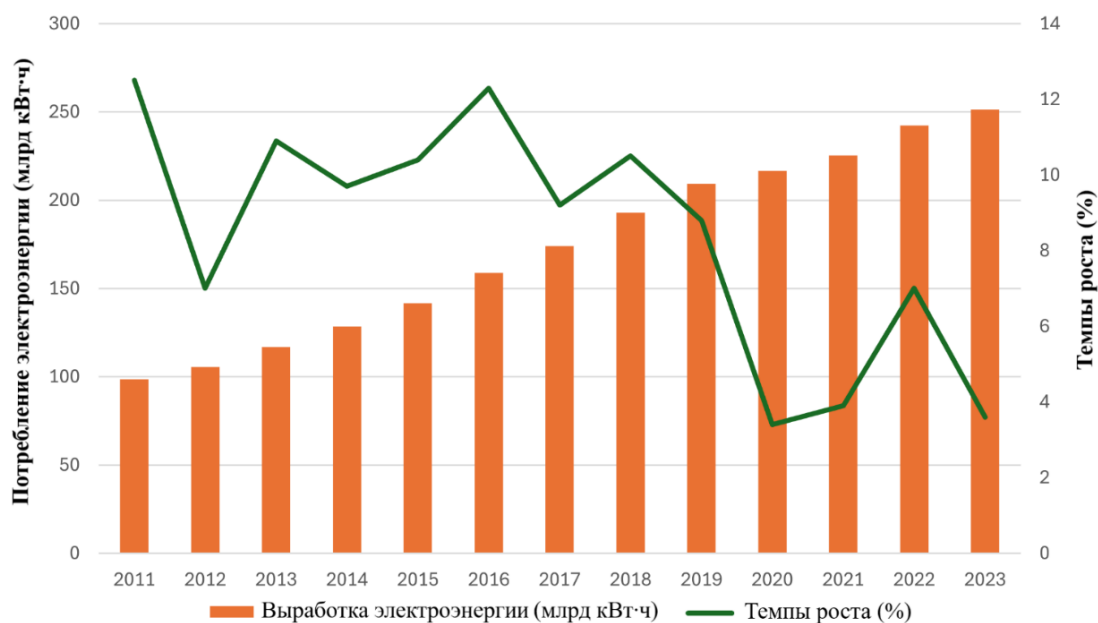


Рисунок 1.1. Выработка электроэнергии во Вьетнаме за период 2011–2023 гг.

Ожидается, что в 2024–2030 гг. ежегодный рост спроса на электроэнергию во Вьетнаме составит 8,5–9,4%, в 2031–2040 гг. – 4,7–5,8%.

Вьетнам поставил цель обеспечить внутренний спрос на энергию², в котором первичная энергия к 2030 г. достигнет 175–195 млн тонн нефтяного эквивалента (ТОЕ), к 2045 г. 320–350 млн ТОЕ; общая мощность источников электроэнергии к 2030 г. достигнет 125–130 ГВт, выработка электроэнергии составит 550–600 млрд кВт·ч.

С учетом приведенных выше данных и прогноза спроса на электроэнергию, можно констатировать, что потребление энергии Вьетнама все еще низкое. Выработка электроэнергии на душу населения Вьетнама составляет всего 2399 кВт·ч, что составляет около 70% от среднемирового уровня (мир – 3441 кВт·ч) и очень низка по сравнению с промышленно развитыми странами (США – 12913 кВт·ч, Южная Корея – 11192 кВт·ч) [1]. Энергоэффективность Вьетнама также очень низкая, в среднем на 1 доллар США валового внутреннего продукта (ВВП), энергоинтенсивность (объем энергии, необходимый для создания единицы ВВП) во Вьетнаме более чем в три раза

² Постановление № 55-NQ/TW Политбюро Компартии Вьетнама от 11.2.2020 — О направлениях национальной стратегии развития энергетики Вьетнама до 2030 году с видением до 2045 году. URL: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Nghi-quyet-55-NQ-TW-2020-dinh-huong-Chien-luoc-phat-trien-nang-luong-quoc-gia-cua-Viet-Nam-435381.aspx> (дата обращения: 02.04.2024).

выше, чем в развитых странах. Это показывает, что усиление развития электроэнергетики Вьетнама является насущной необходимостью для обеспечения социально-экономического развития в период ускоряющейся индустриализации и модернизации страны.

Кроме того, при относительно скромном потреблении энергии, Вьетнам столкнулся с нехваткой источников энергии, и текущее развитие источников электроэнергии во Вьетнаме также сталкивается со многими трудностями и ограничениями. За последние 30 лет Вьетнам почти полностью использовал потенциал гидроэнергетики; угля, нефти и газа в стране не много, в последние годы пришлось импортировать десятки миллионов тонн угля и нефти и т.д. и будет продолжать увеличить в будущем³. Поэтому дополнительные требования и структурная трансформация источников энергии необходимы и объективны.

Согласно текущей тенденции, необходимо ограничить строительство новых теплоэлектростанций (ТЭС), особенно угольные ТЭС, из-за выбросов парниковых газов и загрязнения окружающей среды. И как мы все знаем, все типы источников энергии имеют свои преимущества и недостатки, но во многих аспектах, ВИЭ и атомная энергия имеют взаимодополняющие характеристики, поэтому атомная энергия играет особую роль в энергосистеме.

1.2.2 Подготовка к развитию атомной энергетики

Для Вьетнама исследование и строительство АЭС основано на следующих преимуществах: (1) Диверсификация источников энергии. Это касается в основном базовых электростанций, составляющих значительную и стабильную долю в энергосистеме, что обеспечивает энергобезопасность страны. Данная диверсификация полностью удовлетворит потребности страны в электроэнергии, снизить зависимость от ископаемых топлива. Снижение этой зависимости особенно важно, учитывая, что большинство потенциала гидроэлектроэнергии и ископаемых видов топлива уже исчерпано. Данная мера

³ Журнал «NĂNG LƯỢNG VIỆT NAM» — Việt Nam có đủ điều kiện phát triển điện hạt nhân. URL: <https://nangluongvietnam.vn/viet-nam-co-du-dieu-kien-phat-trien-dien-hat-nhan-26789.html> (дата обращения: 08.04.2024).

обеспечивает экономию при конкуренции с другими видами импортного топлива, так как урановое топливо можно хранить в течение многих лет, что снижает риски и проблемы, связанные с транспортировкой топлива; (2) Содействие смягчению последствий изменения климата. Постепенная замена электростанций, работающих на ископаемом топливе, и возможно создать потенциал на получение финанса за счет сокращения выбросов CO₂. Это абсолютное преимущество перед другими ископаемыми источниками; (3) Дальнейшее развитие научно-технического и технологического потенциала страны. Эта инвестиция позволит развивать инфраструктуру не только в атомной энергетике, в электроэнергетике, но и во многих других промышленных и экономических отраслях; (4) Содействие укреплению и повышению позиций Вьетнама на международной арене благодаря освоению ядерных технологий.

Однако также есть трудности для страны, построившей АЭС в первый раз:

- Психологические барьеры и опасения по поводу безопасности АЭС. Поэтому необходимо иметь общественное согласие и сильную поддержку Правительства;

- Существует потенциальные риски касаясь ядерной безопасности, поэтому необходимо тщательно выбирать самые передовые, безопасные и проверенные технологии (технология поколения III+ была выбрана для АЭС «Ниньтхуан-1», строительство и эксплуатация которой уже начаты);

- Необходимо обеспечить адекватную инфраструктуру, особенно правовые документы; создать и развить команду экспертов и кадров по ядерной энергии, а также по культуре ядерной безопасности;

- Требуется время на подготовку проекта из-за сложной технологии и большой инвестиционный капитал. Несмотря на низкие затраты на топливо, существуют трудности в привлечении инвестиционного капитала;

- Необходимо рассчитать план хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и подготовить стоимость демонтажа энергоблоков АЭС (около 1 млрд \$/энергоблок) по истечении срока эксплуатации.

После аварии на АЭС «Фукусима-1» проект АЭС «Ниньтхуан-1» реализуется очень осторожно с целью для того, что найти самые безопасные варианты для первой АЭС Вьетнама. В этом проекте предусмотрены активные и пассивные системы безопасности, которые предотвращают развитие любых аварийных ситуаций. В качестве базового проекта АЭС Вьетнам был выбран российский проект «АЭС-2006» с ВВЭР-1200 поколения III+ с улучшенными технико-экономическими показателями.

В ходе реализации проекта АЭС Ниньтхуан, ситуация в экономике изменилась по сравнению с моментом принятия решения об инвестировании проекта. Кроме того, Вьетнаму потребовались к значительным капиталовложениям в инфраструктуру, чтобы создать движущую силу для социально-экономического развития, а также для решения проблем, вызванных изменением климата. В ноябре 2016 г. Национальное собрание Вьетнама проголосовало за прекращение строительства АЭС по экономическим причинам. Атомная энергетика сейчас не включена в План электроэнергетики Вьетнама. Сейчас планы Вьетнама по развитию атомной энергетике остаются неясными.

До принятия решения о прекращении реализации инвестиционной политики АЭС Ниньтхуан реализованы мероприятия, сохраняющие возможность возврата к строительству АЭС с минимальными издержками:

- EVN представила Премьер-министру комплект документов для утверждения площадки и Отчет по ТЭО проекта АЭС «Ниньтхуан-1». Было подтверждено, что Вьетнам выбрал самый современный проект АЭС-2006 (поколение безопасности III+) российского дизайна для АЭС «Ниньтхуан-1». Для АЭС «Ниньтхуан-2» для дальнейшего рассмотрения выбраны технологии – АТМЕА1 (японско-французское предприятие) и AP-1000 (США). Отчет по ТЭО проекта «Ниньтхуан-2» был представлен в EVN;

- Министерство науки и технологий (MOST) и Министерство природных ресурсов и окружающей среды (MONRE) Вьетнама организовали оценку и экспертизу отчетов по анализу безопасности, об ОВОС проектов АЭС «Ниньтхуан-1» и «Ниньтхуан-2»;

- Система электроснабжения для строительства АЭС «Ниньтхуан-1» и офис Отдела управления проектами (EVNNPB) находится в стадии строительства и завершения;

- В рамках проекта по миграции и переселения завершены обследование и проектирование районов поселения, инвентаризация, регулирование размеров компенсаций на местах и т.д.;

- Разработаны правовые документы, регламентирующие строительство АЭС; сформирована кадровая политика, проведена информационно-просветительская работа, развивается международное сотрудничество.

1.2.3 Подготовка площадки для строительства АЭС

Правильный выбор места для строительства АЭС обеспечит безопасную эксплуатацию, высокую экономическую эффективность, надежность энергоснабжения и в то же время внесет вклад в защиту окружающей среды. В процессе выбора площадки должны быть изложены и решены ряд экономических, технических, социальных и экологических проблем.

Строительная площадка АЭС должна обеспечивать очень высокие требования с точки зрения безопасности фундаментальных работ, защиты от экстремальных природных явлений, таких как торнадо, наводнения, землетрясения, цунами и т.д. Местоположение должно не только обеспечивать безопасность АЭС, но и соответствовать экономической рациональности строительства, минимизировать воздействие на окружающую среду и быть одобренным местным населением.

Вьетнам давно заинтересован в атомной энергии. Разработка ТЭО, правовых нормы; поиск партнеров, особенно выбор места строительства АЭС Вьетнама требуют значительных затрат.

Для того, чтобы помочь государствам-членам в выборе площадки, МАГАТЭ разработало и выпустило циркуляр по поиску, оценке и выбору площадок для строительства АЭС [2]. Этот процесс состоит из многих этапов, и каждый этап основан на наборе стандартов и технических регламентов с соответствующим уровнем детализации.

По данным МАГАТЭ, процесс выбора площадки для размещения АЭС состоит из трех этапов [3]: этап 1 – исследование площадки, этап 2 – оценка площадки, этап 3 – дополнительное исследование до и после эксплуатации. На первом этапе, процесс поиска и исследования площадки делится еще на 3 фазы: фаза 1 – анализ территории и выбор потенциальной площадки, фаза 2 – отсев потенциальных площадок и выбор кандидатов в отношении места строительства, фаза 3 – сравнение и определение приоритетность кандидатов.

В период 1996-2000 гг. в проекте «Обзор исследования по развитию АЭС во Вьетнаме» были реализованы 1-я и 2-я фаза первого этапа. В период 2001-2007 гг. в проекте «Предварительное ТЭО строительства АЭС во Вьетнаме» была выполнена 3-я фаза первого этапа.

Для выполнения работ первого этапа Вьетнам мобилизовал многие агентства, организации и экспертов из Министерства промышленности и торговли (МОИТ), MOST и Вьетнамской академии науки и технологий. Наряду с командой отечественных экспертов, участвовали и японские специалисты в консультациях по методологии и соответствующему профессиональному содержанию. Стоимость этой работы составляет миллионы долларов. Результаты рассмотрены, оценены, одобрены и представлены для утверждения Госэкспертным советом.

Благодаря более чем 10-летним исследованиям, поиску, оценке, отсеvu, а также с помощью российских и японских экспертов, Вьетнам выбрал из 20 кандидатов две наиболее подходящие площадки – Фыокзинь и Виньхай (в провинции Ниньтхуан). Площадки Фыокзинь (проект АЭС «Ниньтхуан-1») и

Виньхай (проект АЭС «Ниньтхуан-2») удовлетворяют таким требованиям для строительства АЭС, как⁴:

- Наличие благоприятной топографии и достаточной площади для строительства АЭС с четырьмя энергоблоками;
- Наличие хороших геологических условий для строительства: расположение в районе с низкой интенсивностью землетрясений обеспечивает безопасность АЭС и его низкую стоимость строительства;
- Площадки расположены близко к морю, что обеспечивает благоприятные условия для строительства систем водяного охлаждения и перевозки сверхдлинного и сверхтяжелого оборудования;
- Площадки расположены в районах с низкой плотностью населения, меньшим воздействием на пахотные земли и общественные объекты;
- Наличие поддержки общественности и местных лидеров в строительстве АЭС вблизи их территории.

Для проведения работы по оценке площадки в Фьюкзинь и Виньхай, российские и японские партнеры выполнили следующие мероприятия [4]:

Во-первых, провели обследование и оценку природных условий и человеческой деятельности, связанной с этими площадками, что включало: обследование и оценку землетрясений, разломов поверхности, вулканов; метеорологическое обследование и оценку; обследование и оценку возможности затопления; обследование и оценку возможности цунами; геотехнические обследования и оценка; обследование и оценку факторов, вызванных антропогенной деятельностью; обследование и оценку источников охлаждающей воды и электроснабжения для АЭС.

Во-вторых, российские и японские партнеры провели обследование и оценку возможности воздействия распространения радиоактивных веществ с АЭС на население. Данная экспертиза включала: обследование распространения радиоактивных веществ в воздухе, через поверхностные и

⁴ Журнал «NĂNG LƯỢNG VIỆT NAM» — Địa điểm xây dựng nhà máy điện hạt nhân: Một quá trình lâu dài và tốn kém [Kỳ 1]. URL: <https://nangluongvietnam.vn/dia-diem-xay-dung-nha-may-dien-hat-nhan-mot-qua-trinh-lau-dai-va-ton-kem-ky-1-22028.html> (дата обращения: 09.04.2024).

грунтовые воды; обследование по распределению населения и радиационному фону; определение предельной дозы облучения для населения.

В период 2011–2015 гг. Росатомом (РФ) и JINED (Япония) был реализован 2-ой этап «Оценка площадки» в рамках проекта «ТЭО строительства АЭС во Вьетнаме». Для реализации работы по оценке площадки, EVN подписала контракт с консалтинговыми партнерами: консорциум E4 - КИЕР - ЕРТ (консорциум, состоящий из трёх организаций – двух российских, «Группа E4» и «Энергопроекттехнология», и одной украинской, КИЭП) и японская атомная энергетическая компания (JAEC). Помимо дополнения, обновления и обработки всей существующей информации первого этапа, консорциум E4 - КИЕР - ЕРТ и JAEC провели геологоразведочное бурение. Этот процесс сопровождался проведением десятками всевозможных скважин и тысячами метров глубокого бурения для сбора образцов грунта и горных пород. Данные породы были доставлены в Россию и Японию для анализа и оценки. Российские и японские партнеры также построили и установили станции гидрометеорологического и сейсмического мониторинга для отслеживания и сбора необходимой информации. Данные работы по обследованию, исследованию и оценке двух площадок Фьюкзинь и Виньхай проводятся в соответствии со стандартами и техрегламентами Вьетнама. В отношении работ, неуказанных во вьетнамских стандартах и техрегламентах, партнерами применялись стандарты и техрегламенты РФ и Японии, разрешенные уполномоченными органами.

Стоимость выполнения задач по ТЭО и оценки площадки для каждого проекта (АЭС «Ниньтхуан-1» и «Ниньтхуан-2») составляет более 30 млн \$, которые предоставлены Вьетнаму Правительствами России и Японии в виде невозвратной помощи. При этом финансирование исследования, обследования и оценки каждой площадки составляет десятки миллионов долларов. Результаты исследования, обследования и оценки этих двух площадок были рассмотрены Госэкспертным советом в соответствии с Циркуляром MOST [5].

Поиск, выбор и оценка площадки для строительства АЭС представляет собой длительный, сложный и дорогостоящий процесс для Вьетнама. Помимо инвестиций из России и Японии, Вьетнам потратил значительные средства в течение 20 лет на поиск, классификацию, оценку и выбор площадок, отвечающих требованиям для строительства АЭС. Определены 8 потенциальных мест для строительства АЭС, утвержденных Премьер-министром⁵. Проведены исследования на площадках Фыокзинь (АЭС «Ниньтхуан-1») и Виньхай (АЭС «Ниньтхуан-2») в провинции Ниньтхуан.

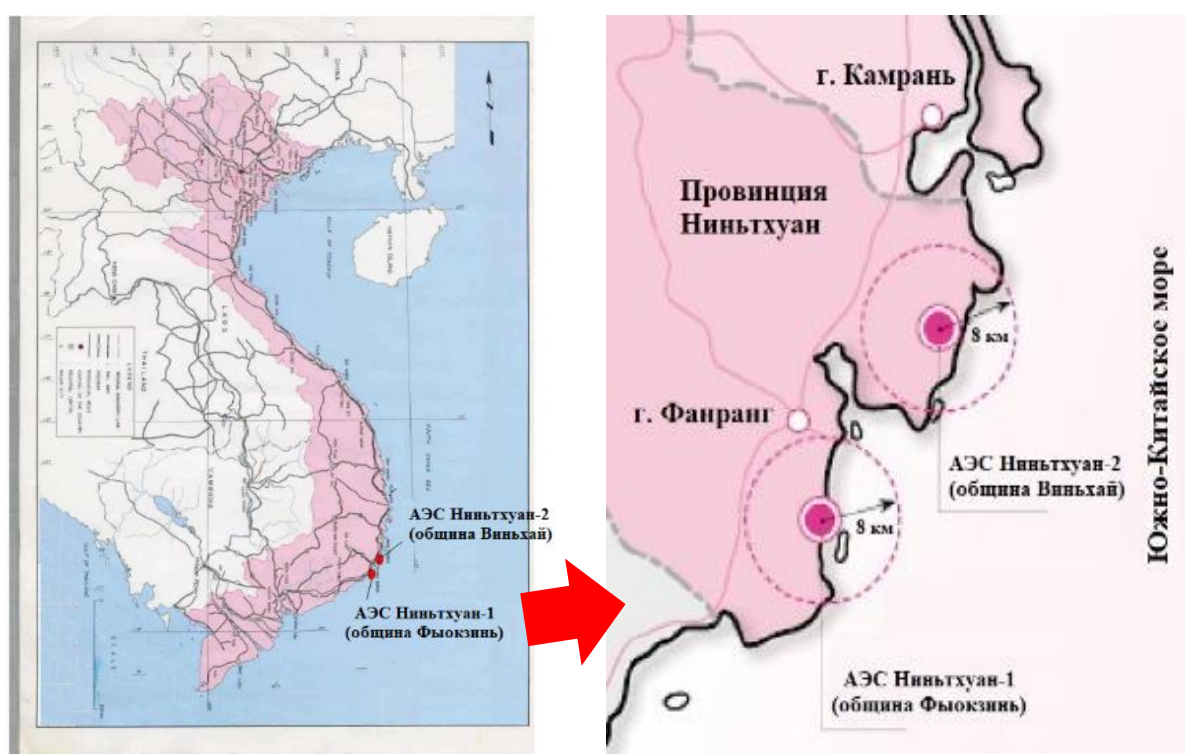


Рисунок 1.2. Место расположения АЭС Ниньтхуан

В октябре 2019 г. Народный комитет провинции Ниньтхуан предложил Правительству переориентировать площадку под строительство ВИЭ мощностью несколько сотен МВт (вместо строительства двух АЭС с мощностью 4000 МВт). Учитывая, что оценка и изучение строительства двух АЭС уже обошлась в десятки миллионов долларов США, переход на ВИЭ выглядит поспешным и неубедительным. Международный опыт показывает,

⁵ Решение Премьер-министра Вьетнама № 906/QĐ-TTg от 17.6.2010 — Об утверждении направлений планирования развития атомной энергетики Вьетнама на период до 2030 году. URL: <https://vanbanphapluat.co/decision-no-906-qd-ttg-approving-orientations-for-planning-nuclear-power> (дата обращения: 03.04.2024).

что правовые документы позволяют инвесторам сохранять площадки для строительства АЭС в течение 20 лет. После этого срока можно рассматривать изменение назначения площадки. Поэтому эксперты предложили не менять цели площадки. Правительство согласилось сохранить площадки Фьюкзинь и Виньхай в Ниньтхуане для будущего развития атомной энергетики.

1.2.4 Урановый потенциал Вьетнама

Вьетнам начал обращать внимание на исследование запасов урана после принятия Резолюции [6]. На основании анализа эффективности работы АЭС (КПД 33,5%, средняя глубина выгорания 40 МВт·сут/кгU) было определено, что потребность в ядерном топливе для первой загрузки составляет ≈ 90 т урана (что эквивалентно 262 тоннам U_3O_8), в последующем ежегодная потребность составит 30 т урана. Следовательно, потребность в руде U_3O_8 для обеспечения работы одного энергоблока за 40 лет составит – 3617 тонн. Поэтому обследование и определение запасов урановых рудников в промышленных масштабах является важной задачей Вьетнама для развития атомной энергетики.

Вьетнам провел лишь поверхностные разведывательные работы. Местные специалисты смогли только обработать технологические пробы с объемом в несколько десятков тонн руды посредством геофизического бурения. На помощь в оценке перспективы урана, Вьетнам привлек Канадскую компанию «NWT Uranium Corp». Сейчас топливо для АЭС также популярно в мире. Топливо зависит от типа реакторов. Крупные страны мира, такие как США, Россия, Франция, Япония, Южная Корея и т.д. могут производить и поставлять топливо для своих ядерных реакторов. Россия также производит топливо для реакторов западных стран.

Вьетнам же полагается на международные рынки для поставок ядерного топлива и не преследует задачу обогащения топлива в стране. Кроме того, для первой АЭС «Ниньтхуан-1» будет реализована политика России по строительству АЭС в странах, не обладающих ядерным оружием, которая

заключается в поставке «под ключ», включая поставку всего топлива и возврат ОЯТ в процессе эксплуатации АЭС. Отработавшее топливо будет переработано в России, а разделенные отходы будут возвращены в страну-покупатель [7].

Согласно Решению МОИТ [8], добыча, переработка и использование урановой руды во Вьетнаме осуществляется в мирных целях. Государство имеет монополию на добычу, переработку и использование урановых руд, а также радиоактивных продуктов. В частности, что касается урана, Вьетнам намерен к 2025 г. постепенно реализовать некоторые этапы ядерного топливного цикла и перейти к производству ядерного топлива из урановых ресурсов, добываемых внутри страны. Первый этап - производство технического урана (желтый кек «англ. yellow cake» - урановый концентрат, обычно в форме оксида U_3O_8) из песчаниковой руды, добытой в районе Нонг Сон, Вьетнам. Следующий этап – пошагово осуществить этапы по производству керамических топливных таблеток и тепловыделяющих элементов из природного урана и обогащенного урана (по выбору аутсорсинга или импорта обогащенных материалов) для работы отечественных АЭС.

Согласно Отчету геологического агентства, общие запасы урана во Вьетнаме оцениваются на уровне около 218 тысяч тонн U_3O_8 . Вьетнаму необходимо организовать обследование и разведку дополнительных запасов; подготовить технологию добычи, а также высококвалифицированные кадры для освоения зарубежных технологий в процессе сотрудничества в области исследований, добычи и переработки урана. Если это удастся, то в будущем у Вьетнама будет достаточно условий для активного использования этого источника топлива.

1.2.5 Инвестиции и финансы

В последнее время возникли дополнительные потребности в различных мерах безопасности (например, меры противодействия цунами, землетрясениям), так что в конструкциях АЭС III+ предусматривается больше систем безопасности. Следовательно, инвестиционные затраты возрастают.

В отличие от новых других технологий, инвестзатраты на строительство АЭС в будущем будет нелегко снизить из-за высоких требований безопасности и низкой степени локализации Вьетнама. Однако, системы и оборудования АЭС спроектированы и изготовлены качественно, что обеспечивает большую надежность и длительные сроки эксплуатации. Ядерные реакторы нового поколения могут работать 60 лет, по истечении которых, этот срок может быть продлен на 20 лет и более. При условии, что АЭС достигли конца своего срока службы, но все еще находятся в хорошем состоянии, прошли оценку безопасности и имеют лицензию на продолжение работы, то стоимость электроэнергии будет низкой (много АЭС в мире сейчас работают в период после окончания их первоначального срока службы, приносящие высокую экономическую эффективность). Хотя фактическая цена на электроэнергию АЭС сейчас высока, но учитывая такие длительные сроки эксплуатации, цена все еще находится в приемлемых рамках.

Для АЭС Ниньтхуан (изначально 2000 МВт), расчетная ставка инвестиций составляла 4000 \$/кВт, сейчас ≈ 6000 \$/кВт) [7]. Хотя АЭС требуют больших капиталовложений, они стабильно работают в базовом режиме более 7500 часов в год, являются низкоуглеродным источником, занимают меньшие площади, используют дешевое топливо, имеют срок службы в 3 раза больше, чем ВИЭ. Эти достоинства свидетельствуют об экономической пользе АЭС.

Инвестиции в АЭС – это большие финансовые вложения для Вьетнама. Однако, обладая населением почти в 100,3 млн человек, ВВП страны в 2023 г. достигло 430 млрд \$ и быстро растет. С другой стороны, если период инвестирования длительный, то в течение 2–3 лет Вьетнам может полностью покрыть все финансовые издержки.

1.3 Создание ядерной инфраструктуры

Осуществление ядерно-энергетической программы (ЯЭП) является серьезным мероприятием, требующим тщательного планирования, подготовки, больших капиталовложений, времени и людских ресурсов. Атомная энергетика

нуждается в пристальном внимании с учетом рассмотрения вопросов, связанных с владением ядерными материалами. Внедрение ЯЭП предполагает минимум 100-летнее обязательство поддерживать устойчивую национальную инфраструктуру при эксплуатации, снятии с эксплуатации и захоронении отходов [9].

1.3.1 Руководство МАГАТЭ по развитию ядерной инфраструктуры

Подготовка государствами ядерной инфраструктуры (далее - ЯИ) для запуска объекта ядерной энергетики в территориальных границах требует сотрудничества с МАГАТЭ для выбора оптимального и безопасного пути ее развития. МАГАТЭ способствует разработке требований к ЯИ, основанной на многолетнем опыте и наработках стран-первопроходцев отрасли. Агентство обладает достаточными инструментами для проведения оценки, выявления недостатков ЯИ в рамках одного государства и консультации стран по решению, возникающих отраслевых вопросов.

Ядерная инфраструктура (ЯИ) – это совокупность элементов и условий, обеспечивающих государственную, институциональную, политическую, законодательную, управленческую, организационную и административную, регулируемую и надзорную, научно-техническую, финансовую, кадровую, промышленную, социальную и общественную поддержку для обеспечения безопасной и эффективной реализации национальной ЯЭП.

ЯИ многогранна и включает государственный, правовой, регулирующий и управленческий элементы и кроме того, инфраструктуру физической безопасности. Комплексное видение развития ЯИ изложено в публикации «Вопросы, которые следует учитывать при разработке ядерно-энергетической программы» (GOV/INF/2007). В публикации «Вехи развития национальной инфраструктуры ядерной энергетики» № NG-G-3.1 (2007), предоставлены рекомендации относительно трех этапов развития, изложенных в публикации GOV/INF/2007. А в новейшей версии этой публикации № NG-G-3.1 (Rev.1) (2020) было дано более подробное, нацеленное на более широкую аудиторию

описание полного спектра инфраструктурных элементов, которые необходимо рассмотреть, и были указаны ожидаемые уровни достижения по каждому элементу в конце каждого этапа.

Программа развития инфраструктуры под первую АЭС в государстве, согласно документам МАГАТЭ, подразумевает три этапа. В публикации «Оценка положения дел в области развития национальной ядерной инфраструктуры» № NG-T-3.2 (2009) описываются три этапа развития при решении каждого из 19 вопросов, охватывающих диапазон от позиции правительства в отношении ядерной энергетики до закупки оборудования и услуг для первой АЭС и излагается подход к оценке состояния развития национальной ЯИ.



Рисунок 1.3. 19 элементов развития ядерной инфраструктуры⁶

Первый этап предусматривает рассмотрение всех вопросов до принятия решения о начале осуществления ЯЭП и завершается принятием официальных обязательств в отношении программы. Второй этап включает

⁶ Презентация АО «РУСАТОМ СЕРВИС» — Ядерная инфраструктура и устойчивое развитие. URL: https://www.rosatom.ru/upload/iblock/Nuclear%20Infrastructure%20and%20SDG_Rus.pdf (дата обращения: 05.04.2024).

подготовительную работу по заключению контракта о строительстве АЭС и завершается объявлением тендера или переговорами по контракту о строительстве. Заключительный этап включает деятельность по реализации проекта АЭС, такую, как окончательное инвестрешение, заключение контракта и строительство. Продолжительность этих этапов зависит от страны, но обычно это занимает от 10 до 15 лет (рис. 1.4).



Рисунок 1.4. Развитие инфраструктуры для национальной ЯЭП [10]

Применение такого подхода обеспечивает возможность определения условий создания инфраструктуры, охватывающих все 19 вопросов. Этап «Вежа 2», как он определен в публикации №. NG-G-3.1 (Rev.1), является ключевым этапом, на котором государству необходимо продемонстрировать «готовность к проведению конкурса предложений о строительстве АЭС». Результаты проведения самооценки являются этапом, на котором государству рекомендуется показать широкой аудитории готовность к строительству АЭС.

После завершения работ по каждому из этапов производится оценка достигнутого прогресса и принятия решения о переходе к следующему. Таким образом программа развития ЯИ преодолевает три следующих вех [10]:

- на вехе 1 страна будет в состоянии принять решение по уместности внедрения ЯЭП. Для достижения этой вехи, нужно оценить потребности в энергии, включить ядерную энергетику в качестве варианта удовлетворения этих потребностей и принять твердое решение о разработке программы;

- на вехе 2 страна будет располагать инфраструктурой для проведения конкурса конкурентных предложений по созданию первой АЭС, а также для надзора за ее строительством. После принятия политического решения о переходе к развитию ЯЭП, требуется выполнить большой объем работы для достижения требуемого уровня технической и институциональной компетентности, а также для создания необходимой юридической основы. Должен быть создан эффективный полностью независимый регулирующий орган. Владелец (оператор) должен быть высоко компетентным, с тем чтобы руководить проектом по созданию АЭС и достигнуть необходимого уровня организационной и эксплуатационной культуры для удовлетворения регулирующих требований;

- на вехе 3 страна будет в состоянии приступить к вводу в эксплуатацию и начать эксплуатацию первой АЭС. Владелец (оператор) превратится в организацию, способную взять на себя ответственность за ввод в эксплуатацию и эксплуатацию АЭС. Нужно выполнить большой объем работ по набору и подготовке кадров на всех уровнях, продемонстрировать способность руководить проектом в течение всего его жизненного цикла. Достижение вехи 3 является началом обязательства обеспечивать безопасное и эффективное применение атомной энергетики.

1.3.2 Миссии МАГАТЭ по комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР)

Комплексное рассмотрение ядерной инфраструктуры (ИНИР) представляет собой всестороннюю независимую экспертизу для оказания помощи государствам-членам в оценке состояния их национальной инфраструктуры для целей внедрения атомной энергетики. Экспертиза охватывает комплексную инфраструктуру, необходимую для разработки безопасной, надежной и устойчивой ЯЭП.

МАГАТЭ по просьбе страна-члена проводит миссию ИНИР, в состав которой входит группа международных экспертов, имеющих непосредственный опыт в специализированных областях ядерной инфраструктуры (ЯИ), а также сотрудники МАГАТЭ. До принятия миссии ИНИР страна должна провести самооценку по 19 вопросам в отношении ЯИ, включенным в изложенный в документе [10] подход, представляющий собой всеобъемлющую методологию, которая ориентирует страны и организации в их систематической работе по внедрению атомной энергетики.

Миссии ИНИР позволяют представителям государств-членов МАГАТЭ проводить углубленные дискуссии с международными экспертами относительно опыта и передовой практики в развитии ЯИ. Рекомендации и предложения сообщаются в отчете государству-члену, что позволяет ему соответствующим образом обновить свой нацплан действий. Предоставляя всестороннюю оценку всех аспектов ЯЭП, охватывающих регулирующий орган, энергопредприятие и все соответствующие заинтересованные государственные органы, ИНИР является ценным инструментом обеспечения того, чтобы ЯИ, необходимая для безопасного, надежного и устойчивого использования ядерной энергии, разрабатывалась и внедрялась ответственным и упорядоченным образом [11].

Для укрепления сотрудничества в развитии ЯИ Вьетнам и МАГАТЭ разработали в феврале 2011 г. в Вене, Австрия, комплексный план работы (КПР) по развитию ЯИ. План КПР включает мероприятия по поддержке

развития необходимой инфраструктуры для ЯЭП, такие как завершение системы юридических документов, управление проектами, развитие людских ресурсов, финансирование для проектов, ядерная безопасность, общественная информация и т.д. Подход, изложенный в публикации [10], является руководящим документом, а КПП важным средством привлечения всех заинтересованных сторон во Вьетнаме для обеспечения выполнения всех требований безопасности, физической безопасности и гарантий, заложенных в проект сооружения первой АЭС. КПП позволит Вьетнам разработать всеобъемлющий подход к осуществлению руководящих материалов МАГАТЭ, а также сотрудничать с национальными заинтересованными сторонами и другими двусторонними партнерами в разработке и реализации национальной ЯЭП.

1.4 Ситуация с развитием ядерной инфраструктуры во Вьетнаме

С 2009 по 2014 гг. МАГАТЭ направило три миссии ИНИР для работы с соответствующими министерствами, секторами и местностями Вьетнама с целью оценки текущего состояния ЯИ Вьетнама. Согласно заключению МАГАТЭ, в настоящее время Вьетнам находится на втором этапе разработки своей ЯИ. Это важный этап со многими трудностями и проблемами, особенно для стран, которые только начали ЯЭП, таких как Вьетнам, из-за отсутствия опыта, нехватки высококвалифицированных специалистов и т.д.

1.4.1 Период до 2009 г.

Развитие атомной энергетики во Вьетнаме было впервые рассмотрено в 1996 г. Была принята Резолюция о подготовке научных предпосылок для использования атомной энергии после 2000 г. В стратегии социально-экономического развития на период 2001–2010 гг., была поставлена задача исследования вариантов использованию атомной энергии.

«Обзор исследований по сооружению АЭС во Вьетнаме» осуществлялся MOST, MONRE и другими органами под руководством MOIT. В 2002 г. был подготовлен Отчет о предварительном технико-экономическом обосновании

(ТЭО) для проекта строительства АЭС. Ориентация на долгосрочное планирование развития атомной энергетики Вьетнама была принята Решением Премьер-министра [12]. Закон об атомной энергии принят Нацсобранием Вьетнама 03.06.2008. Инвестполитика строительства АЭС Ниньтхуан была утверждена в сентябре 2009 г.

Первая миссия ИНИР МАГАТЭ с 30.11.2009 до 04.12.2009:

С 30.11.2009 по 04.12.2009 ИНИР во Вьетнаме был впервые проведено МАГАТЭ в контексте того, что Вьетнам проводил заключительные работы по завершению этапа 1 в развитии ЯИ. Результаты рассмотрения миссии ИНИР-2009 показывают, что Вьетнам продемонстрировал твердую национальную приверженность развитию атомной энергетики и осознано необходимые требования к развитию ЯИ. Миссия ИНИР-2009 пришла к выводу, что большая часть работ по этапу 1 завершена, а также проведены большая часть подготовительных работ для этапа 2. Миссия ИНИР дала рекомендаций по достижению прогресса на этапе 2.

1.4.2 Период 2010–2015 гг.

После одобрения Нацсобранием инвестполитики для проекта АЭС Ниньтхуан в октябре 2010 г. было подписано Межправсоглашение о строительстве АЭС в сотрудничестве с Россией и Японией. EVN получила задание по управлению, развертыванию и реализации проекта вместе со своими партнерами. К 2015 году Отчеты о результатах ТЭО и обследования площадки были завершены партнерами и представлены EVN в Агентство по радиационной и ядерной безопасности Вьетнама (VARANS) для рассмотрения и проведения экспертизы о безопасности.

Со времени визита миссии ИНИР-2009 Вьетнам добился значительного прогресса во многих областях, в частности [13]: (1) В 2010 г. был создан Государственный руководящий комитет (ГРК) проекта АЭС Ниньтхуан для контроля, надзора и руководства координацией проектов АЭС; был создан Нацсовет по ядерной безопасности; (2) В 2011 г. был создан ГРК по подготовке

кадров в области атомной энергии; было создано Агентство по атомной энергии Вьетнама (VAEA) при MOST для координации политики, связанной с атомной энергетикой; было создано Главное управление энергетике при MOIT для управления реализацией программы развития энергетике; (3) EVN была назначена инвестором проекта АЭС Ниньтхуан; в 2011 г. в составе EVN был создан Отдел управления проектами АЭС Ниньтхуан (EVNNPB) с четкими задачами и функциями для развертывания конкретных проектов по строительству АЭС; (4) Участие в ряде международно-правовых документов, таких как Конвенция о ядерной безопасности, Конвенция о физической защите ядерного материала и поправки к настоящей Конвенции; (5) Издание решений, указов и циркуляров, касающихся поддержки реализации программы развития атомной энергетике; (6) Подписание контрактов на ТЭО проектов АЭС.



Рисунок 1.5. Государственный руководящий комитет (ГРК) проекта АЭС Ниньтхуан

Вторая миссия ИНИР МАГАТЭ с 05.12.2012 до 14.12.2012:

20.03.2012 Вьетнам направил официальное письмо с просьбой к МАГАТЭ организовать 2-ю миссию ИНИР во Вьетнаме, после чего Вьетнам направил в МАГАТЭ «Отчет о самооценке текущего состояния развития ЯИ». Отвечая на запрос вьетнамской стороны, МАГАТЭ провело предварительное совещание для миссии ИНИР в Вене с 8 по 10.10.2012, и согласовало ToR (техническое задание) и основные направления деятельности этой миссии. В результате миссия ИНИР-2012 пришла к выводу, что Вьетнам добился значительного прогресса после миссии ИНИР-2009 в развитии необходимой ЯИ для национальной ЯЭП. Вьетнаму необходимо развернуть значительный объем работы для завершения деятельности этапа 2.

Миссия ИНИР-2012 указала приоритетные области, в которых Вьетнаму необходимо сосредоточиться на реализации дополнительных деятельности, а именно [14]: утверждение генплана развития национальной ЯИ и инвестпроекта, укрепление нормативно-правовой базы, обнародование измененного закона об атомной энергии, продвижение и интеграция планов развития людских ресурсов, улучшение системы управления, решение проблемы о капитале и финансах, разработка стратегии обращения с ОЯТ и РАО, и доработка и утверждение национального плана реагирования на ядерные и радиационные аварии.

Третья миссия ИНИР МАГАТЭ с 10.11.2014 до 14.11.2014:

Вьетнам обратился к МАГАТЭ с просьбой оценить выполнение рекомендаций миссии ИНИР, состоявшейся в декабре 2012 г. В ответ на эту просьбу, дополняющая миссия ИНИР (INIR Follow-up) проходила с 10 по 14.11.2014 г. Миссия ИНИР-2014 установила, что после миссии ИНИР-2012 была проведена следующая деятельность во Вьетнаме [13]: (1) Создание Нацсовета по развитию и применению атомной энергии; (2) Вьетнам присоединился к Объединенной конвенции о безопасности обращения с ОЯТ и о безопасности обращения с РАО; (3) Издан ряд юридических документов, таких как циркуляр о готовности к чрезвычайным ситуациям, циркуляр о

местоположении и отходах; (4) Создано пять подкомитетов при ГРК (см. рис. 1.5); (5) В 2013 г. был утвержден проект по информационно-просветительской работе для развития атомной энергетики во Вьетнаме и план его реализации; (6) Выполнение некоторой льготной политики для подбора и удержания людских ресурсов; (7) EVN завершила и представила отчет по ТЭО и Досье по согласованию для утверждения площадки строительства (SAD – site approval dossier) АЭС «Ниньтхуан-2» в июне 2013 г.; (8) В 2014 г. утвержден генплан развития национальной ЯИ до 2020 г.

Миссия ИНИР-2014 отметила, что Вьетнам добился значительного прогресса в развитии ЯИ. Из 19 вопросов по развитию ЯИ, миссия нет рекомендаций в областях, как *гарантии, участие заинтересованных сторон и закупки*. Остальные вопросы требуют проработки. Подробности [15]:

- По *национальной позиции*, необходимо создать эксплуатирующую организацию (ЭО) после утверждения инвестпроекта;

- По *ядерной безопасности*, ЭО и регулирующим органам (РО) необходимо усовершенствовать процедуры оценки информации о ядерной безопасности. Необходимо установить правила об обмене информацией между РО и другими соответствующими организациями (ЭО, организация технической поддержки, подрядчик и т.д.); разработать программы по продвижению культуры безопасности в организациях, связанных с ядерной безопасностью; и определить уровень постоянного участия поставщиков в обеспечении безопасной эксплуатации после завершения строительных работ;

- По *управлению*, необходимо разработать полное подробное техническое описание (спецификацию) для приглашения к участию в торгах (BIS – bid invitation specifications), а также отдельные подробные технические описания (спецификации) для любых требований, не предусмотренных основным контрактом (например, эксплуатационная поддержка); продолжить создание компетентной группы по закупкам, включая запланированное привлечение международных экспертов; разработать планы обучения для удовлетворения организационных требований к EVN в строительном надзоре; издать

требования к системе управления организациями, претендующими на получение лицензий, с учетом соответствующих руководств МАГАТЭ. Агентство по радиационной и ядерной безопасности (VARANS) и Институт атомной энергии (VINATOM) Вьетнама необходимо разработать и развернуть систему управления с учетом соответствующих руководств МАГАТЭ;

- По *субсидированию и финансированию*, необходимо завершить расчет стоимости проекта и обеспечить финансирование затрат, не входящих в рамках кредита страны-поставщика; распределить основные финансовые риски посредством договоров и соглашений; завершить инвестпроект и подтвердить осуществимость проекта с учетом финансовых и других стратегических факторов; и разработать механизмы для интеграции бюджета и оценки затрат на развитие ЯИ. Как только будет принята стратегия обращения с РАО и ОЯТ, нужно рассмотреть и включить соответствующие расходы в планы по субсидированию и финансированию;

- По *законодательной основе*, необходимо внести поправки и обнародовать закон об атомной энергии для удовлетворительного решения ряда важных вопросов, а также других законов. Эти вопросы касаются создания действительно независимого регулирующего органа (независимого от организаций, ответственных и получающих выгоду от разработки ЯЭП) с полномочиями и ресурсами, необходимыми для выполнения уставных обязанностей. Также необходимо разграничить обязанности ведомств, участвующих в ЯЭП; разработать положения о мерах по обеспечению аварийной готовности и реагированию; подготовить обращение с РАО и ОЯТ. Закон должен включать в себя положения о выводе из эксплуатации, физической безопасности и защите, гарантиях и гражданской ответственности за ядерный ущерб;

- По *регулирующей основе*, необходимо своевременно обнародовать регламенты, соответствующие требованиям ЯЭП; VARANS необходимо приступить к разработке программы инспекции строительства, включая площадки, планы и процедуры инспекции; продолжать подбор и обучение

персонала, в том числе обучение на рабочем месте, чтобы обеспечить адекватное укомплектование кадрами для поддержки текущего и будущего исполнения регулирующих обязанностей;

- По *радиационной защите*, эксплуатирующей организации необходимо разработать план радиационной защиты;

- По *энергосети*, необходимо проанализировать стабильность и надежность всей энергосети, чтобы определить, какие области нуждаются в улучшении для безопасной эксплуатации АЭС; и определить работы, связанные с улучшением энергосети и финансированием, и планировать эти работы в соответствии с ЯЭП;

- По *развитию людских ресурсов*, необходимо интегрировать существующие планы организаций в разработку национальной стратегии и плана развития людских ресурсов, включая все потребности организаций; прогресс и степень обучения; разработку и развертывание образовательных программ, обучение и накопление опыта; координацию в вопросе трудоустройства студентов после окончания учебы; и разработку стимулов по обучению и подбору для долгосрочного удержания людских ресурсов;

- По *площадке и вспомогательным установкам*, нужно выполнить детальную оценку площадки строительства АЭС и представить Досье по согласованию для утверждения площадки строительства (SAD), а также разработать план подготовки ЯИ для поддержки строительных работ до объявления технического описания для приглашения к участию в торгах (BIS).

- По *охране окружающей среды*, необходимо провести комплексную оценку воздействия проектов АЭС на окружающую среду; и включить в BIS требования по техническим подробностям об условиях, факторах, характеристиках и данных окружающей среды площадки строительства АЭС;

- По *аварийному планированию*, необходимо доработать и утвердить национальный план реагирования на ядерные и радиационные аварии.

- По *физической безопасности и физической защите*, необходимо включить в свои правовые положения концепцию оценки угроз и подход DBT

(design basis threat – проектная основная угроза) и предпринять необходимые шаги для планирования разработки DBT; продолжать устанавливать требования безопасности в процессе строительства АЭС; и подготовить план по продвижению и развитию культуры ядерной безопасности;

- По *ядерному топливному циклу*, необходимо разработать политику и стратегию по обращению с ОЯТ;

- По *радиоактивным отходам*, необходимо распределить обязанности и разработать план строительства объектов по переработке, хранению, захоронению РАО, а также определить национальные критерии для вывода из эксплуатации АЭС;

- По *отраслевому участию*, необходимо разработать нацпрограмму по содействию участию отечественной промышленности на основе оценки способности отечественной промышленности, с тем чтобы контракт позволил достичь желаемой цели, касающейся пропорций участия отечественной промышленности.

1.4.3 Период после 2016 г.

После отказа от АЭС в 2016 г. Вьетнам продолжает программу по развитию мирного атома, ведется подготовка вьетнамских специалистов-ядерщиков, планируется создание Центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ), в стране функционируют такие направления как ядерная медицина, производство изотопов, применение атомной энергии в сельском хозяйстве. Россия остается лидером среди вьетнамских партнеров в сфере атомной энергетики.

20.9.2018 в Вене, Австрия, Агентство по атомной энергии Вьетнама (VAEA) провел рабочее заседание с МАГАТЭ по вопросам поддержки развития ядерной инфраструктуры (ЯИ) Вьетнама. МАГАТЭ отметили текущее состояние ЯЭП во Вьетнаме после прекращения реализации проекта АЭС Ниньтхуан. МАГАТЭ высоко оценила тесное сотрудничество Вьетнама по поддержке ЯЭП Вьетнама в течение последнего периода. МАГАТЭ считает,

что будущие намерения Вьетнама могут помочь определить характер механизма поддержки МАГАТЭ Вьетнаму в будущем в области развития ЯИ.

В настоящее время МАГАТЭ продолжает оказывать поддержку Вьетнаму в текущих приоритетных областях ЯИ с целью сохранения способности и полученных ядерных знаний, продолжения обучения молодого поколения персонала. МАГАТЭ поддерживает следующие области ЯИ: правовая база, радиационная безопасность, развитие людских ресурсов, взаимодействие с заинтересованными сторонами, защита окружающей среды, реагирование на радиации и ядерные инциденты. Эти вспомогательные мероприятия призваны помочь Вьетнаму в реализации его приоритетных проектов: новый ИЯР; повышение способности ядерной безопасности; развитие людских ресурсов; готовность и реагирование на радиационные и ядерные инциденты (создание систем радиационного мониторинга; управление рисками безопасности существующих радиационных и ядерных объектов).

По существующим правилам МАГАТЭ эксплуатация ИЯР требует наличия в стране необходимой ЯИ и нормативно-правовой базы. МАГАТЭ помогает странам по их запросу проанализировать текущую ситуацию и определить направления для возможного совершенствования путем организации миссий по ИНИР для ИЯР (ИНИР-РР). Они представляют собой координируемые МАГАТЭ миссии независимой экспертизы, которые имеют комплексный характер и проводятся международными группами в составе экспертов МАГАТЭ и сторонних экспертов, имеющих непосредственный опыт в области специализированной ЯИ для ИЯР [16].

Перед началом миссии заинтересованная страна сначала должна подготовить отчет о самооценке, касающейся положения дел в 19 связанных с инфраструктурой вопросах, в соответствии с публикацией [17] МАГАТЭ. В ней содержатся руководящие материалы в отношении своевременной подготовки проекта ИЯР на основе последовательных процессов разработки, разделенных на этапы. После этого эксперты оценивают ситуацию, исходя из собранных в

ходе миссии ИНИР-РР фактических сведений, в том числе стратегических планов и особенностей площадки.

После завершения миссии группа ИНИР-РР подготавливает доклад, содержащий рекомендации о мерах по устранению выявленных недостатков. Приблизительно через два года после первоначальной миссии может быть проведена повторная миссия, призванная оценить ход выполнения рекомендаций. Обычно заинтересованная страна и МАГАТЭ, с учетом выводов по итогам рассмотрения, составляют план действий, обеспечивающих целенаправленное создание потенциала по некоторым из 19 вопросов ЯИ.

Процесс реализации программы по созданию ИЯР подразделяется на три основных этапа: проработка ТЭО проекта ИЯР; обеспечение условий для сооружения реактора, в том числе создание правовой и регулирующей основы; и собственно сооружение и ввод в эксплуатацию нового реактора [18]. Каждый из этих этапов предусматривает свой показатель готовности, или «веху», с помощью которых страна может отслеживать ход работ и оценивать степень готовности к началу работ на следующем этапе. Первая веха считается достигнутой тогда, когда страна готова к реализации программы по созданию ИЯР; вторая веха обозначает момент, когда страна готова начать переговоры для заключения контракта на сооружение и эксплуатацию реактора; третья веха знаменует собой готовность реактора к вводу в эксплуатацию.

С 3 по 7 декабря 2018 г. во Вьетнаме была проведена миссия ИНИР-РР, целью которой была проверка готовности Вьетнама к строительству нового многоцелевого ИЯР. Группа участвовавших в миссии экспертов пришла к выводу о том, что Вьетнам добился значительного прогресса в создании необходимой для ИЯР инфраструктуры. Представленные рекомендации включали проведение более подробной оценки профиля использования ИЯР и повышение степени независимости регулирующего органа, а также обновление и расширение программу развития людских ресурсов [19].

Планируемый многоцелевой ИЯР мощностью 10–15 МВт (тепл.) увеличит потенциал Вьетнама в области научных исследований, обучения и

подготовки кадров, а также производства радиоизотопов и исследований в области материаловедения. Вьетнам планирует ввести ИЯР в эксплуатацию к 2029 году. Миссия ИНИР-РР помогла Вьетнаму определить направления для дальнейшего развития инфраструктуры, в числе которых можно отметить стратегию обращения с радиоактивными отходами и нормативную базу.

Вьетнам продемонстрировал понимание долгосрочных национальных обязательств по развитию ЯИ для нового ИЯР. На сегодняшний день Вьетнам применяет комплексный подход, чтобы обеспечить эффективное привлечение ресурсов для развития необходимой ЯИ для предлагаемого ИЯР, а также уделяет особое внимание подготовке инфраструктуры для обеспечения ядерной безопасности, особенно созданию системы правовых документов и присоединению к международным договорам; обучение и развитие людских ресурсов; повышение способности ядерных регулирующих органов, организаций технической помощи и т.д.

1.5 Основные пути возникновения радиационных нагрузок на персонал АЭС

Составляющими радиационной опасности на АЭС являются:

- мгновенное излучение при делении тяжелых ядер в реакторе;
- излучение и загрязнение оборудования и воздуха продуктами собственной активности теплоносителя;
- радиоактивные продукты коррозии;
- радиоактивные продукты деления.

Активность теплоносителя. Вещества, используемые в качестве теплоносителя, активируются при прохождении через активную зону реактора. Наиболее распространенный теплоноситель АЭС с реакторами на тепловых нейтронах – вода высокой чистоты. В процессе облучения нейтронным потоком в воде образуются радионуклиды ^{13}N , ^{16}N , ^{17}N , ^{18}F и др. Кроме того, возможна активация примесей, недостаточно полно удаленных в процессе

водоподготовки⁷. Большой вклад в γ -излучение при работе реактора вносит образующийся в процессе активации воды ^{16}N ($T_{1/2} = 7,38$ с). При остановке реактора мощность γ -излучения ^{16}N быстро снижается.

Активность продуктов коррозии и примесей. При омывании теплоносителем поверхностей оборудования технологического контура АЭС в него поступают образующиеся продукты коррозии конструкционных материалов. Они переносятся теплоносителем по контуру, в том числе через активную зону реактора, где под действием нейтронного излучения часть из них активируется. Продукты коррозии не только поступают в теплоноситель, но и из теплоносителя осаждаются на поверхности оборудования, образуя пленку отложений. Между продуктами коррозии, находящимися в теплоносителе и в отложениях постоянно происходит массообмен. Все это представляет собой сложный физико-химический процесс.

Несмотря на то, что коррозионные отложения постоянно смываются циркулирующим теплоносителем и частично выводятся на фильтрах спецводоочистки, количество и активность их на поверхностях оборудования и трубопроводов постоянно возрастает. Последнее обстоятельство связано с тем, что продолжительность эксплуатации большинства АЭС не достигает времени насыщения по ^{60}Co .

В водоохлаждаемых реакторах оборудование технологического контура изготавливается из коррозионно-стойких сталей, а некоторые узлы конденсатно-питательного тракта АЭС с кипящими реакторами – из низколегированных и углеродистых сталей. Поэтому в состав коррозионных отложений в контурах АЭС различных типов входят в основном одни и те же радионуклиды [22]: кобальт, железо, хром, марганец и др. (табл. 1.1). Они образуются из химических элементов, входящих в состав сталей, сплавов циркония и других материалов.

⁷ Главная — Дезактивация в ядерной энергетике. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/ampelogova_dezaktivatsiya-v-yadernoy-energetike_1982/p3/ (дата обращения: 16.4.2024).

Таблица 1.1. Характеристика радиоактивных продуктов коррозии, входящих в состав отложений

Реакция образования	Период полураспада	Энергия фотонов, МэВ
$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	45,1 сут	1,1; 1,29
$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	27,703 сут	0,32
$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	2,5785 ч	0,846; 1,81; 2,11
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	312,3 сут	0,835
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	5,272 года	1,17; 1,33
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	70,78 сут	0,511; 0,81
$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$	64,05 сут	0,72; 0,75
$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$	250,4 сут	0,66; 0,88; 0,94; 1,38

Кобальт-60. Источником ^{59}Co , из которого образуется ^{60}Co , в контурах АЭС являются конструкционные материалы, в которых он присутствует в качестве легирующей добавки или примеси. Сплавы на основе кобальта (стеллиты) имеют высокие прочностные качества. Из-за использования на первых блоках Белоярской АЭС стеллита после непродолжительного срока эксплуатации удельная активность продуктов коррозии определялась на 80...90% изотопом ^{60}Co . Исключение стеллита из состава контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) на АЭС с РБМК существенно изменило картину: через 10000 ч эксплуатации активность ^{60}Co в теплоносителе была меньше активности других продуктов коррозии.

Содержание ^{59}Co в хромоникелевых нержавеющей сталях типа 18–8 составляет около 0,1%. Кобальт, как трудно удаляемая примесь к никелю, всегда содержится в рудах, и при любых металлургических процессах переработки попадает в никелевую сталь. На одноконтурных АЭС Японии допускалось содержание кобальта до 0,25%. Однако даже в этом случае присутствие ^{60}Co является основной причиной облучения персонала на АЭС во время ремонта и перегрузки топлива.

Ограничение содержания кобальта в нержавеющей сталях является важным путем решения одной из актуальных задач атомной энергетики – снижения дозозатрат обслуживающего персонала АЭС. Это очень важная

проблема, влияющая в конечном счете на конкурентоспособность отечественных ядерных энергетических установок на мировом рынке.

Особенности образования и переноса продуктов коррозии в технологическом контуре АЭС с реактором на быстрых нейтронах. На характер радиоактивного загрязнения поверхностей первого контура реакторов на быстрых нейтронах (РБН) влияют природа поверхности сорбирующего материала, металлического расплава, химические свойства и состояние радионуклида, концентрация примеси, кинетические, гидродинамические факторы и др. Отличительной особенностью является малая массовая концентрация радионуклидов в расплаве натрия. Радиоактивное загрязнение поверхностей первого контура происходит в основном вследствие сорбционных процессов. Радионуклиды сорбируются на тонких оксидных отложениях и на частичках, которые вместе с сорбирующимися радионуклидами осаждаются на поверхностях, образуя фазовые отложения.

В неизотермическом контуре радионуклиды сорбируются поверхностью конструкционных материалов в соответствии с их коэффициентами распределения. Отложение марганца и кобальта происходит преимущественно на горячих участках контура, так как их коэффициенты распределения растут с увеличением температуры. Коэффициенты распределения цезия, наоборот, уменьшаются с ростом температуры и поэтому его изотопы более эффективно сорбируются на холодных участках контура. Наименьшим коэффициентом распределения обладает ^{137}Cs , являющийся химическим аналогом натрия. Он менее других сорбируется на конструкционных материалах и преимущественно находится в элементарной растворимой форме в расплаве натрия.

Главной особенностью коррозионного воздействия натрия являются значительные изменения состава и структуры поверхностного слоя материала. Процесс коррозии конструкционных материалов контура, заполненного натрием, происходит менее интенсивно, чем контура с водой. Окисление поверхностей конструкционных материалов обусловлено присутствием в натрии примесей, и в первую очередь кислорода: скорость коррозии и

поступления в натрий железа увеличивается примерно в 15 раз при увеличении концентрации кислорода от 100 до 400 млн⁻¹. Основным процессом, приводящим к появлению в натрии ПК, является растворение. Поэтому при эксплуатации происходит изменение химического состава поверхностного слоя конструкционного материала контура – обеднение легко растворимыми компонентами сталей (Ni и Cr). Скорость поступления ПК в натрий зависит от скорости его циркуляции по контуру.

Радиоактивность теплоносителя первого контура при работе реактора БН-600 определяется радионуклидом ²⁴Na ($T_{1/2} = 15,005$ ч). После останова реактора и распада ²⁴Na радиоактивность натрия определяется ²²Na ($T_{1/2} = 2,602$ лет) и ¹³⁷Cs ($T_{1/2} = 30,174$ лет), небольшой вклад вносят ¹³⁴Cs ($T_{1/2} = 2,062$ лет) и ⁵⁴Mn ($T_{1/2} = 312,3$ дня). Активность долгоживущих нуклидов цезия зависит от продолжительности работы реактора с поврежденными твэлами, их количества, проведения очистки натрия от цезия.

Радионуклид ¹³¹I ($T_{1/2} = 8,04$ дня) на радиационную обстановку практически не влияет, т.к. быстро соединяется с натрием и в виде NaI удерживается в холодных ловушках.

Активность в газовой полости реактора (ГПР) в отсутствие негерметичных твэлов определяется изотопом ⁴¹Ar ($T_{1/2} = 1,83$ ч). При разгерметизации твэлов в активной зоне активность газообразных продуктов деления (ГПД) значительно превышает активность ⁴¹Ar. На этапе эксплуатации реактора с модернизированной активной зоной значения активности ГПД в ГПР значительно ниже, чем в предыдущий период.

Поверхностная загрязненность оборудования первого контура является важной характеристикой при проведении ремонтных работ. Радиоактивность отложений на поверхностях трубопроводов первого контура (входной и выходной коллекторы фильтр-ловушек) и бака реактора определяется ⁵⁴Mn. Его активность (по результатам спектрометрических измерений в 1989 году) на поверхности входного коллектора достигала 2,8 ГБк/м², на поверхности выходного коллектора – в 3 раза меньше. На боковой поверхности бака

реактора активность ^{54}Mn составляла 1,1...1,8 ГБк/м², а в районе центральной части днища – до 3,5 ГБк/м². В поверхностных отложениях на выемных частях ГЦН-I максимальная радиоактивность зафиксирована на поверхностях, омываемых натрием. В радиоактивных отложениях преобладает ^{54}Mn . Активность других радионуклидов коррозионного происхождения (^{58}Co , ^{60}Co), а также продуктов деления (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{95}Nb , ^{140}La) на таких поверхностях в 10 и более раз меньше. На поверхностях, находящихся в газовой полости, преобладают отложения ^{137}Cs .

Активность теплоносителя второго контура определяется натрием-24, образующимся при активации натрия во время прохождения его через промежуточные теплообменники. В петлях, прилегающих по расположению к элеваторам загрузки-выгрузки, активность ^{24}Na составляет 500...700 Бк/кг. В петле, расположенной напротив элеваторов – 110 Бк/кг. Основными источниками радиоактивного загрязнения воды в бассейне выдержки (~70%) являются активированные продукты коррозии конструкционных материалов (^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co) остальной вклад дают продукты деления ^{137}Cs , ^{134}Cs (около 30%). Небольшой вклад вносит выход в воду радионуклидов из отложений на поверхностях отработавших ТВС и стержней системы управления и защиты.

1.6 Заключение и рекомендации

В настоящее время мировая атомная энергетика меняется, переходя в период активного развития в контексте борьбы с изменением климата (после конференции ООН по изменению климата «COP28») и изменения геополитики в мире (кризис на Украине с 2022 г. привел к росту цен на нефть и газ, особенно на газ, соответственно, энергобезопасность становится важнее чем когда-либо). Ядерная энергия является стабильным и надежным источником электроэнергии с высокой мощностью; чистым источником электроэнергии, без выбросов парниковых газов; и к тому же привносит важный вклад в преобразование структуры энергоснабжения стран всего мира. Электроэнергия из ВИЭ является чистым и хорошо развитым источником электроэнергии, однако она зависит от

погодных и климатических условий. Следовательно, в ближайшем будущем, сочетание ядерной энергии и ВИЭ станет преобладающей тенденцией в сфере электроснабжения. По мнению аналитиков, климатические цели могут быть достигнуты только путем объединения ветра, солнца, ядерной и гидроэнергетики. Можно называть эти четыре источника энергии зеленым квадратом, где АЭС и ГЭС обеспечивают базовую нагрузку, а ветер и солнце отвечают за пиковую нагрузку.

Вьетнам запустил ЯЭП еще до воссоединения страны в 1975 г. Значительный прогресс в развертывании программы пришелся на период с 1996–2009 гг., особенно с 2010–2016 гг. при реализации проекта АЭС Ниньтхуан. Однако этот проект остановлен с 2016 г. На данный момент в контексте общей мировой тенденции, Вьетнаму необходимо тщательно рассмотреть возможность возрождения проекта по развитию атомной энергетики. Это необходимо для того, чтобы Вьетнам мог выполнить свои обязательства по COP28, обеспечить стабильное электроснабжение с большой мощностью и, что очень важно, мог сохранить независимость от поставок нефти и газа, что обеспечивало бы энергобезопасности страны.

Исходя из фактической ситуации о развертывании проекта АЭС Ниньтхуан, ранее подготовленной ЯИ Вьетнама и развития атомной энергетики в мире, в случае возвращения к развитию атомной энергетики Вьетнаму необходимо сосредоточиться на следующих моментах [20, 21, 1]:

- Чтобы иметь возможность развивать атомную энергетику, Вьетнаму необходимо начать с ЯЭП на базе усовершенствованного легководного реактора поколения III+. Это зрелая технология, тщательно изученная специалистами и прошедшая проверку временем за 70 лет. Легководные реакторы были и останутся популярной технологией в мире. На данный момент они имеют прочное научное, технологическое и промышленное обоснование, подкрепленное опытом работы специалистов. Вьетнам может начать исследования малых модульных реакторов (ММР) в долгосрочной перспективе.

Однако, перезапуск ядерной программы ММР не имеет смысла, особенно когда ММР не прошли необходимую проверку и не коммерциализированы.

- Вьетнам добился значительных результатов в реализации ЯЭП: запланированы площадки для строительства АЭС (8 потенциальных мест, в которых тщательно обследованы 2 площадки Фьюкзинь и Виньхай в Ниньтхуане), разработана правовая база в сфере атомной энергетики, ядерной и радиационной безопасности; подготовлены необходимые для эксплуатации атомных объектов кадры; имеется научно-практическая база; развернута команда по реализации проекта и т. д. Следовательно, возвращение к развитию атомной энергетики имеет основательную базу, которую можно было бы задействовать если бы Вьетнам продолжил то, чего он достиг к 2016 г.

- Обнародовать политику высшего руководства в ближайшее время, чтобы иметь основу для подготовки к возвращению строительства АЭС; сохранить ЯИ, людские ресурсы, мобилизованные в атомной энергетике и подготовленные за последние 20 лет.

- Организовать механизмы и политику, позволяющие выпускникам ядерных специальностей (особенно отличникам в учебе) повышать свою квалификацию. Это ценные людские ресурсы для исследовательских институтов и госорганов управления по радиационной и ядерной безопасности. Это позволит подготовиться к долгосрочным ЯЭП и активно реагировать на региональные и международные ядерные проблемы. С другой стороны, необходимо исследовать и перестроить долгосрочный план по подготовке кадров для ЯЭП. Проект АЭС реализуется много лет, но обучение кадров для работы с ядерной энергией требует больше времени!

- Пересмотреть и реструктурировать систему управления и участия агентов, задействованных в ЯЭП в случае перезапуска. В соответствии с международной практикой стоит рассмотреть и выбрать подходящих партнеров для реализации ядерных проектов. При возрождении ЯЭП было бы разумно обратиться к уже запланированным площадкам для строительства АЭС, где основное внимание заострено на 2 площадках в Ниньтхуане.

- Завершить разработку правовых документов по атомной энергетике для работы по экспертизе и утверждению площадки строительства АЭС. Продолжить изучение, разработку и редактирование правовых документов, обосновывающих строительство АЭС (внесение поправок в Закон об атомной энергии и в другие соответствующие документы, поскольку Закон об атомной энергии в значительной мере зависит от законов об инвестициях, о строительстве, об охране окружающей среды. Согласно действующим правилам, Премьер-министр утверждает местоположение, MOST выдает разрешение на строительство, а МОИТ выдает лицензию на эксплуатацию. Эти правила противоречат указаниям МАГАТЭ, которые требуют, что должен существовать единый РО, выполняющий все эти три функции.

- Ускорить процесс переговоров с российскими партнерами для развертывания проекта ЦЯНТ. Создать механизм, привлекающий молодых специалистов, которые будут работать, заниматься научно-исследовательской деятельностью в области атомной энергетике на благо научно-технологического и экономического развития Вьетнама.

- Создать мощную систему исследований и применений (НИОКР) в области атомной энергии для оказания технической поддержки с упором на технологии и ядерную безопасность. В частности, нужно создать и подготовить команду исследователей и квалифицированных специалистов-ядерщиков с одновременной проработкой льготных механизмов для поощрения талантливых кадров, преисполненных энтузиазмом для работы в атомной энергетике⁸.

- Продолжить мониторинг землетрясений в районе, где планируется построить АЭС, на основе созданной базы данных и имеющегося опыта. В ближайшее время развернуть строительство нацсети радиационного мониторинга и предупредительной системы об угрозах окружающей среде. Разработать дорожную карту организации мониторинга естественного радиационного фона. Сформировать структуры быстрого реагирования на

⁸ Корпорация «EVN» — Điện hạt nhân: nguồn năng lượng cần có trong Quy hoạch điện VIII. URL: <https://www.evn.com.vn/d6/news/Dien-hat-nhan-nguon-nang-luong-can-co-trong-Quy-hoach-dien-VIII-6-8-26918.aspx> (дата обращения: 08.04.2024).

радиационные и ядерные инциденты, вызванные потенциальными радиоактивными источниками выбросов за пределами Вьетнама и т.д.

- Расширить информационно-просветительскую работу о ядерной энергии, предоставлять полную и регулярную информацию общественности в СМИ и других средствах формирования общественного мнения. Это способствует пониманию необходимости использования ядерной энергии среди широких слоев населения, создаст условия для общественной поддержки и приведет к достижению консенсуса в разработке ЯЭП Вьетнама.

1.7 Основные выводы к главе 1

На основании цели и задач диссертационного исследования, а также результатов исследования и анализа перспектив развития атомной энергетики и ядерной инфраструктуры (ЯИ) Вьетнама, автор диссертации выделил три элемента (охрана окружающей среды, развитие людских ресурсов и радиационная защита) из 19 элементов развития ЯИ (см. рис. 1.3), определенных документом МАГАТЭ [10], чтобы углубиться в исследования. Была проведена разработка отдельных мероприятий по созданию этих элементов ЯИ.

По элементу «Охрана окружающей среды», был проведен анализ основных требований и применимых методов при проведении оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), правовая база Вьетнама в области ОВОС и соответствующие руководства МАГАТЭ и ведущих стран мира (РФ, США и др.) в области использования атомной энергии для разработки руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС.

По элементу «Развитие людских ресурсов», был разработан и издан русско-вьетнамский словарь терминов в области использования атомной энергии (всего 840 терминов, из которых 106 разработаны впервые) и подготовлен к изданию учебник «Основы ядерной энергетики» на русском и вьетнамском языках для подготовки вьетнамских студентов и специалистов в вузах России и обучения русскому языку вьетнамских специалистов.

По элементу «Радиационная защита», был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований образцов природных минералов из месторождений Вьетнама, которые были собраны автором диссертации и доставлены в УрФУ для оценки потенциальной возможности использования местных природных минералов при сооружении радиационной защиты объектов использования атомной энергии во Вьетнаме. Использование местных природных строительных материалов позволяет минимизировать стоимость сооружения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

Подробное их изложение представлено в следующих главах диссертационной работы.

По результату анализа основных путей возникновения радиационных нагрузок на персонал АЭС, можно сказать, что основной вклад для радиоактивных загрязнений на ОИАЭ вносит долгоживущих нуклидов, как цезия и кобальт с низкими и средними энергиями γ -излучения, основным изотопом которых является Cs-137 и Co-60, которые могут быть использован как при выводе из эксплуатации атомных объектов, так и в любых других радиационно-опасных зонах.

ГЛАВА 2 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ КАМЕННЫХ МИНЕРАЛОВ ВЬЕТНАМА

2.1 Общие сведения

В последнее время наблюдается рост интенсивности использования ядерных и радиационных технологий в различных областях науки и техники, в том числе в энергетике и, конечно, атомной промышленности. Основной проблемой и опасностью, связанной с развитием ядерных и радиационных технологий, является генерация излучений (нейтронное, альфа-, бета-, гамма-излучение) и обеспечения их ослабления. Из-за высокой проникающей способности различных видов излучения требуются различные экранирующие материалы. Гамма- и нейтронное излучение обладают высокой проникающей способностью, поэтому они представляют собой излучения, вызывающие серьезную озабоченность и следует относиться очень серьезно [22, 23].

Первым и основным требованием к материалу, предназначенному для защиты от излучения от ядерного реактора, являются высокие защитные свойства как по отношению к нейтронам, так и к γ -излучению. Для этого материал должен иметь определенный химический состав. В независимости от того, в каком виде используется материал, он должен обладать рядом требований для длительной и качественной защиты: конструкционная прочность, высокая радиационная и термическая стойкость, жаростойкость и технологичность [24].

К сожалению, в природе нет материалов, удовлетворяющих всем требованиям, поэтому ученые научились комбинировать материалы, которые хоть немного подходят этим требованиям. Исследование комбинированных радиационно-защитных материалов направлено на реализацию одного из основных принципов радиационной защиты – принципа оптимизации [25, 26]. Как известно, стоимость защиты современных ядерных объектов может достигать 20–30% от общей стоимости строительства, поэтому применение

широко распространенных в регионе сооружения АЭС природных материалов в ее защите может снизить стоимость сооружения станции [24]. Бетоны [27, 28], руды [29, 30], различные камни [31–34] и минералы [35, 36] наиболее широко востребованы при сооружении биологической защиты. Эти материалы доступны, дешевы и удобны в технологическом отношении, но что не маловажно обладают достаточно высокими защитными свойствами [34].

В настоящее время во Вьетнаме рассматривается проект по строительству ЦЯНТ с новым ИЯР мощностью 10 МВт (с возможности повышения мощности до 15 МВт). Следовательно, изучение свойств и характеристик местных природных пород Вьетнама для применения в целях радиационной защиты при строительстве ЦЯНТ в частности и АЭС Вьетнама в целом является важным и актуальным задачей. Потенциал использования региональных природных ресурсов и промышленных отходов для сооружения ОИАЭ и внедрения радиационных технологий особенно важен для минимизации затрат при их строительстве. Эти объекты имеют первостепенное значение для развития науки, техники и технологий, а также для наиболее эффективного использования ресурсов страны [37].

Целью настоящей работы является оценка экранирующих свойств вьетнамских природных каменных материалов посредством теоретических и экспериментальных исследований, а также их экспериментальная оценка физико-химических характеристик и способности для использования в области защиты от гамма-излучения. Исследование проводилось с целью определения возможности оценки полученных вьетнамских природных камней для использования в радиационной защите.

2.2 Материалы и методы

2.2.1 Сбор, подготовка камней и исследование их физических свойств

В настоящей работе вьетнамские природные каменные материалы представлены в виде восьми образцов камней, собранных из разных регионов Северного Вьетнама, среди которых три образца были взяты из провинции

Лайчау, четыре – из города Сапа (провинция Лаокай) и один – из уезда Виньлок (провинция Тханьхоа) (рис. 2.1). Кроме того, фотографии образцов представлены в табл. 2.1. Сначала образцы были очищены от пыли и всех примесных материалов, а затем выдержаны при комнатной температуре для высыхания.



Рисунок 2.1. Места отбора образцов камней в Северном Вьетнаме

Для того, чтобы экспериментально оценить способность защиты от излучения, собранные камни необходимо разрезать до определенной формы и толщины (рис. 2.2).

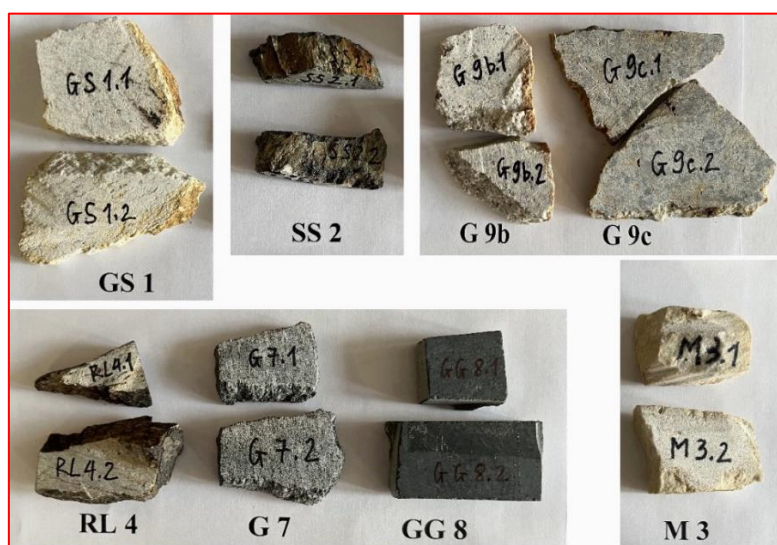


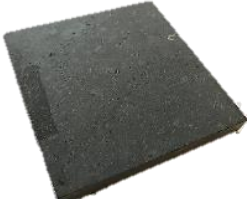




Рисунок 2.2. Образцы камней Вьетнама после обработки и резки

Таблица 2.1. Исследуемые вьетнамские образцы камней

№ п/п	Картинки	Наименование	Место отбора
1		камень Гранодиорит (GS 1)	деревня Та Ван Дай II, коммуна Та Ван, город Сапа, провинция Лаокай
2		Мрамор (M 3)	жилая группа №2, квартал Кау Май, город Сапа, провинция Лаокай
3		Известняк перекристалли- зованный (RL 4)	жилая группа №2, деревня Пхо, коммуна Мыонг Хоа, город Сапа, провинция Лаокай
4		Зеленый гранит (GG 8)	деревня Ван Хань, коммуна Виньфук, уезд Виньлок, провинция Тханьхоа
5		Гранит (G 9b)	провинция Лайчау
6		Гранит (G 9c)	провинция Лайчау
7		Гранит (G 7)	деревня Тоонг, коммуна Тханьбинь, город Сапа, провинция Лаокай
8		сланец Серицит (SS 2)	возле Средней Школы №1 Сапа, город Сапа, провинция Лаокай

Затем экспериментально были измерены объемная плотность (ρ , г/см³), пористость (Φ , %) и водопоглощение (K , %) образцов камней. Для измерения плотности собранных камней использовался цифровой плотномер МН-300А (Гуандун, Китай) с точностью измерения $\pm 0,001$ г/см³. При измерениях в соответствии с уравнением Архимеда (2.1), в качестве погружающей жидкости используется вода ($\rho_L \approx 1$ г/см³) [37].

$$\rho \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right) = \frac{W_a}{(W_a - W_L)} \rho_L \quad (2.1)$$

где значения W_a и W_L обозначают массу собранных камней в воздухе и погружающей жидкости, соответственно.

Для измерения значений Φ , необходимо определить объем пор (V_p , см³) и насыпный объем (V_b , см³) для каждого собранного камня, где значения Φ могут быть определены в соответствии с уравнением (2.2) [38].

$$\Phi (\%) = \frac{V_p}{V_b} \quad (2.2)$$

Затем экспериментально измеряли водопоглощающую способность собранных камней в соответствии с уравнением (2.3) [38].

$$K (\%) = \frac{(W_a - W_L)}{W_a} \times 100 \quad (2.3)$$

2.2.2 Оценка экранирующих свойств образцов камней

Характеристики ослабления γ -излучения для собранных вьетнамских камней были измерены экспериментально при энергии γ -излучения 1,252 МэВ с использованием метода пропускания узкого пучка γ -излучения. Метод основан на том, что детектор и источник γ -излучения размещаются на двух разных сторон экранирующего материала по одной оси. Узкий пучок излучения, испускаемого источником, формировался свинцовым коллиматором, до и после экранирующего материала и направлялся на детектор.

Измерения выполнялись на гамма-радиометре РКГ-АТ1320 (производство «Атомтех», Белоруссия) со сцинтилляционным детектором NaI (Тl) \varnothing 63x63 мм. Образцы помещали вплотную к детектору, а источники гамма-квантов

располагали на одинаковом расстоянии от детектора во всех измерениях. Точечный источник гамма-излучения «Кобальт-60» (Co-60) использовался для экспериментальных измерений линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}). Схема выполнения измерений представлена на рис. 2.3.

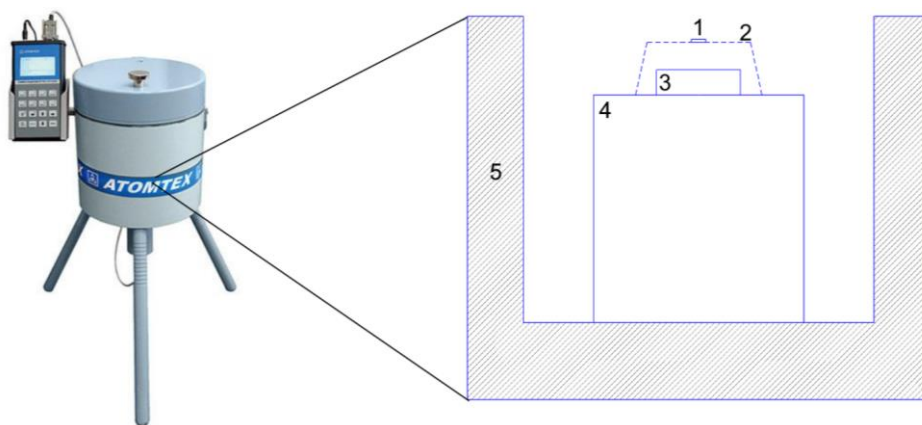


Рисунок 2.3. Экспериментальная установка для измерения γ -излучения: 1 – точечный источник гамма-квантов, 2 – подставка для обеспечения одинакового расстояния между детектором и источником, 3 – образец, 4 – сцинтилляционный детектор NaI (Tl), 5 – свинцовая защита

Оценку интенсивности проводили по фотопикам. Интенсивность рассчитывали по следующей формуле:

$$N = \frac{S_p}{t_m} - \frac{S_b}{t_b} \quad (2.4)$$

где S_p – площадь пика, равная суммарному числу зарегистрированных гамма-квантов на спектре в границах фотопика. Площадь пика обсчитывали вручную, выделив диапазон каналов аналого-цифрового преобразователя; t_m – время набора спектра при облучении образца; S_b – число отсчетов в диапазоне каналов фонового спектра, соответствующих границам фотопика; t_b – время набора фонового спектра.

Перед началом измерений источник γ -фотонов помещался в коллиматор и без образцов камней измерялся поток γ -излучения (N_o). Затем устанавливались образцы камней разной толщины для измерения потока γ -излучения (N_t) при наличии образцов камней. Определение значений N_t и N_o проводилось несколько раз, а полученные чистые значения усреднялись для минимизации относительной погрешности. На основе измеренных величин N_t и N_o были

определены линейные коэффициенты ослабления (μ , см^{-1}) образцов камней Вьетнама, где значение μ представляет собой наклон зависимости между $\ln(N_o / N_t)$ и x (толщина камня, см), как показано в уравнении (2.5) [39].

$$\mu (\text{см}^{-1}) = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right) \quad (2.5)$$

Предыдущее уравнение показывает зависимость значений μ от толщины образцов, поэтому для измерения толщины образцов камней (x , см) применяется высокоточный цифровой штангенциркуль фирмы X-PERT (Москва, Россия) с погрешностью $\pm 0,02$ мм.

Коэффициент μ используется для описания способности любого материала ослаблять проходящее излучение на единицу толщины материала. Величина μ зависит от атомного номера поглощающего материала и длины волны гамма-излучения. Каждое измерение повторялось 4 раза, чтобы оценить неопределенность полученных результатов. Погрешность линейного коэффициента ослабления ($\Delta\mu$) определялась по уравнению (2.6), где ΔN_o – погрешность измерения интенсивности излучения без экранирующего материала, ΔN_t – погрешность измерения интенсивности излучения при наличии экранирующего материала, Δx – погрешность измерения толщины.

$$\Delta\mu = \frac{1}{x} \sqrt{\left(\frac{\Delta N_o}{N_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_t}{N_t}\right)^2 + \ln \left(\frac{N_o}{N_t}\right)^2 \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2} \quad (2.6)$$

Массовый коэффициент ослабления μ_m ($\text{см}^2/\text{г}$) является мерой вероятности взаимодействия гамма-излучения с веществом и определяется из уравнения:

$$\mu_m \left(\frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right) = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right) \quad (2.7)$$

где ρ – плотность измеряемого материала, $\text{г}/\text{см}^3$.

Массовый коэффициент ослабления μ_m характеризует уменьшение интенсивности гамма-излучения в единице массы вещества. В случае необходимости μ находится умножением μ_m на экспериментально найденную величину плотности вещества при температуре опыта.

Результат взаимодействия электромагнитного излучения с веществом может характеризоваться также слоем половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), представляющим собой толщину слоя $\Delta_{0,5}$, при прохождении которого интенсивность лучей ослабляется в два раза, т.е. $N = N_o / 2$. Толщина $\Delta_{0,5}$ убывает с возрастанием энергии гамма-излучения. Следовательно, слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$), определяемый как толщина материала, которая вдвое уменьшает интенсивность потока фотонов, попадающих в материал, рассматривается как важная характеристика, которая может быть использован для оценки экранирующей способности любого материала-поглотителя для падающих фотонов. $\Delta_{0,5}$ связан с μ , согласно следующей зависимости:

$$\Delta_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.8)$$

Кроме того, длина свободного пробега (λ , см) обозначает расстояние внутри собранных камней, которое фотоны проходят между двумя взаимодействиями с электронами камней. Это также определяется на основе измеренных значений μ в соответствии с уравнением (2.9).

$$\lambda \text{ (cm)} = \frac{1}{\mu} \quad (2.9)$$

Затем с использованием измеренных значений N_t , N_o и μ для вьетнамских природных камней были оценены эквивалентная толщина свинца (Δ_{eq} , см), коэффициент пропускания (TF , %) и эффективность радиационной защиты (RPE , %), как описано в уравнениях (2.10–2.12).

$$\Delta_{eq} \text{ (cm)} = \frac{x \text{ (cm)} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right)_{\text{свинец}}}{\ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right)_{\text{камень}}} \quad (2.10)$$

$$TF \text{ (\%)} = \frac{N_t}{N_o} \times 100 \quad (2.11)$$

$$RPE \text{ (\%)} = \frac{N_a}{N_o} = \frac{(N_o - N_t)}{N_o} \times 100 \quad (2.12)$$

где $N_a = (N_o - N_t)$ представляет собой количество поглощенных фотонов в пределах толщины вьетнамских природных камней.

2.2.3 Определение химического состава образцов камней Вьетнама

Исследование химического состава отобранных образцов камней Вьетнама автор диссертации проводил совместно с научным сотрудником Махмуд Карем Абделазим Габер (кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии, УрФУ, г. Екатеринбург) с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора X-5000 (Olympus).

Анализатор Olympus X-5000 специально спроектирован для безопасного и качественного дисперсноэнергетического рентгенофлуоресцентного анализа (EDXRF). Анализатор представляет собой переносную мини-лабораторию с надежно защищенным тестовым отсеком и универсальным программным обеспечением, содержащим широкий набор заводских и пользовательских калибровок. X-5000 характеризуется безопасностью и высокой производительностью традиционного настольного EDXRF-анализатора, а также отличается экономичностью и прочностью проверенного на практике портативного оборудования XRF.

Портативный анализатор Olympus X-5000 (рис. 2.4) обладает высокой производительностью благодаря рентгеновской трубке мощностью 50 кэВ/10 Вт, которая обеспечивает идеальный предел обнаружения химических элементов от легких элементов, таких как магний (Mg), до тяжелых элементов, таких как уран (U). Он также отличается различными типами анодов, включая серебряные (Ag), танталовые (Ta) и родиевые (Rh). Помимо редкоземельных элементов, чувствительный Ta-анод используется для измерения более 25 тяжелых элементов, включая Cd, Ba, Ag, Au, Pb, Sn и Sb. С другой стороны, точный анализ легких элементов и переходных металлов достигается с помощью Rh-анода. Чтобы увеличить предел обнаружения легких элементов (особенно образцов в нефтяной промышленности), был использован третий Ag-анод. Полупроводниковый детектор Si-PIN, используемый в портативном анализаторе Olympus X-5000, работает в широком диапазоне температур от -10 °C до 50 °C.



Рисунок 2.4. Анализатор Olympus X-5000 для определения химического состава образцов с помощью метода рентгенофлуоресцентного анализа и его принцип работы

Метод рентгенофлуоресцентного анализа (X-ray fluorescence spectrometry) основан на сборе и анализе спектра, полученного после возбуждения характеристического рентгеновского излучения, которое возникает при переходе атома из возбуждённого в основное состояние. Атомы разных элементов испускают фотоны со строго определёнными энергиями, измерив которые можно определить качественный элементный состав. Для измерения количества элемента регистрируется интенсивность излучения с определённой энергией. Результаты химического анализа представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Химический состав собранных вьетнамских образцов камней

Элементы	Химический состав (%) вьетнамских природных образцов камней							
	G 7.1	G 9c.1	GS 1.1	M 3.1	SS 2.2	RL 4.1	GG 8.1	G 9b.2
Al ₂ O ₃	4,384	5,826	7,142	0,000	3,420	5,782	0,000	3,804
SiO ₂	32,145	41,764	44,396	1,840	28,965	25,029	17,741	28,294
P ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,421	0,000
SO ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,196
Cl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,860	0,450
K ₂ O	8,306	13,289	15,380	0,141	16,666	18,210	1,067	9,789
CaO	6,049	0,000	1,404	26,945	0,000	0,000	14,949	1,208
TiO ₂	0,488	0,115	0,150	0,134	0,455	0,477	0,866	0,294
V ₂ O ₅	0,086	0,055	0,058	0,067	0,089	0,157	0,167	0,156
Cr ₂ O ₃	0,028	0,021	0,028	0,038	0,027	0,035	0,062	0,061
MnO	0,129	0,000	0,024	0,032	0,227	0,434	0,165	0,042
Fe ₂ O ₃	9,734	2,516	1,653	0,239	10,765	6,988	9,582	1,382
NiO	0,010	0,012	0,013	0,008	0,010	0,015	0,022	0,014

CuO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,009	0,004
ZnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,004	0,000	0,004
ZrO ₂	0,027	0,007	0,012	0,000	0,030	0,019	0,000	0,003
MoO ₃	0,001	0,003	0,004	0,000	0,001	0,001	0,006	0,004
CdO	0,005	0,003	0,003	0,000	0,008	0,003	0,012	0,002
Sb ₂ O ₅	4,384	5,826	7,142	0,000	3,420	5,782	0,000	3,804
WO ₃	32,145	41,764	44,396	1,840	28,965	25,029	17,741	28,294
PbO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,421	0,000
Bi ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,196
Средние легкие элементы	38,608	39,305	53,292	36,388	54,070	29,734	70,555	42,839
Плотность (г/см ³)	2,73	2,72	2,48	2,83	2,60	2,68	2,86	2,61

2.2.4 Моделирование методом Монте-Карло и теоретическая оценка экранирующей способности образцов

В последний период времени значительно выросли мощности вычислительной техники. По этой причине возникло активное развитие расчетных программ на основе метода Монте-Карло к задачам решения уравнения переноса излучения. Эти вычислительные методы стали незаменимым инструментом для разработки материалов радиационной защиты для ядерных приложений. Основное преимущество данных программ заключается в возможности подробного и детального описания, а также выполнения точных расчетов характеристик излучения в сложной трехмерной геометрии поставленной задачи. Использование этих методов помогает найти оптимальный химический состав материалов, который дает необходимое ослабление излучения и физико-химические свойства для данного приложения. Метод Монте-Карло заключается в моделировании конечного числа историй частиц с помощью генератора псевдослучайных чисел. В истории каждой частицы генерируются случайные числа, которые используются для выборки соответствующих распределений вероятностей для начальной энергии частицы/фотона, направления движения, длины шага, взаимодействующего ядра, типа взаимодействия, нового направления и т.д. Отслеживается история каждой частицы, \bar{x} некоторых величин, таких как поток, ток, вероятность выхода или любое количество других величин.

Одним из таких программных кодов, в котором реализован метод Монте-Карло, является код переноса N-частиц по методу Монте-Карло (MCNP), версия 5 (сокращение: MCNP-5). Данный расчетный код MCNP-5 обладает мощными вычислительными возможностями, позволяющие рассматривать реальные процессы, происходящие в ядерной энергетической установке. Это код общего назначения с непрерывной энергией, обобщенной геометрией, зависящий от времени, код переноса излучения по методу Монте-Карло, предназначенный для отслеживания многих типов частиц в широком диапазоне энергий и разработанный Лос-Аламосской национальной лабораторией [40]. Программа MCNP-5 позволяет решать задачи переноса для следующих частиц: только нейтрон, только фотон, только электрон, в комбинации нейтронные / фотонные задачи, где фотоны являются продуктом взаимодействия нейтронов с веществом, нейтронные / фотонные / электронные, фотонные / электронные или электронные / фотонные. Нейтронная энергия рассматривается в диапазоне от 10^{-11} МэВ до 20 МэВ для всех изотопов и свыше 150 МэВ для некоторых изотопов. Фотонный диапазон рассматриваемых энергий лежит в пределах от 1 кэВ до 100 ГэВ, а также электронный от 1 кэВ до 1 ГэВ. Полноценное описание трехмерной геометрии, т.е. существует возможность задавать различные фигуры: параллелепипед, шар, конус, поверхности второго порядка (эллипсоид, гиперболоид, параболоид) и некоторые поверхности четвертого порядка (эллиптический или круговой тор, параллельный одной из осей координат). Также реализована возможность проведения вставок, накладок, вырезов, врезок геометрических фигур и т.д., что позволяет детально описывать геометрию расчёта. Реализованная в MCNP функция перемещения и повороты осей координат, позволяет расширить количество используемых геометрических фигур. Отличительной особенностью данной программы является описание распределения источника. Способность задавать источник частиц в виде точки, в виде объемного распределения в ячейке, также задание источника в нескольких разных местоположениях с разной интенсивностью излучения. Это далеко не все указанные возможности моделирования источника [41].

Для работы с MCNP-5 сначала пользователь должен создать входной файл. Единицы измерения, используемые в этом файле: (см) для длины, (МэВ) для энергии, (10^{-8} секунд) для временных колебаний, ($\text{г}/\text{см}^3$) для массовой плотности. Входной файл MCNP-5 оформлен в виде текстового файла. Он содержит полное описание пучка частиц, геометрии, материалов, физики и оценки, а также количество первичных частиц (историй) и исполняемых файлов, необходимых для запуска моделирования MCNP-5 (рис. 2.5) [42]. Входной файл MCNP-5 обсуждался в ранее опубликованных статьях для различных экранирующих материалов, таких как сплавы, стекла, кирпичи и бетоны [43, 44]. Выходные файлы обычно являются двоичными и имеют формат текстового файла.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
E:\ph D russia\Karem_glasses\BBB\simulation\BBB1>"C:\Program Files\MCNP\mcnp54.exe
mcnp ver=5 , ld=07042014 03/30/22 19:00:50
O.txt already exists. P.txt is created instead.
Thread Name & Version = MCNP5_RSICC, 1.40
Copyright LANL/UC/DOE - see output file

i n c n p 5

sdef cel=80 pos=0 0 0 rad=d1 axs=0 0 1 ext=0 wgt=1 PAR=2 ERG=d3
warning. ext is constant. in most problems it is a variable.

comment. 13 surfaces were deleted for being the same as others.
warning. source distribution 2 is not used in this problem.
comment. using random number generator 1, initial seed = 19073486328125
lmcn is done

runtpe already exists. runtprf is created instead.
warning. material 1 has been set to a conductor.
dump 1 on file runtprf nps = 0 coll = 0
ctm = 0.00 nrn = 0

xact is done

cp0 = 0.01
run terminated because 10 particles got lost.
warning. 2 of 2 tallies did not pass all 10 statistical checks.
warning. 2 of 2 tallies were all zeros.
dump 2 on file runtprf nps = 17 coll = 367

*NC.txt - Notepad
File Edit Format View Help
15 rcc 0 0 8 0 0 1 10
c Tally:
60 rcc 0 0 15 0 0 0.1 3 $ tally
70 rcc 0 0 15 0 0 10 9 $ air surrounding tally
C environmental:
80 rcc 0 0 0 0 0 3 5 $ source vacuum
82 pz 0 $ Source
85 rcc 0 0 0 0 0 9 15
86 rcc 0 0 0 0 0 5 5.1
87 rcc 0 0 5 0 0 4 10.1
88 rcc 0 0 9.2 0 0 5.5 15
89 rcc 0 0 9.2 0 0 5.5 5.1
90 rcc 0 0 0 0 0 25 20 $ surrounds
95 rcc 0 0 -5 0 0 30 25

c mode p
c materials:
m1 82000 -1.000 $ Lead
m3 3000. -0.019931
5000. -0.082783
8000. -0.214397
9000. -0.145477
12000. -0.011632
56000. -0.525779
m2 7000. -0.755267 $ air
8000. -0.231781
18000. -0.012827
6000. -0.000124
  
```

Рисунок 2.5. Скриншот для входного файла и пример моделирования линейного коэффициента ослабления с использованием кода MCNP-5

Карта материалов содержит элементарный химический состав и плотность материалов ячейки. В созданном исходном файле находится химический состав исследуемых защитных материалов (например: горных пород, бетонов, стекол, сплавов и т.д.). Карта источника (SDEF) используется для описания всей информации об используемом источнике, такие как положение источника (расстояние до детектора), номер ячейки (номер ячейки, в которой находится источник), Dir ([0, 0, 1] направление излучения вдоль

направления Z), PAR (предполагается 2 для фотонов), ENG (использованная энергия фотонов), WGT (описывает вес частицы). Кроме того, в карту источника (SDEF) также была внесена вероятность испускания и распространения излучения.

Для подтверждения экспериментальных оценок экранирующей способности исследуемых вьетнамских природных камней, была использована компьютерная программа для оценки линейного коэффициента ослабления – код моделирования MCNP-5 с использованием метода Монте-Карло. Исходными данными для нее является химический состав отобранных проб. Чем точнее химический состав, тем выше эффективность используемой программы и точнее определяются радиационно-защитные свойства.

Код MCNP-5 [40] требует входной файл для моделирования средней длины пути (average track length – ATL) γ -фотонов внутри изученных вьетнамских камней. К коду MCNP-5 была подключена ядерная база данных ENDF/B-VI.8 [45], содержащая поперечные сечения взаимодействия γ -лучей, необходимые для оценки ATL собранных камней. Чтобы запустить моделирование и исследовать ATL камней, необходимо создать входной файл в формате txt. Компоненты геометрии (внешнее экранирование, состав камня, коллиматоры, источник и детектор) должны быть перечислены и внесены в созданный входной файл. Вышеупомянутая информация о геометрии вносилась во входной файл во многих картах, включая карты поверхности, ячейки, важности, материала, источника (SDEF – source definition card – карта определения источника), подсчета, отсечения, NPS (number of particles per second – количество частиц в секунду) и физическую карту, как представлено на рис. 2.6. Более подробно о созданной геометрии и входном файле было рассказано в ранее опубликованных статьях [46, 47]. ATL γ -фотонов в исследуемых камнях оценивалась с помощью подсчетной функции «F4». С помощью карты отсечения, на которой установлено 10^8 исторических выбросов, фотонно-электронное взаимодействие управляется и контролируется. Значения ATL для каждой ячейки табулировались в выходном файле, который

автоматически создавался после завершения моделирования. Значения АТЛ использовались для оценки значений линейного коэффициента ослабления для исследуемых камней. Элементный химический состав образцов камней Вьетнама (см. табл. 2.2) был внесен в карту материала.

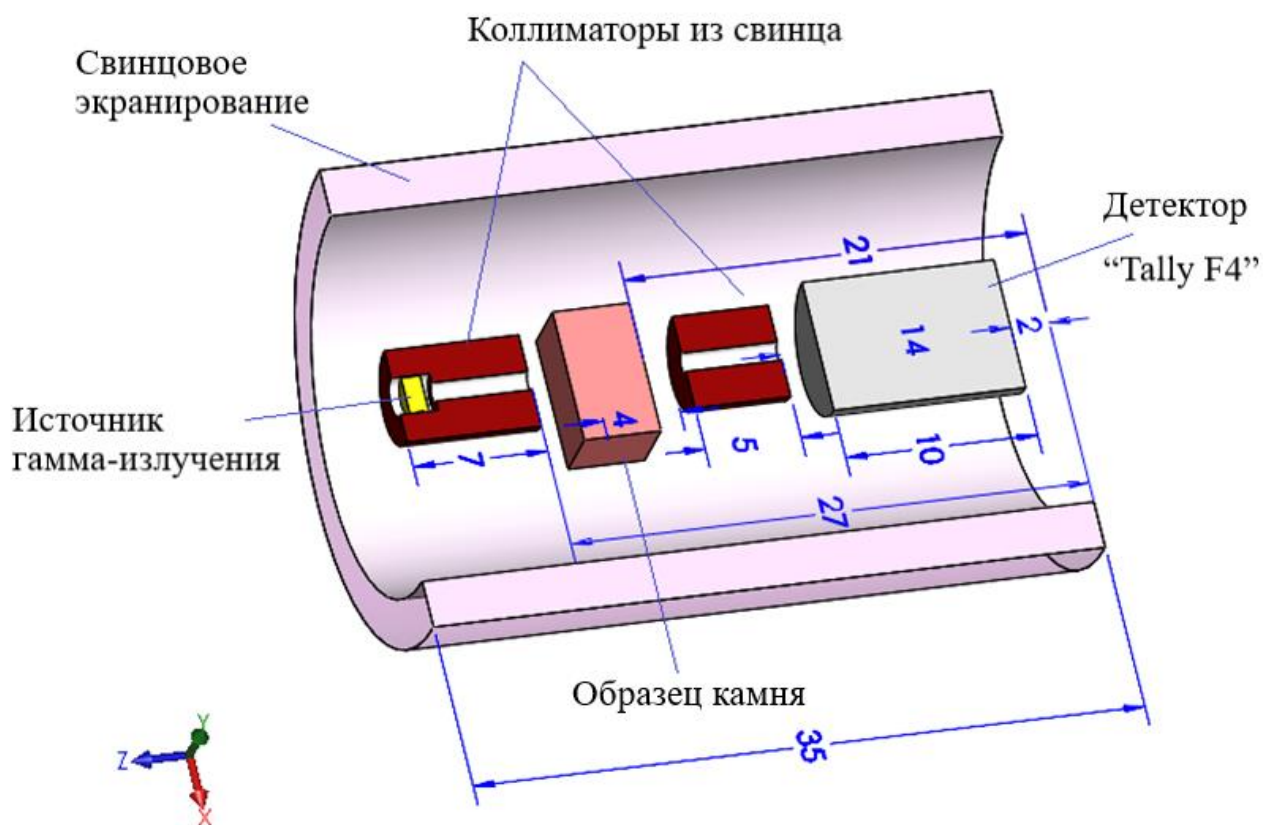


Рисунок 2.6. Трехмерное изображение для созданного входного файла MCNP-5 (единица измерения: см)

2.3 Результаты и обсуждение

2.3.1 Физические и химические свойства

После сбора вьетнамских камней была измерена их плотность, как показано на рис. 2.7. Измерения показывают, что плотность образцов камней варьируется в пределах 2,73; 2,72; 2,48; 2,83; 2,60; 2,68; 2,86 и 2,61 г/см³ для образцов камней G 7.1, G 9с.1, GS 1.1, M 3.1, SS 2.2, RL 4.1, GG 8.1 и G 9b.2, соответственно. Среди собранных камней наибольшие значения плотности (ρ , г/см³) были получены для образцов камней M 3.1, GG 8.1, G 7.1 и G 9с.1, которые относятся к мрамору и гранитному камню. Основная причина высоких значений ρ для выбранных камней в данном исследовании связана с двумя

факторами, включая химический состав и пористость выбранных камней. Химический состав образцов вьетнамского камня представлен в табл. 2.2. В отобранных камнях отмечены наиболее высокие концентрации Fe+Ca, которые достигают 65,97; 48,60; 37,78 и 20,40% для образцов М 3.1, G 7.1, GG 8.1 и G 9с.1, соответственно. Вторым фактором, влияющим на значения ρ для выбранных образцов, являются величины пористости (Φ , %) для выбранных камней. На рис. 2.7 показано, что величины Φ для выбранных камней варьировались в пределах 1,56; 3,37; 8,23; 2,02; 4,21; 4,71; 0,15 и 1,21% для образцов G 7.1, G 9с.1, GS 1.1, М 3.1, SS 2.2, RL 4.1, GG 8.1 и G 9b.2, соответственно. Вышеупомянутые результаты показали, что камни с самыми высокими значениями ρ (М 3.1, GG 8.1 и G 7.1) имеют практически самые низкие значения Φ , которые достигают (2,02; 0,15 и 1,56%). Величины Φ для собранных камней влияют на коэффициент водопоглощения (K , %) для собранных камней, где увеличение времени погружения в воду от 10 до 180 минут изменяет коэффициент K в пределах от 0,71 до 0,83% (для камня М 3.1), от 0,57 до 0,64% (для камня G 7.1) и от 0,05 до 0,16% (для камня GG 8.1). Что касается коэффициента K , то камень GS 1.1 с высокой величиной Φ (8,23%) имеет самый высокий коэффициент K , где его коэффициент K увеличивается от 3,17 до 3,37% при увеличении времени погружения в воду от 10 до 180 минут (рис. 2.8).

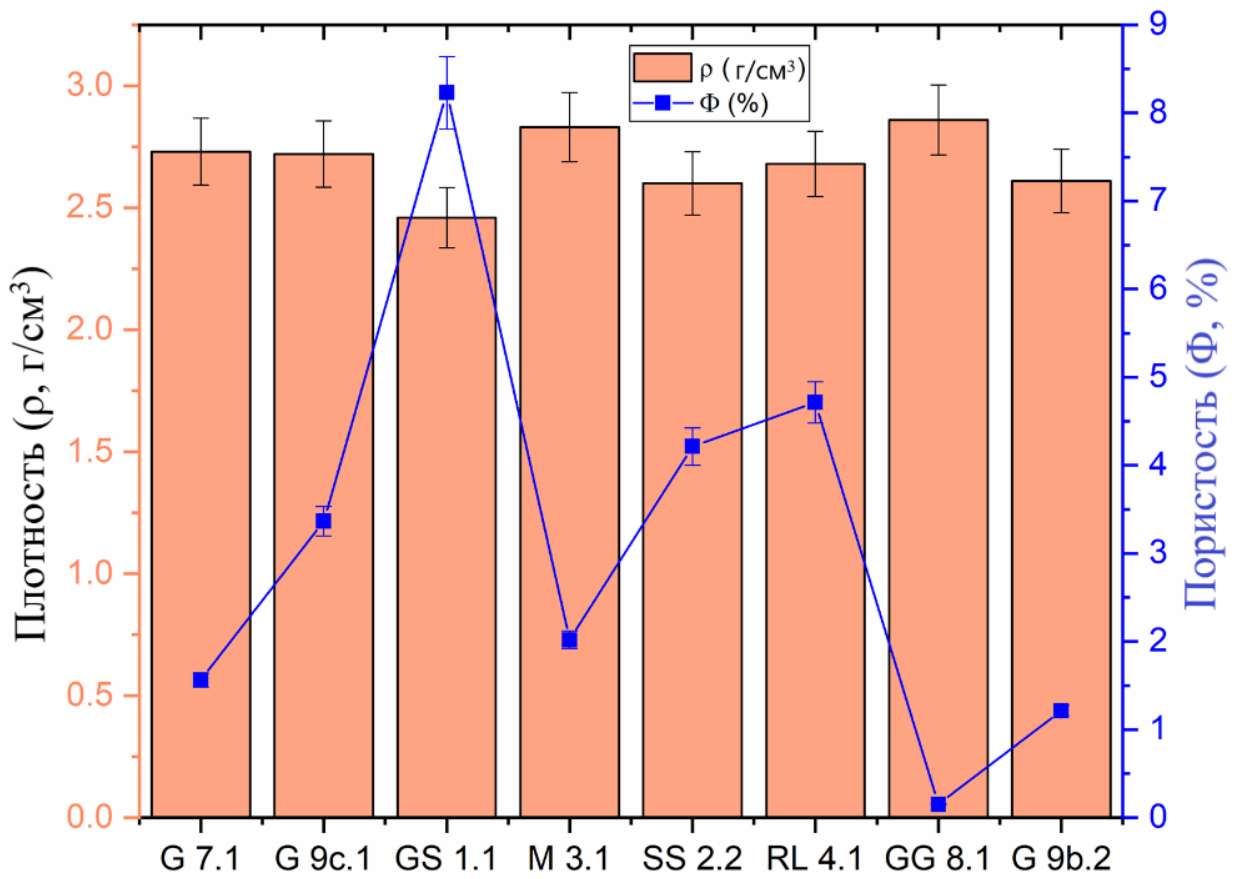


Рисунок 2.7. Плотность (ρ , г/см³) и пористость (Φ , %) собранных вьетнамских камней

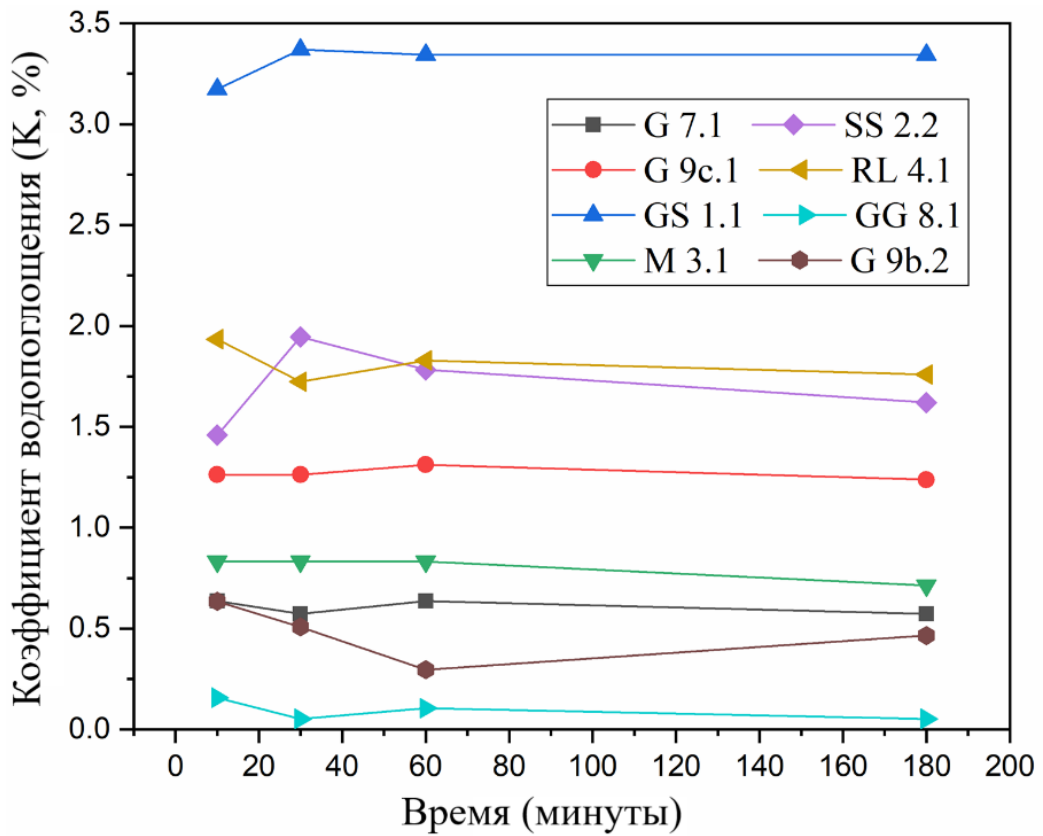


Рисунок 2.8. Изменение коэффициента водопоглощения (K , %) в зависимости от времени погружения (мин.).

2.3.2 Анализ радиационно-защитных характеристик

На рис. 2.9–2.12 представлена зависимость различных радиационно-защитных характеристик исследуемых образцов камней от энергии γ -фотонов (от низких до высоких энергий в диапазоне от 0,040 до 1,332 МэВ), где G 7.1 (гранит), G 9с.1 (гранит), GS 1.1 (гранодиорит), M 3.1 (мрамор), SS 2.2 (серицит), RL 4.1 (перекристаллизованный известняк), GG 8.1 (зеленый гранит), G 9b.2 (гранит) – обозначения образцов камней Вьетнама, которые были теоретически изучены с помощью моделирования методом Монте-Карло в этой главе.

Фотоэлектрические взаимодействия обычно происходят в диапазоне энергий γ -квантов от 0,015 до 0,1 МэВ, а взаимодействия комптоновского рассеяния – в диапазоне от 0,1 до 5 МэВ. Таким образом, уровни энергии падающих γ -лучей, применяемые при моделировании методом MCNP-5 в данном исследовании для образцов вьетнамского камня (с уровнями энергии 0,040; 0,090; 0,128; 0,249; 0,349; 0,662; 1,173 и 1,332 МэВ), также должны быть разделены и оценены в двух таких диапазонах энергии. Это энергетический интервал, где доминируют фотоэлектрические взаимодействия (при энергиях γ -лучей 0,040 и 0,090 МэВ), в то время как энергетический интервал, где доминируют взаимодействия комптоновского рассеяния (при энергиях γ -лучей 0,128; 0,249; 0,349; 0,662; 1,173 и 1,332 МэВ). Это явно влияет на значения линейного коэффициента ослабления (μ , см⁻¹), как показано на рис. 2.9, где значения μ резко уменьшаются с увеличением энергии падающих γ -фотонов в диапазоне от 0,040 до 1,332 МэВ. В диапазоне энергий, где фотоэлектрические взаимодействия доминируют (от 0,040 до 0,090 МэВ), значения μ меняются четко, и между ними существует значительная разница. Значения μ уменьшились от 5,359 до 0,850 см⁻¹ (для образца G 7.1), от 3,340 до 0,669 см⁻¹ (для G 9с.1), от 1,826 до 0,501 см⁻¹ (для GS 1.1), от 3,781 до 0,724 см⁻¹ (для M 3.1), от 2,863 до 0,609 см⁻¹ (для SS 2.2), от 2,750 до 0,608 см⁻¹ (для RL 4.1), от 3,680 до 0,721 см⁻¹ (для GG 8.1) и от 1,965 до 0,531 см⁻¹ (для G 9b.2), соответственно, при увеличении энергии γ -излучения от 0,040 до 0,090 МэВ. В

противном случае в диапазоне энергий, где взаимодействия комптоновского рассеяния доминируют (от 0,128 до 1,332 МэВ), значения μ исследуемых образцов камней мало изменяются и незначительно уменьшаются. При этом при увеличении энергии γ -квантов от 0,128 до 1,332 МэВ значения μ уменьшаются от 0,530 до 0,145 см^{-1} (для образца G 7.1), от 0,468 до 0,147 см^{-1} (для G 9с.1), от 0,390 до 0,135 см^{-1} (для GS 1.1), от 0,500 до 0,155 см^{-1} (для M 3.1), от 0,437 до 0,141 см^{-1} (для SS 2.2), от 0,443 до 0,145 см^{-1} (для RL 4.1), от 0,501 до 0,155 см^{-1} (для образца GG 8.1) и от 0,411 до 0,142 см^{-1} (для G 9b.2), соответственно. Относительно высокая плотность исследуемых образцов камней (в пределах от 2,48 до 2,86 $\text{г}/\text{см}^3$) показывает, что достигнутые значения μ достаточно высоки, соответственно, образцы природного камня Вьетнама обладают хорошей радиационно-экранирующей способностью.

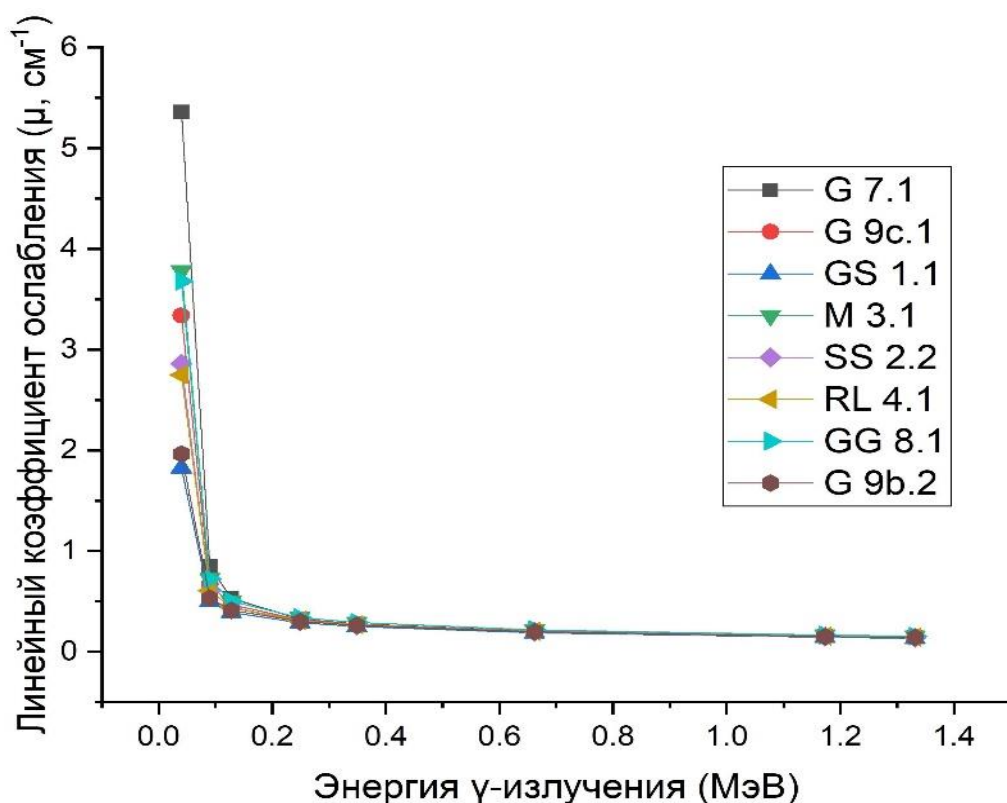


Рисунок 2.9. Влияние энергии γ -квантов (E_γ , МэВ) на линейный коэффициент ослабления (μ , см^{-1})

Из уравнений (2.8–2.9) видно, что значения слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) и длины свободного пробега (λ , см) обратно пропорциональны

значениям μ . Это означает, что при увеличении энергии падающих γ -лучей постепенное уменьшение значений μ (как было сказано выше) приведет к постепенному увеличению величин $\Delta_{0,5}$ и λ . Из-за влияния фотоэлектрических взаимодействий и взаимодействий комптоновского рассеяния эти величины сначала быстро увеличиваются, а затем возрастают умеренно (рис. 2.10а, б). Значения $\Delta_{0,5}$ увеличились с 0,129 до 4,767 см (для образца G 7.1), с 0,208 до 4,717 см (для G 9с.1), с 0,380 до 5,126 см (для GS 1.1), с 0,183 до 4,463 см (для M 3.1), с 0,242 до 4,927 см (для SS 2.2), с 0,252 до 4,786 см (для RL 4.1), с 0,188 до 4,463 см (для GG 8.1) и с 0,353 до 4,882 см (для G 9b.2), соответственно; а значения λ увеличились на 97,29% (для G 7.1), 95,60% (для G 9с.1), 92,59% (для GS 1.1), 95,89% (для M 3.1), 95,09% (для SS 2.2), 94,73% (для RL 4.1), 95,78% (для GG 8.1) и 92,77% (для G 9b.2), соответственно, при увеличении энергии γ -квантов от 0,040 до 1,332 МэВ. При $E_\gamma = 1,332$ МэВ, образцы GG 8.1 (зеленый гранит) и M 3.1 (мрамор) достигают наименьших значений $\Delta_{0,5}$ (4,463 см) для снижения интенсивности падающих γ -лучей в два раза, поскольку достигнутые ими значения μ были самыми высокими среди исследованных образцов ($0,155 \text{ см}^{-1}$).

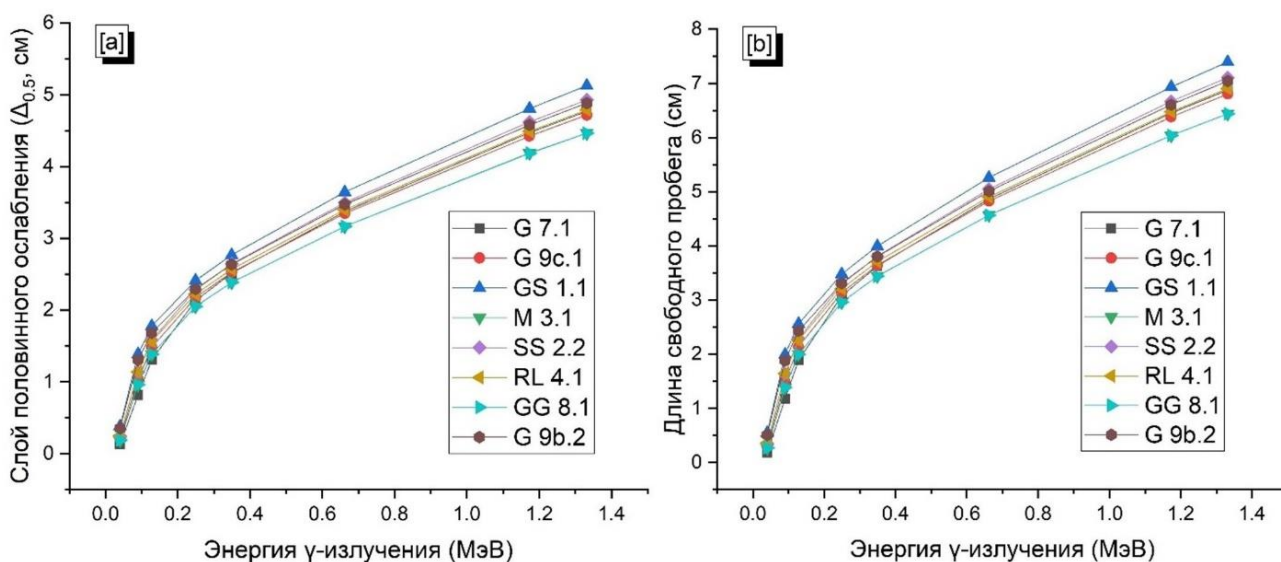


Рисунок 2.10. Влияние энергии γ -квантов (E_γ , МэВ) на: [а] слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) и [б] длину свободного пробега (λ , см)

Влияние двух энергетических диапазонов, в которых доминируют фотоэлектрические взаимодействия и взаимодействия комптоновского рассеяния, на величины эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см) более наглядно показано на рис. 2.11. Значение Δ_{eq} исследуемых образцов – это величина, эквивалентная 1 см чистого свинца. На рис. 2.11 величины Δ_{eq} достигают высоких значений в диапазоне энергий от 0,040 до 0,090 МэВ (фотоэлектрические взаимодействия) по сравнению с другими уровнями энергии. Затем значения Δ_{eq} резко уменьшаются (в диапазоне E_γ от 0,090 до 0,249 МэВ) и постепенно снижаются (в диапазоне E_γ от 0,349 до 1,332 МэВ) с увеличением энергии падающих γ -лучей из-за влияния взаимодействий комптоновского рассеяния в этих диапазонах энергий. В диапазоне E_γ от 0,040 до 0,090 МэВ значения Δ_{eq} увеличились на 68,60% (для образца G 7.1); 60,34% (для G 9с.1); 45,66% (для GS 1.1); 62,08% (для M 3.1); 57,90% (для SS 2.2); 56,21% (для RL 4.1); 61,22% (для GG 8.1) и 46,51% (для G 9b.2), соответственно; а в диапазоне E_γ от 0,090 до 1,332 МэВ значения Δ_{eq} уменьшились с 96,330 до 4,361 см (для образца G 7.1), с 122,405 до 4,314 см (для G 9с.1), с 163,406 до 4,689 см (для GS 1.1), с 113,083 до 4,083 см (для M 3.1), с 134,521 до 4,507 см (для SS 2.2), с 134,628 до 4,378 см (для RL 4.1), с 113,599 до 4,082 см (для GG 8.1) и с 154,264 до 4,466 см (для G 9b.2), соответственно, при увеличении энергии γ -излучения от 0,040 до 1,332 МэВ. Образцы GG 8.1 (зеленый гранит) и M 3.1 (мрамор) достигают наименьших значений Δ_{eq} (4,082 см) при $E_\gamma = 1,332$ МэВ (т.е. их эквивалентная толщина по отношению к 1 см чистого свинца является наименьшей). Это можно объяснить их высокой плотностью по сравнению с другими отобранными образцами вьетнамского природного камня.

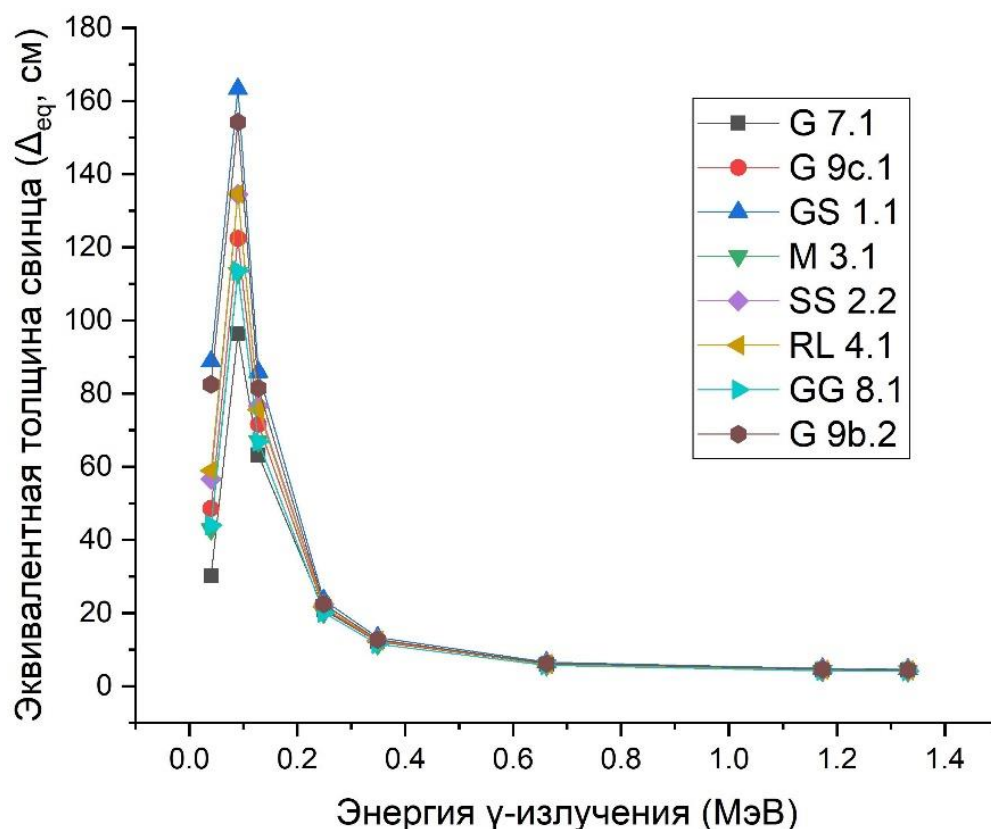


Рисунок 2.11. Влияние энергии γ -квантов на эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см)

Из-за влияния фотоэлектрических взаимодействий и взаимодействий комптоновского рассеяния в диапазоне E_γ от 0,040 до 1,332 МэВ сечение взаимодействия в атомных ядрах исследуемых образцов камней уменьшается с увеличением интенсивности падающих γ -лучей. Следовательно, взаимодействие и контакт между атомами (электронами) образцов вьетнамского природного камня и падающими γ -фотонами радиоактивных источников уменьшились. Отсюда количество поглощенных γ -фотонов N_a уменьшится, а количество γ -фотонов, прошедших через образцы камней N_t (не поглощенных), увеличится по сравнению с количеством первоначально падающих γ -фотонов N_o . Это приводит к уменьшению значений эффективности радиационной защиты (RPE , %) и увеличению значений коэффициента пропускания (TF , %), как показано на рис. 2.12а, б, при увеличении значений E_γ , см. уравнения (2.11–2.12). Значения RPE снизились со 100,00 до 51,67% (для образца G 7.1), с 99,99 до 52,04% (для G 9c.1), с 99,99 до 49,14% (для GS 1.1), со 100,00 до 54,00% (для M 3.1), с 99,99 до 50,51% (для SS 2.1), с 99,99 до 49,14% (для GS 1.1), со 100,00

до 54,00% (для М 3.1), с 99,99 до 50,51% (для SS 2.2), с 99,99 до 51,53% (для RL 4.1), со 100,00 до 54,00% (для GG 8.1) и с 99,99 до 50,83% (для G 9b.2), соответственно, при увеличении энергии γ -излучения от 0,040 до 1,332 МэВ. Наибольшей радиационно-защитной способностью обладают образцы GG 8.1 (зеленый гранит) и М 3.1 (мрамор) (со значениями RPE около 54%) при $E_\gamma = 1,332$ МэВ.

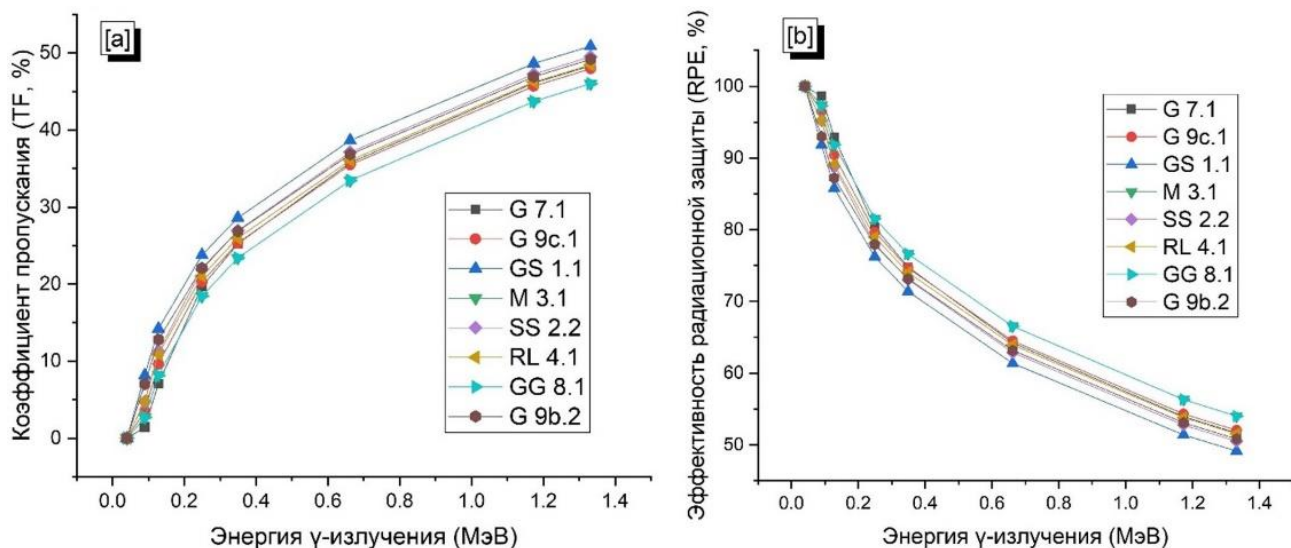


Рисунок 2.12. Влияние энергии γ -квантов (E_γ , МэВ) на: [а] коэффициент пропускания (TF , %) и [б] эффективность радиационной защиты (RPE , %)

Кроме того, массовый коэффициент ослабления (μ_m , см²/г) для собранных образцов камней был рассчитан на основе экспериментальных измерений и кода моделирования MCNP-5, как представлено в табл. 2.3. Экспериментально измеренные значения μ_m при $E_\gamma = 1,252$ МэВ (средняя энергия гамма-излучения источника Со-60) составляют 0,0518; 0,0504; 0,0564; 0,0508; 0,0550; 0,0537; 0,0567 и 0,0507 см²/г, соответственно, для образцов камней G 7.1, G 9c.1, GS 1.1, М 3.1, SS 2.2, RL 4.1, GG 8.1 и G 9b.2. Полученные данные свидетельствуют о совпадении экспериментальных и смоделированных данных с разницей в пределах $\pm 10\%$.

Таблица 2.3. Сравнение экспериментальных и смоделированных значений массового коэффициента ослабления для собранных вьетнамских природных образцов камней

Энергия (МэВ)	Массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$)															
	G 7.1		G 9c.1		GS 1.1		M 3.1		SS 2.2		RL 4.1		GG 8.1		G 9b.2	
	MCNP-5	Эксп. ⁹	MCNP-5	Эксп.	MCNP-5	Эксп.	MCNP-5	Эксп.	MCNP-5	Эксп.	MCNP-5	Эксп.	MCNP-5	Эксп.	MCNP-5	Эксп.
0,040	1,9631	-	1,2279	-	0,7359	-	1,3380	-	1,1012	-	1,0276	-	1,2867	-	0,7542	-
0,090	0,3115	-	0,2460	-	0,2021	-	0,2563	-	0,2342	-	0,2274	-	0,2521	-	0,2039	-
0,128	0,1941	-	0,1721	-	0,1573	-	0,1770	-	0,1682	-	0,1657	-	0,1752	-	0,1579	-
0,249	0,1192	-	0,1172	-	0,1159	-	0,1196	-	0,1168	-	0,1165	-	0,1182	-	0,1160	-
0,350	0,1009	-	0,1010	-	0,1009	-	0,1029	-	0,1009	-	0,1008	-	0,1016	-	0,1009	-
0,662	0,0753	-	0,0762	-	0,0767	-	0,0775	-	0,0762	-	0,0762	-	0,0766	-	0,0767	-
1,173	0,0568	-	0,0576	-	0,0581	-	0,0586	-	0,0577	-	0,0577	-	0,0579	-	0,0581	-
1,252	0,0550	0,0518	0,0558	0,0504	0,0563	0,0564	0,0568	0,0508	0,0559	0,0550	0,0559	0,0537	0,0561	0,0567	0,0563	0,0507
1,332	0,0533	-	0,0540	-	0,0545	-	0,0550	-	0,0541	-	0,0541	-	0,0543	-	0,0545	-

⁹ Эксп. – экспериментальные значения

Влияние увеличения толщины исследуемых образцов вьетнамского природного камня на величины TF и RPE при уровне энергии падающего γ -излучения 1,332 МэВ показано на рис. 2.13. С увеличением толщины исследуемых образцов камней увеличивается расстояние пробега падающих γ -фотонов в образцах камней, в результате чего их поглощение в образцах камней становится выше.

Увеличение плотности матрицы атомных ядер исследуемых камней также приводит к увеличению количества электронов на единицу площади, тем самым уменьшая длину свободного пробега (без столкновений) падающих γ -фотонов в диапазоне энергий, где доминируют взаимодействия комптоновского рассеяния. Это приводит к уменьшению значений N_t с увеличением толщины образцов камней. Следовательно, значения TF уменьшаются, а значения RPE линейно увеличиваются с увеличением толщины образцов камней. По результатам исследований, постепенное увеличение толщины образцов вьетнамского природного камня (до 30 см) демонстрирует хорошие радиационно-защитные свойства в диапазоне энергий, где доминируют взаимодействия комптоновского рассеяния (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ).

При увеличении толщины образцов камней с 1 до 30 см значения TF уменьшились с 86,47 до 1,28% (для образца G 7.1), с 86,33 до 1,22% (для G 9c.1), с 87,35 до 1,73% (для GS 1.1), с 85,62 до 0,95% (для M 3.1), с 86,88 до 1,47% (для SS 2.2), с 86,52 до 1,30% (для RL 4.1), с 85,61 до 0,95% (для GG 8.1) и с 86,76 до 1,41% (для G 9b.2), соответственно, при $E_\gamma = 1,332$ МэВ (рис. 2.13a). При толщине 30 см количество падающих γ -фотонов, прошедших через образцы камней GG 8.1 (зеленый гранит) и M 3.1 (мрамор), достигало значения не более 1,00%. Напротив, при $E_\gamma = 1,332$ МэВ значения RPE увеличились с 13,53 до 98,72% (для образца G 7.1), с 13,67 до 98,78% (для G 9c.1), с 12,65 до 98,27% (для GS 1.1), с 14,38 до 99,05% (для M 3.1), с 13,12 до 98,53% (для SS 2.2), с 13,48 до 98,70% (для RL 4.1), с 14,39 до 99,05% (для GG 8.1) и с 13,24 до 98,59% (для G 9b.2), соответственно, при увеличении толщины образцов камней от 1 до 30 см (рис. 2.13b). При толщине 30 см количество падающих γ -фотонов,

поглощаемых образцами камня GG 8.1 (зеленый гранит) и М 3.1 (мрамор), составляет до 99,05%. Существенных различий в значениях TF и RPE исследуемых образцов камней при одинаковой толщине не выявлено, что объясняется высокой и однородной плотностью отобранных образцов вьетнамского природного камня (в пределах от 2,48 до 2,87 г/см³).

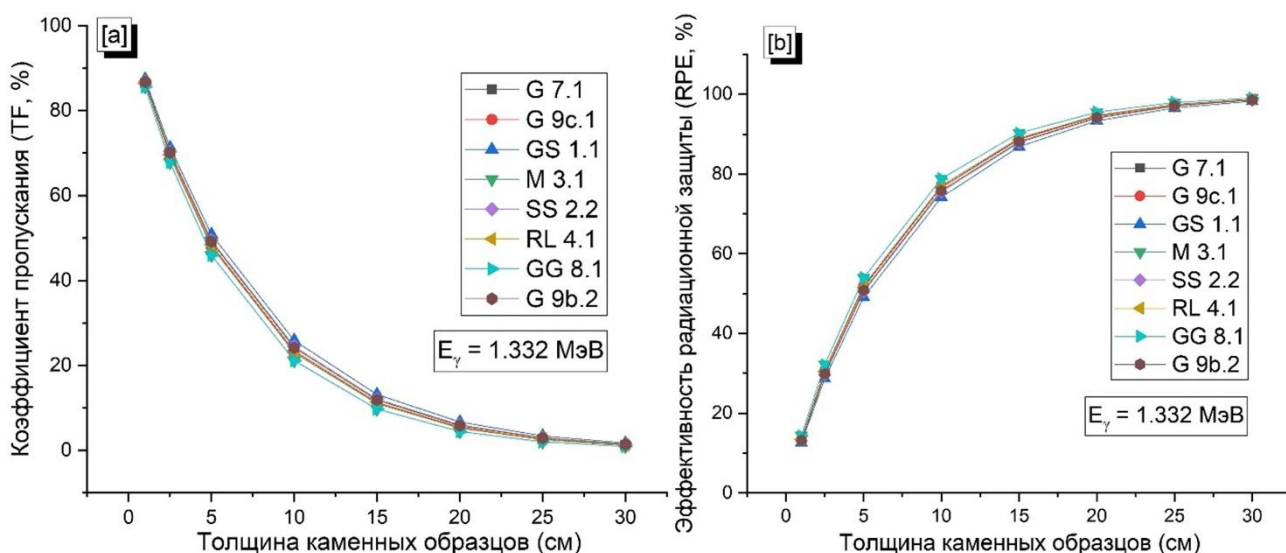


Рисунок 2.13. Влияние толщины образцов камней на: [a] коэффициент пропускания (TF , %) и [b] эффективность радиационной защиты (RPE , %) при $E_\gamma = 1,332$ МэВ

Радиационно-защитная способность образцов вьетнамского природного камня зависит от элементного химического состава веществ. В данном исследовании основными компонентами, оказывающими значительное влияние на экранирующие свойства гамма-излучения собранных камней, являются железо (Fe) и кальций (Ca). На рис. 2.14а видно, что с увеличением концентрации железа и кальция в образцах камней линейный коэффициент ослабления (μ , см⁻¹) также увеличивается. Величины μ достигают высоких значений, и их увеличение четко проявляется на уровне энергии 0,090 МэВ, где фотоэлектрические взаимодействия доминируют. Небольшое увеличение значений μ наблюдается при энергиях 0,662 и 1,332 МэВ, где взаимодействия комптоновского рассеяния доминируют. Такое поведение объясняется зависимостью поперечного сечения взаимодействия от $Z_{eff}^{4.5}$ и Z_{eff} (эффективных атомных номеров) в интервалах энергии фотоэлектрического и

комптоновского рассеяния. Увеличение концентрации железа и кальция в исследуемых камнях увеличивает Z_{eff} и плотность электронов внутри камня. Следовательно, увеличение вероятности взаимодействия между фотонами и электронами приводит к увеличению значений μ . Одновременно значения Δ_{eq} постепенно уменьшались с увеличением концентрации железа и кальция в образцах камней (рис. 2.14b). При низком уровне энергии (0,090 МэВ) величины Δ_{eq} достигают гораздо больших значений, чем при среднем и высоком уровнях энергии (0,662 и 1,332 МэВ), что объясняется доминированием интервала фотоэлектрического взаимодействия, где значения μ свинца высоки по сравнению с измеренными в данной работе. При энергии 0,662 МэВ значения Δ_{eq} увеличились в диапазоне от 5,675 до 6,534 см при уменьшении концентрации железа и кальция в диапазоне от 65,97 до 3,21%, соответственно.

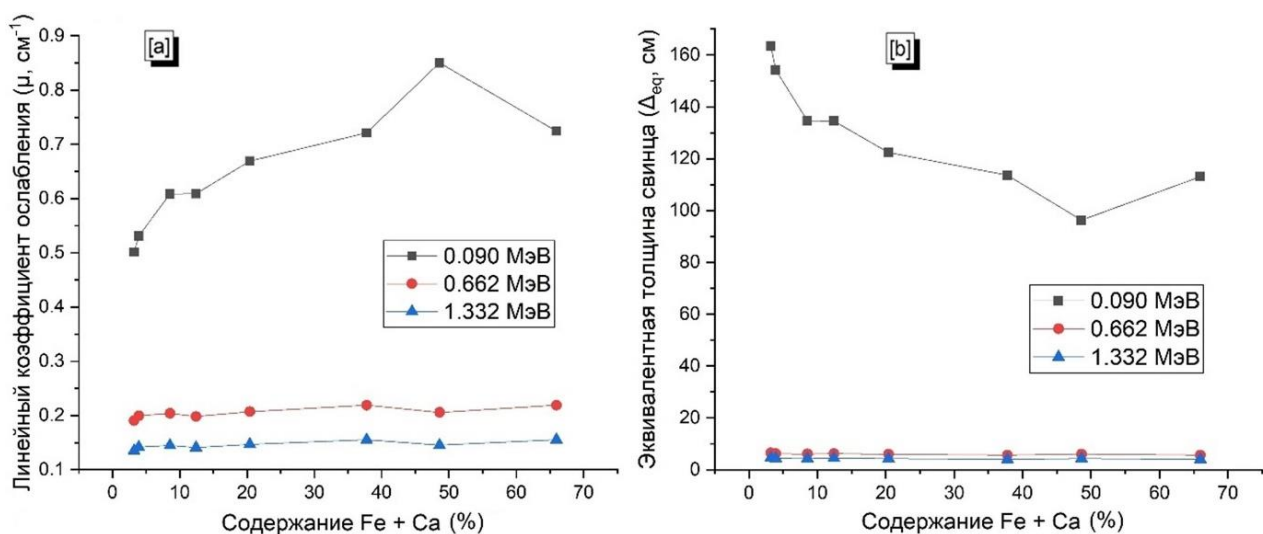


Рисунок 2.14. Влияние содержания Fe+Ca в образцах камней на: [a] линейный коэффициент ослабления (μ , см^{-1}) и [b] эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см)

Плотность веществ, способных сильно поглощать падающие γ -лучи в образцах камней, увеличивается с увеличением концентрации в них железа и кальция, в результате чего падающие γ -фотоны с большей вероятностью взаимодействуют с атомами железа и кальция в образцах камней. Это приводит к тому, что величина слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) немного уменьшается, как показано на рис. 2.15а, а величина эффективности

радиационной защиты (RPE , %) немного увеличивается, как показано на рис. 2.15b, с увеличением концентрации железа и кальция в образцах камней. Величина $\Delta_{0,5}$ достигает наибольших значений при уровне энергии 1,332 МэВ и наименьших значений при уровне энергии 0,090 МэВ. Таким образом, необходимая толщина образцов камней для снижения энергии падающих γ -лучей в два раза достигает минимальных значений при уровне энергии 0,090 МэВ (значения $\Delta_{0,5}$ образцов камней менее 1,5 см). Кроме того, величины RPE образцов камней достигли высоких значений радиационной защиты (более 90%) при уровне энергии 0,090 МэВ, более 60% при уровне энергии 0,662 МэВ и в основном более 50% при уровне энергии 1,332 МэВ при увеличении концентрации железа и кальция в образцах камней.

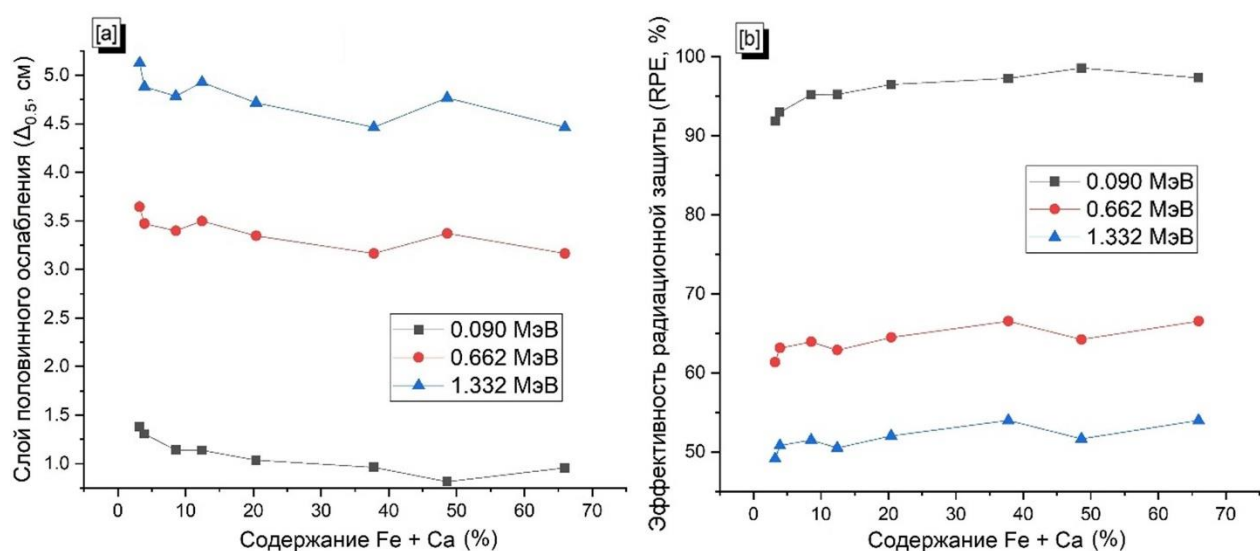


Рисунок 2.15. Влияние содержания Fe+Ca в образцах камней на: [a] слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) и [b] эффективность радиационной защиты (RPE , %)

Радиационно-экранирующие свойства вьетнамских камней сравнивались со свойствами ранее изученных камней из различных регионов мира. Сравнение проводилось для того, чтобы проиллюстрировать способность вьетнамских камней ослаблять средне- и высокоэнергетическое гамма-излучение. Как показано в табл. 2.4 и рис. 2.16, линейный коэффициент ослабления исследуемых вьетнамских камней при энергии 0,662 МэВ сравнивался с линейными коэффициентами ослабления некоторых ранее

изученных образцов камней. Значения μ для вьетнамских камней при энергии 0,662 МэВ составляют 0,206; 0,207; 0,190; 0,219; 0,198; 0,204; 0,219 и 0,200 см^{-1} , соответственно, для образцов камней G 7.1 (гранит), G 9с.1 (гранит), GS 1.1 (гранодиорит), M 3.1 (мрамор), SS 2.2 (серицит), RL 4.1 (известняк), GG 8.1 (зеленый гранит) и G 9b.2 (гранит). Упомянутые значения μ для мрамора M 3.1 и зеленого гранита GG 8.1 близки к индийскому граниту «Роза Пинк» ($\mu = 0,219 \text{ см}^{-1}$) [48] и турецкому белому граниту ($\mu = 0,218 \text{ см}^{-1}$) [50]. Кроме того, их значения μ выше, чем у мрамора (Зеленый, Индия), мрамора (Каррара, Италия), мрамора (Роза, Португалия) [49], иракского желтого гранита, испанского оранжевого гранита, индийского красного гранита, китайского серого гранита, египетского цветного гранита [50], индийского оливинового базальта, индийского зеленого мрамора, индийского черного гранита, индийского телефонного черного гранита, индийского известняка «Кудапа», индийского розового мрамора [33], египетского алевролита (S24), египетского доломита (S16) [31] и зимбабвийского гранита «Неро» [48], как представлено в табл. 2.4. С другой стороны, значения μ для вьетнамских камней (мрамор M 3.1 и зеленый гранит GG 8.1) ниже, чем для индийского белого мрамора [33], египетского алевролита (S18), египетского алевролита (S22) [31], бразильского гранита «Каппа Бонита», китайского гранита «Роза Бета» и китайского гранита «Балтик Браун» [48] со значениями μ 0,225; 0,226; 0,292; 0,234; 0,227 и 0,229 см^{-1} , соответственно, как показано в табл. 2.4.

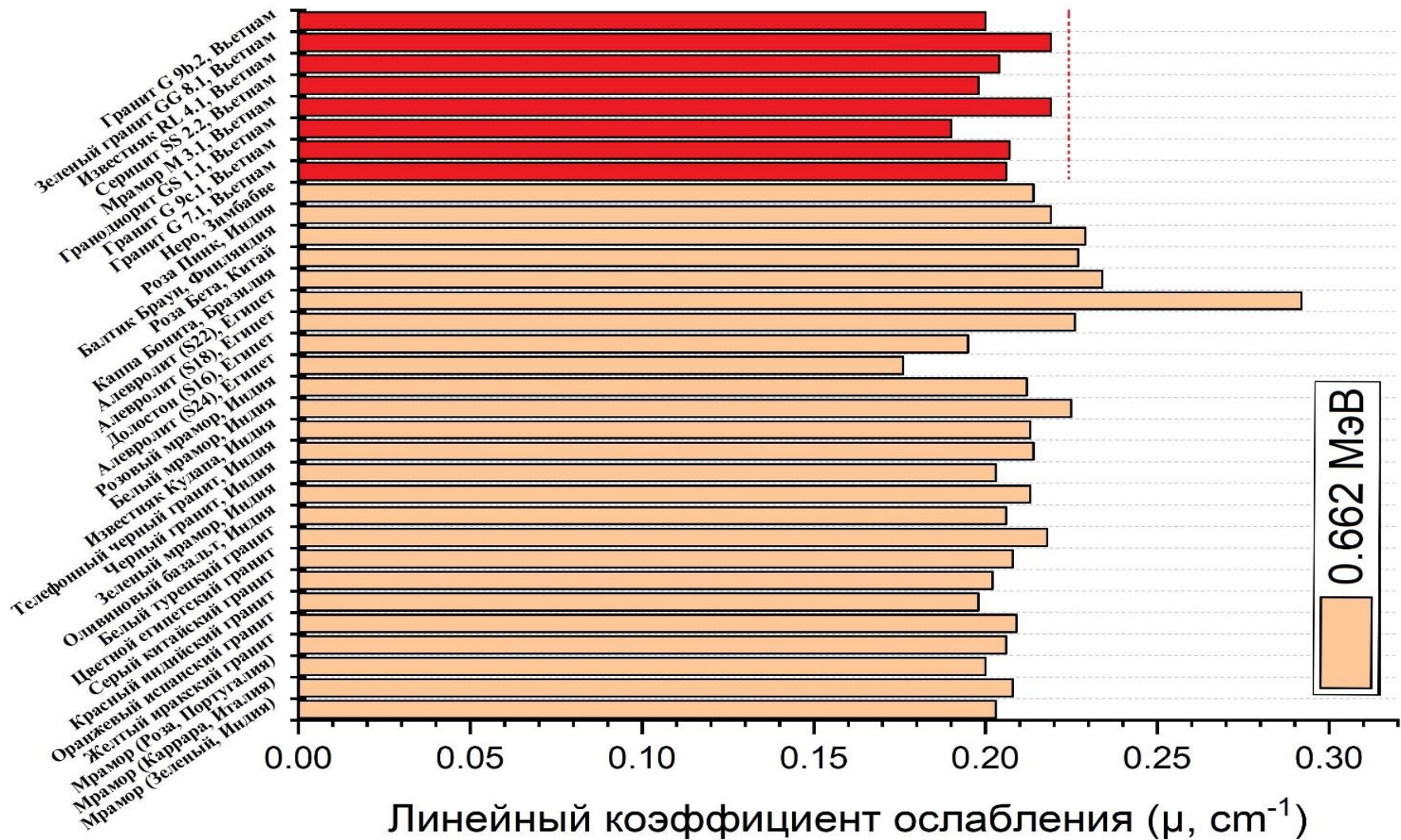


Рисунок 2.16. Сравнение значений μ (cm^{-1}) образцов камней Вьетнама с другими камнями по всему миру при $E_\gamma = 0,662$ МэВ

Таблица 2.4. Сравнение линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) камней, собранных во Вьетнаме, и некоторых ранее изученных образцов камней

Образцы камней	Плотность (ρ , г/ см^3)	Экспериментальное значение линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1})	Ссылки
		$E_\gamma = 0,662 \text{ МэВ}$	
Мрамор (Зеленый, Индия)	2,64	0,203	[49]
Мрамор (Каррара, Италия)	2,69	0,208	
Мрамор (Роза, Португалия)	2,65	0,200	
Желтый иракский гранит	2,78	0,206	[50]
Оранжевый испанский гранит	2,68	0,209	
Красный индийский гранит	2,71	0,198	
Серый китайский гранит	2,66	0,202	
Цветной египетский гранит	2,63	0,208	
Белый турецкий гранит	2,69	0,218	
Оливиновый базальт, Индия	2,72	0,206	[33]
Зеленый мрамор, Индия	2,74	0,213	
Черный гранит, Индия	2,64	0,203	
Телефонный черный гранит, Индия	2,80	0,214	
Известняк Кудапа, Индия	2,73	0,213	
Белый мрамор, Индия	2,89	0,225	
Розовый мрамор, Индия	2,70	0,212	
Алевролит (S24), Египет	2,33	0,176	[31]
Долостон (S16), Египет	2,46	0,195	
Алевролит (S18), Египет	2,98	0,226	
Алевролит (S22), Египет	3,85	0,292	
Каппа Бонита, Бразилия	-	0,234	[48]
Роза Бета, Китай	-	0,227	
Балтик Браун, Финляндия	-	0,229	
Роза Пинк, Индия	-	0,219	
Неро, Зимбабве	-	0,214	
Гранит G 7.1, Вьетнам	2,73	0,206	Данная работа
Гранит G 9c.1, Вьетнам	2,72	0,207	
Гранодиорит GS 1.1, Вьетнам	2,46	0,190	
Мрамор M 3.1, Вьетнам	2,83	0,219	
Серицит SS 2.2, Вьетнам	2,60	0,198	
Известняк RL 4.1, Вьетнам	2,68	0,204	
Зеленый гранит GG 8.1, Вьетнам	2,86	0,219	
Гранит G 9b.2, Вьетнам	2,61	0,200	

2.4 Выводы главы 2

Целью исследования в этой главе является оценка эффективности радиационной защиты различных видов природных камней Вьетнама для оценки потенциала их применения в качестве экранирующих материалов в предстоящем проекте ЦЯНТ Вьетнама. Экспериментальное исследование вьетнамских камней показало, что увеличение концентрации Fe+Ca во вьетнамских камнях в пределах от 3,21 до 65,97% увеличивает их плотность от 2,48 до 2,86 г/см³, соответственно. При этом камни высокой плотности (М 3.1, GG 8.1 и G 7.1) имеют практически наименьшую пористость среди собранных камней, которая достигает (2,02; 0,15 и 1,56%). Образцы с высокой пористостью имеют самый высокий коэффициент водопоглощения. Кроме того, исследование радиационно-защитных свойств показывает увеличение линейного коэффициента ослабления вьетнамских камней с ростом концентрации Fe+Ca, где линейный коэффициент ослабления при энергии 1,332 МэВ увеличивается в пределах от 0,135 до 0,155 см⁻¹ при увеличении концентрации Fe+Ca в пределах от 3,21 до 65,97%, соответственно.

Исследование показывает хорошую защитную способность вьетнамских природных камней по сравнению с защитной способностью камней по всему миру, о которой ранее сообщалось. Настоящие вьетнамские камни достаточно распространены на рынке и имеют невысокую стоимость, что характеризует их доступность в применении. Результаты исследования показали, что применение природных материалов Вьетнама в составе строительных материалов для защиты от гамма-излучения возможно и может быть осуществлено в условиях, не требующих ограничения для толщины защиты.

Таким образом, исследованные вьетнамские камни (особенно мрамор М 3.1 и зеленый гранит GG 8.1) могут использоваться в качестве природных бессвинцовых экранирующих материалов, а также в качестве наполнителя бетона при сооружении АЭС и других ОИАЭ во Вьетнаме.

ГЛАВА 3 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НОВЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРАСНОЙ И БЕЛОЙ ГЛИНЫ ВЬЕТНАМА

3.1 Общие сведения

Использование человеком ядерной энергии и источников ионизирующего излучения постоянно расширяется во многих областях, таких как производство энергии, диагностика и лечение заболеваний, неразрушающий контроль и т.д. Опасным фактором для человека при использовании этих технологий является воздействие ионизирующего излучения. На протяжении всей истории развития гражданской атомной энергетики и применения радиационных технологий в медицине и промышленности радиационная защита всегда оставалась проблемной областью. Поэтому главным условием использования этих технологий является обеспечение радиационной безопасности.

Радиационная безопасность персонала и населения базируется на трех принципах: обоснование, нормирование и оптимизация радиационной защиты [51]. При проведении работ в радиационных полях при ремонте и выводе из эксплуатации наиболее широко применяется экранирование источников ионизирующего излучения с соблюдением принципа оптимизации [52, 53].

Экранирующий материал снижает уровень излучения до безопасного уровня, установленного нормами радиационной безопасности [54]. Для защиты от γ -излучения используются экраны с наполнителями, имеющими высокие атомные номера и плотности. Среди всех традиционных материалов вольфрам и свинец обладают наибольшей защитной эффективностью, но они довольно дорогие.

В настоящее время актуальным является создание новых эффективных композиционных экранирующих материалов, удобных в использовании. Преимущество композиционных материалов перед мономатериалами заключается в возможности создания оптимального состава наполнителей для

планируемых условий облучения. Это позволяет получить максимально возможные экранирующие свойства при минимальной стоимости защитного материала. Важным требованием к экранирующим материалам является исключение из их состава свинца, который является токсичным материалом. Поэтому учеными различных стран проводится большое количество исследований по повышению экранирующей способности композитных материалов, таких как стекла [55–56], полимеры [57, 58], керамика [59, 60], цемент [61–62], сплавы [63, 64] и глина [65, 66] с использованием тяжелых легирующих соединений или минералов. При этом наполнитель должен иметь минимальный размер частиц и равномерно распределяться в материале матрицы. В качестве матрицы могут использоваться различные вещества (например, полимеры, цементная смесь, глина и др.). Каждый тип матрицы имеет свой диапазон применения с точки зрения температуры, прочности на сжатие или изгиб и т.д.

Преимуществом глины является возможность изготовления кирпичей (блоков) для сооружения быстровозводимой защиты при проведении радиационно-опасных работ по ремонту или демонтажу оборудования или изготовления дополнительной защиты контейнеров для размещения кондиционированных радиоактивных отходов [67, 68]. Используя прессование для изготовления кирпичей, можно повысить его экранирующую способность за счет увеличения плотности [69].

Целью настоящей работы является оценка радиационно-защитных свойств природных красных и белых глинистых минералов из Батчанга Вьетнама путем улучшения их физических характеристик для использования в области защиты от γ -лучей. Для достижения данной цели собранные глины были смешаны с эпоксидной смолой, уплотнены при различных уровнях давления, и было тщательно экспериментально исследовано влияние давления на физические, структурные и защитные свойства образцов от γ -излучения.

3.2 Материалы и методы исследования

3.2.1 Изготовление новых образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама под различным давлением и их характеристика

Исследуемые образцы вьетнамской красной и белой глины нагревались до 200°C в электропечи и выдерживались в течение 3 часов для полного высушивания и удаления влаги. Затем сухой минерал красной и белой глины вручную измельчался в мелкозернистый порошок. Мелкий порошок красной и белой глины смешивался отдельно с эпоксидной смолой в соотношении 9:1 соответственно и хорошо перемешивался вертикальным блендером до получения гомогенной смеси в течение 10 мин. Эпоксидная смола и отвердитель, используемые для изготовления кирпича, были поставлены компанией SlabDOC (Иваново, Россия); а вьетнамские минералы красной и белой глины были собраны в деревне Батчанг (Ханой, Вьетнам).

Образцы, изготовленные в данной работе, имели одинаковое соотношение красной и белой глины и эпоксидной смолой, но формовались при различных значениях давления, варьирующихся от 7,61 до 114,22 МПа. Изготовленные образцы РЗМ обозначались как PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 и PR6 (как для красной, так и для белой глины) при различных значениях давления (PR, МПа) 7,61; 22,84; 45,70; 68,55; 91,40 и 114,22 МПа, соответственно (рис. 3.1).



Рисунок 3.1. Изготовленные образцы прессованного кирпича при разном давлении от 1 до 15 тонн (эквивалентно от 7,61 до 114,22 МПа)

В процессе прессования изготовленных образцов РЗМ использовался гидравлический пресс (пресс SD0821ROSSVIK 15 тонн, Екатеринбург, Россия) с максимальным значением давлением 15 метрических тонн $\approx 114,22$ МПа. В данном исследовании изменение величины давления начинается с 1 метрической тонны $\approx 7,61$ МПа и постепенно увеличивается до 15 метрических тонн $\approx 114,22$ МПа. Для каждого значения давления были изготовлены три образца различной толщины для экспериментальной оценки линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) и массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$).

Изготовленные образцы выдерживались на воздухе для затвердевания в течение 24 часов. После этого для измерения толщины изготовленных образцов РЗМ (x , см) применяется высокоточный цифровой штангенциркуль фирмы X-PERT (Москва, Россия) с погрешностью $\pm 0,02$ мм. Затем определялась плотность (ρ , $\text{г}/\text{см}^3$) приготовленных образцов РЗМ с помощью цифрового плотномера МН-300А (Гуандун, Китай) с точностью $0,001$ $\text{г}/\text{см}^3$ [70]. При измерениях, проводимых в соответствии с уравнением Архимеда (3.1), в качестве погружающей жидкости использовалась вода.

$$\rho \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right) = \frac{W_a}{(W_a - W_L)} \rho_L \quad (3.1)$$

где W_a и W_L – масса приготовленных РЗМ в воздухе и жидкой воде, соответственно; а величина ρ_L принимается равной 1 $\text{г}/\text{см}^3$.

Кроме того, пористость (Φ , %) в изготовленных образцах РЗМ определялась экспериментально путем измерения объема пор (V_p) и насыпного объема (V_b) в соответствии с уравнением (3.2) [71]. Разность между плотностями заполненного и незаполненного образца позволяет определить полный объем пор, если известна плотность смачивающей жидкости. Таким образом, этот метод позволяет определить полную пористость материала.

Пористость определяется по разнице весов сухого и насыщенного образца, отнесённой к объёму образца, умноженному на плотность

насыщающей жидкости. Отношение объёма пор к объёму образца даёт искомую величину пористости, её выражают в % или в долях единицы.

$$\Phi (\%) = \frac{V_p}{V_b} \quad (3.2)$$

Минералогический анализ новых образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама и оценка их соответствующего фазового состава был проведен автором диссертации совместно с научным сотрудником кафедры атомных станций и ВИЭ Махмудом Каремом с помощью метода рентгеновской дифракции (XRD). Рентгеновские дифракционные картины (дифрактограммы) были получены с помощью рентгеновского дифрактометра «Malvern Panalytical Empyrean» с использованием излучения $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), при этом напряжение и ток рабочей трубки составляли 40 кВ и 30 мА. В интервале от 5 до 75° были получены дифракционные картины (дифрактограммы) с интервалом $2\theta^{10}$, и их сравнивали с картинами, найденными в базе данных порошковой дифракции (PDF – powder diffraction files).

3.2.2 Экспериментальная оценка экранирующих свойств образцов от γ -излучения

Экспериментальные измерения γ -экранирующих свойств изготовленных образцов проводились с помощью сцинтилляционного детектора NaI (Tl) фирмы USA Ortec. Спектрометр предназначен для подсчета количества фотонов, испускаемых источниками γ -излучения Cs-137 (при E_γ 0,662 МэВ) и Co-60 (при E_γ 1,173 и 1,332 МэВ и средней энергии 1,252 МэВ). Установка для проведения экспериментальных измерений показана на рис. 3.2. Источник γ -излучения помещался внутри коллиматора перед началом измерения.

¹⁰ При проведении дифракции, **тета (θ)** — это угол входящей электромагнитной волны, а также угол дифрагированной электромагнитной волны относительно плоскостей Брэгга. Таким образом, общее изменение угла электромагнитной волны равно 2 тета (2θ). Максимальный полезный диапазон (в зависимости от аксессуаров) гониометра рентгеновского дифрактометра «Malvern Panalytical Empyrean» от $-111^\circ < 2\theta < 168^\circ$.

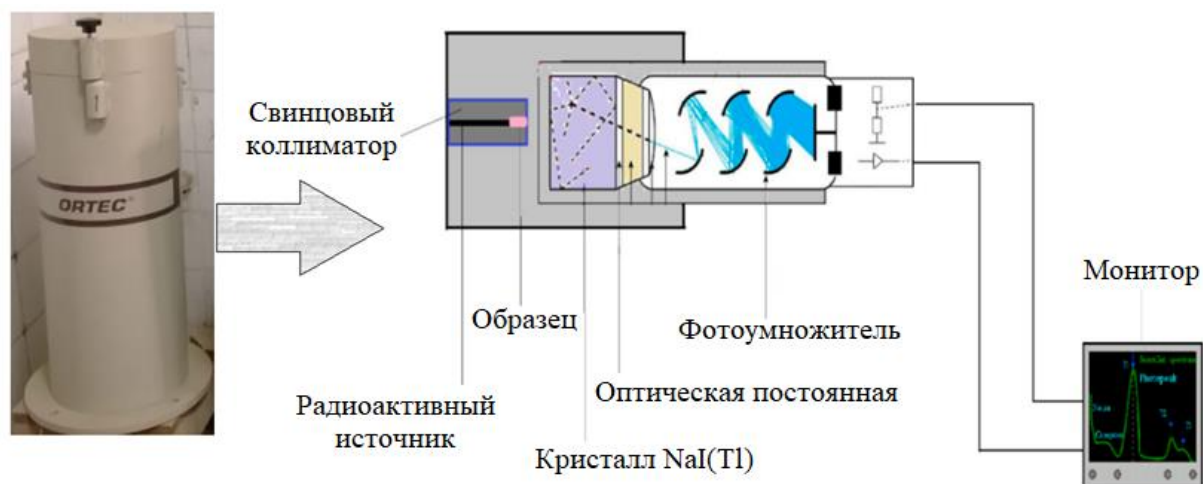


Рисунок 3.2. Экспериментальная установка для измерения γ -излучения с использованием детектора NaI (Tl)

Поток γ -излучения (N_o) измерялся при отсутствии экранирующего материала. Затем, вставляя подготовленные образцы различной толщины, регистрировалось число пропущенных фотонов (N_t)¹¹ для каждой толщины образцов. Значения N_t и N_o определялись несколько раз, затем эти значения усреднялись для уменьшения неопределенности (погрешности) измерений. По измеренным интенсивностям N_t и N_o были экспериментально исследованы линейные коэффициенты ослабления (μ , см^{-1}) образцов, где μ представляют собой отношение зависимости между $\ln(N_o / N_t)$ и толщиной кирпича x (см); а массовые коэффициенты ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) образцов были исследованы экспериментально на основании измеренных интенсивностей N_t и N_o , где значения μ_m представляют собой наклон зависимости между $\ln(N_o / N_t)$ и массовой толщиной (ρx , $\text{г}/\text{см}^2$), как указано в законе Ламберта-Бера в уравнении (3.3–3.4) [72, 73].

$$\mu \text{ (см}^{-1}\text{)} = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right) \quad (3.3)$$

$$\mu_m \left(\frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right) = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right) \quad (3.4)$$

Затем, используя измеренные значения N_t , N_o и μ , для образцов на основе красной и белой глины оценивались слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см),

¹¹ Индекс « t » — сокращение английского слова «transmission» («пропускание»).

эквивалентная толщина свинца (Δ_{eq} , см), коэффициент пропускания (TF , %) и эффективность радиационной защиты (RPE , %), как описано в уравнениях (3.5–3.8) [74, 75].

$$\Delta_{0.5} \text{ (см)} = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3.5)$$

$$\Delta_{\text{eq}} \text{ (см)} = \frac{x \text{ (см)} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right)_{\text{свинец}}}{\ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right)_{\text{кирпич}}} \quad (3.6)$$

$$TF \text{ (\%)} = \frac{N_t}{N_o} \times 100 \quad (3.7)$$

$$RPE \text{ (\%)} = \frac{(N_o - N_t)}{N_o} \times 100 \quad (3.8)$$

где $N_a = (N_o - N_t)$ представляет собой количество поглощенных фотонов в пределах толщины изготовленного образца.

3.3 Результаты и их обсуждение

3.3.1 Исследование минералогического состава

Минералогический состав образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама был исследован с помощью метода рентгеновской дифракции (XRD).

Глина – осадочная горная порода, составляющая основной состав земной коры. Глины состоят из очень мелких частиц, которые пластифицируются при смешивании с соответствующим количеством воды и затвердевают при высушивании или прокаливании [77]. Несколько типов глинистых минералов встречаются в природе в виде чистых минералов и существуют в природе в виде смесей чистых глинистых фракций, таких как иллит, каолинит и смектит, и различных примесей, таких как кварц, кальцит и органические остатки [78].

На рис. 3.3 и рис. 3.4 в качестве примеры представлены дифрактограммы образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама (PR6), изготовленных под давлением 114,22 МПа.

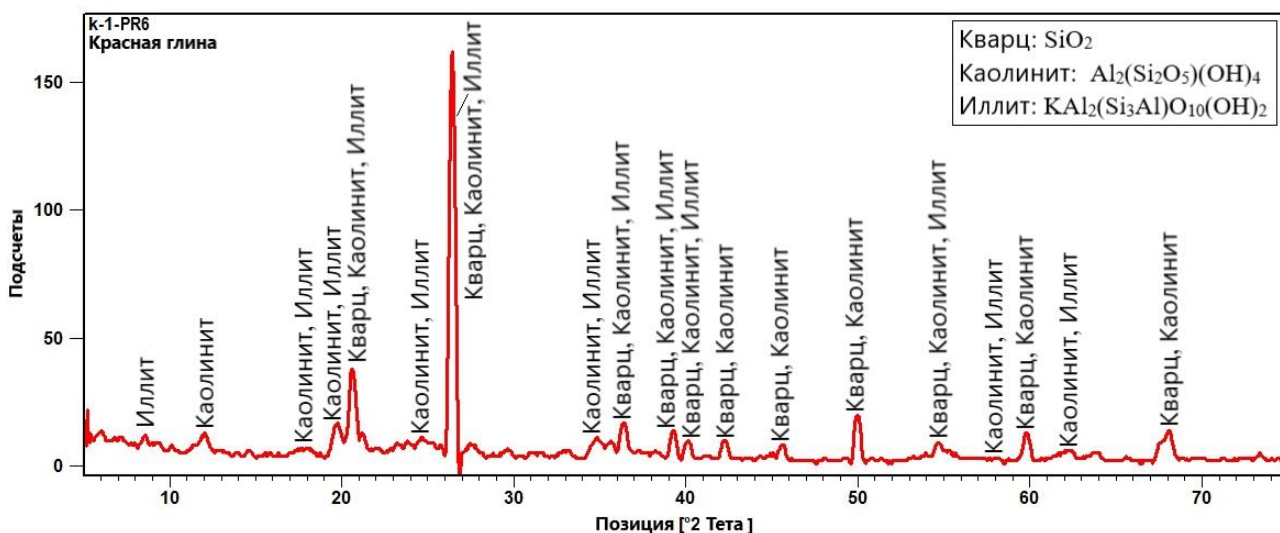


Рисунок 3.3. Дифрактограмма для красного образца кирпича PR6 Вьетнама

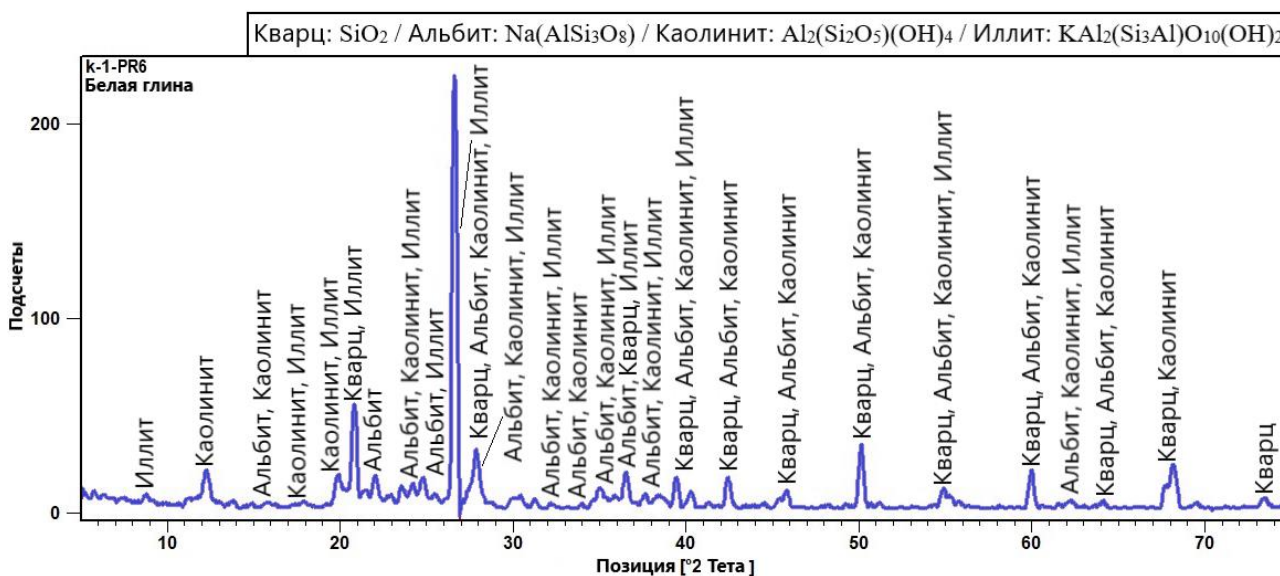


Рисунок 3.4. Дифрактограмма для белого образца кирпича PR6 Вьетнама

Минералогический анализ показывает, что образцы РЗМ на основе красной глины Вьетнама состоят в основном из иллита и каолинита, а образцы РЗМ на основе белой глины Вьетнама – состоят в основном из альбита, иллита и каолинита; и технология обжига и изготовления образцов не оказывает существенного влияния на минералогический состав. Иллит, каолинит и альбит в используемой красной и белой глине встречаются в сочетании с кварцем.

3.3.2 Физические свойства изготовленных композитов

а) Образцы из красного глинистого минерала

Увеличение давления (PR , МПа), применяемого при изготовлении РЗМ из красной глины, приводит к уменьшению толщины РЗМ и увеличению их плотности, как показано на рис. 3.5. Благодаря мелкозернистости красной глины при повышении давления увеличивается компактность изготовленных образцов и уменьшается расстояние между частицами глины, что положительно влияет на плотность изготовленных композитов. Значения плотности (ρ , г/см³) изготовленных образцов РЗМ увеличились на $\approx 13\%$ с 1,86 до 2,10 г/см³ при повышении значения давления изготовления (PR) с 7,61 до 114,22 МПа, соответственно.

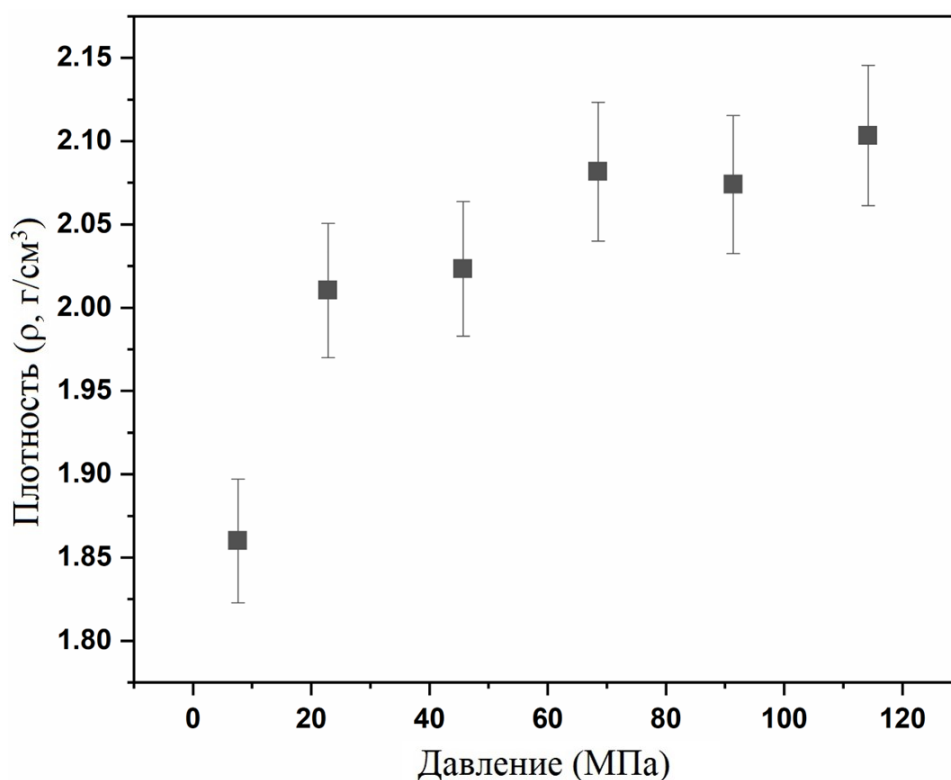


Рисунок 3.5. Изменение плотности (ρ , г/см³) образцов РЗМ на основе красной глины Вьетнама в зависимости от давления изготовления

б) Образцы из белого глинистого минерала

При увеличении давления уменьшаются расстояния между частицами, составляющими глину, что приводит к увеличению количества атомов и электронов на единицу площади. Поэтому плотность (ρ , г/см³) изготовленных образцов РЗМ увеличивалась с увеличением давления, как показано на рис. 3.6.

Увеличение значений ρ изготовленных образцов РЗМ было связано с уменьшением объема пор изготовленных образцов РЗМ, что влияет на значения пористости (Φ , %), где значения Φ уменьшаются при уменьшении значения объема пор (V_p) в изготовленных образцах РЗМ. Например, при повышении давления от 7,61 до 114,22 МПа плотность изготовленных образцов РЗМ увеличивается с 1,65 до 2,02 г/см³, при этом значения V_p уменьшаются с 1,70 до 0,92 см³, а значения Φ уменьшаются с 16,24 до 10,88%. Увеличение плотности повышает эффективность экранирования изготовленных образцов РЗМ от γ -излучения на 12%.

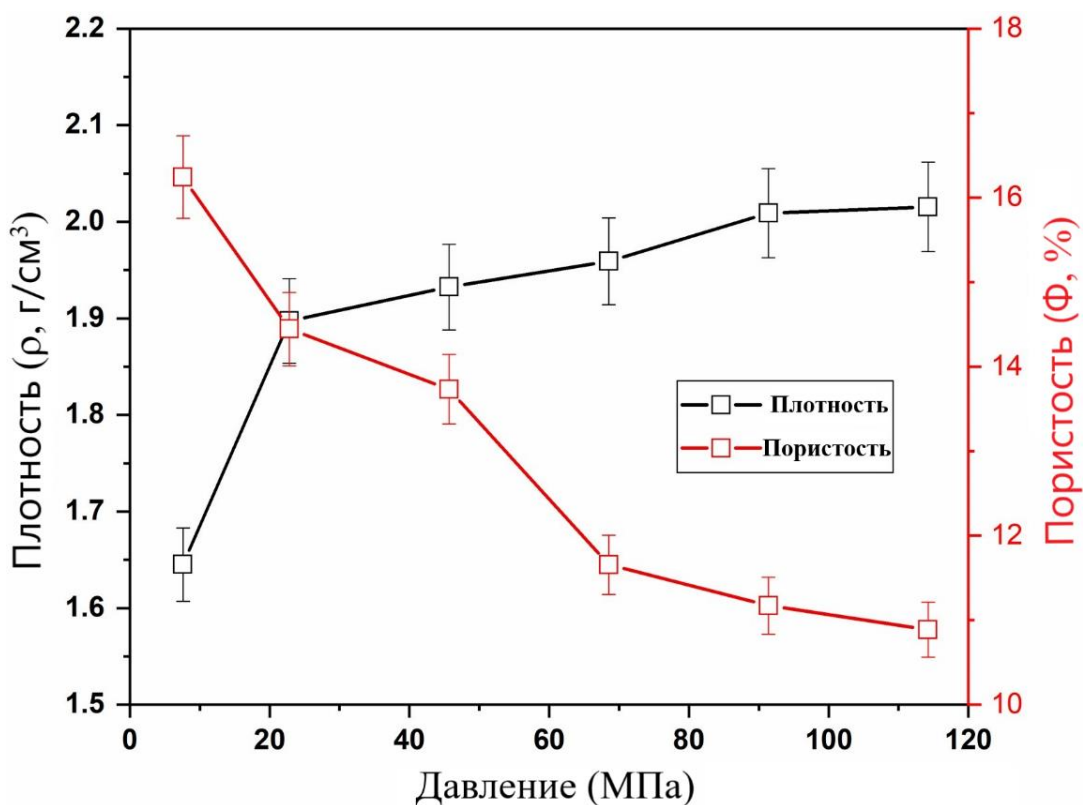


Рисунок 3.6. Изменение плотности (ρ , г/см³) и пористости (Φ , %) образцов РЗМ на основе белой глины Вьетнама в зависимости от давления изготовления

3.3.3 Исследования защитных свойств от гамма-излучения

а) Образцы из красного глинистого минерала

На рис. 3.7 показано влияние увеличения значений энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) на значения линейного коэффициента ослабления (μ , см⁻¹) изготовленных образцов, причем увеличение значений E_γ сопровождается

уменьшением значений μ изготовленных образцов РЗМ на основе красной глины. Увеличение E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ сопровождается снижением значений μ образцов РЗМ на основе красной глины на 57,6; 57,8; 56,8; 53,7; 56,4 и 56,1% для образцов, изготовленных при давлениях 7,61 (PR1); 22,84 (PR2); 45,70 (PR3); 68,55 (PR4); 91,40 (PR5) и 114,22 МПа (PR6), соответственно. Умеренное снижение значений μ образцов можно объяснить преобладанием взаимодействия комптоновского рассеяния в выбранном интервале энергий от 0,662 до 1,332 МэВ. Увеличение значений E_γ уменьшает поперечное сечение взаимодействия, где поперечное сечение обратно пропорционально изменяется с E_γ . Уменьшение поперечного сечения взаимодействия приводит к уменьшению числа фотонов-электронов глины внутри изготовленных образцов РЗМ. Таким образом, переданное число фотонов (N_t) увеличилось по сравнению с чистым испускаемым фотоном (N_o), что приводит к уменьшению μ образцов РЗМ.

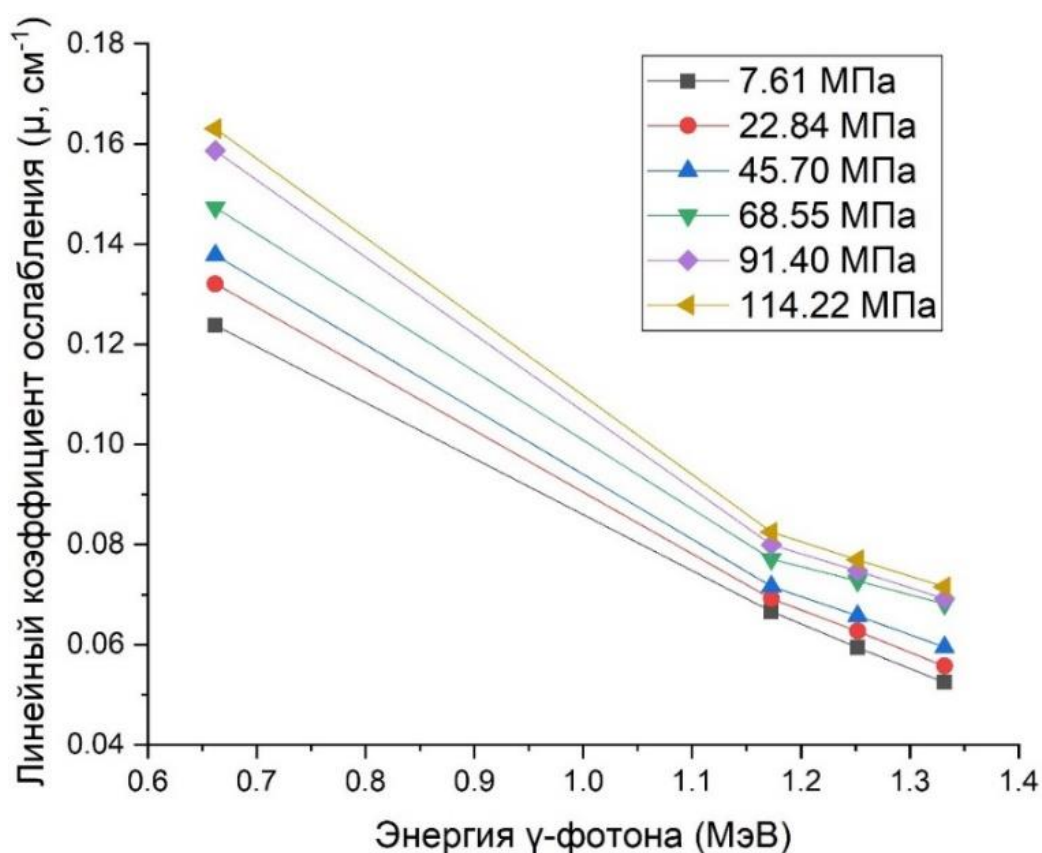


Рисунок 3.7. Влияние энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) на линейный коэффициент ослабления (μ , см^{-1})

Поскольку величина слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) обратно пропорциональна величине μ изготовленных образцов РЗМ, величина $\Delta_{0,5}$ также увеличивалась с каждым увеличением значения E_γ , как показано на рис. 3.8а. $\Delta_{0,5}$ увеличилась с 5,60 до 13,21 см (для образца PR1), с 5,25 до 12,43 см (для образца PR2), с 5,03 до 11,65 см (для образца PR3), с 4,71 до 10,17 см (для образца PR4), с 4,37 до 10,02 см (для образца PR5) и с 4,25 до 9,68 см (для образца PR6) при увеличении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Уменьшение значений μ изготовленных образцов РЗМ при увеличении значений E_γ приводит к увеличению числа фотонов N_t по сравнению с исходным числом фотонов N_o . Поэтому для уменьшения значений N_t до половины, от значений N_o требуется бóльшая толщина кирпича. Одновременно увеличение значений N_t при повышении значений E_γ приводит к увеличению значений коэффициента пропускания (TF , %), как показано на рис. 3.8б. Значения TF для образцов РЗМ толщиной 5 см повысились с 53,9 до 76,9% (для образца PR1), с 51,7 до 75,7 % (для образца PR2), с 50,2 до 74,3% (для образца PR3), с 47,9 до 71,1% (для образца PR4), с 45,2 до 70,8% (для образца PR5) и с 44,2 до 69,9% (для образца PR6), повышая значения E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. В отличие от этого, как видно из рис. 3.8с, эффективность радиационной защиты (RPE , %) РЗМ толщиной 5 см уменьшалась при увеличении значений E_γ . При толщине изготовленного образца 5 см значения RPE снижаются с 46,1 до 23,1% (для образца PR1), с 48,3 до 23,3% (для образца PR2), с 49,8 до 25,7% (для образца PR3), с 52,1 до 28,9% (для образца PR4), с 54,8 до 29,2% (для образца PR5) и с 55,8 до 30,1% (для образца PR6), повышая значения E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно.

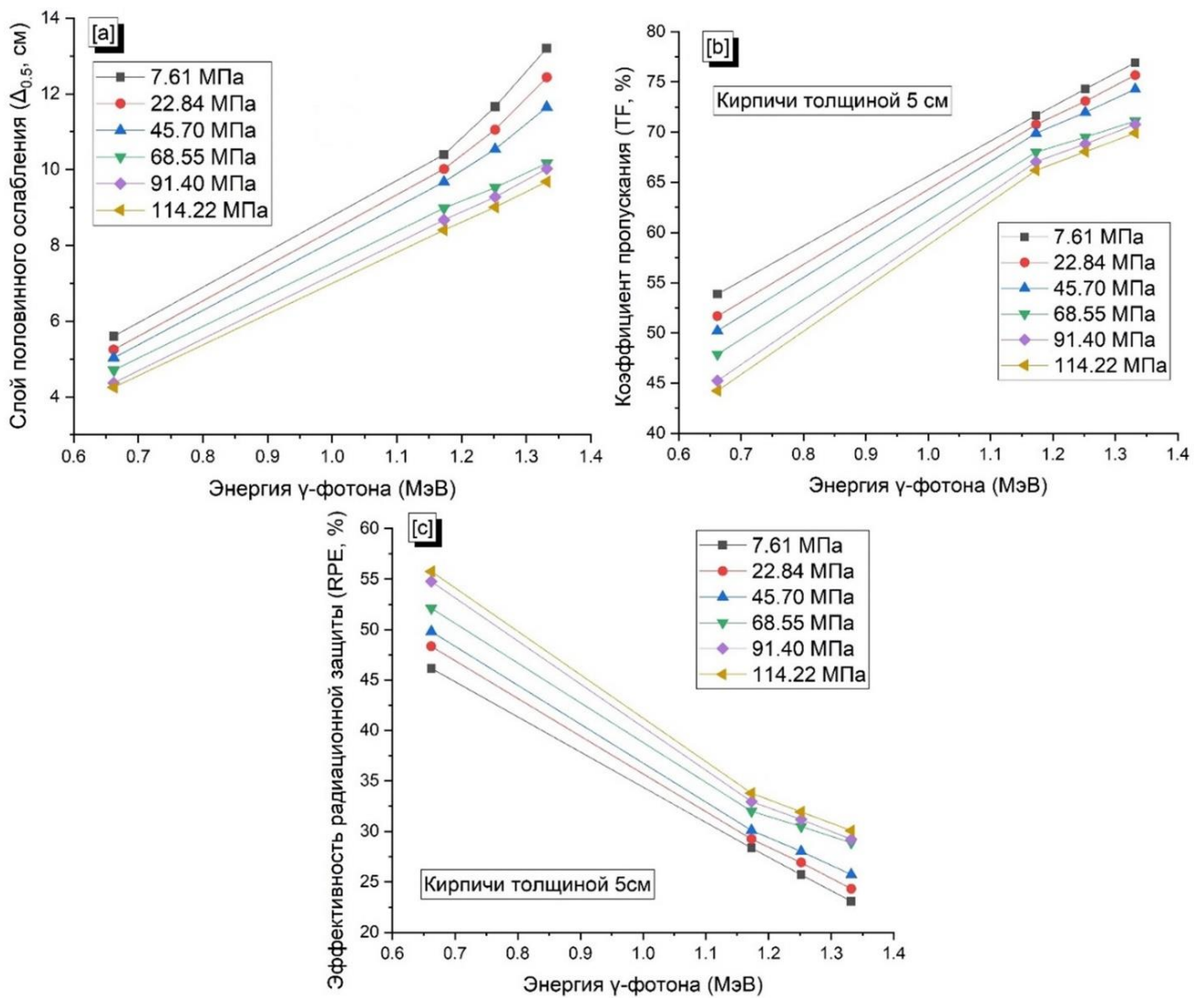


Рисунок 3.8. Влияние энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) на: [а] слой половинного ослабления ($\Delta_{0.5}$, см), [б] коэффициент пропускания (ТФ, %) и [с] эффективность радиационной защиты (RPE, %)

Кроме того, повышение значений E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ влияет на расчетные значения эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см), где значения Δ_{eq} увеличились на 20,29; 20,85; 18,15; 10,18; 17,03 и 16,22% для образцов PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 и PR6, соответственно, как показано на рис. 3.9. Увеличение значений Δ_{eq} связано с уменьшением значений μ как для свинца, так и для изготовленных образцов РЗМ, при этом увеличение значений E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ снижает значения μ для свинца на 50%, в то время как значения μ изготовленных образцов РЗМ уменьшаются на 57,6; 57,8; 56,8; 53,7; 56,4 и 56,1% для образцов PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 и PR6, соответственно.

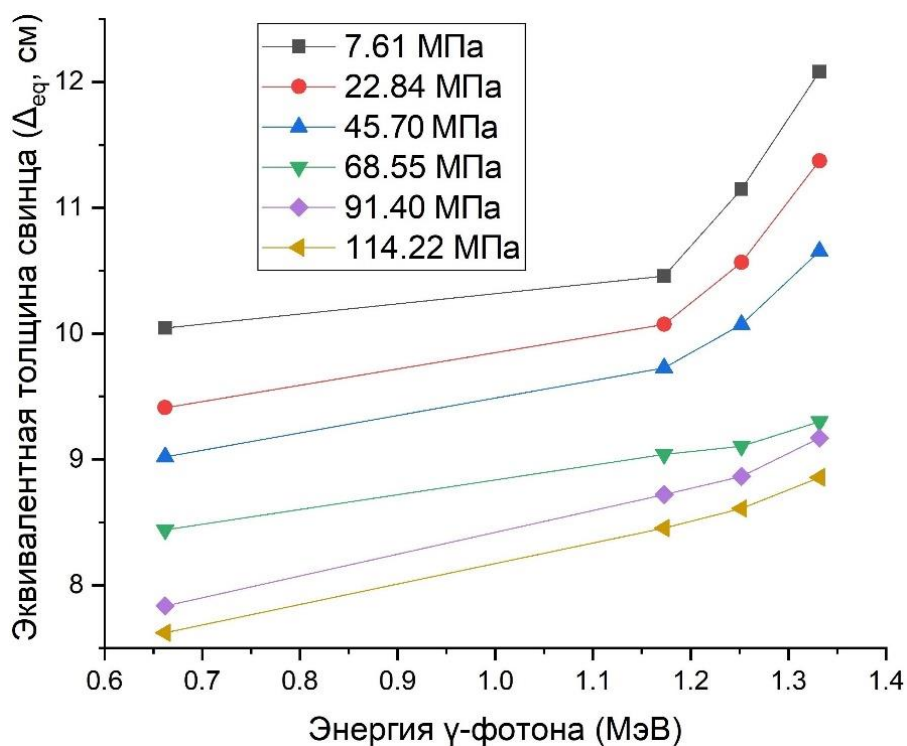


Рисунок 3.9. Влияние энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) на эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см)

Влияние применяемых величин давления (PR , МПа) на экранирующие свойства γ -излучения хорошо видно на рис. 3.10–3.12. На рис. 3.10 показано увеличение значений μ изготовленных образцов РЗМ при повышении применяемого PR , где повышение PR от 7,61 до 114,22 МПа увеличивает значения μ на 31,8; 23,7; 29,5 и 36,4%, соответственно, при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ. Увеличение применяемого PR уменьшает расстояние между частицами глины и повышает компактность изготовленных образцов РЗМ. Таким образом, плотность изготовленных композитов увеличивается, а количество электронов на единицу площади изготовленных образцов возрастает. Поскольку поперечное сечение взаимодействия комптоновского рассеяния пропорционально изменялось в зависимости от эффективного атомного номера (Z_{eff}) и плотности электронов (N_{eff}), вероятность взаимодействия фотонов с электронами глины увеличивалась, сопровождаясь уменьшением числа фотонов N_i . Следовательно, значения μ увеличивались с ростом применяемого PR .

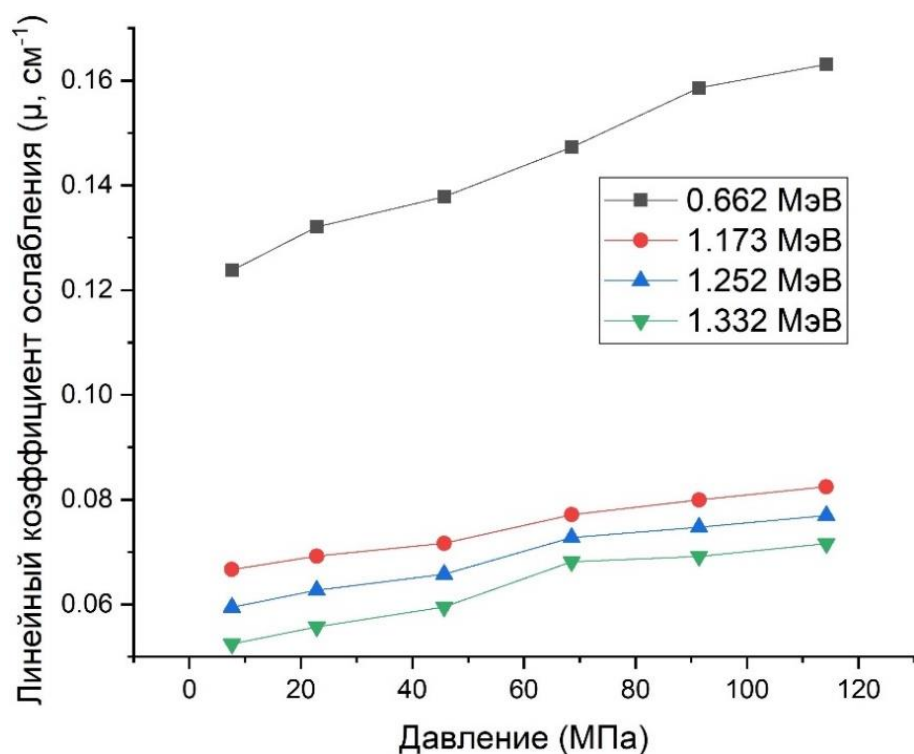


Рисунок 3.10. Влияние применяемого давления (PR , МПа) на линейный коэффициент ослабления (μ , см^{-1})

Увеличение значений линейного коэффициента ослабления образцов (μ , см^{-1}) сопровождается уменьшением значений слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), как показано на рис. 3.11а. При повышении давления изготовления образцов (PR , МПа) с 7,61 до 114,22 МПа величины $\Delta_{0,5}$ уменьшаются с 5,60 до 4,25 см (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 10,40 до 8,40 см (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 11,66 до 9,01 см (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и снижается с 13,21 до 9,68 см (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Основной причиной уменьшения значений $\Delta_{0,5}$ является уменьшение количества фотонов N_t при увеличении значений μ . Кроме того, увеличение значений PR сопровождается уменьшением величин Δ_{eq} , как показано на рис. 3.11б. Увеличение значений PR от 7,61 до 114,22 МПа приводит к уменьшению расчетных значений Δ_{eq} с 10,04 до 7,62 см (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 10,46 до 8,45 см (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 11,15 до 8,86 см (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 12,08 до 9,17 см (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Увеличение значений μ изготовленных образцов РЗМ является основной причиной снижения Δ_{eq} . При этом повышение применяемого PR с 7,61 до 114,22 МПа приводит к увеличению значения μ изготовленных образцов РЗМ по сравнению со значениями μ свинца.

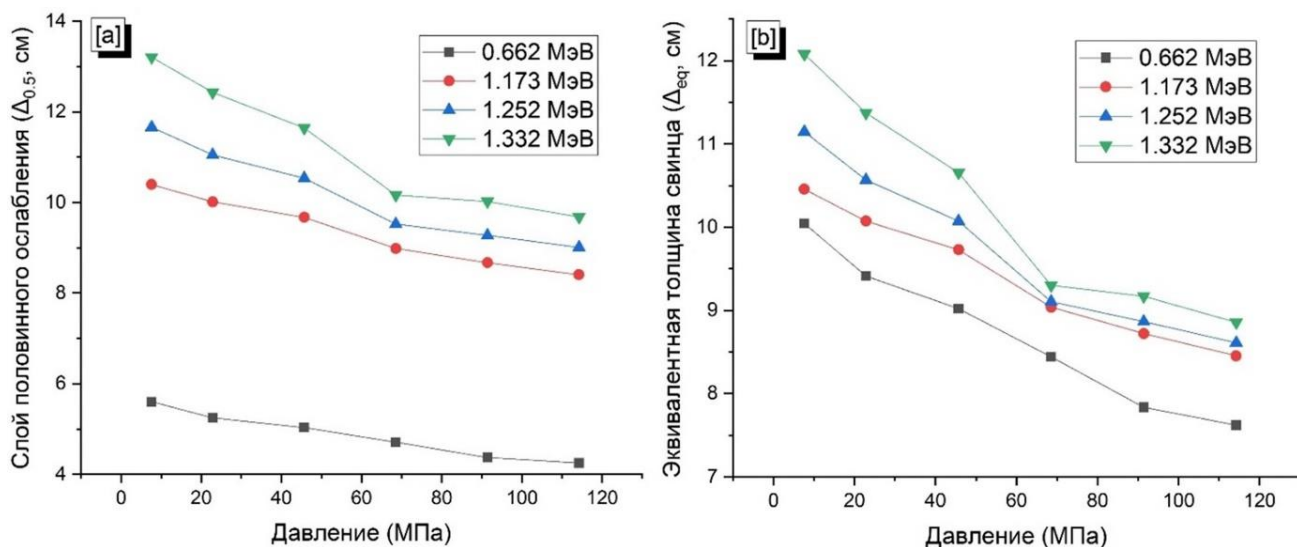


Рисунок 3.11. Влияние применяемого давления (PR , МПа) на: [а] слой половинного ослабления ($\Delta_{0.5}$, см) и [б] эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см)

Более того, уменьшение значений N_t сопровождается увеличением числа поглощенных фотонов ($N_o - N_t$) в изготовленных образцах кирпичах. Следовательно, соотношение N_t / N_o снижается, в то время как соотношение $(N_o - N_t) / N_o$ увеличивается, что приводит к уменьшению значений коэффициента пропускания (TF , %), сопровождаемому увеличением расчетных значений эффективности радиационной защиты (RPE , %), как показано на рис. 3.12d, e. Увеличение значений давления изготовления (PR , МПа) от 7,61 до 114,22 МПа снижает значения TF для толщины изготовленных образцов 5 см с 53,9 до 44,2% (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ) и уменьшает с 76,9 до 69,9% (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Напротив, при той же толщине изготовленных образцов РЗМ значения RPE увеличились с 46,1 до 55,8% (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ) и с 23,1 до 30,1% (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ), увеличив применяемый PR с 7,61 до 114,22 МПа, соответственно.

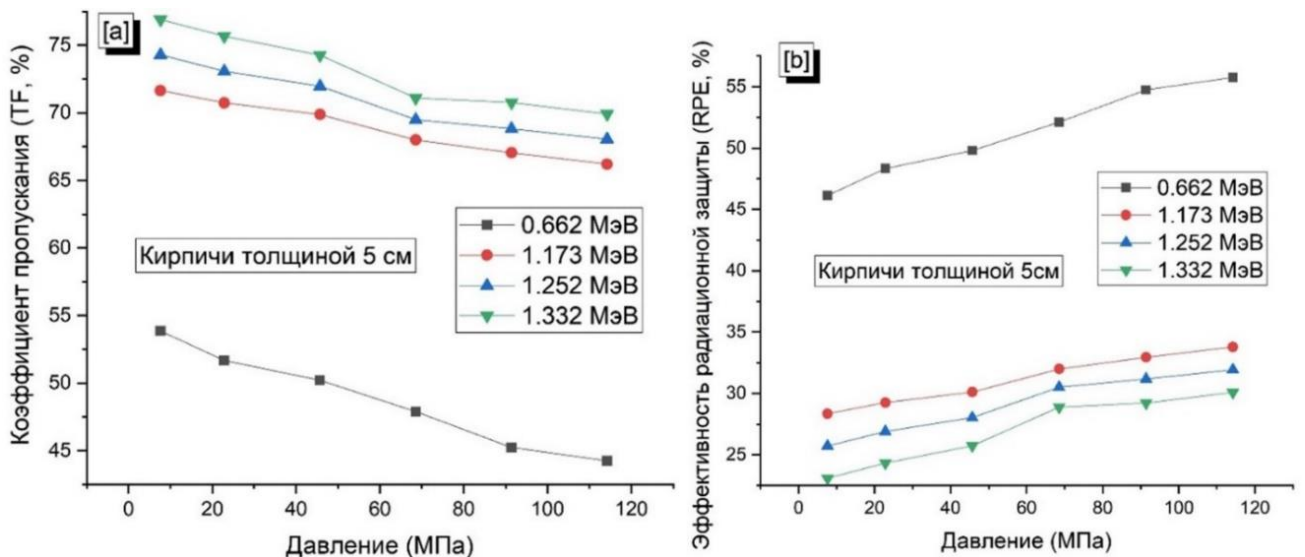


Рисунок 3.12. Влияние применяемого давления (PR , МПа) на: [a] коэффициент пропускания (TF , %) и [b] эффективность радиационной защиты (RPE , %)

На рис. 3.13а, б показано влияние толщины РЗМ на расчетные значения коэффициента пропускания (TF , %) и эффективности радиационной защиты (RPE , %), где увеличение толщины образцов сопровождалось увеличением RPE , в то время как TF уменьшался. При $E_\gamma = 1,252$ МэВ увеличение толщины образцов от 1 до 20 см снижает значения TF от 94,2 до 30,5% (для образца PR1), от 93,9 до 28,5% (для PR2), от 93,6 до 26,8% (для PR3), от 93,0 до 23,3% (для PR4), от 92,8 до 22,4% (для PR5) и снижается от 92,6 до 21,5% (для PR6). Напротив, значения RPE изготовленных образцов РЗМ увеличились с 5,8 до 69,5% (для образца PR1), с 6,1 до 71,5% (для PR2), с 6,4 до 73,2% (для PR3), с 7,0 до 76,7% (для PR4), с 7,2 до 77,6% (для PR5) и с 7,4 до 78,5% (для PR6). Уменьшение значений TF и увеличение RPE для изготовленных образцов объясняются длиной пробега γ -фотонов, где увеличение толщины кирпича приводит к увеличению длины пробега γ -лучей. Таким образом, увеличение вероятности взаимодействия фотонов с электронами атомов элементов, входящих в составе глины, привело к увеличению числа поглощенных фотонов в толще кирпича и уменьшению фотонов N_t . В результате значения RPE изготовленных образцов РЗМ увеличились, а значения TF уменьшились. Как следует из предыдущего обсуждения, давление изготовления образцов (PR , МПа) оказывает большое влияние на экранирующие свойства от γ -лучей.

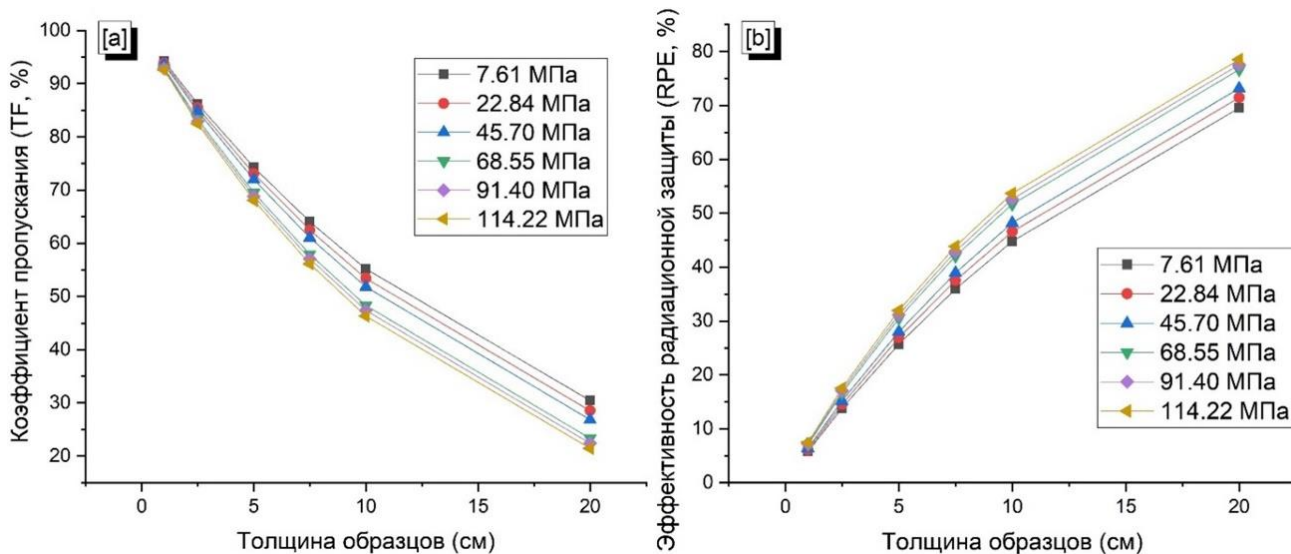


Рисунок 3.13. Влияние толщины образцов РЗМ на: [а] коэффициент пропускания (TF , %) и [б] эффективность радиационной защиты (RPE , %) при $E_\gamma = 1,252$ МэВ

б) Образцы из белого глинистого минерала

Массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) для изготовленных образцов РЗМ на основе белой глины из Вьетнама был определен экспериментально через соотношение между $\ln(N_o / N_t)$ и массовой толщиной ($x\rho$, $\text{г}/\text{см}^2$) изготовленных образцов. Увеличение значений $x\rho$ было связано с увеличением значений $\ln(N_o / N_t)$ при $E_\gamma = 0,662$ МэВ. Что касается связи между значениями $\ln(N_o / N_t)$ и $x\rho$, то наклон прямых линий дает экспериментальные значения μ_m для изготовленных образцов при энергии 0,662 МэВ. Кроме того, значения μ_m при энергиях γ -излучения 1,173, 1,252 и 1,332 МэВ оценивались так же, как и при энергии 0,662 МэВ. Измеренные значения μ_m для изготовленных образцов использовались при расчетах экранирующих свойств γ -излучения, включая значения μ , $\Delta_{0,5}$, Δ_{eq} , TF и RPE .

На рис. 3.14–3.17 представлена зависимость μ_m , $\Delta_{0,5}$, Δ_{eq} , TF и RPE от применяемых значений E_γ . На рис. 3.14 представлена зависимость значений μ_m от применяемых E_γ , где значения μ_m уменьшились на 40,89; 41,29; 40,38; 40,31; 38,94 и 39,19% для образцов PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 и PR6 при повышении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Комptonовское рассеяние является

основной причиной умеренного уменьшения значений μ_m , где поперечное сечение взаимодействия комптоновского рассеяния пропорционально E_γ^{-1} в указанном интервале E_γ . В указанном выбранном интервале E_γ нет эффекта ни для фотоэлектрического взаимодействия, ни для взаимодействия образования пар. На основе измеренных значений μ_m для изготовленных образцов оцениваются значения μ . Значения μ изменяются в пределах от 0,102 до 0,060 см^{-1} (для образца PR1), от 0,105 до 0,062 см^{-1} (для образца PR2), от 0,107 до 0,064 см^{-1} (для образца PR3), от 0,110 до 0,065 см^{-1} (для образца PR4), от 0,110 до 0,067 см^{-1} (для PR5) и от 0,116 до 0,070 см^{-1} (для PR6) при увеличении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Уменьшение μ_m и μ связано с поперечным сечением взаимодействия, где увеличение применяемой энергии фотонов сопровождается уменьшением поперечного сечения взаимодействия γ -лучей, что снижает количество взаимодействия γ -фотонов с электронами атомов образцов РЗМ. Уменьшение количества взаимодействия привело к увеличению числа N_i фотонов по отношению к числу N_o . Следовательно, уменьшились и значения μ и μ_m .

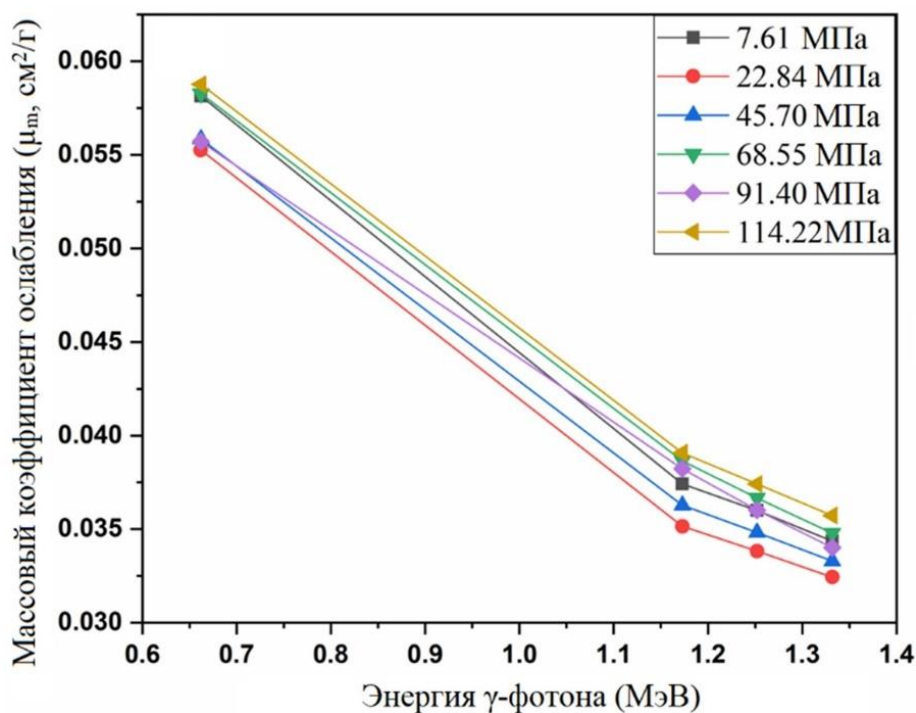


Рисунок 3.14. Влияние энергии γ -фотона (E_γ , МэВ) на массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$)

Вследствие обратной зависимости между значениями линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) и слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) – уравнение (3.5), значения $\Delta_{0,5}$ на рис. 3.15а резко повышаются при любом увеличении значений E_γ . При увеличении E_γ с 0,662 до 1,332 МэВ, $\Delta_{0,5}$ увеличилось с 6,81 до 11,52 см (для образца PR1), с 6,61 до 11,25 см (для образца PR2), с 6,48 до 10,86 см (для образца PR3), с 6,32 до 10,59 см (для образца PR4), с 6,29 до 10,31 см (для образца PR5) и с 5,99 до 9,84 см (для образца PR6). Увеличение значений $\Delta_{0,5}$ объясняется увеличением числа фотонов N_t , которое связано с увеличением значений E_γ и уменьшением значений μ . Чтобы снизить значения N_t до 50% от N_o , требуются большее значение толщины для их ослабления. Напротив, значения эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см) уменьшались на рис. 3.15б при увеличении применяемой E_γ . Расчетные значения Δ_{eq} уменьшились на 13,71; 13,12; 14,45; 14,55; 16,46 и 16,12% для образцов PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 и PR6, соответственно, при увеличении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ. Снижение Δ_{eq} объясняется большим снижением значений μ свинца по сравнению со значениями μ изготовленных образцов при повышении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, где снижение μ свинца достигает 49%, в то время как μ изготовленных образцов уменьшились на 40,89; 41,29; 40,38; 40,31; 38,94 и 39,19% для образцов PR1, PR2, PR3, PR4, PR5 и PR6, соответственно.

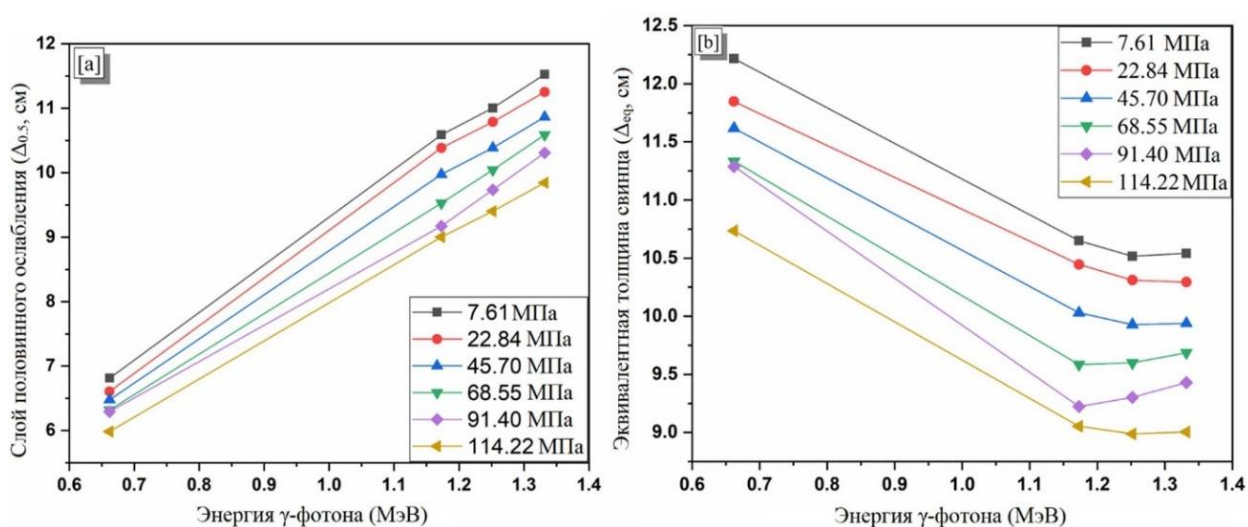


Рисунок 3.15. Влияние энергии γ -фотона (E_γ , МэВ) на: [а] слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) и [б] эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см)

На рис. 3.16а, б показано изменение значений коэффициента пропускания (TF , %) и эффективности радиационной защиты (RPE , %) в зависимости от E_γ фотонов, где увеличение E_γ сопровождается увеличением TF и уменьшением расчетных значений RPE . Например, повышение E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ увеличивает расчетные значения TF для толщины 5 см образцов с 60,13 до 74,03% (для образца PR1), с 59,18 до 73,49% (для образца PR2), с 58,57 до 72,69% (для образца PR3), с 57,79 до 72,09% (для образца PR4), с 57,66 до 71,45% (для образца PR5) и с 56,05 до 70,32% (для образца PR6). Указанное увеличение TF толщины 5 см изготовленных образцов РЗМ на основе белой глины Вьетнама сопровождается снижением расчетных RPE с 39,87 до 25,97% (для образца PR1), с 40,82 до 26,51% (для образца PR2), с 41,43 до 27,31% (для образца PR3), с 42,21 до 27,91% (для образца PR4), с 42,34 до 28,55% (для образца PR5) и с 43,95 до 30,83% (для образца PR6) при повышении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ.

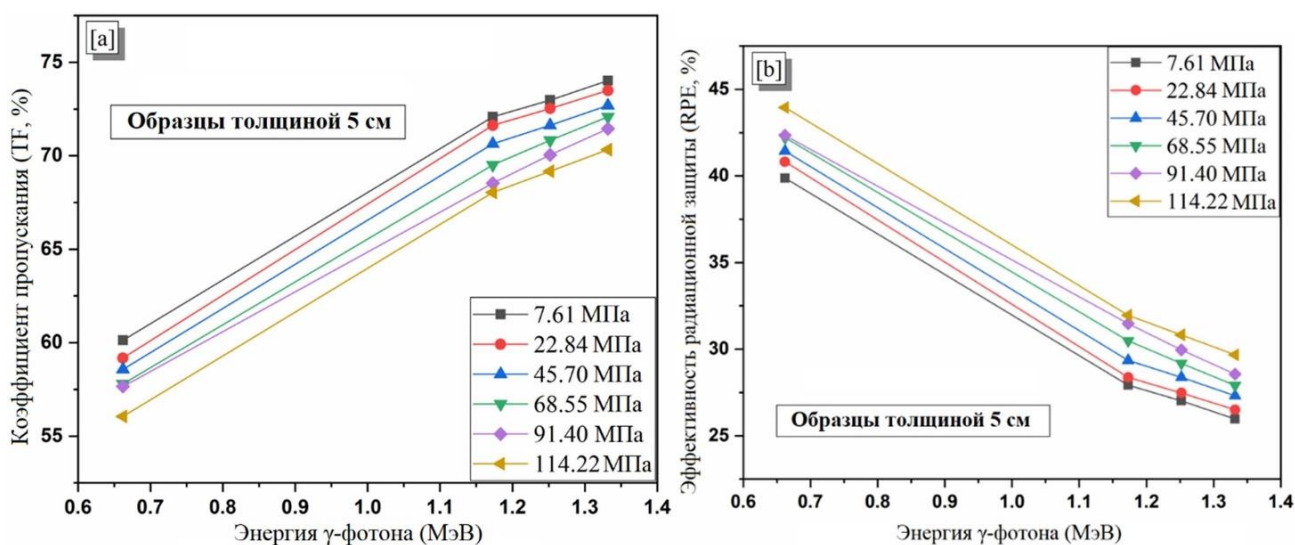


Рисунок 3.16. Влияние энергии γ -фотона (E_γ , МэВ) на: [а] коэффициент пропускания (TF , %) и [б] эффективность радиационной защиты (RPE , %)

Влияние давления изготовления (PR , МПа) на физические свойства изготовленных образцов РЗМ (значения ρ и Φ) влияет на экранирующие свойства γ -излучения, как показано на рис. 3.17–3.19. На рис. 3.17 представлено изменение экспериментально измеренных значений μ_m в зависимости от

применяемых значений PR , где при повышении PR от 7,61 до 114,22 МПа значения μ_m незначительно уменьшились от 0,062 до 0,057 $\text{см}^2/\text{г}$ (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), от 0,040 до 0,038 $\text{см}^2/\text{г}$ (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), от 0,038 до 0,037 $\text{см}^2/\text{г}$ (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и от 0,037 до 0,035 $\text{см}^2/\text{г}$ (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Незначительное изменение значений массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) объясняется независимостью значений μ_m от значений плотности (ρ , $\text{г}/\text{см}^3$) изготовленных образцов. Также незначительное изменение μ_m можно объяснить зависимостью значений μ_m от химического состава изготовленных образцов, в то время как химический состав во всех изготовленных образцах кирпичах одинаков. Поэтому на рис. 3.17 наблюдалось незначительное изменение μ_m .

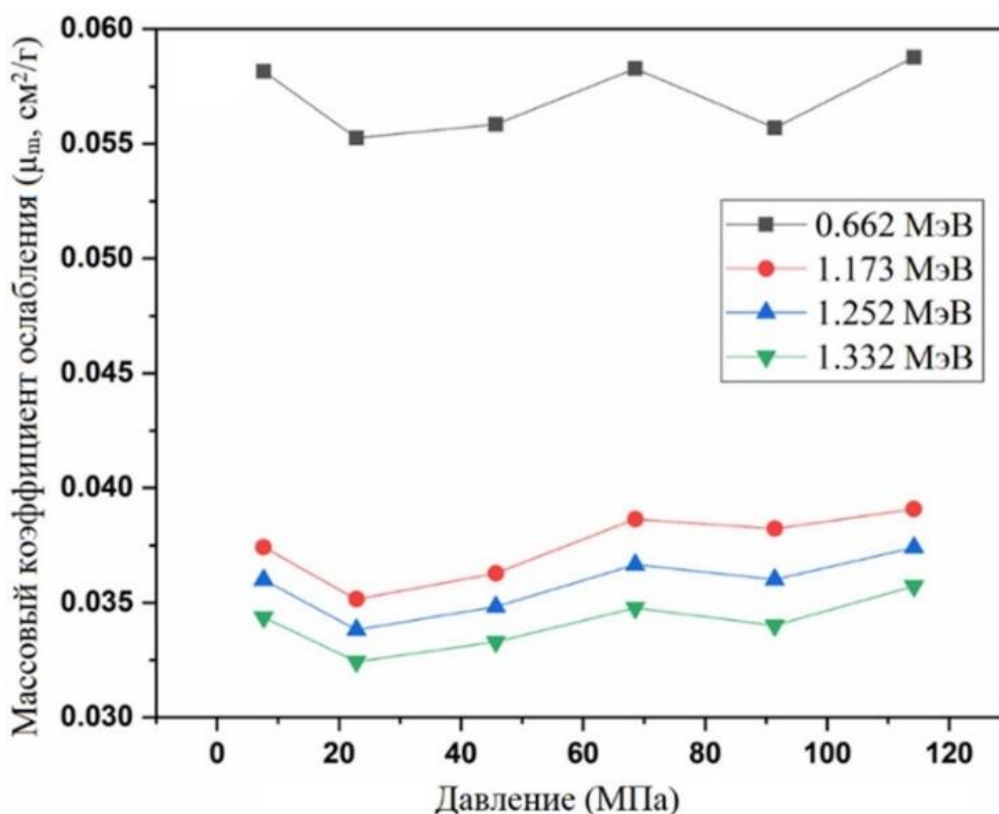


Рисунок 3.17. Влияние применяемого давления (PR , МПа) на массовый коэффициент ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$)

Напротив, измерения линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) показывают увеличение значений μ , связанное с повышением давления изготовления (PR , МПа) от 7,61 до 114,22 МПа. Например, при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ значение μ увеличилось на 13,8; 17,6; 17,0 и 17,1%,

соответственно. Увеличение μ можно объяснить увеличением поперечного сечения взаимодействия γ -лучей, которое прямо зависит от эффективного атомного номера (Z_{eff}) в интервале взаимодействия комптоновского рассеяния. Увеличение значений PR приводит к увеличению компактности изготовленных образцов, что увеличивает количество глинистых частиц, а также количество электронов на единицу объёма образцов РЗМ. Затем, увеличение количества электронов приводит к увеличению электронной плотности и Z_{eff} изготовленных образцов, что увеличивает поперечное сечение взаимодействия γ -лучей и увеличивает взаимодействие между γ -фотонами и электронами в уплотнённых кирпичах. Следовательно, N_t немного уменьшились по сравнению со значением N_o , и в результате значения μ увеличились.

Увеличение значений μ объясняется увеличением поперечного сечения взаимодействия γ -лучей, а также плотности изготовленных образцов. Увеличение значений μ уменьшает значения слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), как показано на рис. 3.18. При увеличении PR от 7,61 до 114,22 МПа снижает значения $\Delta_{0,5}$ с 6,81 до 5,99 см (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 10,59 до 9,00 см (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 11,00 до 9,40 см (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и снижается с 11,52 до 9,81 см (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Уменьшение значений $\Delta_{0,5}$ объясняется обратной пропорциональностью величин $\Delta_{0,5}$ и μ , где увеличение значений μ сопровождается уменьшением фотонов N_t по сравнению с фотонами N_o . Следовательно, толщина $\Delta_{0,5}$ в результате уменьшилась. Снижение количества фотонов N_t по сравнению с количеством фотонов N_o также повлияло на значения коэффициента пропускания (TF , %) для изготовленных образцов РЗМ на основе белой глины Вьетнама.

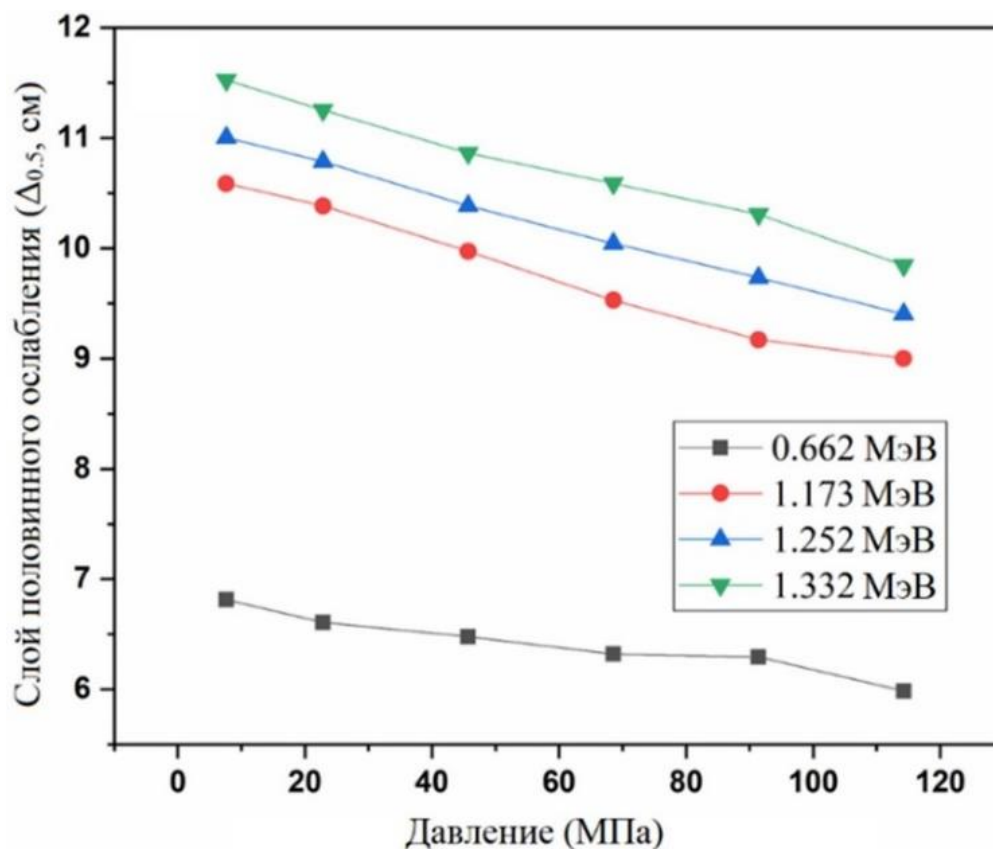


Рисунок 3.18. Влияние применяемого давления (PR , МПа) на слой половинного ослабления ($\Delta_{0.5}$, см)

На рис. 3.19б показано снижение коэффициента пропускания (TF , %) при повышении давления изготовления (PR , МПа) от 7,61 до 114,2 МПа, где значения TF для толщины 5 см образцов снизились с 6,78; 5,61; 5,22 и 5,00%. Уменьшение значений N_t связано с увеличением фотонов N_a , где $N_a = (N_o - N_t)$. Таким образом, количество поглощенной энергии γ -фотонов в пределах толщины 5 см изготовленного образца увеличилось, что связано с увеличением эффективности радиационной защиты (RPE , %), как показано на рис. 3.19с. При E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ величины RPE увеличились на 10,22; 14,48; 14,09 и 14,26%, соответственно. Кроме того, на рис. 3.19а показано изменение Δ_{eq} в зависимости от применяемого PR , где повышение давления снижает расчетные величины Δ_{eq} на 12,13; 14,98; 14,54 и 14,58% при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ, соответственно. Уменьшение величин Δ_{eq} объясняется увеличением значений μ образцов РЗМ по сравнению со значениями μ свинца.

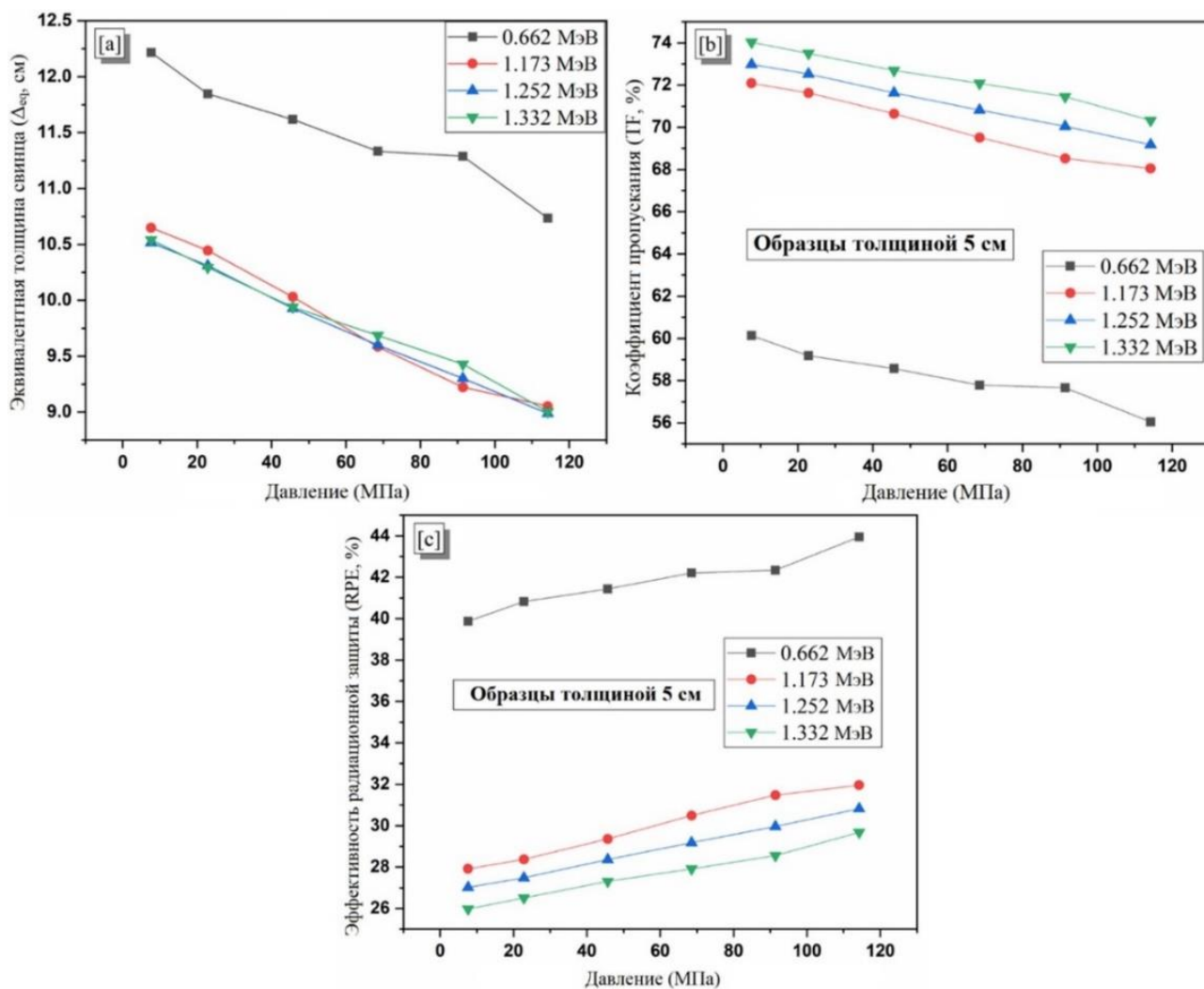


Рисунок 3.19. Влияние применяемого давления (PR , МПа) на: [a] эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см), [b] коэффициент пропускания (TF , %) и [c] эффективность радиационной защиты (RPE , %)

Роль толщины изготовленных образцов РЗМ в изменениях значений коэффициента пропускания (TF , %) и эффективности радиационной защиты (RPE , %) проиллюстрирована на рис. 3.20а, б. На рис. 3.20а видно, что увеличение толщины кирпича с 1 до 30 см снижает значения TF с 93,9 до 15,1% (для образца PR1), с 93,8 до 14,6% (для образца PR2), с 93,5 до 13,5% (для образца PR3), с 93,3 до 12,6% (для образца PR4), с 93,1 до 11,8% (для образца PR5) и с 92,9 до 11,0% (для образца PR6). Уменьшение значений TF объясняется уменьшением числа N_i из-за большого количества электронных взаимодействий γ -фотонов с более плотной толщиной изготовленных образцов. При этом увеличение γ -фотонных электронных взаимодействий

сопровождается увеличением количества энергии γ -лучей, поглощаемой в слоях бóльшей толщины изготовленных образцов. Следовательно, увеличение числа N_a с ростом толщины привело к увеличению RPE изготовленных образцов (рис. 3.20b). Например, при $E_\gamma = 1,252$ МэВ увеличение толщины образцов в пределах от 1 до 30 см сопровождается увеличением RPE изготовленных образцов с 6,1 до 84,9% (для образца PR1), с 6,2 до 85,4% (для образца PR2), с 6,5 до 86,5% (для PR3), с 6,7 до 87,4% (для образца PR4), с 6,9 до 88,2% (для образца PR5) и с 7,1 до 89,0% (для образца PR6).

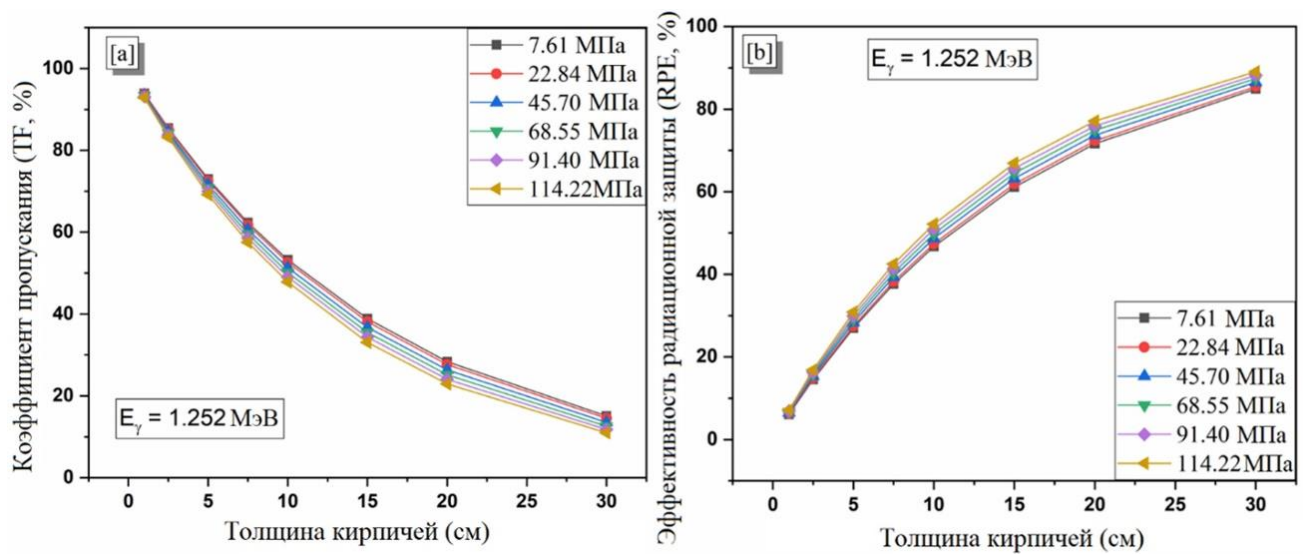


Рисунок 3.20. Влияние толщины образцов РЗМ на: [а] коэффициент пропускания (TF , %) и [б] эффективность радиационной защиты (RPE , %) при $E_\gamma = 1,252$ МэВ

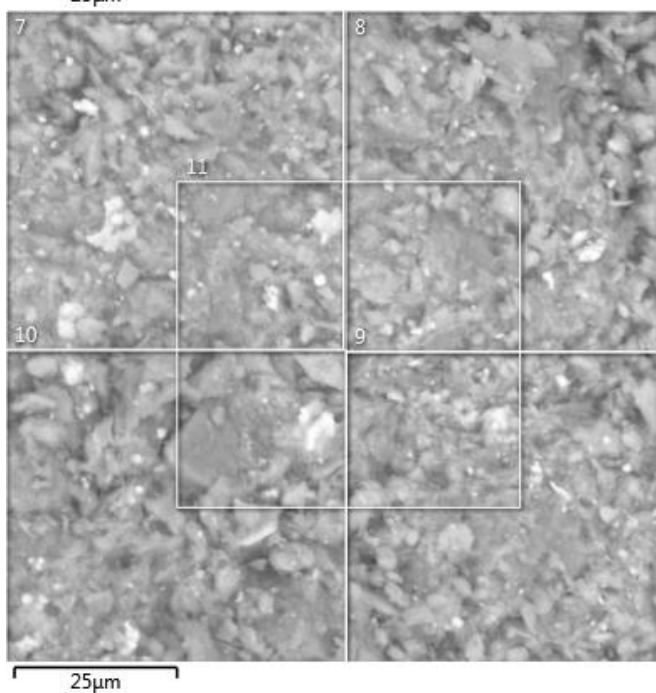
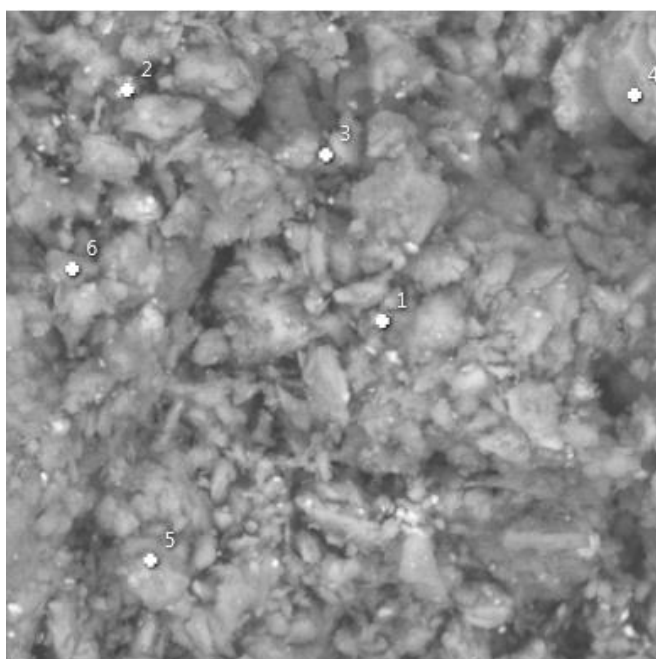
В итоге прессованные РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама толщиной до 20–30 см могут быть использованы в качестве бессвинцового защитного материала, а также в качестве постоянного радиационно-защитного материала при выводе из эксплуатации АЭС. Они также могут быть использованы в качестве строительного материала в диагностических клиниках.

3.3.4 Исследование химического состава образцов глины Вьетнама с помощью электронного микроскопа

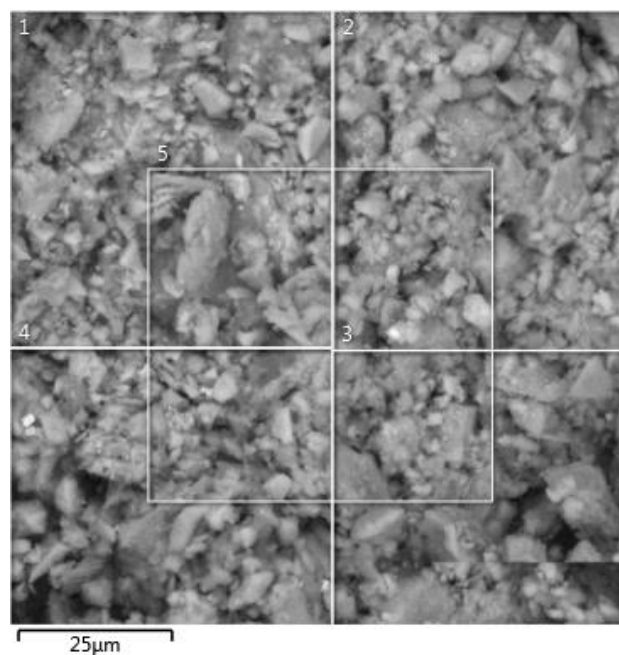
Химический состав исследуемых образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама также был исследован с помощью электронного микроскопа. Сканирующие электронно-микроскопические исследования и микрозондовый рентгеноспектральный анализ проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira3 LMU при ускоряющем напряжении 20 кВ, оснащенный системой энерго-дисперсионного анализа (ЭДС) характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) x-Act 6. Глубина возбуждения ХРИ составляет 1–3 мкм в зависимости от состава пробы и ускоряющего напряжения. Определение содержания легких по атомному номеру элементов (кислорода, углерода) носит качественный характер. Обработка результатов элементного анализа производилась в программе AZtec.

На рис. 3.21 в качестве примеры представлены электронные изображения для образцов PR6 (на основе красной и белой глины Вьетнама), изготовленные при давлении 114,22 МПа.

Результаты исследования химического состава красной и белой глины Вьетнама представлены в табл. 3.1 и на рис. 3.22. Интегральный элементный анализ по площади показывает, что основными элементами, входящими в состав красной и белой глины Вьетнама являются O, Al, Si, наблюдается присутствие Na, K и Fe.



а) Красная глина



б) Белая глина

Рисунок 3.21. Электронные изображения при исследовании химического состава образцов глины Вьетнама с помощью электронного микроскопа

Таблица 3.1. Химический состав образцов красной и белой глины Вьетнама

Название спектра	Образцы красной (крас.) и белой (бел.) глины Вьетнама											
	Крас.	Бел.	Крас.	Бел.	Крас.	Бел.	Крас.	Бел.	Крас.	Бел.	Крас.	Бел.
	O (%)		Na (%)		Al (%)		Si (%)		K (%)		Fe (%)	
Спектр 1	45,37	50,61	-	1,35	12,52	12,09	27,89	33,75	2,03	1,49	11,64	0,70
Спектр 2	44,10	49,13	-	1,41	11,25	11,50	20,05	36,04	1,49	1,11	23,01	0,80
Спектр 3	56,99	49,85	-	1,72	9,23	11,27	22,42	35,07	2,00	1,40	3,81	0,69
Спектр 4	45,69	50,20	-	1,25	9,13	10,60	39,02	35,60	1,37	1,52	4,80	0,84
Спектр 5	46,20	49,09	-	1,38	12,44	11,65	34,41	34,92	1,58	1,83	5,36	1,13
Спектр 6	44,53	-	-	-	10,91	-	35,78	-	2,19	-	6,59	-
Спектр 7	47,77	-	0,28	-	12,38	-	29,10	-	1,97	-	7,15	-
Спектр 8	48,70	-	0,20	-	12,96	-	28,08	-	2,32	-	6,77	-
Спектр 9	46,35	-	0,17	-	12,14	-	30,38	-	2,33	-	7,27	-
Спектр 10	43,77	-	0,36	-	12,01	-	30,69	-	2,35	-	9,79	-
Спектр 11	45,73	-	0,35	-	12,79	-	29,21	-	2,24	-	8,71	-
Макс	56,99	50,61	0,36	1,72	12,96	12,09	39,02	36,04	2,35	1,83	23,01	1,13
Мин	43,77	49,09	0,17	1,25	9,13	10,60	20,05	33,75	1,37	1,11	3,81	0,69
Усреднение	46,84	49,78	0,27	1,42	11,61	11,42	29,73	35,08	1,99	1,47	8,63	0,83
Стандартное отклонение	1,91	0,66	0,08	0,18	0,41	0,55	1,05	0,86	0,16	0,26	1,27	0,18

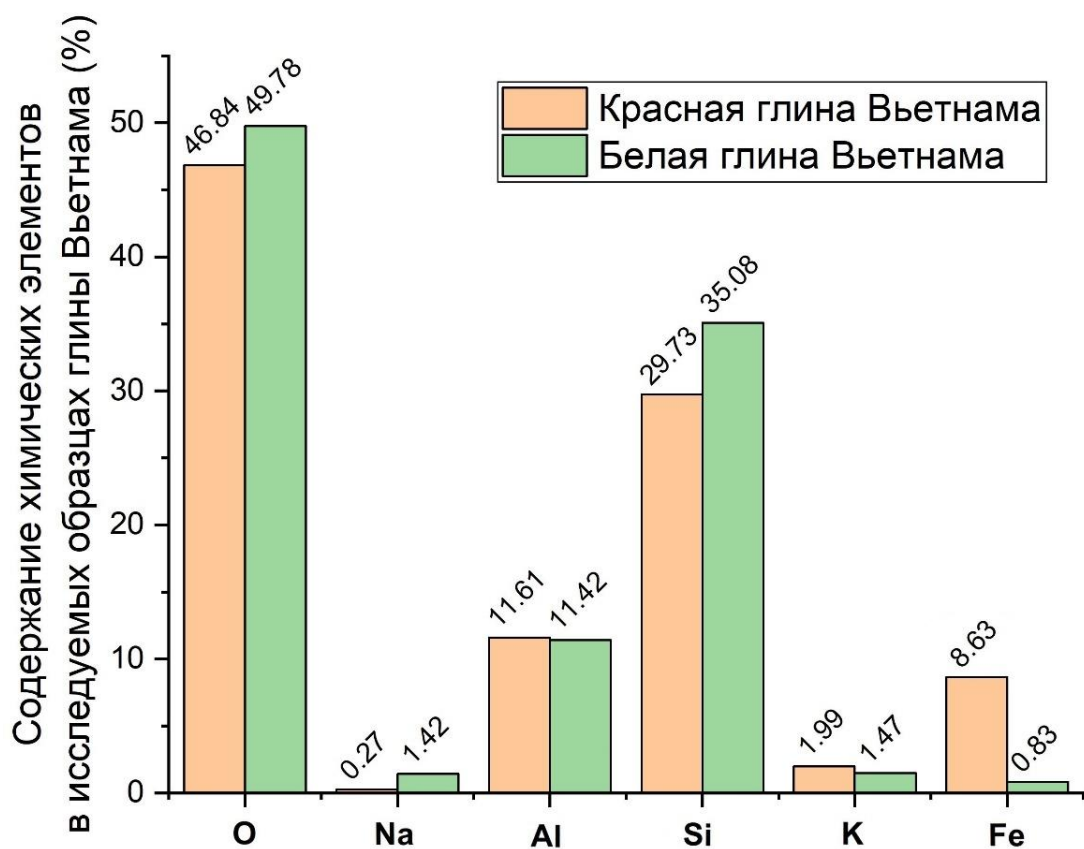


Рисунок 3.22. Состав основных химических элементов в образцах РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама

3.3.5 Оценка радиационно-защитных характеристик образцов глины Вьетнама с помощью программы XCOM

Для подтверждения экранирующих свойств от γ -излучения изготовленных образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама была использована программа XCOM. Программное обеспечение XCOM используется для теоретической оценки массового коэффициента ослабления. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) составил базу данных сечений фотонов, используемую в программе XCOM. XCOM предоставляет полное сечение, а также парциальное сечение следующих процессов: некогерентного рассеяния, когерентного рассеяния, фотоэлектрического поглощения и образования пар в полях атомного ядра и в поле электронов атомов (рис. 3.23).

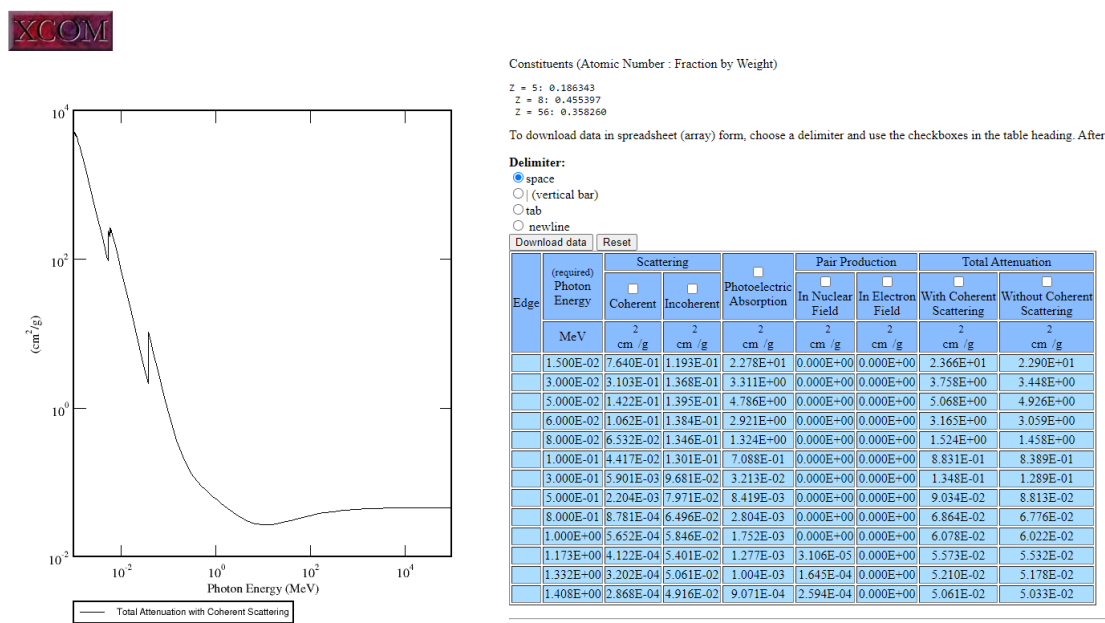


Рисунок 3.23. Скриншот для расчета массового коэффициента ослабления (μ_m , см²/г) с помощью программы XCOM [42]

Данные относятся к элементам с атомным номером до 100 и энергии фотонов от 1 кэВ до 1 ГэВ. Сечения сложных веществ также определяются с помощью программы XCOM с использованием правила взвешенной смеси для атомных составляющих по формуле:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i W_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (3.9)$$

где $(\mu/\rho)_i$ – массовый коэффициент ослабления i -го составляющего элемента, а W_i – массовая доля i -го составляющего элемента в образце материала.

Таблица 3.2. Сравнение экспериментальных и теоретических значений μ_m (см²/г) образцов РЗМ на основе красной и белой глины, изготовленных под давлением 114,22 МПа

Энергия (МэВ)	Красная глина (образец PR6)		Разница (Δ , %)	Белая глина (образец PR6)		Разница (Δ , %)
	Эксп.	ХСОМ		Эксп.	ХСОМ	
0,662	0,0779	0,0765	1,7972	0,0588	0,0612	3,9215
1,173	0,0394	0,0422	6,6351	0,0391	0,0395	1,0127
1,252	0,0368	0,0336	8,6957	0,0374	0,0330	11,7647
1,332	0,0342	0,0315	7,8947	0,0357	0,0319	10,6443

Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами теоретического исследования с помощью программы ХСОМ. Различие (Δ , %) между экспериментальными измеренными результатами и теоретическими результатами, полученными с помощью программы ХСОМ, находилась в диапазоне $\pm 10\%$ для образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама, изготовленных под давлением 114,22 МПа (PR6) при различных энергиях γ -фотонов. Указанная разница обусловлена многими факторами, связанными с инструментальной частью. Кроме того, исходный химический состав немного изменился в процессе изготовления образцов (эпоксидная смола была добавлена в глиняном смеси для прессования и изготовления образцов РЗМ), что повлияло на величину Δ (%) между экспериментальными и теоретическими оценками.

Из рис. 3.22 видно, что содержание железа (Fe) в образцах на основе красной глины Вьетнама значительно больше, чем в образцах на основе белой глины. Это объясняет, почему красная глина обладает более хорошими радиационно-защитными свойствами, чем белая. Об этом также свидетельствуют и результаты вышеописанных экспериментальных исследований по просвечиванию образцов на основе красной и белой глины Вьетнама (пункты 3.3.1 и 3.3.2) с помощью гамма-излучения и теоретических исследований с помощью программы ХСОМ.

3.3.6 Сравнение с другими результатами

Измеренные значения μ для изготовленных образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама сравнивались со значениями μ для некоторых образцов на основе других видов глины, представленных в табл. 3.3.

Превосходство значений μ для образцов, описанных в литературе: СВ40 (композит из глины и 40% баритового порошка), СS40 (композит из глины и 40% стального шлака), КG50 (необожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита) и КG50В (обожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита), объясняется добавлением в глиняный кирпич высоких концентраций плотных материалов с высоким содержанием Z_{eff} (натуральный гранит, баритовый порошок и стальной шлак) в литературе [76, 79–81]. Образец PR6 (красная глина) имеет значения μ на 4% ниже по сравнению с значением μ для образца КG50 [80] при $E_\gamma = 0,662$ МэВ, на 42% ниже при $E_\gamma = 1,173$ МэВ и на 51% ниже при $E_\gamma = 1,332$ МэВ, соответственно. Образец PR6 (белая глина) имеет значения μ на 31% ниже по сравнению с значением μ для образца КG50 [80] при $E_\gamma = 0,662$ МэВ, на 45% ниже при $E_\gamma = 1,173$ МэВ и на 52% ниже при $E_\gamma = 1,332$ МэВ, соответственно.

Кроме того, значения μ для изготовленных образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама близки к значениям μ для образца «Кирпич», «Глина» и СF10 (глина + 10% содержание летучей золы), приведенным в литературе [68, 79]. Образец PR6 (красная глина) имеет значения μ на 30% выше по сравнению с значением μ для образца «Кирпич» [81] при $E_\gamma = 0,662$ МэВ, на 2% выше при $E_\gamma = 1,173$ МэВ и на 14% ниже при $E_\gamma = 1,332$ МэВ, соответственно. Образец PR6 (белая глина) имеет значения μ на 2% выше по сравнению с значением μ для образца «Кирпич» [81] при $E_\gamma = 0,662$ МэВ, на 4% ниже при $E_\gamma = 1,173$ МэВ и на 17% ниже при $E_\gamma = 1,332$ МэВ, соответственно.

Сравнение показывает примерно одинаковые при $E_\gamma = 0,662$ МэВ и более низкие при $E_\gamma = 1,332$ МэВ экранирующие способности образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама, рассмотренных в настоящем исследовании, по сравнению с другими образцами, указанными в литературе.

Таблица 3.3. Сравнение линейного коэффициента ослабления настоящего исследования для некоторых аналогичных материалов в других исследованиях

Образцы	Плотность (г/см ³)	Экспериментальные значения линейного коэффициента ослабления (μ , см ⁻¹)			Ссылка
		$E_{\gamma} = 0,662$ МэВ	$E_{\gamma} = 1,173$ МэВ	$E_{\gamma} = 1,332$ МэВ	
CB40 (композит из глины и 40% баритового порошка)	2,55	0,165	0,122	0,120	[76]
CS40 (композит из глины и 40% стального шлака)	2,00	0,159	0,119	0,098	[79]
Кирпич	1,50	0,114	0,080	0,084	[81]
Глина	1,78	0,138	0,103	0,096	[68]
CF10 (глина + 10% содержание летучей золы)	1,73	0,131	0,102	0,095	
KG50 (необожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита)	2,56	0,170	0,142	0,147	[80]
KG50В (обожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита)	2,50	0,168	0,141	0,143	
PR1 (давление изготовления 7,61 МПа) - Красная глина - Белая глина	1,84 1,75	0,124 0,102	0,067 0,065	0,052 0,060	Данная работа
PR2 (давление изготовления 22,84 МПа) - Красная глина - Белая глина	1,99 1,90	0,132 0,105	0,069 0,067	0,056 0,062	Данная работа
PR3 (давление изготовления 45,70 МПа) - Красная глина - Белая глина	1,97 1,92	0,138 0,107	0,072 0,070	0,060 0,064	Данная работа
PR4 (давление изготовления 68,55 МПа) - Красная глина - Белая глина	2,04 1,88	0,147 0,110	0,077 0,073	0,068 0,065	Данная работа
PR5 (давление изготовления 91,40 МПа) - Красная глина - Белая глина	2,05 1,98	0,159 0,110	0,080 0,076	0,069 0,067	Данная работа
PR6 (давление изготовления 114,22 МПа) - Красная глина - Белая глина	2,09 1,97	0,163 0,116	0,082 0,077	0,072 0,070	Данная работа

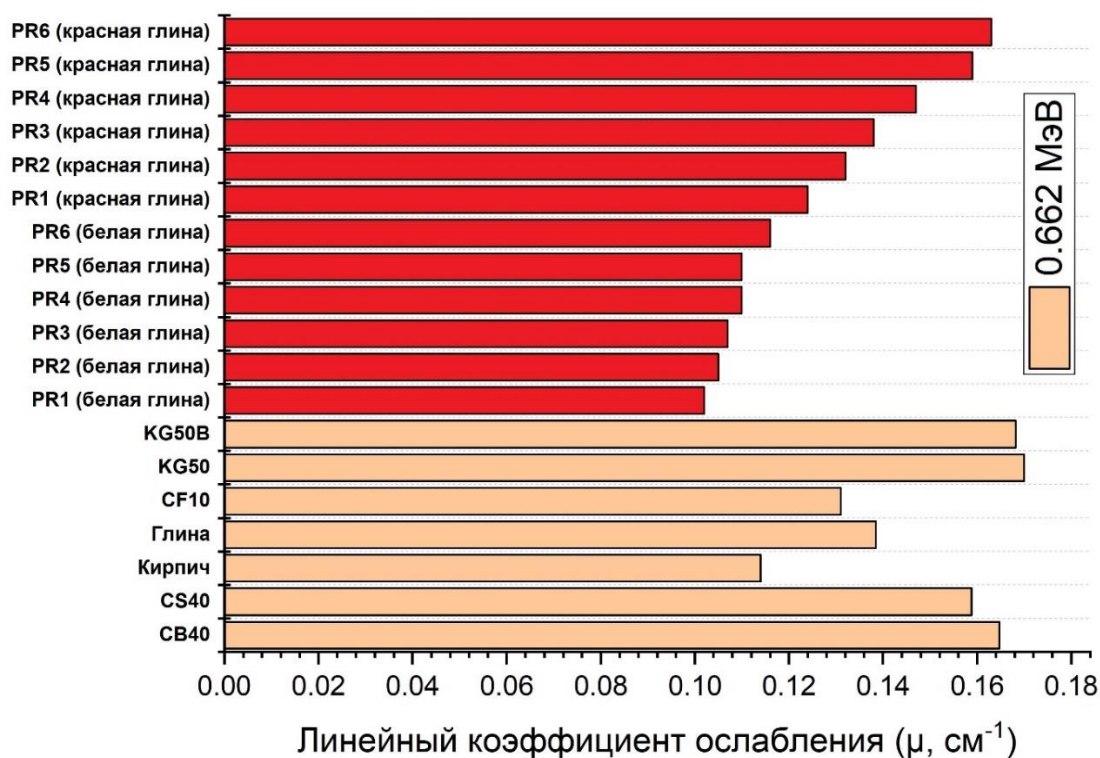


Рисунок 3.24. Сравнение значений μ настоящего исследования со значениями μ некоторых аналогичных материалов в других исследованиях при $E_\gamma = 0,662$ МэВ

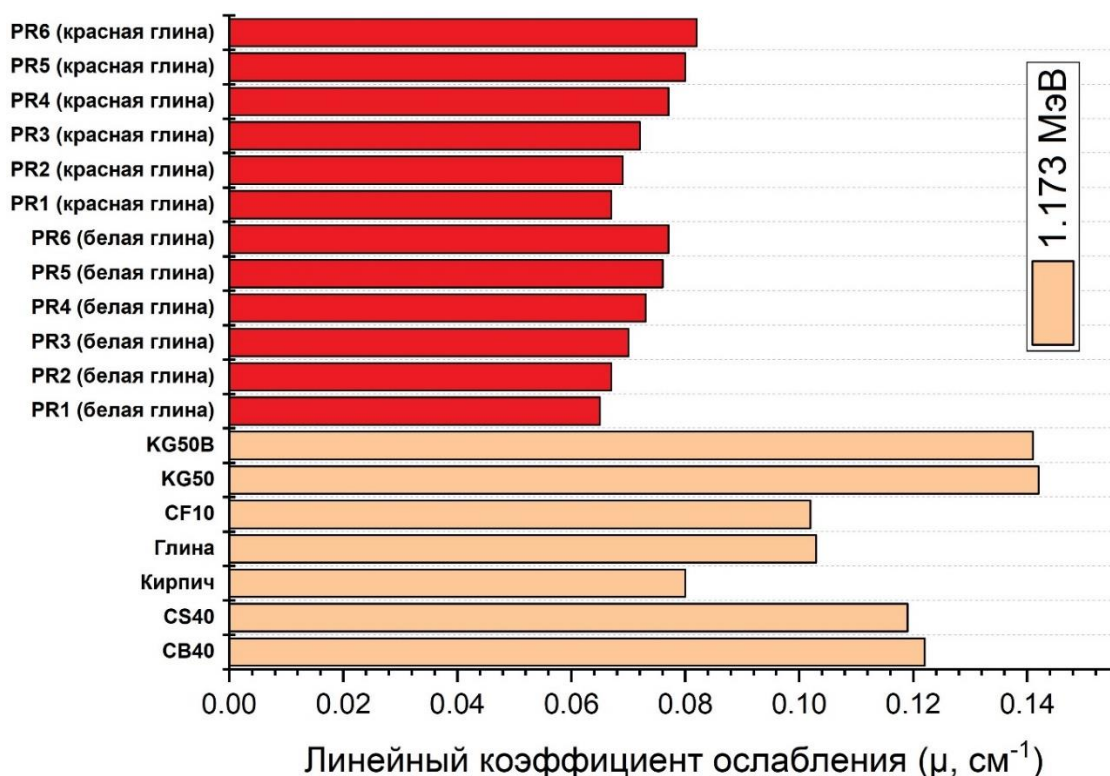


Рисунок 3.25. Сравнение значений μ настоящего исследования со значениями μ некоторых аналогичных материалов в других исследованиях при $E_\gamma = 1,173$ МэВ

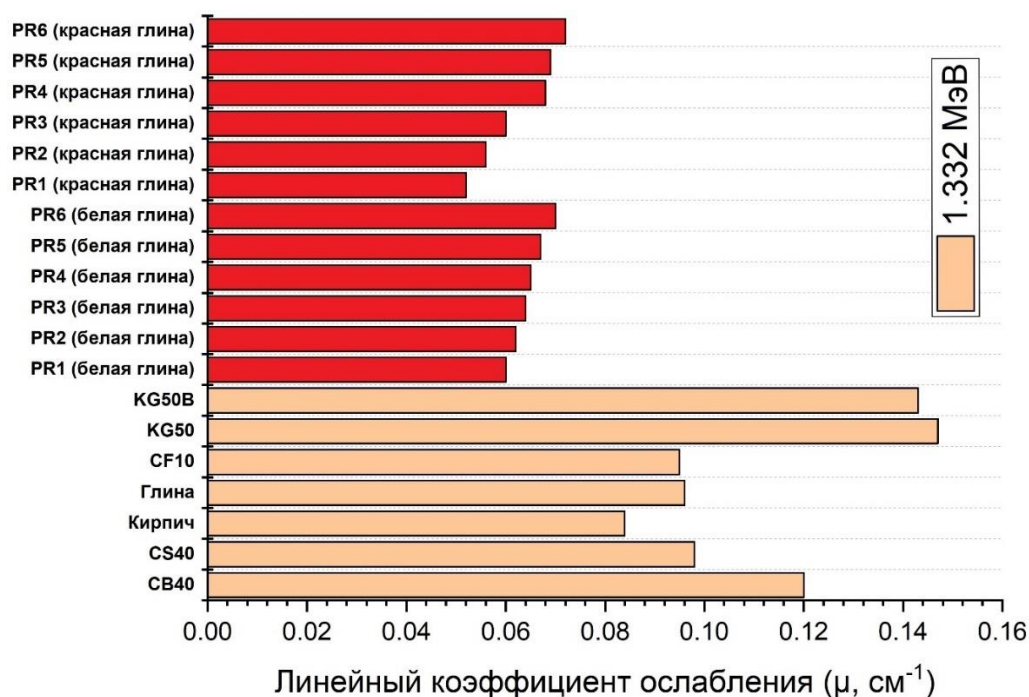


Рисунок 3.26. Сравнение значений μ образцов PR1–PR6 и некоторых аналогичных материалов при $E_{\gamma} = 1,332$ МэВ

3.4 Выводы главы 3

Двенадцать образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама были изготовлены при различных величинах давления для получения нового экранирующего материала от γ -излучения. Образцы изготавливались из смеси предварительно высушенного минерала красной и белой глины и эпоксидной смолы в соотношении 9:1 при давлении от 7,61 до 114,22 МПа. Были получены следующие результаты:

- Для образцов с красным глинистым минералом: При повышении давления, плотность образцов увеличилась на $\approx 13\%$. Увеличение плотности изготовленных образцов влияет на их защитную способность от γ -излучения. При увеличении давления изготовления образцов от 7,61 до 114,22 МПа линейный коэффициент ослабления увеличивается на 31,8; 23,7; 29,5 и 36,4% при E_{γ} 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ, соответственно. Одновременно слой половинного ослабления уменьшается с 5,60 до 4,25 см (на 24%) (при $E_{\gamma} = 0,662$ МэВ), с 10,40 до 8,40 см (на 19%) (при $E_{\gamma} = 1,173$ МэВ), с 11,66 до 9,01 см (на 23%) (при $E_{\gamma} = 1,252$ МэВ) и с 13,21 до 9,68 см (на 27%) (при $E_{\gamma} = 1,332$ МэВ).

Кроме того, для оценки экранирующей способности изготовленных образцов была рассчитана эквивалентная толщина свинца для изготовленных образцов, где при $E_\gamma = 0,662$ МэВ эквивалентная толщина для 1 см чистого свинца составила 10,04; 9,41; 9,02; 8,44; 7,84 и 7,62 см для образцов, изготовленных под давлением 7,61; 22,84; 45,70; 68,55; 91,40 и 114,22 МПа, соответственно. При повышении давления при изготовлении образцов от 7,61 до 114,22 МПа эквивалентная толщина свинца уменьшилась на 24; 19; 23 и 27% при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ, соответственно.

- Для образцов с белым глинистым минералом: Экспериментально были определены пористость и плотность изготовленных образцов РЗМ, при этом значения ρ увеличились на 22,5% с 1,65 до 2,02 г/см³ при повышении давления с 7,61 до 114,22 МПа, соответственно. Пористость образцов РЗМ снизилась с 16,24 до 10,89%. Защитные свойства образцов от γ -излучения были улучшены за счет повышения давления, где значения μ увеличились на 13,8; 17,6; 17,0 и 17,1% при повышении давления от 7,61 до 114,22 МПа соответственно при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ. Исследование также показало незначительное изменение значений μ_m при повышении давления. Значения $\Delta_{0,5}$, Δ_{eq} и TF уменьшаются линейно, в то время как значения RPE увеличиваются с ростом давления. В результате исследования был сделан вывод, что более высокая плотность изготовленных образцов обеспечивает повышенную эффективность экранирования для низких и средних энергий γ -лучей, при толщине 30 см изготовленных образцов РЗМ способна поглотить около 84,9; 85,4; 86,5; 87,4; 88,2 и 89,0% падающих γ -фотонов с энергией 1,252 МэВ.

Следовательно, изготовленные образцы РЗМ из красных и белых глинистых минералов Вьетнама могут являться альтернативным бессвинцовым экранирующим материалом, который может быть использован как при выводе из эксплуатации атомных объектов, так и в любых других радиационно-опасных работах.

ГЛАВА 4 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КРАСНОЙ И БЕЛОЙ ГЛИНЫ ВЬЕТНАМА С НАПОЛНИТЕЛЕМ В ВИДЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

4.1 Общие сведения

Нефтеразведка, выявление и лечение заболеваний, производство электроэнергии, археология, снижение уровня загрязнения окружающей среды – это лишь некоторые направления применения ядерных технологий. Перечисленные области применения оказывают существенное влияние на технический и экономический прогресс государств [82–85]. Различные ионизирующие излучения, используемые в ядерных технологиях, такие как γ -лучи, рентгеновские лучи и нейтроны, могут негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека [86]. В настоящее время ядерные технологии применяются все чаще, поэтому обеспечение защиты людей и окружающей среды от негативных последствий радиации становится ключевым аспектом, играющим важную роль в противодействии отрицательным воздействиям этой технологии [87]. Для обеспечения радиационной безопасности населения и работников используются три основных принципа (обоснование, нормирование и оптимизация радиационной защиты) [88, 89]. Радиационная защита должна гарантировать, что работники, находящиеся на территории зоны контролируемого доступа АЭС, подвергнутся воздействию ниже допустимых уровней радиации в соответствии с отраслевыми нормами и правилами безопасности [90].

Можно построить стационарную конструкцию радиационной защиты, которая одновременно служит несущим элементом здания атомной станции. Она может быть создана в виде постоянной защитной конструкции, выполняющей исключительно роль экрана и не несущей никакой дополнительной нагрузки. В случае проведения радиационно-опасных работ по техническому обслуживанию и выводу из эксплуатации АЭС это может быть и

временная защитная конструкция [91, 92]. Для защиты от γ -излучения предпочтительны радиационно-защитные материалы с наполнителями, имеющими большие атомные номера и плотности. Наилучшей защитой обладают традиционные материалы – свинец и вольфрам. Однако они достаточно дороги. Возможность определения оптимального содержания наполнителя для заданных условий облучения отличает композиционные материалы от мономатериалов. Это позволяет получить наиболее эффективные экранирующие свойства защитного материала при минимально возможной стоимости [93, 94].

Бетон обычно используется для основной части несущих конструкций, в том числе защитных оболочек ядерных реакторных установок, в качестве радиационной защиты, обеспечивающей высокую прочность зданий. Некоторые конструктивные элементы изделий могут быть выполнены из кирпича [95].

По сравнению с большинством других строительных материалов кирпичные стены обладают лучшими изоляционными свойствами, и они также относительно недороги. Кирпичи изготовлены из чистых натуральных материалов, не наносящих вреда окружающей среде, а кирпичные стены обладают прочностью, которая может сохраняться на протяжении многих поколений. Поскольку кирпич обладает исключительной прочностью, он требует минимальных работ по техническому обслуживанию и ремонту. Кирпич в основном изготавливается из природных глинистых минералов, но для повышения физической прочности материала в него могут добавляться некоторые металлы. При этом наряду с прочностью повышаются и радиационно-защитные свойства кирпича [96].

В последнее время появилось много сообщений о применении композитных РЗМ для экранирования нейтронов и γ -излучения. При низких и промежуточных энергиях γ -фотонов от 0,059 МэВ до 1,332 МэВ были исследованы радиационно-защитные свойства образцов с различными летучими золами [97]. Они утверждали, что использование образцов РЗМ,

армированных летучей золой, для воздействия фотонов средней энергии дало успешные результаты, и что летучая зола может быть использована продуктивно. Свойства защиты от рентгеновского излучения РЗМ, содержащих сульфат бария ($BaSO_4$), были исследованы в рентгенодиагностическом диапазоне между 50–120 киловольт-пик¹² и 40 миллиампер-секунд (мАс) [98].

Кроме того, более толстая стенка глинистого минерала галлуазита, а также глиняных образцов оказывает существенное влияние на снижение мощности дозы излучения из хранилищ радиоактивных отходов, для промежуточной энергии γ -излучения [99, 100]. Многие другие исследования показывают более высокие экранирующие свойства кирпича, армированного различными наполнителями, по сравнению с экранирующими свойствами бетона, гипса и т.д. [101, 102].

Защитные кирпичи удобны для использования в строительстве быстровозводимых защитных сооружений. При сооружении временной радиационной защиты важными требованиями являются возможность создания радиационной защиты в различных конфигурациях (например, вокруг радиоактивного оборудования различной геометрической формы) и возможность сооружения защитного экрана вручную (без использования грузоподъемных механизмов) в ограниченном пространстве. При этом ограничивается вес блока (кирпича) для защиты. Ступенчатое соединение используется для предотвращения прострелов излучения через кирпичные швы.

Инновационным аспектом данного исследования является разработка новых образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама, армированных порошкообразными промышленными металлическими отходами различной концентрации для радиационной защиты. В данной работе экспериментально исследовано влияние добавления металлических отходов на структуру, физические свойства и способность к ослаблению γ -излучения образцов РЗМ.

¹² Пик в киловольтах (кВп) – наивысшее мгновенное напряжение на рентгеновской трубке, соответствующее испускаемому рентгеновскому излучению наивысшей энергии.

4.2 Материалы и методы исследования

4.2.1 Изготовление образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама с наполнителем в виде промышленных металлических отходов и их характеристика

Целью настоящего исследования является разработка новой серии РЗМ на основе вьетнамского минерала красной и белой глины Батчанг и металлических отходов. Для достижения поставленной цели минералы красной и белой глины были собраны во вьетнамской деревне Батчанг, входящей в округ Зялам города Ханой (Батчанг – древняя деревня с богатой гончарной традицией). Глинистые минералы были предварительно нагреты до 200°C в электропечи в течение 180 мин для удаления влаги. Затем сухие минералы красной и белой глины измельчались вручную до получения мелкозернистого глиняного порошка. Глинистые минералы и металлические отходы смешивались в определенных концентрациях, а к полученной смеси добавлялась еще 10% эпоксидной смолы (эпоксидная смола + отвердитель), что все в дальнейшем тщательно перемешивалось. Эпоксидная смола и отвердитель были поставлены компанией SlabDoc (Иваново, Россия). После 10-минутного смешивания компонента с помощью вертикального блендера образцы были отформованы в цилиндрической пресс-форме диаметром 4,2 см под давлением 114,22 МПа на гидравлическом прессе (15-тонный пресс SD0821ROSSVIK, Екатеринбург, Россия). Десять изготовленных образцов РЗМ имеют химическую концентрацию (x) промышленных металлических отходов + (90% - x) минерала красной и белой глины (отдельно) + 10% (эпоксидная смола + отвердитель), где $x = 0; 20; 40; 50$ и 70%. Во всех десяти изготовленных образцах РЗМ соотношение эпоксидной смолы и отвердителя составляет 2:1. На рис. 4.1 показано производство образцов РЗМ на основе красной и белой глины и технологическая схема изготовления. Для каждого образца кирпича были изготовлены три образца разной толщины, плотность каждого образца измерялась с помощью цифрового плотномера МН-300А (Гуандун, Китай). Среднее значение плотности для трех толщин каждого образца кирпича

используется для получения чистой плотности каждого образца. Точность измерения плотности составляет $0,001 \text{ г/см}^3$. Измерения плотности проводились в соответствии с принципом Архимеда в уравнении (4.1), где иммерсионная жидкость представляет собой обычную воду с плотностью $\rho_L \approx 1 \text{ г/см}^3$, а значения W_a и W_L представляют собой массу подготовленных образцов на основе красной и белой глины в воздухе и иммерсионной жидкости, соответственно [103].

$$\rho \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right) = \frac{W_a}{(W_a - W_L)} \rho_L \quad (4.1)$$



Рисунок 4.1. Технологическая схема процессов изготовления образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама с добавкой промышленных металлических отходов

Пористость (Φ , %) изготовленных образцов РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама и металлических отходов определялась экспериментально путем измерения объема пор (V_p) и насыпного объема (V_b) внутри изготовленных кирпичях, где соответствующие значения Φ могут быть подтверждены с помощью уравнения (4.2) [104].

$$\Phi (\%) = \frac{V_p}{V_b} \quad (4.2)$$

Автор диссертации также проводил минералогическое исследование изготовленных образцов РЗМ на основе вьетнамской красной и белой глины и оценку их соответствующего фазового состава совместно с научным сотрудником кафедры атомных станций и ВИЭ Махмудом Каремом с помощью рентгеновского дифрактометра «Malvern Panalytical Empyrean». Дифрактограммы были получены с использованием излучения $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) при напряжении и токе трубки 40 кВ и 30 мА, соответственно. Дифрактограммы регистрировались в диапазоне от 5 до 75° (2θ) и сравнивались с существующими дифрактограммами в файлах данных порошковой дифракции (PDF – powder diffraction files).

4.2.2 Экспериментальная оценка характеристик ослабления γ -излучения

Из каждого состава смеси были изготовлены по три образца различной толщины. Для измерения толщины изготовленных образцов РЗМ использовался цифровой штангенциркуль X-PERT (Москва, Россия). Он позволяет измерять образцы толщиной от 0 до 150 мм с точностью $\pm 0,02$ мм.

С помощью NaI (Tl) детектора и источников γ -излучения, включающих Cs-137 и Co-60 (энергии гамма-лучей E_γ составляют 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ), измерялся линейный коэффициент ослабления (μ , см^{-1}) изготовленных образцов. Используемый детектор NaI (Tl) был поставлен компанией Ortec. Детектор поддерживается программным обеспечением Maestro, которое используется для регистрации излучения от источников γ -излучения (Cs-137 и

Co-60). Сначала проводилось измерение без использования изготовленных образцов РЗМ (N_o), затем образцы помещаются между источником и детектором и регистрируется интенсивность источника γ -излучения (N_t), как показано на рис. 4.2. Значение μ для изготовленных образцов РЗМ может быть определено путем построения зависимости между $\ln(N_o / N_t)$ и толщиной образца (x , см), по уравнению Ламберта-Бера (4.3).

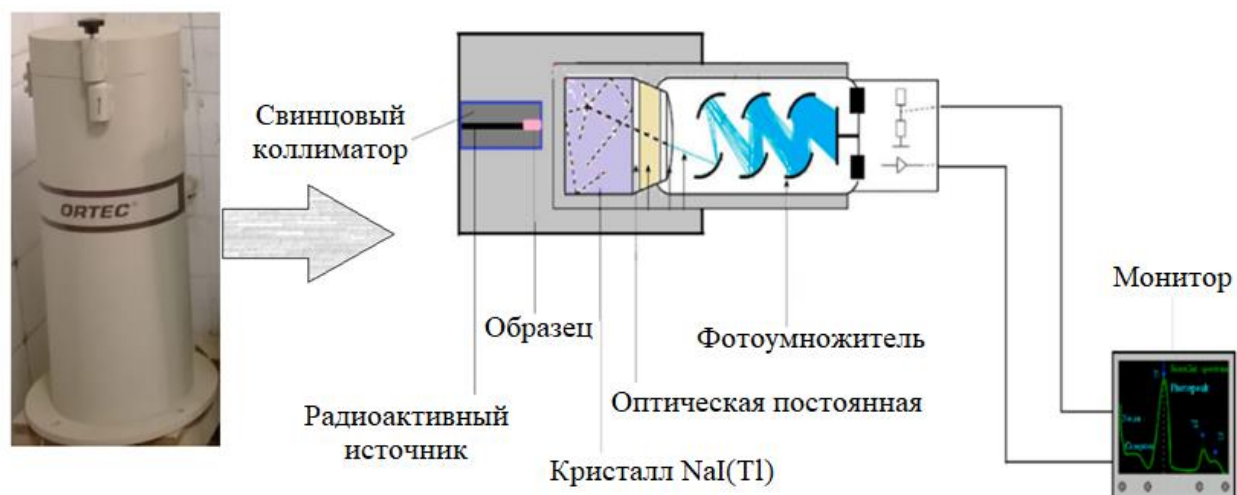


Рисунок 4.2. Экспериментальная установка для измерения γ -излучения с использованием детектора NaI (Tl)

На основе измеренных значений μ и зарегистрированных данных для N_t и N_o были рассчитаны многие другие характеристики радиационной защиты, включая массовый коэффициент ослабления (μ_m , см²/г), слой половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), длину свободного пробега (λ , см), коэффициент пропускания (TF , %), эффективность радиационной защиты (RPE , %) и эквивалентную толщину свинца (Δ_{eq} , см) – толщину изготовленного образца, эквивалентную 1 см чистого свинца, в соответствии с уравнениями (4.4–4.9) [105].

$$\mu \text{ (см}^{-1}\text{)} = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right) \quad (4.3)$$

$$\mu_m \left(\frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right) = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x} \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right) \quad (4.4)$$

$$\Delta_{0.5} (\text{см}) = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (4.5)$$

$$\Delta_{\text{eq}} (\text{см}) = \frac{x (\text{см}) \ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right)_{\text{свинец}}}{\ln \left(\frac{N_o}{N_t} \right)_{\text{кирпич}}} \quad (4.6)$$

$$\lambda (\text{см}) = \frac{1}{\mu} \quad (4.7)$$

$$TF (\%) = \frac{N_t}{N_o} \times 100 \quad (4.8)$$

$$RPE (\%) = \frac{(N_o - N_t)}{N_o} \times 100 \quad (4.9)$$

где $N_a = (N_o - N_t)$ представляет собой количество поглощенных фотонов в пределах толщины изготовленного образца.

4.3 Результаты и обсуждение

4.3.1 Образцы из красного глинистого минерала

Минералогический состав образцов РЗМ на основе красной глины Вьетнама был исследован с помощью метода рентгеновской дифракции (XRD). На рис. 4.3 в качестве примеры представлены подробную дифрактограмму для образца красного кирпича RW20, армированного 20% промышленными металлическими отходами и дифрактограммы для других образцов РЗМ на основе красной глины Вьетнама.

Результаты минералогического анализа показывают, что образцы РЗМ на основе красной глины Вьетнама состоят в основном из иллита и каолинита, и технология обжига и изготовления образцов РЗМ не оказывает существенного влияния на минералогический состав. Иллит, каолинит встречаются в сочетании с кварцем и гематитом в используемой красной глине. Причина появления гематита в исследуемом образце связана с металлическими отходами, добавляемыми в процессе производства этого композиционного материала.

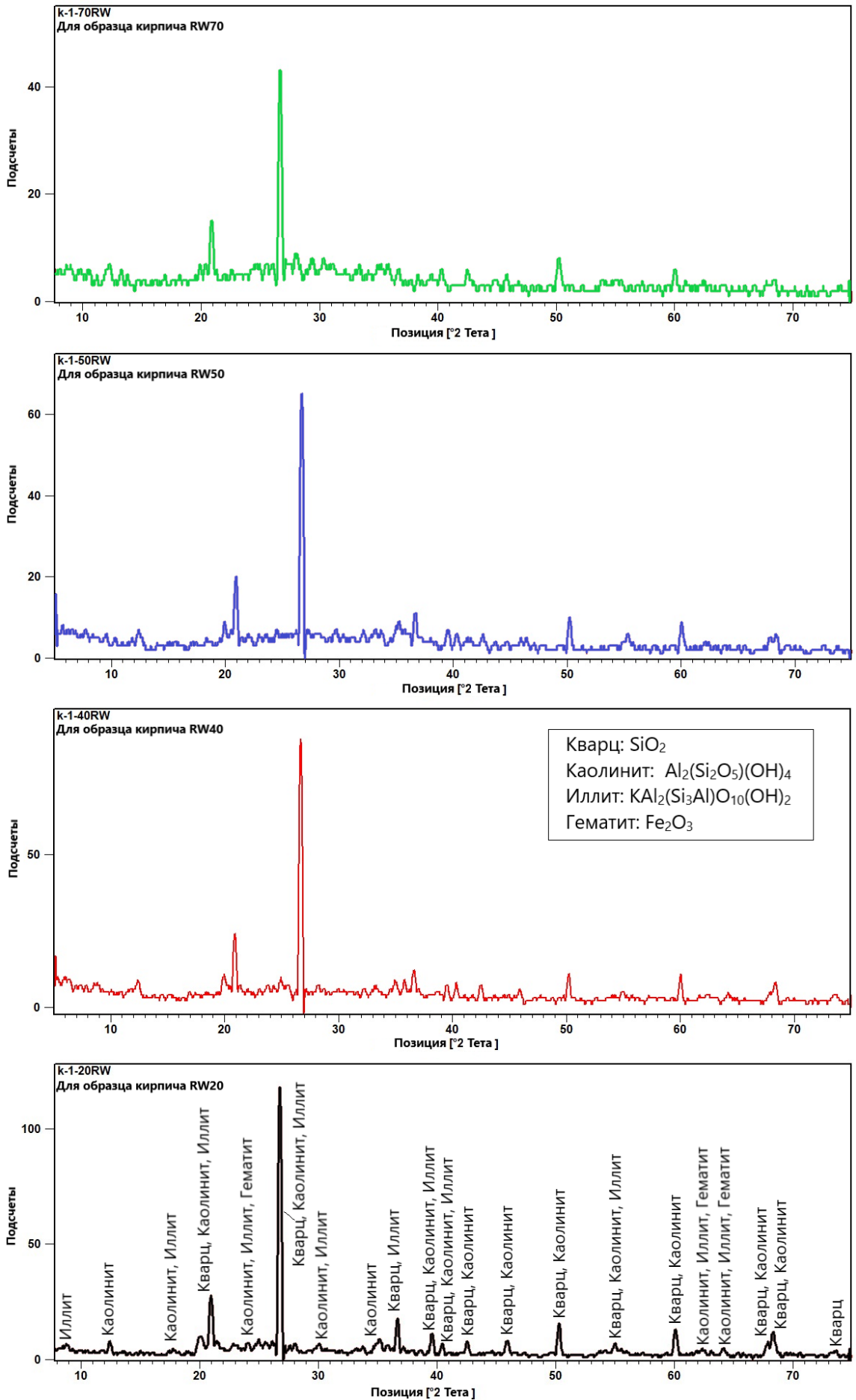


Рисунок 4.3. Дифрактограмма для образцов РЗМ на основе красной глины Вьетнама

Промышленные металлические отходы имеют большую плотность и массу, чем глина того же размера и объема. Имея одинаковое давление при изготовлении образцов РЗМ (144,22 МПа), увеличение концентрации металлических отходов наряду с хорошими адгезионными свойствами частиц, составляющих глину, приведет к увеличению количества электронов и атомов металлических отходов на единицу площади и образованию твердых, прочных и хорошо адгезионных образцов РЗМ. Таким образом, плотность (ρ , г/см³) образцов увеличивалась с повышением концентрации отходов, как показано на рис. 4.4. Увеличение значений ρ образцов приводит к уменьшению расстояния между глиной и частицами промышленных металлических отходов, а также к уменьшению объема пустот в изготовленных образцах, что влияет на значения пористости (Φ , %), где ее значения увеличивались с повышением значений объема пор (V_p) внутри изготовленных образцов. Например, при увеличении концентрации отходов с 0 до 70% плотность образцов повышается с 2,10 до 2,26 г/см³, при этом значения V_p уменьшаются с 1,30 до 0,11 см³, а значения Φ – с 11,66 до 1,00%. Значение Φ достигло наилучшего показателя (1%) в образцах с плотностью 2,26 г/см³, что указывает на хорошую экранирующую способность изготовленного образца от γ -лучей.

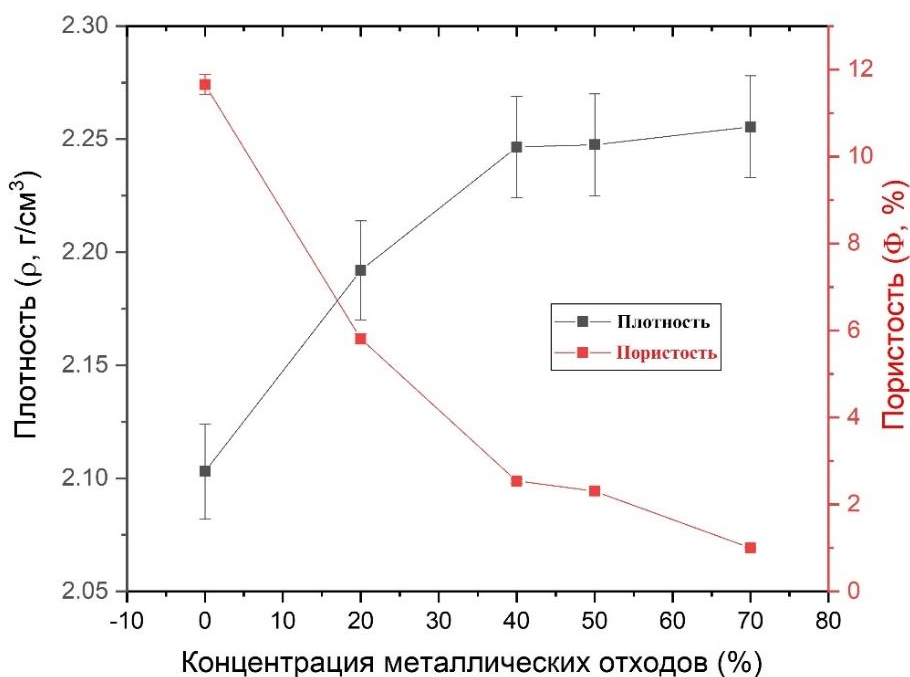


Рисунок 4.4. Изменение плотности (ρ , г/см³) и пористости (Φ , %) изготовленных образцов на основе красной глины в зависимости от концентрации металлических отходов

Пять образцов были изготовлены под давлением 144,22 МПа с обозначениями RW0, RW20, RW40, RW50 и RW70, в которых доля металлических отходов составляет 0; 20; 40; 50 и 70%, соответственно. На рис. 4.5а показано изменение значений линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) при увеличении энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от 0,662 до 1,332 МэВ, причем видно, что значения μ уменьшаются с увеличением E_γ . Дальнейшее увеличение энергии падающего γ -излучения приводит к умеренному уменьшению значений μ вследствие преобладания взаимодействия комптоновского рассеяния в выбранном диапазоне энергий. Причина уменьшения значений массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) объясняется аналогично μ . С увеличением энергии падающих γ -фотонов уменьшается поперечное сечение их взаимодействия с атомами глины и металлических отходов в образцах, что приводит к уменьшению значений μ_m . Значения μ_m уменьшаются на 55,9; 56,7; 57,2; 56,9 и 59,6% при увеличении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ для образцов RW0, RW20, RW40, RW50 и RW70, соответственно, как показано на рис. 4.5b.

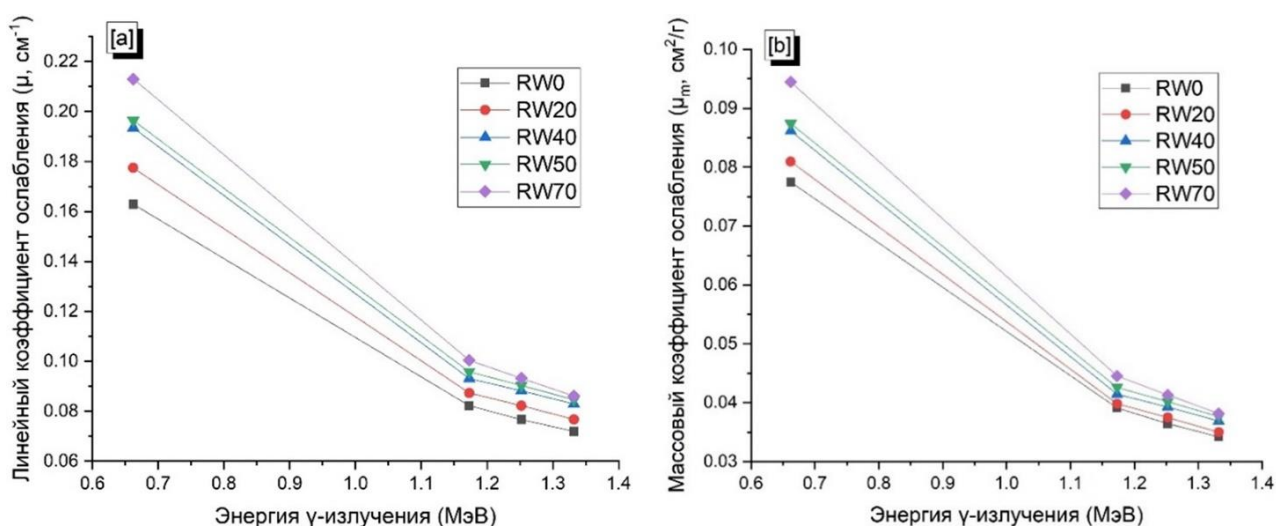


Рисунок 4.5. Зависимость энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от: [а] линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) и [б] массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$)

Поскольку значение слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) обратно пропорционально значениям μ и μ_m изготовленных образцов, значения $\Delta_{0,5}$ также увеличивались с каждым увеличением значений E_γ , как показано на рис.

4.6. Значение $\Delta_{0,5}$ является важной характеристикой для оценки способности материала ослаблять γ -излучение. При повышении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ величина $\Delta_{0,5}$ увеличилась с 4,26 до 9,64 см (для образца RW0), с 3,91 до 9,03 см (для образца RW20), с 3,58 до 8,36 см (для образца RW40), с 3,53 до 8,19 см (для образца RW50) и с 3,25 до 8,05 см (для образца RW70), соответственно. Значение $\Delta_{0,5}$ образца RW70 является наименьшим среди других отобранных образцов, что объясняется наибольшим содержанием металлических отходов в этом образце. С увеличением значений E_γ возрастает переданное число фотонов (N_t) по сравнению с исходным числом фотонов (N_o). Поэтому требуется более плотные толщины кирпича для уменьшения значения N_t до половины значений N_o .

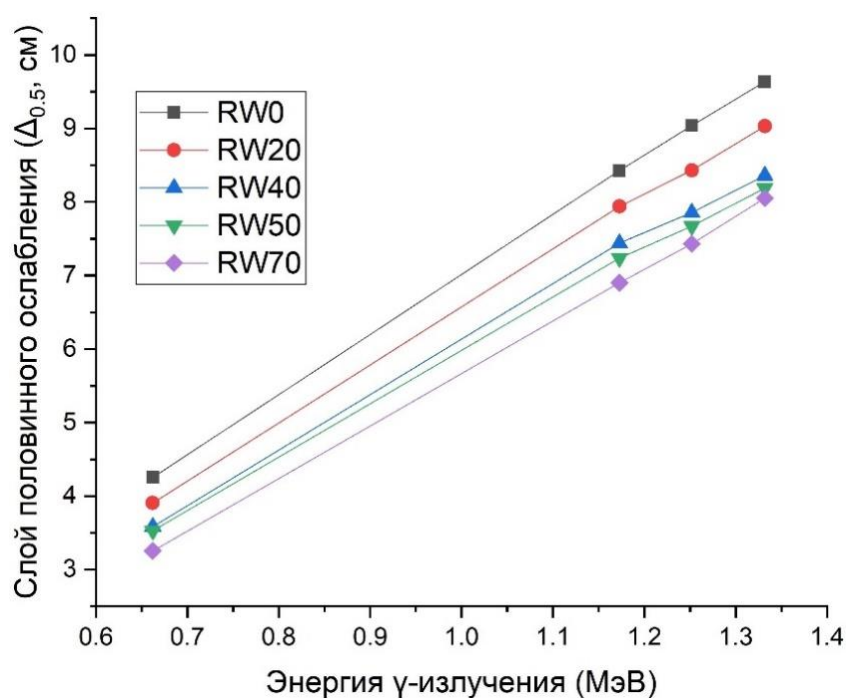


Рисунок 4.6. Зависимость энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см)

Одновременно, увеличение значений N_t приводит к увеличению значений коэффициента пропускания (TF , %), как показано на рис. 4.7а. Величина TF характеризует способность ионизирующего излучения проникать в материалы. При повышении значений E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ при толщине образцов 10 см (для всех образцов) значения TF увеличились с 19,6 до 48,7% (для образца

RW0), с 17,0 до 46,4% (для образца RW20), с 14,4 до 43,7% (для образца RW40), с 14,0 до 42,9% (для образца RW50) и с 11,9 до 42,3% (для образца RW70). Напротив, эффективность радиационной защиты (RPE , %) характеризует способность материала защищать от проникающего воздействия ионизирующего излучения. Значения RPE образцов толщиной 10 см уменьшались с увеличением значений E_γ , как видно из рис. 4.7б. При толщине 10 см изготовленных образцов значения RPE снизились с 80,4 до 51,3% (для образца RW0), с 83,0 до 53,6% (для образца RW20), с 85,6 до 56,4% (для образца RW40), с 86,0 до 57,1% (для образца RW50) и с 88,1 до 57,7% (для образца RW70) при увеличении значений E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Заметно, что между значениями TF и RPE существует обратная зависимость. Если TF увеличивается, то RPE снижается, и наоборот. Эти величины демонстрируют радиационно-защитные характеристики материала, проникающую способность ионизирующего излучения, а также экранирующую способность γ -фотонов радиационно-защитного материала.

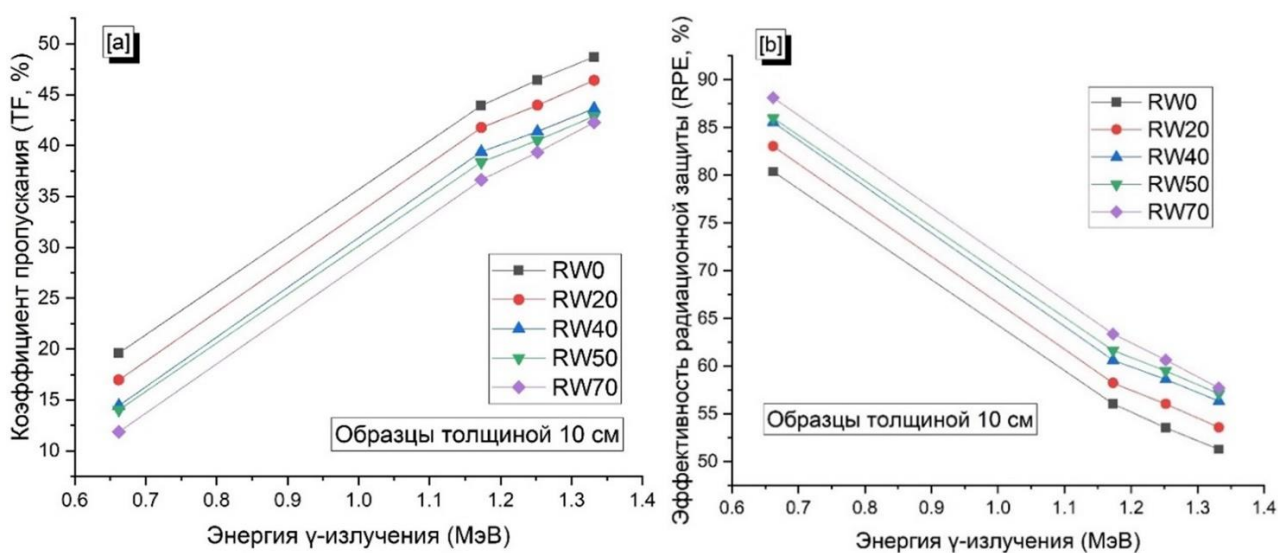


Рисунок 4.7. Зависимость энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от: [a] коэффициента пропускания (TF , %) и [b] эффективности радиационной защиты (RPE , %)

Кроме того, увеличение значений E_γ влияет на толщину изготовленных образцов, эквивалентную 1 см чистого свинца (Δ_{eq} , см), где величины Δ_{eq} увеличиваются экспоненциально с увеличением E_γ . Например, значения Δ_{eq}

увеличились с 7,6 до 8,8 см (для образца RW0), с 7,0 до 8,3 см (для образца RW20), с 6,4 до 7,6 см (для образца RW40), с 6,3 до 7,5 см (для образца RW50) и с 5,8 до 7,4 см (для образца RW70) при повышении E_γ с 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно, как показано на рис. 4.8. Образец RW70 имеет наименьшую эквивалентную толщину по сравнению со свинцом.

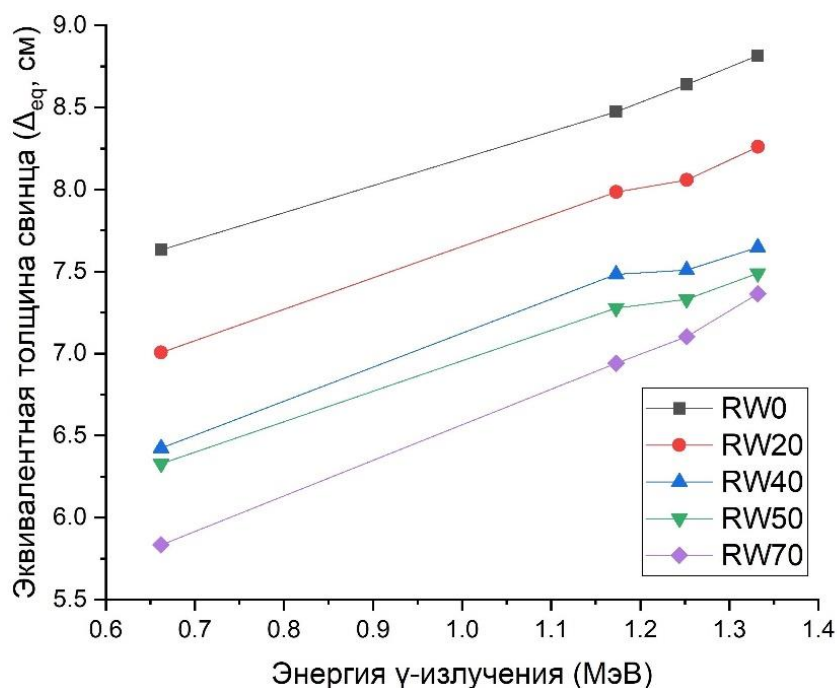


Рисунок 4.8. Зависимость энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см)

Улучшение физических свойств (значений ρ и Φ) изготовленных образцов в зависимости от концентрации отходов образцов (%) влияет на их экранирующие свойства от γ -излучения, как показано на рис. 4.9–4.12. На рис. 4.9а, б представлено изменение экспериментально измеренных значений линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) и массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) в зависимости от концентрации отходов в образцах, где μ и μ_m немного увеличились. Например, при повышении концентрации отходов в образцах от 0 до 70% значение μ увеличилось с 0,163 до 0,213 см^{-1} (для $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 0,082 до 0,100 см^{-1} (для $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 0,077 до 0,093 см^{-1} (для $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 0,072 до 0,086 см^{-1} (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Величина μ_m , рассчитанная на основе значений ρ и μ , незначительно увеличилась от 0,077 до

0,094 см²/г (для E_γ = 0,662 МэВ), от 0,039 до 0,044 см²/г (для E_γ = 1,173 МэВ), от 0,036 до 0,041 см²/г (для E_γ = 1,252 МэВ) и от 0,034 до 0,038 см²/г (для E_γ = 1,332 МэВ) при повышении концентрации отходов образцов от 0 до 70%. Увеличение значений μ_m можно объяснить увеличением поперечного сечения взаимодействия γ-лучей, которое менялось в зависимости от эффективного атомного номера (Z_{eff}) в интервале взаимодействия комптоновского рассеяния. Увеличение концентрации отходов приводит к увеличению плотности изготовленных образцов, что увеличивает количество металлических частиц, а также количество электронов на единицу площади изготовленных образцов РЗМ, и важная роль глины здесь заключается в формировании хорошей адгезионной структуры между металлическими и глинистыми частицами в изготовленных образцах при давлении 114,22 МПа. Далее, с увеличением числа электронов увеличивается электронная плотность и Z_{eff} изготовленных образцов РЗМ, что приводит к увеличению поперечного сечения взаимодействия γ-лучей и увеличению взаимодействия между электронами и γ-фотонами в образцах. Таким образом, значения N_t немного уменьшились по сравнению со значением N_o, и в результате значения μ_m увеличились. При увеличении концентрации отходов в образцах значения плотности и μ_m увеличиваются, в результате чего увеличивается и значение μ.

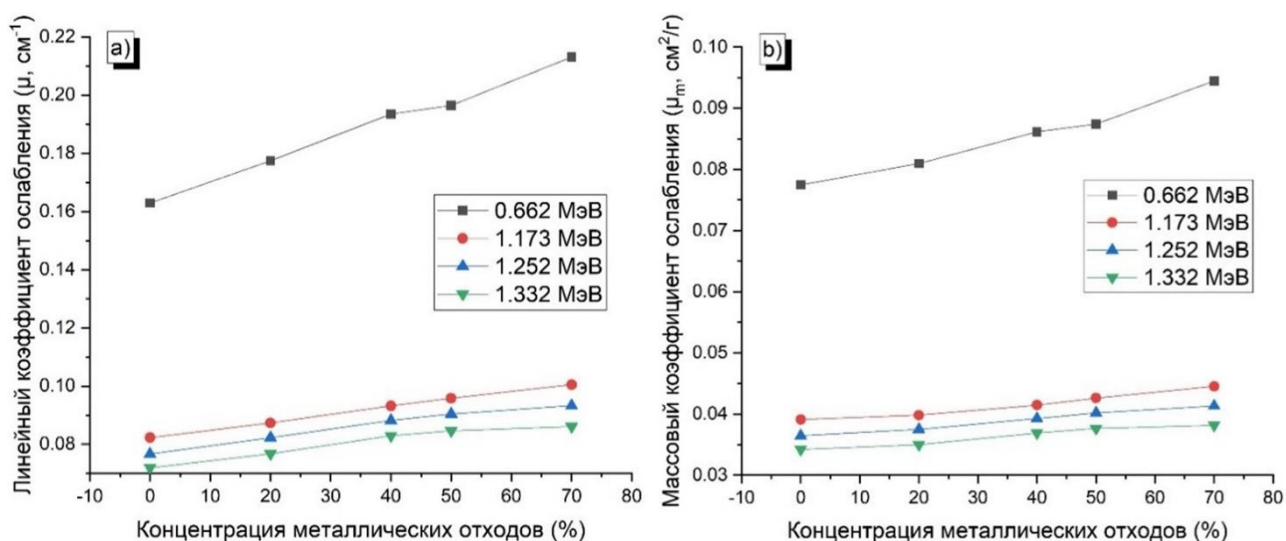


Рисунок 4.9. Зависимость концентрации металлических отходов (%) от: [а] линейного коэффициента ослабления (μ, см⁻¹) и [б] массового коэффициента ослабления (μ_m, см²/г)

С увеличением значений линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) и массового коэффициента ослабления (μ_m , $\text{см}^2/\text{г}$) уменьшаются значения слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), как показано на рис. 4.10. При увеличении значений концентрации отходов в образцах от 0 до 70% величины $\Delta_{0,5}$ снижаются с 4,26 до 3,25 см (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 8,43 до 6,90 см (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 9,04 до 7,43 см (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 9,64 до 8,05 см (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Уменьшение значений $\Delta_{0,5}$ объясняется обратной пропорциональностью значений μ и $\Delta_{0,5}$, где увеличение значений μ сопровождается уменьшением фотонов N_t по сравнению с фотонами N_o . Таким образом, в результате значение $\Delta_{0,5}$ уменьшается.

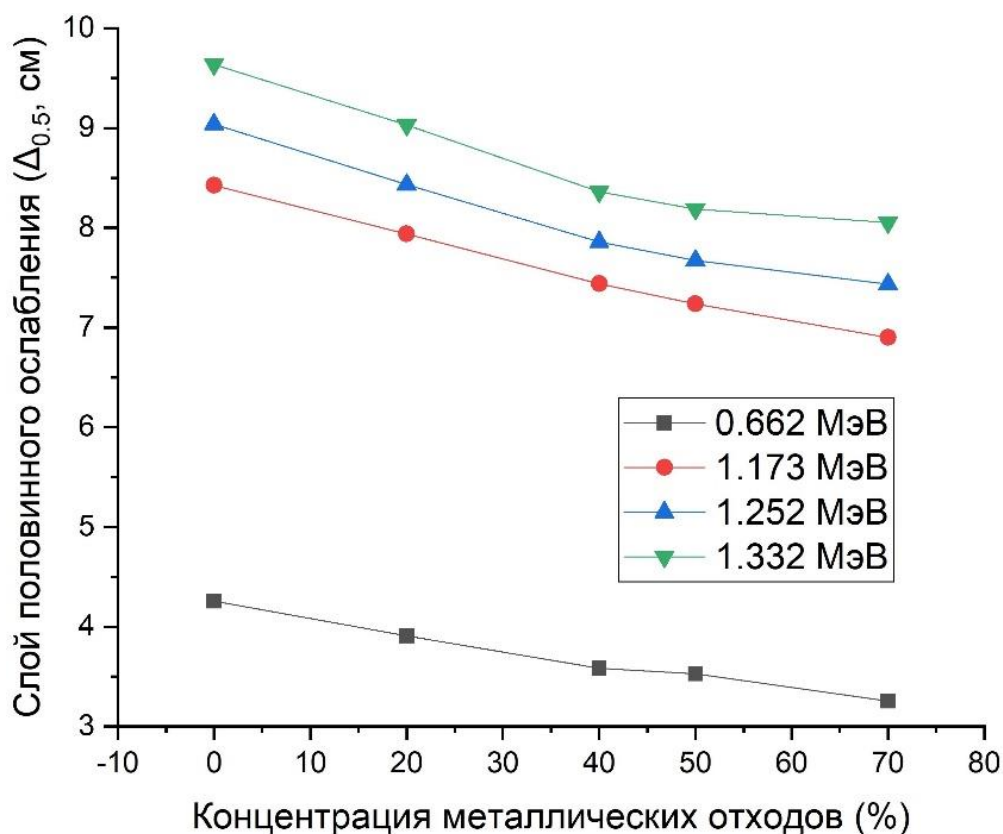


Рисунок 4.10. Зависимость концентрации металлических отходов (%) от слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см)

Уменьшение значений N_t по сравнению с N_o отразилось и на значениях коэффициента пропускания (TF , %) для изготовленных образцов на основе красной глины Вьетнама. На рис. 4.11а показано снижение TF при повышении концентрации отходов в образцах от 0 до 70%, где значения TF для 10 см

толщины изготовленных образцов уменьшились на 39,46; 16,63; 15,28 и 13,22%, соответственно, при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ. Уменьшение значений N_t связано с увеличением фотонов N_a , где $N_a = (N_o - N_t)$. Поэтому количество поглощенной энергии γ -фотонов в пределах 10 см толщины изготовленных образцов РЗМ увеличилось, что связано с увеличением значений эффективности радиационной защиты (RPE , %), как показано на рис. 4.11b. Значения RPE увеличились на 8,78; 11,53; 11,71 и 11,16%, соответственно, при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ.

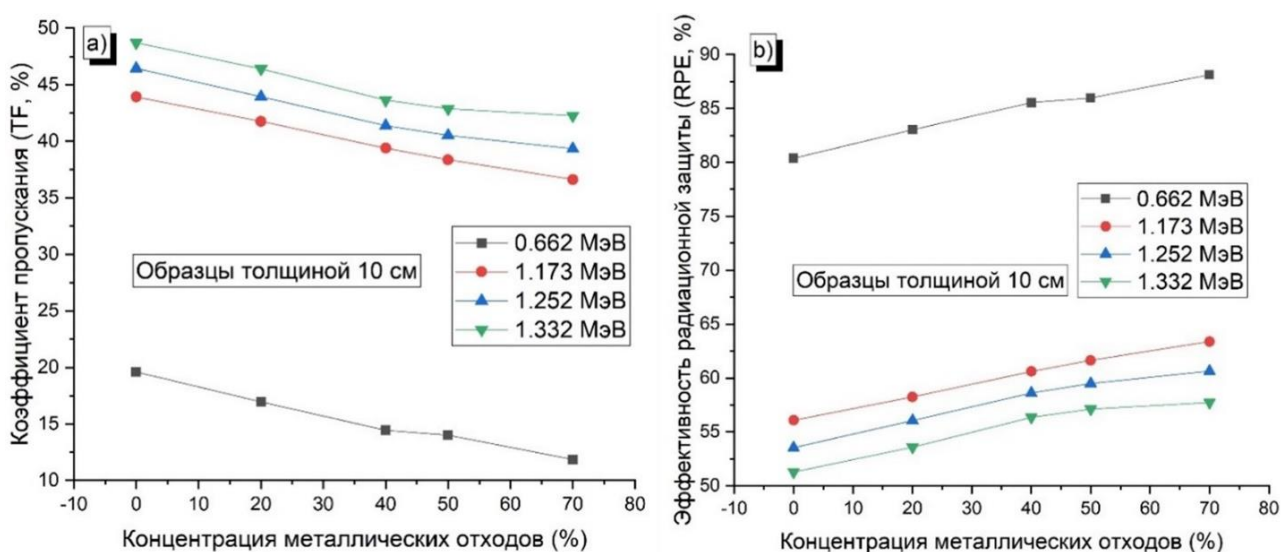


Рисунок 4.11. Зависимость концентрации металлических отходов (%) от: [a] коэффициента пропускания (TF , %) и [b] эффективности радиационной защиты (RPE , %)

Кроме того, на рис. 4.12 показано изменение значений эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см) в зависимости от концентрации образцов, где увеличение концентрации отходов приводит к снижению рассчитанных значений Δ_{eq} на 23,56; 18,11; 17,79 и 16,47% при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ, соответственно. Уменьшение Δ_{eq} объясняется увеличением значений μ изготовленных образцов по сравнению со значениями μ свинца.

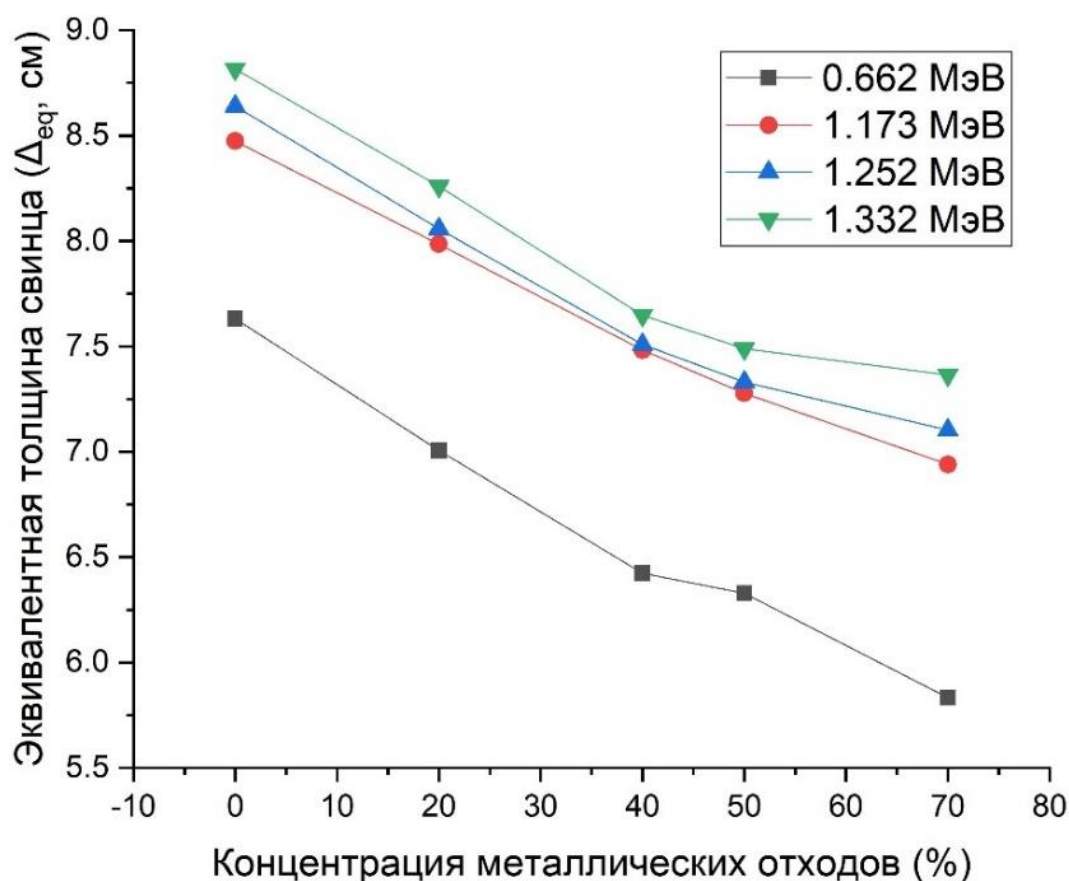


Рисунок 4.12. Зависимость концентрации металлических отходов (%) от эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см)

На рис. 4.13 показано влияние толщины образца на значения коэффициента пропускания (TF , %) и эффективности радиационной защиты (RPE , %), где увеличение толщины образца сопровождалось ослаблением TF , в то время как значение RPE повысилось. Значения TF и RPE были рассчитаны экспериментально. При $E_\gamma = 1,332$ МэВ увеличение толщины образца от 5 до 30 см снижает значения TF с 69,8 до 11,6% (для образца RW0), с 68,1 до 10,0% (для RW20), с 66,1 до 8,3% (для RW40), с 65,5 до 7,9% (для RW50) и с 65,0 до 7,6% (для RW70). Напротив, значение RPE изготовленных образцов повысилось с 30,2 до 88,4% (для образца RW0), с 31,9 до 90,0% (для RW20), с 33,9 до 91,7% (для RW40), с 34,5 до 92,1% (для RW50) и с 35,0 до 92,5% (для RW70). Увеличение толщины образца увеличивает пробег падающих γ -фотонов, что приводит к увеличению вероятности взаимодействия фотонов, электронов глины и металлических отходов. Таким образом, количество γ -энергии, поглощаемой внутри изготовленных образцов, увеличилось, и, как следствие,

значения RPE увеличились. Согласно полученным результатам, изготовленные образцы с большей плотностью проявляют хорошие экранирующие свойства от γ -лучей в выбранном интервале энергии комптоновского рассеяния, причем смешение глины с отходами оказывает большое влияние на экранирующие свойства от γ -лучей благодаря высокой плотности смешанных металлических отходов и хорошей адгезии глины при давлении изготовления образцов 144,22 МПа.

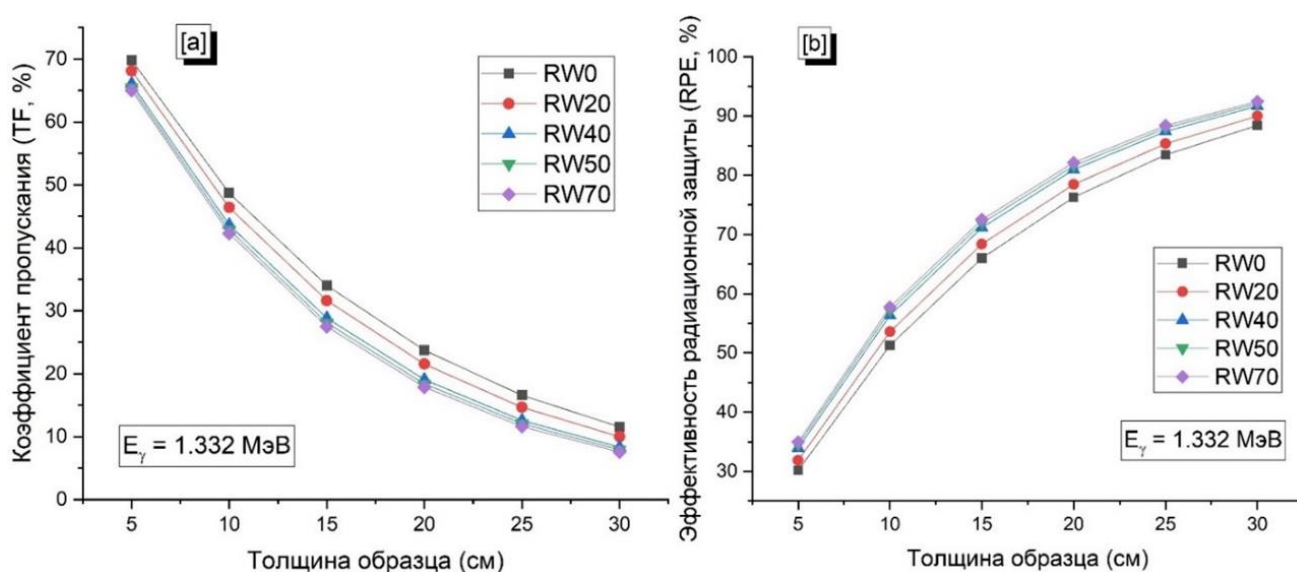


Рисунок 4.13. Влияние толщины образца на: [a] коэффициент пропускания (TF , %) и [b] эффективность радиационной защиты (RPE , %) при $E_\gamma = 1,332$ МэВ

Для валидации и подтверждения радиационной защитной способности изготовленных образцов РЗМ (RW серии), их значения μ при $E_\gamma = 0,662$ МэВ сравнивались со значениями μ для некоторых других образцов РЗМ, о которых ранее сообщалось в литературе [76, 79–81], как показано на рис. 4.14. Значения μ для изготовленных образцов в данной работе составляют 0,163; 0,177; 0,193; 0,196 и 0,213 см^{-1} для образцов RW0, RW20, RW40, RW50 и RW70, соответственно. В настоящей работе изготовленные образцы RW40, RW50 и RW70 имеют самые высокие значения μ при сравнении, в то время как образцы RW0 и RW20 имеют значения μ , близкие к СВ40 (композит из глины и 40% баритового порошка, $\mu = 0,165$ см^{-1}), КГ20 (необожженный кирпич 80% каолина, 20% гранита, $\mu = 0,158$ см^{-1}), КГ30 (необожженный кирпич 70%

каолина, 30% гранита, $\mu = 0,163 \text{ см}^{-1}$), KG40 (необожженный кирпич 60% каолина, 40% гранита, $\mu = 0,167 \text{ см}^{-1}$), KG50 (необожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита, $\mu = 0,170 \text{ см}^{-1}$), KG30В (обожженный кирпич 70% каолина, 30% гранита, $\mu = 0,162 \text{ см}^{-1}$), KG40В (обожженный кирпич 60% каолина, 40% гранита, $\mu = 0,166 \text{ см}^{-1}$), KG50В (обожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита, $\mu = 0,168 \text{ см}^{-1}$).

С другой стороны, все образцы, использованные в данном исследовании, имеют значения μ , превышающие приведенные в литературе для образцов CS40 (композит глины и 40% стального шлака, $\mu = 0,159 \text{ см}^{-1}$), «Кирпич» ($\mu = 0,114 \text{ см}^{-1}$), «Глина» ($\mu = 0,138 \text{ см}^{-1}$), CF10 (глина + 10% содержания летучей золы, $\mu = 0,131 \text{ см}^{-1}$), CF20 (глина + 20% летучей золы, $\mu = 0,127 \text{ см}^{-1}$), CF30 (глина + 30% летучей золы, $\mu = 0,125 \text{ см}^{-1}$), CF40 (глина + 40% летучей золы, $\mu = 0,121 \text{ см}^{-1}$), CF50 (глина + 50% летучей золы, $\mu = 0,117 \text{ см}^{-1}$), KG00 (необожженный кирпич 100% каолина, $\mu = 0,146 \text{ см}^{-1}$), KG10 (необожженный кирпич 90% каолина, 10% гранита, $\mu = 0,152 \text{ см}^{-1}$), KG20 (необожженный кирпич 80% каолина, 20% гранита, $\mu = 0,158 \text{ см}^{-1}$), KG00В (обожженный кирпич 100% каолина, $\mu = 0,146 \text{ см}^{-1}$), KG10В (обожженный кирпич 90% каолина, 10% гранита, $\mu = 0,152 \text{ см}^{-1}$), KG20В (обожженный кирпич 80% каолина, 20% гранита, $\mu = 0,158 \text{ см}^{-1}$). Сравнение показывает высокую защитную способность изготовленных образцов РЗМ (RW серии) по сравнению с другими образцами, описанными в литературе. При $E_\gamma = 0,662 \text{ МэВ}$, образец RW70 (красная глина + 70% металлических отходов) имеет значения μ на 20% выше по сравнению с значением μ для образца KG50 [80], и на 46% выше по сравнению с значением μ для образца «Кирпич» [81].

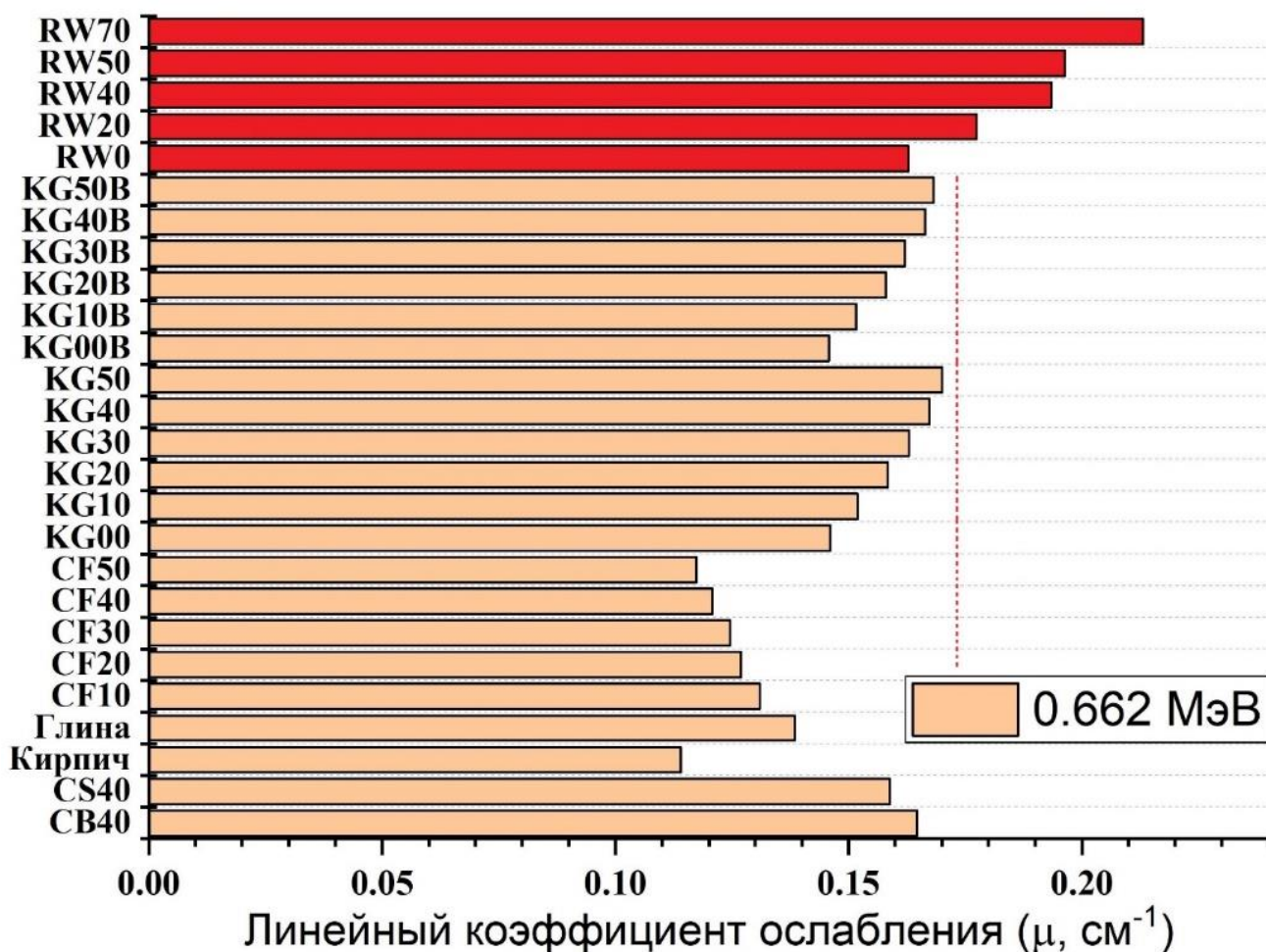


Рисунок 4.14. Сравнение линейного коэффициента ослабления изготовленных образцов на основе красной глины Вьетнама и линейного коэффициента ослабления некоторых других образцов, описанных в литературе

4.3.2 Образцы из белого глинистого минерала

Минералогический состав образцов РЗМ на основе белой глины Вьетнама также был исследован с помощью метода рентгеновской дифракции (XRD). На рис. 4.15 в качестве примеры представлены подробную дифрактограмму для образца белого кирпича RW70, армированного 70% промышленными металлическими отходами и дифрактограммы для других образцов РЗМ на основе белой глины Вьетнама.

Результаты минералогического анализа показывают, что образцы РЗМ на основе белой глины Вьетнама состоят в основном из иллита, каолинита и альбита, и технология обжига и изготовления образцов РЗМ не оказывает существенного влияния на минералогический состав. Иллит, каолинит и альбит встречаются в сочетании с кварцем в используемой белой глине.

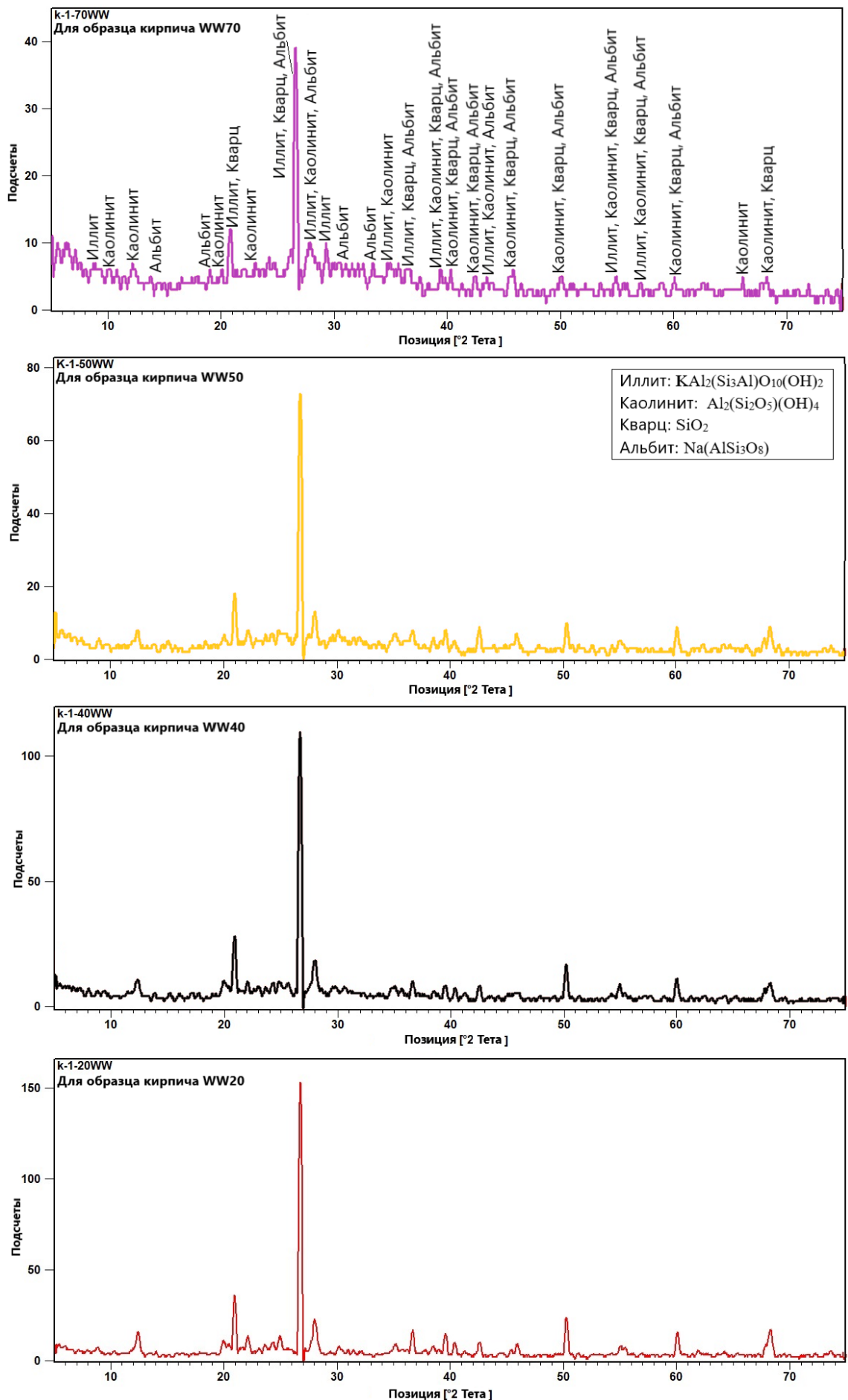


Рисунок 4.15. Дифрактограмма для образцов РЗМ на основе белой глины Вьетнама

Вьетнамская порошкообразная белая глина Батчанг обладает хорошими адгезионными свойствами, гибкостью и меньшей впитываемостью в сочетании с мелкими, твердыми частицами, составляющими металлических отходов, которые имеют большую плотность и объем, чем у глины (при одинаковом объеме и размере). При их смешивании и сжатии под приложенным при изготовлении давлением 114,22 МПа образуются образцы кирпича, сочетающие в себе глину и металлические отходы, обладающие хорошей твердостью, прочностью, высокой плотностью, хорошей адгезией и очень низким водопоглощением. Поэтому при увеличении концентрации промышленных металлических отходов в изготовленных образцах РЗМ по сравнению с концентрацией в них белой глины плотность изготовленных образцов увеличится, как показано на рис. 4.16. Одновременно с увеличением плотности изготовленных образцов будет уменьшаться расстояние между составляющими частицами глины и металлических отходов, что приведет к уменьшению значений объема пор (V_p) и снижению значений пористости (Φ , %) изготовленных образцов. Изменение концентрации металлических отходов влияет на значения V_p изготовленных образцов, при этом увеличение концентрации отходов от 0 до 70% приводит к уменьшению объема пор изготовленных образцов РЗМ. Снижение значений V_p изготовленных образцов прямо пропорционально их значениям Φ , где при повышении концентрации отходов от 0 до 70% значения Φ уменьшались от 11,66 до 0,73%, соответственно. Кроме того, значения ρ изготовленных образцов обратно пропорциональны значениям V_p внутри образцов РЗМ. Поэтому значения ρ в образцах РЗМ повышаются с 2,02 до 2,34 г/см³ при увеличении концентрации отходов с 0 до 70% соответственно. Значение Φ достигло выдающегося результата 0,73% в образце с плотностью 2,34 г/см³. Этот результат превзошел ожидания авторов и продемонстрировал превосходную экранирующую способность от γ -излучения изготовленного образца кирпича.

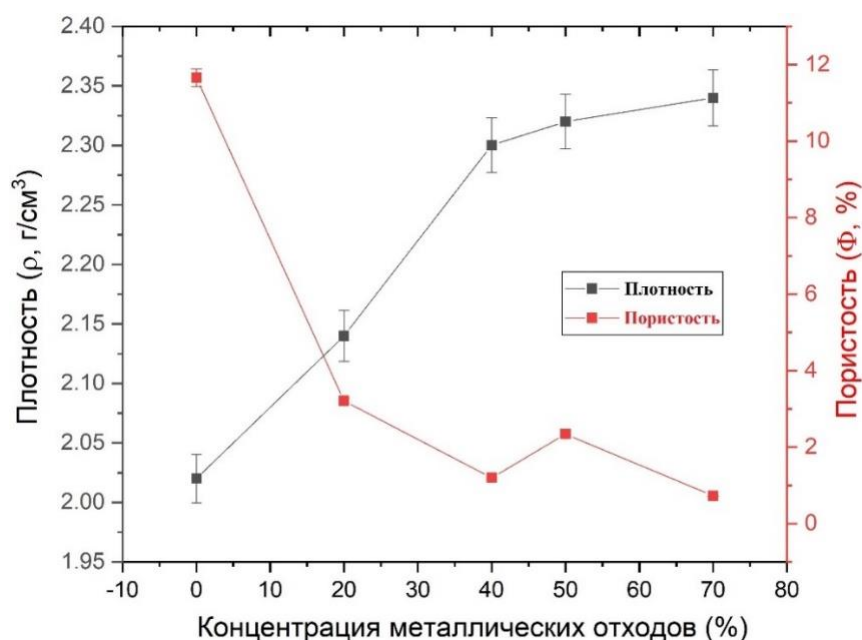


Рисунок 4.16. Влияние плотности изготовленных образцов РЗМ (ρ , г/см³) и пористости (Φ , %) на концентрацию промышленных металлических отходов (%)

WW0, WW20, WW40, WW50 и WW70 – обозначения образцов РЗМ, изготовленных под давлением 114,22 МПа, при этом концентрация промышленных металлических отходов в каждом образце составляет 0; 20; 40; 50 и 70%, соответственно. Экспериментально исследованы значения линейного коэффициента ослабления (μ , см⁻¹) для изготовленных образцов в зависимости от активности источника γ -излучения до и после использования изготовленных образцов с увеличением энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от 0,662 до 1,332 МэВ, как показано на рис. 4.17. Легко видеть, что значения μ уменьшаются с увеличением E_γ . Увеличение значений E_γ падающего γ -излучения при взаимодействии комптоновского рассеяния приводит к уменьшению значений μ из-за обратной пропорциональности поперечного сечения комптоновского рассеяния с E_γ и преобладания взаимодействия комптоновского рассеяния в выбранном диапазоне E_γ . При увеличении значений E_γ падающих γ -фотонов, поперечное сечение взаимодействия γ -фотонов с частицами глины и промышленных металлических отходов в изготовленных образцах уменьшается, что приводит к уменьшению значений μ . Значения μ уменьшаются на 39,2; 40,1; 39,9; 41,2 и 44,6% при увеличении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ для образцов WW0, WW20, WW40, WW50 и WW70, соответственно.

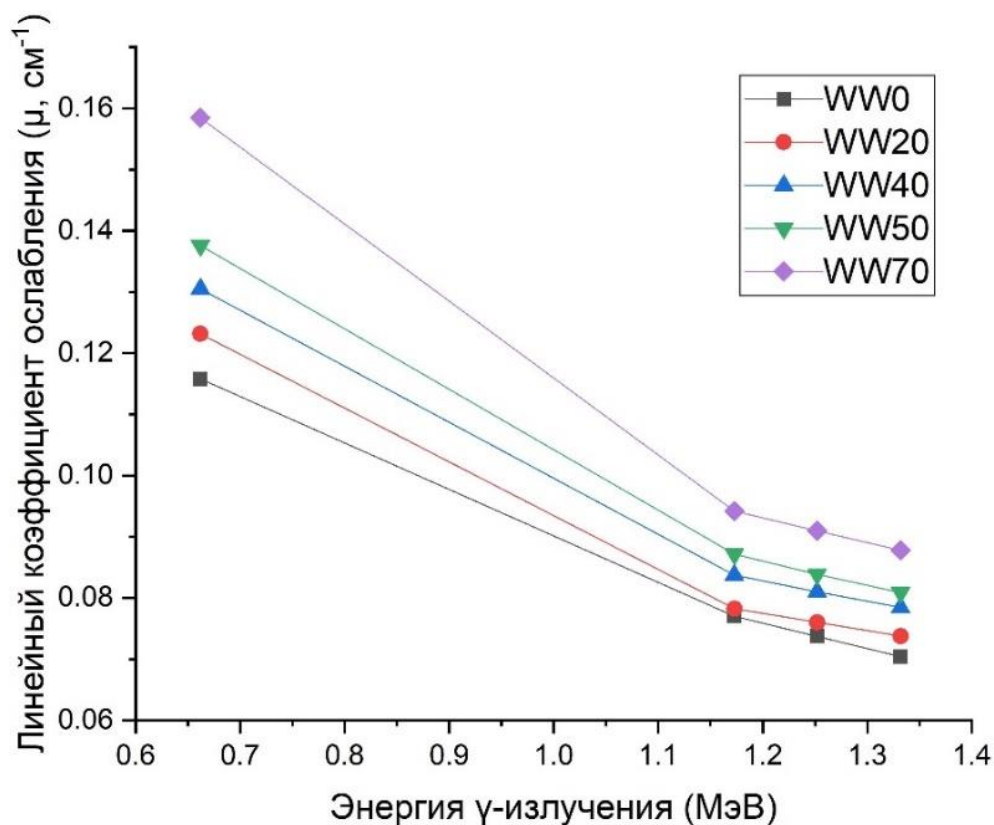


Рисунок 4.17. Изменение энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1})

Значение слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) обратно пропорционально значениям μ , поэтому величины $\Delta_{0,5}$ показали умеренное увеличение за счет эффекта взаимодействия комптоновского рассеяния с каждым увеличением значений E_γ , как показано на рис. 4.18. Величина $\Delta_{0,5}$ – это толщина образцов, при которой плотность фотонов уменьшается до половины от их падающего значения. С увеличением значения E_γ увеличивается число фотонов (N_t), проходящее через изготовленные образцы по сравнению с исходным числом фотонов (N_o). Поэтому для уменьшения значения N_t до половины значения N_o требуется более плотные образцы РЗМ. Величина $\Delta_{0,5}$ увеличилась с 5,99 до 9,84 см (для образца WW0), с 5,63 до 9,40 см (для WW20), с 5,31 до 8,84 см (для WW40), с 5,04 до 8,57 см (для WW50) и с 4,37 до 7,90 см (для WW70) при увеличении E_γ с 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Величина $\Delta_{0,5}$ образца WW70 достигла наименьшего значения (4,37 см) при $E_\gamma = 0,662$ МэВ, что объясняется высокой концентрацией металлических отходов в этом образце.

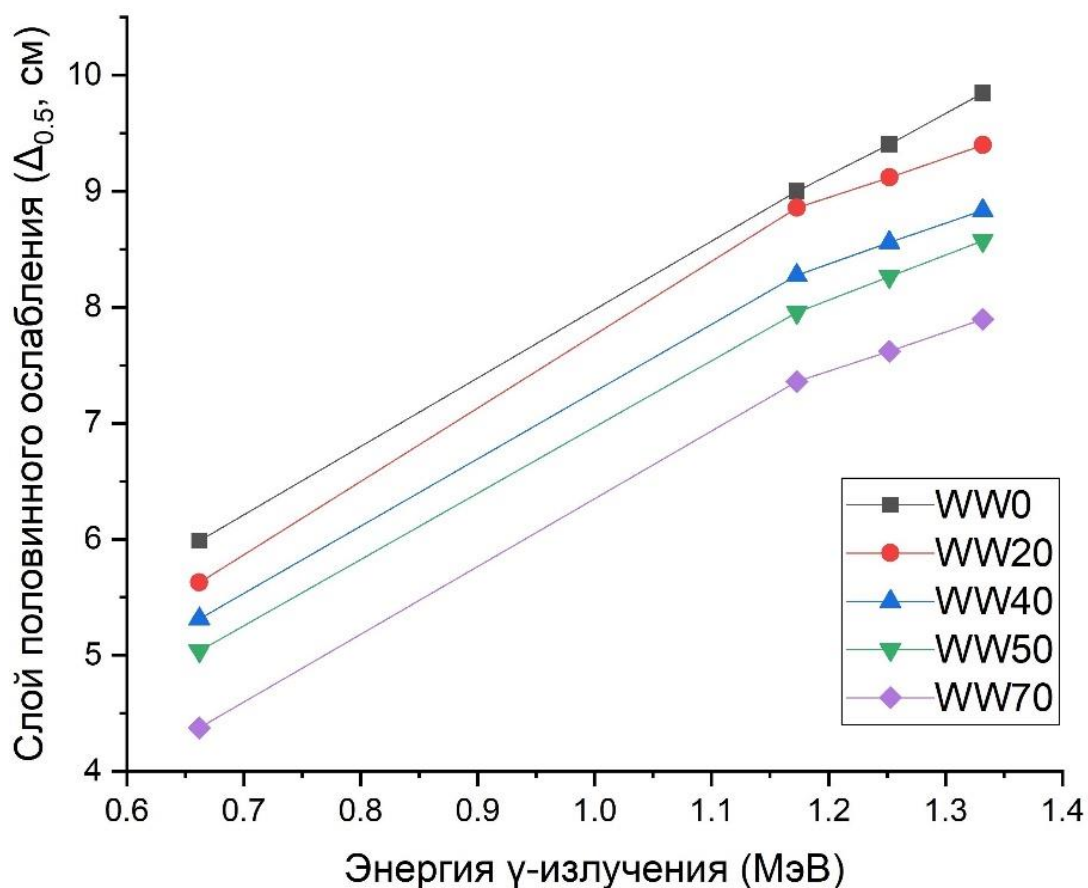


Рисунок 4.18. Изменение энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см)

Длина свободного пробега (λ , см) – еще одна характеристика, используемая для определения скорости реакции γ -фотона. Величина λ – это среднее расстояние, которое пролетает частица (например, γ -фотон) за время между двумя последовательными столкновениями. Причина повышения значений λ объясняется аналогично значениям слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см). Зависимость между значением λ образцов РЗМ и энергией γ -фотона показана на рис. 4.19. Величины λ увеличились с 8,64 до 14,20 см (для образца WW0), с 8,12 до 13,56 см (для образца WW20), с 7,67 до 12,75 см (для образца WW40), с 7,27 до 12,37 см (для образца WW50) и с 6,31 до 11,39 см (для образца WW70) при увеличении E_γ с 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно.

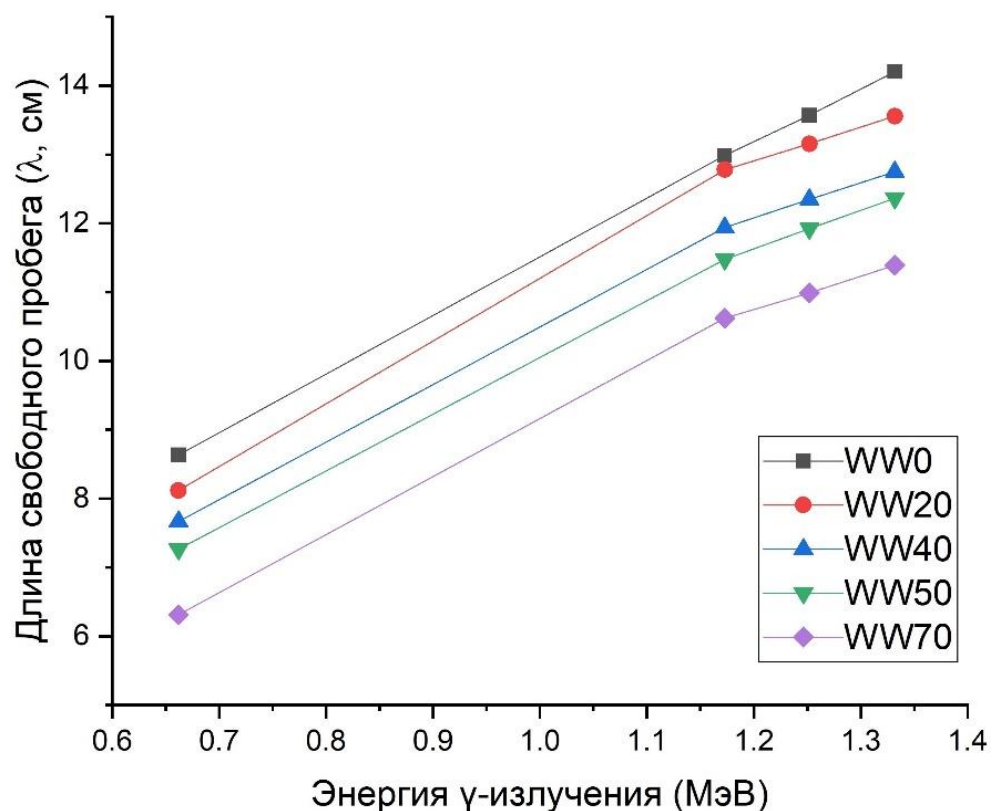


Рисунок 4.19. Изменение энергии γ -излучения от длины свободного пробега (λ , см)

Увеличение значений N_t приводит к увеличению величины коэффициента пропускания (TF , %). Чем выше энергия, тем выше проникающая способность γ -фотонов, и наоборот, что объясняет увеличение значения TF , как показано на рис. 4.20а. При толщине 5 см изготовленных образцов значения TF увеличились с 56,0 до 70,3% (для образца WW0), с 54,0 до 69,2% (для образца WW20), с 52,1 до 67,6% (для образца WW40), с 50,3 до 66,7% (для образца WW50) и с 45,3 до 64,5% (для образца WW70) при увеличении E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Напротив, чем выше энергия, тем меньше эффективность защиты от проникновения γ -фотонов и наоборот, что объясняет снижение значений эффективности радиационной защиты (RPE , %). Значения RPE изготовленных образцов толщиной 5 см уменьшались с увеличением значений E_γ , как показано на рис. 4.20б. Значения RPE снизились с 44,0 до 29,7 % (для образца WW0), с 46,0 до 30,8% (для образца WW20), с 48,0 до 32,4% (для образца WW40), с 49,7 до 33,3% (для образца WW50) и с 54,7 до 35,5% (для образца WW70) при увеличении значений E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно.

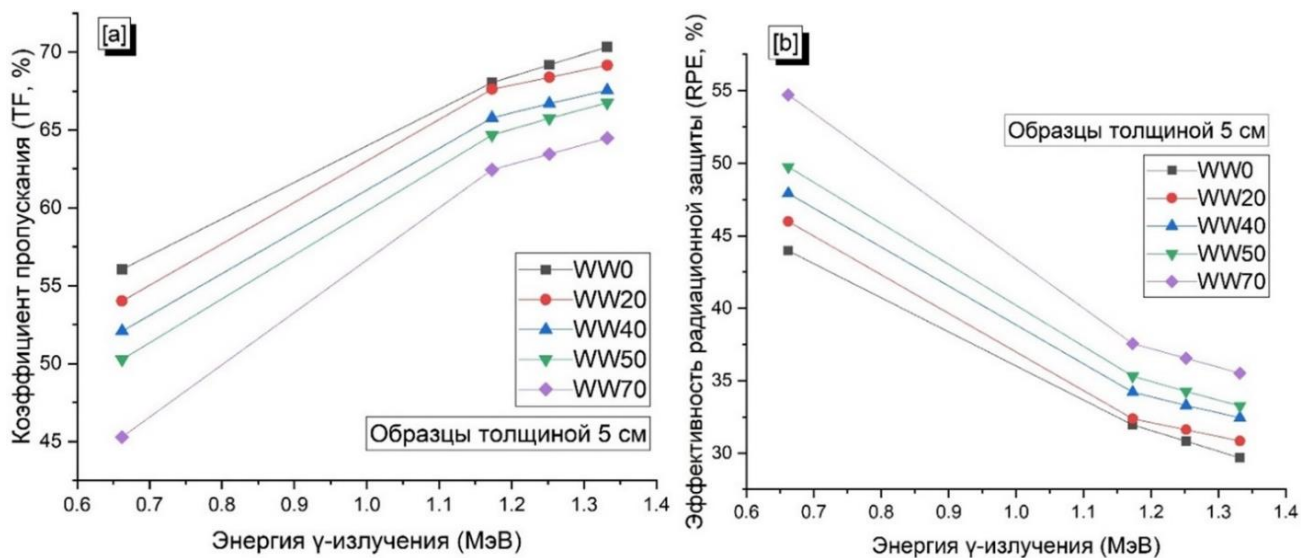


Рисунок 4.20. Изменение энергии γ -излучения (E_γ , МэВ) от: [а] коэффициента пропускания (TF , %) и [б] эффективности радиационной защиты (RPE , %)

Увеличение значений E_γ также влияет на толщину изготовленных образцов РЗМ, эквивалентную 1 см чистого свинца (Δ_{eq} , см), где величины Δ_{eq} несколько уменьшаются с увеличением E_γ . Например, величины Δ_{eq} уменьшились с 10,7 до 9,0 см (для образца WW0), с 10,1 до 8,6 см (для WW20), с 9,5 до 8,1 см (для WW40), с 9,0 до 7,8 см (для WW50) и с 7,8 до 7,2 см (для WW70) при увеличении значений E_γ от 0,662 до 1,332 МэВ, соответственно. Снижение Δ_{eq} объясняется снижением значений μ как для свинца, так и для изготовленных образцов. Видно, что образец WW70 достиг наилучшего результата при наименьшей эквивалентной толщине по сравнению со свинцом (7,2 см) (рис. 4.21).

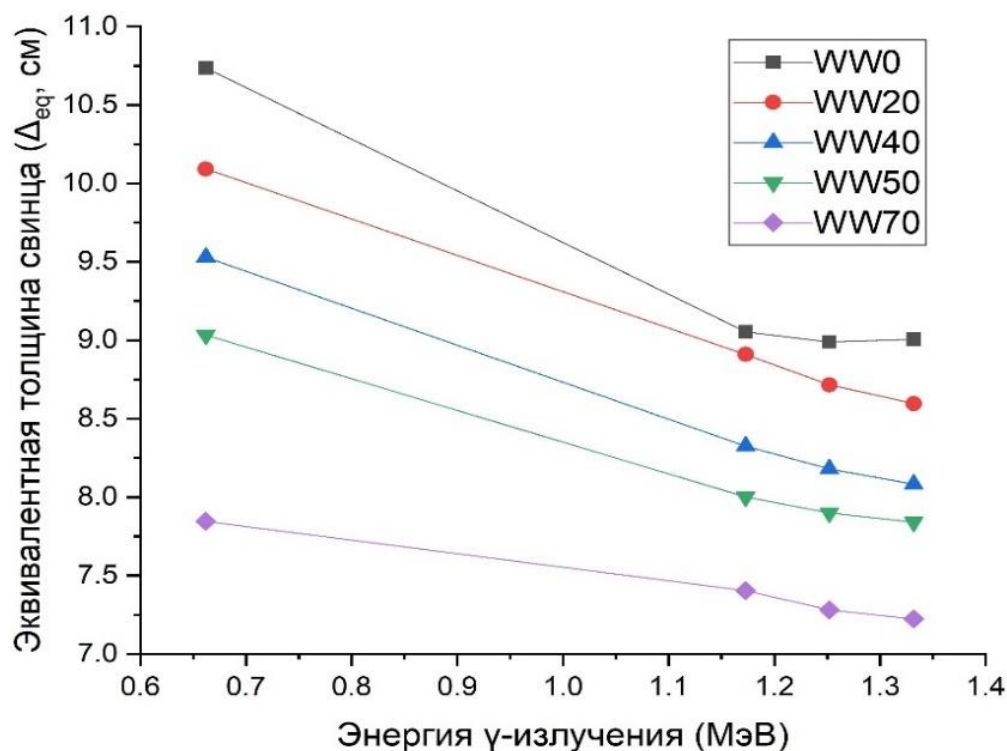


Рисунок 4.21. Изменение энергии γ -излучения от эквивалентной толщины свинца

Концентрация промышленных металлических отходов (%) влияет на γ -экранирующие свойства изготовленных образцов, как показано на рис. 4.22–4.25, где повышение значений концентрации отходов связано с увеличением значений линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) и эффективности радиационной защиты (RPE , %), в то время как это связано с уменьшением значений слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см), длины свободного пробега (λ , см), эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см) и коэффициента пропускания (TF , %). На рис. 4.22 показана зависимость экспериментально измеренных значений μ от концентрации отходов образцов РЗМ, где μ несколько повысились. Величина μ повышалась с 0,116 до 0,158 см^{-1} (для $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 0,077 до 0,094 см^{-1} (для $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 0,074 до 0,091 см^{-1} (для $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 0,070 до 0,088 см^{-1} (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ) при увеличении концентрации отходов образцов РЗМ от 0 до 70%, соответственно. Улучшение физических свойств изготовленных образцов РЗМ (значения Φ и ρ) в зависимости от концентрации отходов в образцах влияет на их экранирующие свойства γ -излучения, а повышение значения μ можно объяснить увеличением поперечного сечения γ -фотонного взаимодействия, которое варьировалось в интервале взаимодействия

комптоновского рассеяния с эффективным атомным номером (Z_{eff}). Количество металлических частиц и количество электронов на единицу площади в изготовленных образцах РЗМ будет увеличиваться при повышении плотности образцов за счет повышения концентрации отходов. Глина в изготовленных образцах выступает в качестве связующего вещества, создающего хорошо сцепляющуюся структуру между металлом и частицами, составляющими глину, при применяемой давлении 114,22 МПа в процессе изготовления. Одновременно с увеличением числа электронов увеличится электронная плотность и Z_{eff} изготовленных образцов, что увеличивает поперечное сечение взаимодействия γ -фотонов и усиливает взаимодействие между γ -фотонами и электронами в образцах кирпича. Поэтому значение N_t плавно уменьшалось по сравнению со значением N_o , в результате чего значение μ увеличивалось.

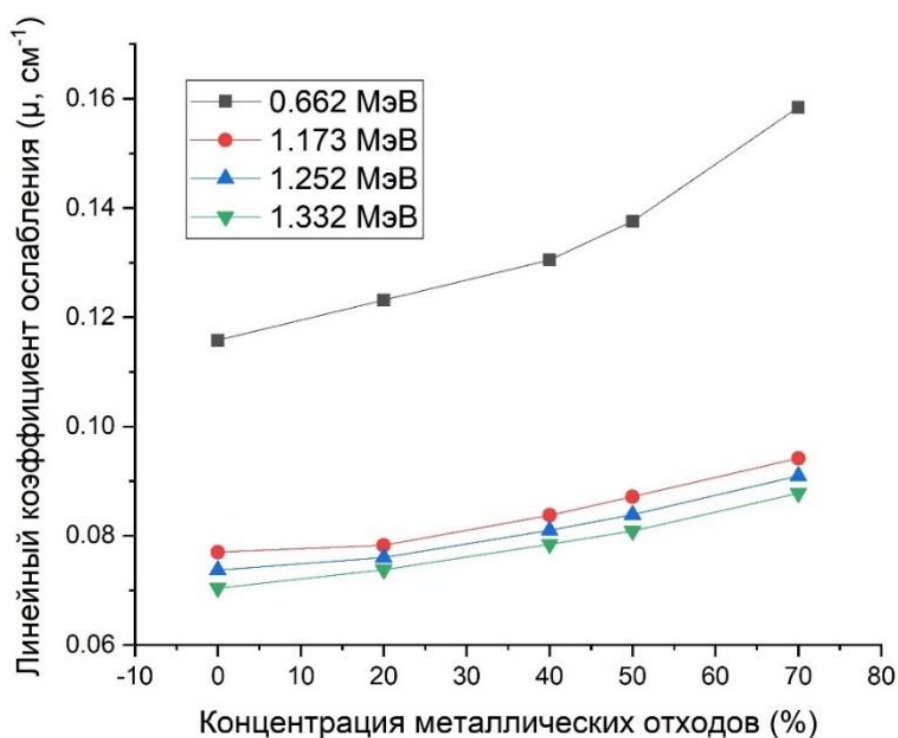


Рисунок 4.22. Изменение концентрации металлических отходов образцов (%) по линейному коэффициенту ослабления (μ , см⁻¹)

Величина линейного коэффициента ослабления (μ , см⁻¹) увеличивается с повышением концентрации отходов в образцах, и в результате значение слоя половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) уменьшается, поскольку эти две величины обратно пропорциональны друг другу, причем увеличение величин μ

сопровождается уменьшением количества фотонов N_t по сравнению с фотонами N_o , как показано на рис. 4.23а. Увеличение концентрации отходов в образцах от 0 до 70% снижает значения $\Delta_{0,5}$ с 5,99 до 4,37 см (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 9,00 до 7,36 см (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 9,40 до 7,62 см (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 9,84 до 7,90 см (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Значения длины свободного пробега (λ , см) рассчитываются аналогично значениям $\Delta_{0,5}$ и прямо пропорциональны друг другу. С увеличением концентрации отходов в образцах от 0 до 70% значения плотности изготовленных образцов увеличиваются, что приводит к уменьшению длины свободного пробега γ -фотонов в образцах. Значения λ уменьшались с 8,64 до 6,31 см (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 12,99 до 10,62 см (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 13,57 до 10,99 см (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 14,20 до 11,39 см (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ) при повышении концентрации отходов изготовленных образцов РЗМ от 0 до 70%, соответственно (рис. 4.23б).

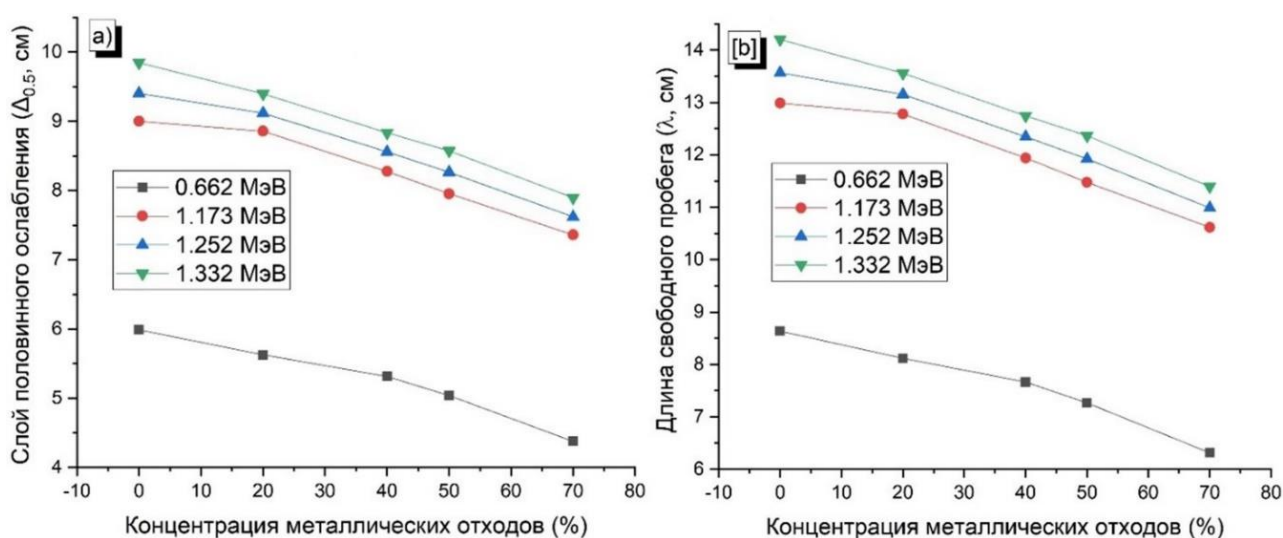


Рисунок 4.23. Изменение концентрации металлических отходов образцов (%) по: [a] слою половинного ослабления ($\Delta_{0,5}$, см) и [b] длине свободного пробега (λ , см)

Уменьшение значений N_t по сравнению со значениями N_o также повлияло на значения коэффициента пропускания (TF , %) для изготовленных образцов РЗМ на основе вьетнамской белой глины. На рис. 4.24а показано уменьшение значений TF при повышении концентрации отходов в образцах от 0 до 70%, где значения TF для толщины 5 см изготовленных образцов уменьшились от 19,20; 8,23; 8,27 и 8,32%, соответственно, при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ.

Уменьшение значений N_t связано с увеличением значений N_a , где $N_a = (N_o - N_t)$. Таким образом, количество поглощенной энергии γ -лучей в пределах толщины 5 см изготовленных образцов увеличилось, что связано с увеличением значений эффективности радиационной защиты (RPE , %), как показано на рис. 4.24b. Значения RPE увеличились на 19,67; 14,91; 15,66 и 16,47%, соответственно, при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ. Следовательно, видно, что увеличение концентрации металлических отходов оказывает существенное влияние на защитную и экранирующую способность изготовленных образцов РЗМ.

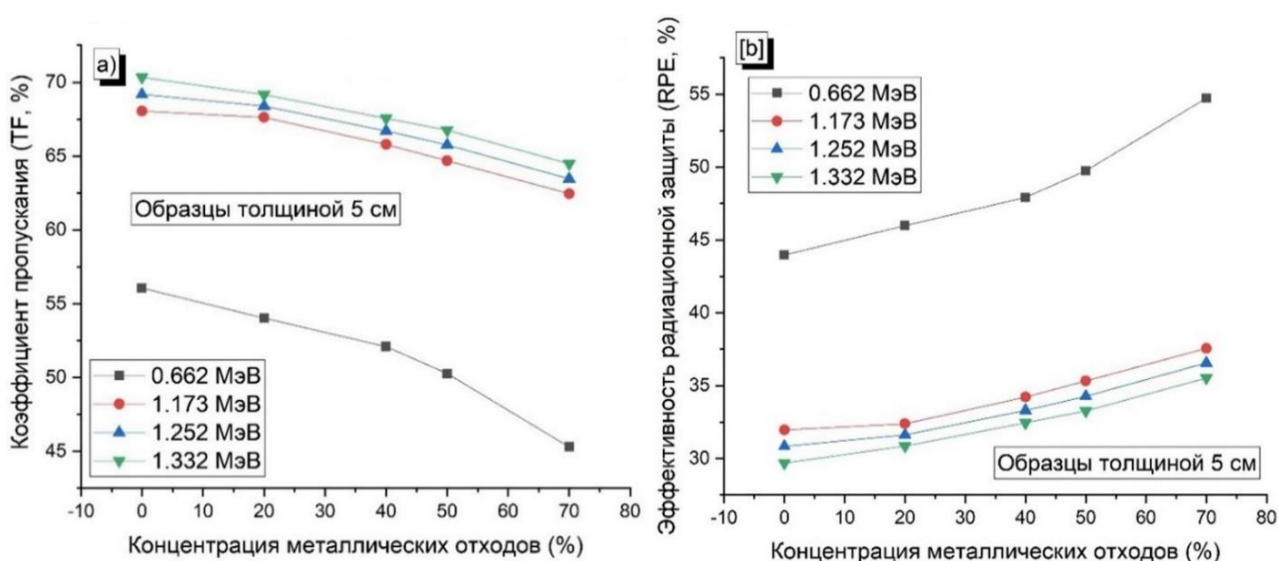


Рисунок 4.24. Изменение концентрации металлических отходов образцов (%) по: [a] коэффициенту пропускания (TF , %) и [b] эффективности радиационной защиты (RPE , %)

На рис. 4.25 показано влияние значений эквивалентной толщины свинца (Δ_{eq} , см) в зависимости от концентрации металлических отходов, где при увеличении концентрации промышленных металлических отходов в изготовленных образцах РЗМ от 0 до 70% расчетные значения Δ_{eq} снижаются на 26,72; 18,23; 18,98 и 19,79% при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ, соответственно. Уменьшение величин Δ_{eq} объясняется повышением значений линейного коэффициента ослабления (μ , см^{-1}) образцов по сравнению со значениями μ свинца. Добавление металлических отходов к образцам вьетнамской белой глины увеличивает плотность изготовленных образцов, приводит к увеличению электронной плотности и эффективного атомного

номера (Z_{eff}) внутри изготовленных образцов. Поскольку поперечное сечение взаимодействия γ -лучей зависит от Z_{eff} изготовленных образцов, увеличение числа взаимодействия γ -фотонов с электронами сопровождалось уменьшением количества фотонов N_f и увеличением значений μ изготовленных образцов РЗМ по сравнению со значениями μ чистого свинца.

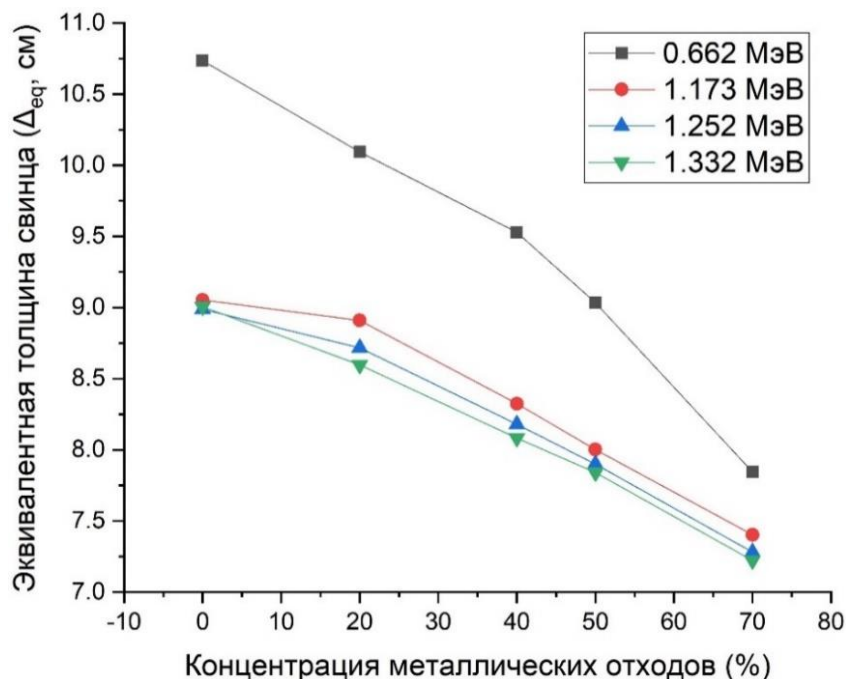


Рисунок 4.25. Изменение концентрации металлических отходов образцов (%) по эквивалентной толщине свинца (Δ_{eq} , см)

Зависимость толщины изготовленных образцов от значений коэффициента пропускания (TF , %) и эффективности радиационной защиты (RPE , %) при $E_\gamma = 0,662$ МэВ проиллюстрирована на рис. 4.26, где увеличение толщины образцов сопровождалось уменьшением значений TF при увеличении значений RPE . Эти величины были определены экспериментально по значениям N_o и N_f . При увеличении толщины образцов РЗМ от 1 до 20 см при $E_\gamma = 0,662$ МэВ значения TF уменьшаются с 89,1 до 9,9% (для образца WW0), с 88,4 до 8,5% (для WW20), с 87,8 до 7,4% (для WW40), с 87,1 до 6,4% (для WW50) и с 85,3 до 4,2% (для WW70). Причем между значениями TF и RPE наблюдается обратная зависимость. Значения RPE изготовленных образцов увеличились с 10,9 до 90,1% (для образца WW0), с 11,6 до 91,5% (для WW20), с 12,2 до 92,6% (для WW40), с 12,9 до 93,6% (для WW50) и с 14,7 до 95,8% (для WW70).

Пробег падающих γ -фотонов увеличивается с увеличением толщины изготовленных образцов, что приводит к увеличению вероятности взаимодействия γ -фотонов с электронами внутри составляющих частиц глины и металлических отходов. Поэтому количество γ -энергии, поглощаемой в изготовленных образцах, увеличилось, и в результате значения RPE увеличились. Видно, что изготовленные образцы РЗМ с большими толщинами обладают хорошими свойствами экранирования и защиты от γ -лучей в выбранном интервале энергии комптоновского рассеяния ($E_\gamma = 0,662$ МэВ), причем смешение вьетнамской белой глины с частицами металлических отходов оказывает значительное влияние на экранирующие свойства от γ -излучения изготовленных образцов, благодаря отличным характеристикам изготовленных образцов под производственным давлением 114,22 МПа, сочетающих в себе глину и металлические отходы, обладающих хорошей твердостью и адгезией, а также высокой прочностью и плотностью.

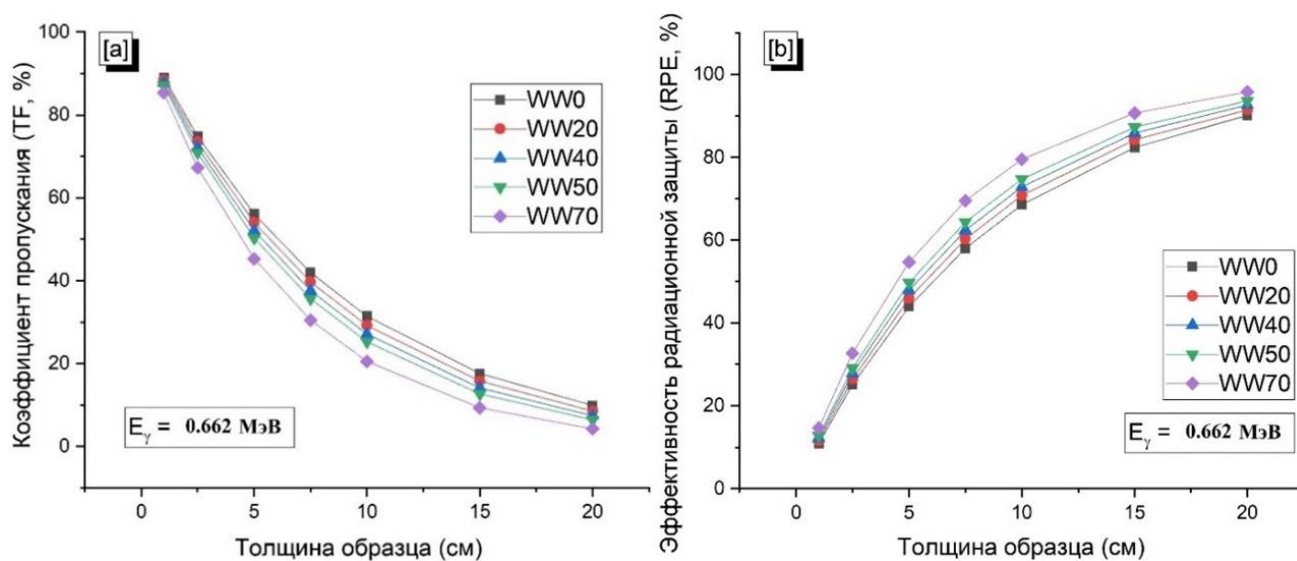


Рисунок 4.26. Зависимость толщины образца от: [a] коэффициента пропускания (TF , %) и [b] эффективности радиационной защиты (RPE , %) при $E_\gamma = 0,662$ МэВ

Как показано на рис. 4.27, значения μ изготовленных образцов РЗМ (WW серии) при $E_\gamma = 0,662$ МэВ сравнивались со значениями μ некоторых ранее опубликованных в литературе образцов РЗМ с целью проверки их радиационно-защитной способности [76, 79–81]. Значения μ изготовленных образцов РЗМ (WW серии) составляют 0,116; 0,123; 0,130; 0,138 и 0,158 см^{-1} для образцов

WW0, WW20, WW40, WW50 и WW70, соответственно. Согласно данным сравнения, заявленные образцы – СВ40 (композит из глины и 40% баритового порошка), КГ30 (необожженный кирпич 70% каолина, 30% гранита), КГ40 (необожженный кирпич 60% каолина, 40% гранита), КГ50 (необожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита), КГ30В (обожженный кирпич 70% каолина, 30% гранита), КГ40В (обожженный кирпич 60% каолина, 40% гранита) и КГ50В (обожженный кирпич 50% каолина, 50% гранита), имеют самые высокие значения μ среди сравниваемых на рис. 4.27, где их значения μ достигали 0,165; 0,163; 0,167; 0,170; 0,166; 0,168 и 0,162 см^{-1} , соответственно.

Кроме того, изготовленный кирпич WW70 в данной работе имеет значение μ , близкое к значениям, указанным для образцов КГ10В (обожженный кирпич 90% каолина, 10% гранита), КГ20 (необожженный кирпич 80% каолина, 20% гранита) и СС40 (композит из глины и 40% стального шлака), которые имеют значения μ 0,152 см^{-1} ; 0,158 см^{-1} и 0,159 см^{-1} , соответственно. Изготовленные образцы WW40 и WW50 имеют значения μ , близкие к указанным для заявленных образцов КГ00 (необожженный кирпич 100% каолина), Глина, СФ10 (глина + 10% летучей золы) со значениями μ 0,146 см^{-1} ; 0,138 см^{-1} и 0,131 см^{-1} , соответственно. Наконец, изготовленные образцы WW0 и WW20 в настоящем исследовании обладают экранирующей способностью по отношению к гамма-излучению, близкой к заявленным образцам «Кирпич», СФ20 (глина + 20% летучей золы), СФ30 (глина + 30% летучей золы), СФ40 (глина + 40% летучей золы), СФ50 (глина + 50% летучей золы), которые имеют значения μ 0,114 см^{-1} ; 0,127 см^{-1} ; 0,125 см^{-1} ; 0,121 см^{-1} и 0,117 см^{-1} , соответственно. Сравнение показывает примерно одинаковые при $E_\gamma = 0,662$ МэВ экранирующие способности образцов РЗМ (WW серии) из белой глины, рассмотренных в настоящем исследовании, по сравнению с образцами, указанными в литературе. При $E_\gamma = 0,662$ МэВ, образец WW70 (белая глина + 70% металлических отходов) имеет значения μ на 7% ниже по сравнению с значением μ для образца КГ50 [80] и на 28% выше по сравнению с значением μ для образца «Кирпич» [81].

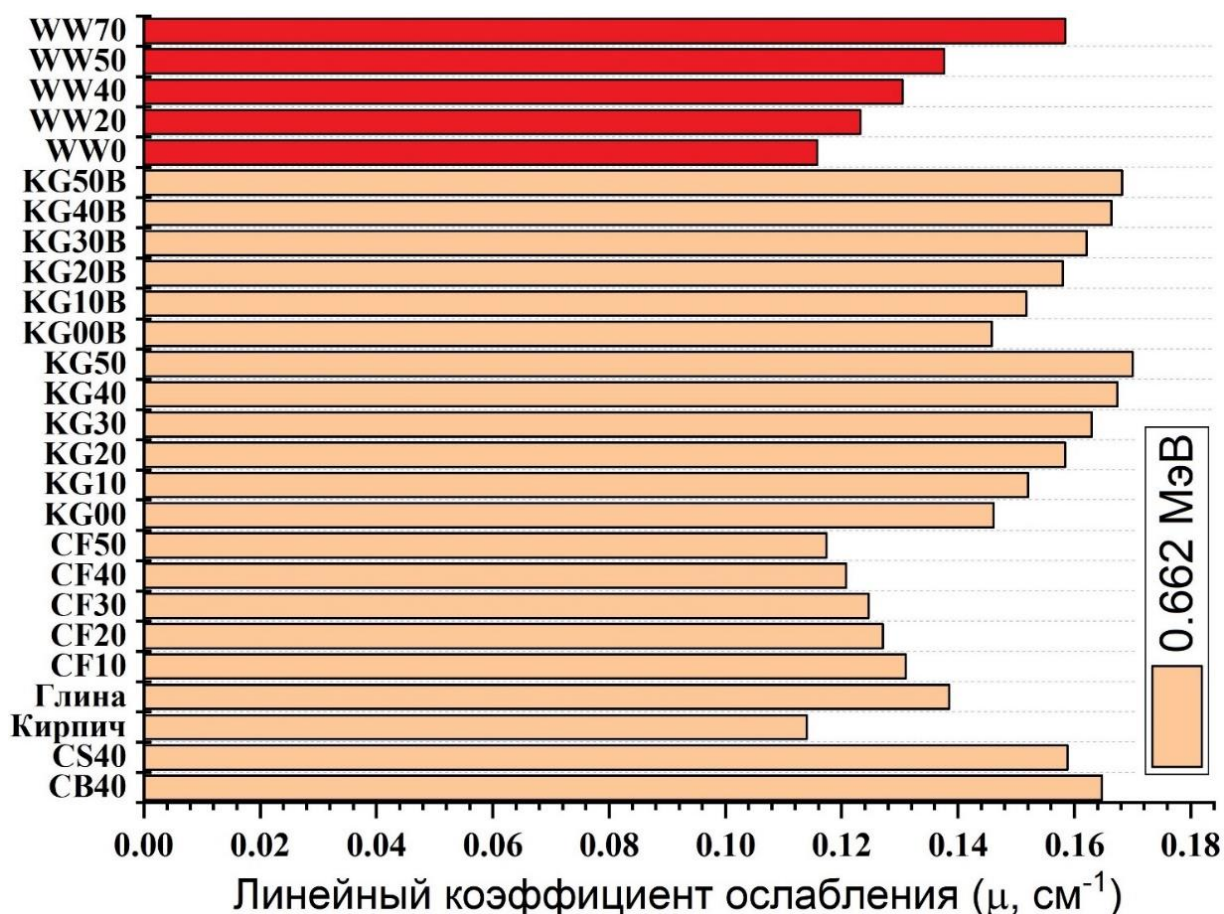


Рисунок 4.27. Сравнение линейного коэффициента ослабления изготовленных образцов на основе белой глины Вьетнама и линейного коэффициента ослабления некоторых образцов, описанных в литературе

Таким образом, изготовленные образцы прессованного кирпича на основе вьетнамской красной и белой глины из Батчанга, смешанные с металлическими отходами, являются новыми исследованными материалами, обладающими, как было рассмотрено выше, высокими гамма-экранирующими свойствами. При увеличении их толщины до 30 см и более они могут быть использованы в качестве потенциального защитно-экранирующего материала при строительстве вьетнамских ядерных объектов (включая проекты АЭС и готовящийся атомный проект Вьетнама – ЦЯНТ с новым ИЯР мощностью 10 МВт). Они также могут быть использованы в качестве постоянного радиационно-защитного материала при выводе из эксплуатации ядерных объектов благодаря простоте изготовления, приемлемой стоимости и легкодоступности (популярности), а также за счет хороших экранирующих характеристик и возможности использования источником промышленных металлических отходов.

4.4 Выводы главы 4

В данной работе изучено влияние добавления металлических отходов на радиационно-защитные свойства нового вьетнамского кирпича на основе красной и белой глины. Рассмотренные десять образцов РЗМ были изготовлены из смеси вьетнамской красной и белой глины, металлических отходов и 10% эпоксидной смолы. При проведении экспериментальной оценки влияния соотношения металлических отходов на структуру и радиационно-защитные свойства, были получены следующие результаты:

- Для образцов на основе красной глины: Увеличение концентрации металлических отходов приводит к уменьшению объема пор и насыпного объема изготовленных образцов РЗМ, при этом объем пор уменьшается с 1,4 до 0,1 см³, а насыпной объем также уменьшается при увеличении концентрации металлических отходов. Уменьшение объема пор и насыпного объема увеличивает плотность изготовленных образцов РЗМ на 7,1%, а их пористость снижается от 11,66 до 1,00% при повышении концентрации металлических отходов в изготовленных образцах РЗМ. Увеличение плотности изготовленных образцов РЗМ улучшает способность к ослаблению γ -излучения на 24; 18; 18 и 16% при E_γ 0,662; 1,173; 1,252 и 1,332 МэВ, соответственно. Экспериментальные измерения линейного коэффициента ослабления показывают увеличение линейного коэффициента ослабления с 0,163 до 0,213 см⁻¹ (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 0,082 до 0,100 см⁻¹ (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 0,077 до 0,093 см⁻¹ (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и с 0,072 до 0,086 см⁻¹ (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ). Повышение значений линейного коэффициента ослабления снижает эквивалентную толщину свинца изготовленных образцов РЗМ, которая уменьшается с 7,63 до 5,83 см (на 24%) (при $E_\gamma = 0,662$ МэВ), с 8,47 до 6,94 см (на 18%) (при $E_\gamma = 1,173$ МэВ), с 8,64 до 7,10 см (на 18%) (при $E_\gamma = 1,252$ МэВ) и уменьшается с 8,81 до 7,36 см (на 16%) (при $E_\gamma = 1,332$ МэВ) при увеличении концентрации металлических отходов от 0 до 70%, соответственно.

- Для образцов на основе белой глины: Плотность изготовленных образцов РЗМ увеличилась с 2,02 до 2,34 г/см³, а их пористость постепенно

снизилась с 11,655% до 0,733% при увеличении концентрации промышленных отходов в образцах РЗМ от 0 до 70%. Кроме того, превышение концентрации отходов сопровождалось увеличением линейного коэффициента ослабления образцов РЗМ на основе белой глины, где линейный коэффициент ослабления увеличился с 0,116 до 0,158 см⁻¹ (на 27%) (при E_γ = 0,662 МэВ), с 0,077 до 0,094 см⁻¹ (на 18%) (при E_γ = 1,173 МэВ), с 0,074 до 0,091 см⁻¹ (на 19%) (при E_γ = 1,252 МэВ) и с 0,070 до 0,088 см⁻¹ (на 20%) (при E_γ = 1,332 МэВ) при увеличении содержания отходов с 0 до 70%, соответственно. В результате исследования было также установлено, что эффективность радиационной защиты для толщины 20 см изготовленных образцов РЗМ достигала 90,1; 91,5; 92,6; 93,6 и 95,8% (при E_γ = 0,662 МэВ) для образцов, армированных промышленными металлическими отходами с концентрацией 0; 20; 40; 50 и 70%, соответственно.

Кроме того, сравнение линейного коэффициента ослабления изготовленных образцов РЗМ с данными, опубликованными в литературе, показывает, что изготовленные образцы РЗМ серии RW и WW на основе красной и белой глины Вьетнама обладают высокой экранирующей способностью. При этом образцы РЗМ серии RW обладает более высокими радиационно-защитными свойствами, чем образцы РЗМ серии WW. Образец RW70 (красная глина + 70% металлических отходов) имеет значения линейного коэффициента ослабления на 26% выше по сравнению с значением линейного коэффициента ослабления для образца WW70 (белая глина + 70% металлических отходов) при E_γ = 0,662 МэВ, на 6% выше при E_γ = 1,173 МэВ, на 3% выше при E_γ = 1,252 МэВ и на 2% ниже при E_γ = 1,332 МэВ, соответственно.

Таким образом, рассмотренные РЗМ на основе красной и белой глины Вьетнама представляют собой альтернативный вариант строительного материала для экранирования γ-излучения, который не требует значительных затрат, легко изготавливается.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ОТДЕЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВЬЕТНАМА

5.1 Основная информация о проекте Центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ) Вьетнама

5.1.1 Общие сведения

Атомная энергетика всегда была важной и ведущей отраслью развитых стран. Исследовательский ядерный реактор (ИЯР) являются основными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области национальной ядерной науки и технологий. Обоснование безопасности эксплуатации коммерческих АЭС невозможно без реализации широкой программы фундаментальных и прикладных исследований, проводимых на ИЯР [106]. Используются ИЯР для производства радиоизотопов для медицины и промышленности, генерирования пучков нейтронов для исследований материалов и неразрушающих испытаний, оказания услуг по облучению [107], а также проведения исследований в сфере культурного наследия и окружающей среды. Они вносят стратегический вклад в образование и подготовку кадров.

Несмотря на меньшие уровни мощности и, соответственно, меньшее количество радиоактивных веществ, образующихся в результате эксплуатации ИЯР, потенциальная опасность этих реакторов для населения и окружающей среды остается, тем не менее, высокой из-за ряда их особенностей [108]: высокая повторяемость переходных процессов во время эксплуатации (пуск и остановка реактора, изменение уровней мощности); частая перегрузка АЗ и непрерывная передача облученных предметов; высокая повторяемость циклов нагрузки на основное оборудование активной зоны и первых контуров охлаждения реакторов; высокая плотность нейтронного потока в активной зоне реактора; наличие высокообогащенного топлива; меньшее, по сравнению с коммерческими энергетическими реакторами, количество защитных барьеров; расположение большинства ИЯР в крупных городах с большим населением.

Существует большое разнообразие конструкций ИЯР с тепловой мощностью от нуля (критические и подкритические сборки) до ~200 МВт. ИЯР могут работать в стационарных или импульсных режимах.

Единственный во Вьетнаме Далатский ИЯР (г. Далат) мощностью 250 кВт работает с марта 1963 г. В 1979–1982 гг. он был реконструирован и его мощность увеличилась до 500 кВт. Реактор предназначен для производства радиоизотопов, нейтронно-активационного анализа, фундаментальных и прикладных исследований и обучения. Однако растущие потребности в этой продукции и исследованиях не могут быть удовлетворены из-за ограниченной мощности реактора. С другой стороны, Далатский ИЯР уже не новый – прошло более 60 лет с момента его постройки в начале 1960-х годов. В этом контексте для сохранения и расширения применения атомной энергии в мирных целях Вьетнаму необходимо инвестировать в проект по строительству ЦЯНТ с основным оборудованием, являющимся многоцелевым ИЯР (ожидаемая мощность 10 МВт с возможностью увеличения до 15 МВт) [109].

Началом сотрудничества между Вьетнамом и РФ по строительству ЦЯНТ стал официальный визит в РФ Премьер-министра Вьетнама в 2009 г. В 2010 г. для руководства проектом АЭС Ниньтхуан были сформированы Государственный руководящий комитет (ГРК) (см. рис. 1.5) и Национальный совет по ядерной безопасности. Была организована подготовка кадров для АЭС [110]. В 2011 г. между Правительствами РФ и Вьетнама было подписано соглашение о сотрудничестве в сооружении ЦЯНТ. В 2012 г. в целях реализации Стратегии мирного использования ядерной энергии был утвержден проект «Укрепление потенциала исследований, развертывание и техническая помощь для развития применения атомной энергии и обеспечение безопасности». В этом проекте строительство ЦЯНТ с новым ИЯР определяется как ключевая задача по созданию и развитию VINATOM и достижения ведущей позиции в регионе.

Несмотря на отказ в 2016 г. от строительства АЭС из-за экономических факторов, Вьетнам и Россия подписали в 2017–2018 гг. Меморандумы о

взаимопонимании о строительстве ЦЯНТ и о сотрудничестве в выполнении информационно-коммуникационных работ по проекту. После утверждения проекта инвестполитики VINATOM и связанные с ним подразделения под руководством MOST оперативно разработали и реализовали проект. В 2019 г. Росатом и MOST подписали Меморандум о взаимопонимании по продвижению проекта строительства ЦЯНТ. На данный момент будущее ядерной энергетики в структуре национального энергобаланса Вьетнама остается неясным, хотя следует отметить, что Вьетнам не исключил полностью ядерную энергетику.

MOST и другие подразделения Министерства работали с провинцией Донгнай и соответствующими подразделениями над организацией работ на участке реализации проекта. С конца 2023 г. осуществляется финансирование, выбор подрядчиков для разработки ТЭО. В 2025 г. планируется начало строительства, в 2029 г. - ввод в эксплуатацию ИЯР.

Согласно положениям действующих законов Вьетнама, проект ЦЯНТ является государственным инвестиционным проектом, поэтому необходимо выполнить следующие шаги [111]:

- Предварительное ТЭО, в том числе: отсев и сравнение потенциальных площадок для предложения трех возможных вариантов; предварительное их обследование и оценка, чтобы предложить одну наиболее подходящую площадку для этапа ТЭО; предварительный дизайн проекта ЦЯНТ, включая новый ИЯР; подготовка предварительный отчет об ОВОС; и подготовка отчет о предварительном ТЭО. Представить их на рассмотрение компетентным органам. На основании вышеуказанных документов Премьер-министр Вьетнама утвердил инвестполитику проекта ЦЯНТ в Решении №75/QD-TTg от 19.11.2018.

- ТЭО, в том числе: техническое обследование и оценка площадки, утвержденные в инвестполитике; подготовка отчета по ТЭО, включая базовый дизайн и отчет о предварительном анализе безопасности; подготовка отчета об ОВОС. На основании этого составить досье по согласованию для утверждения площадки строительства проекта ЦЯНТ.

- Реализация ЕРС-контракта, включая технический дизайн; строительный чертеж; проведение процедур подачи заявок на получение разрешений на строительство; осуществление строительства проекта ЦЯНТ.

Для будущего национальной атомной энергетики Вьетнаму необходимо приложить усилия для скорейшей реализации проекта ЦЯНТ. На данный момент Вьетнам принял госплан по строительству нового ИЯР. Международные миссии по оценке ЯИ для ИЯР позволяют оказать поддержку и предоставить Вьетнаму рекомендации по осуществлению проекта. Ответственность за создание правовой базы для реализации проекта возложена на MOST, которое также отвечает за Руководство подготовкой отчета об ОВОС ИЯР в координации с MONRE при экспертизе отчета об ОВОС. Подготовка ОВОС нового ИЯР является актуальной задачей. Поэтому разработка Руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС является чрезвычайно важной и полезной для регулирующих органов, подрядчиков и т.п. Цель разработки руководства по подготовке и экспертизе состоит в том, чтобы помочь оценщикам применять систематический и последовательный подход к подготовке и экспертизе отчета об ОВОС проекта, относящегося к ядерной установке с ИЯР.

Автор диссертации в составе группы специалистов VINATOM принимал участие в разработке «Руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС» для проекта ЦЯНТ Вьетнама, в частности – в проведении комплексного анализа нормативных документов РФ, других стран, включая рекомендации МАГАТЭ, разработке Руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС в соответствии с правовыми и техническими требованиями Вьетнама, а также в формулировке вопросов, которые необходимо учитывать в отношении радиологических аспектов при подготовке и экспертизе отчета об ОВОС [137].

Для достижения данной цели решались задачи по сбору, обобщению и анализу требований правил и стандартов Вьетнама для экологической оценки в соответствии с указаниями MONRE, а также руководящих указаний МАГАТЭ, правил и норм в области атомной энергетики РФ и других стран.

5.1.2 Цели и задачи проекта ЦЯНТ Вьетнама

Общей целью проекта является содействие исследованиям, созданию и развитию национального потенциала ядерной науки и технологий; формирование современной научно-технической исследовательской базы в Юго-Восточной Азии (ЮВА) наравне с передовыми странами мира в области фундаментальных и прикладных исследований (реакторная физика и техника, реакторные материалы, технология производства радиоизотопов и закрытых источников, разработка методов ядерного анализа, радиационная безопасность, обращение с РАО и охрана окружающей среды и др. [112]); подготовка высококвалифицированных специалистов, способных принимать и осваивать передовые ядерные технологии; расширение и продвижение применения атомной энергии в социально-экономических областях, повышение уровня жизни людей и оказание технической поддержки программе развития атомной энергетики, а также содействие международному сотрудничеству в области использования атомной энергии с международными организациями и странами [113]. Конкретными целями проекта являются:

- Продвижение исследований и открытие во Вьетнаме новых направлений для развития научно-технического потенциала страны в ядерной области, особенно в технологии реакторов, ядерной безопасности, анализе рисков [114, 115] и материаловедении, отвечая растущим требованиям развития экономики и обеспечения национальной безопасности.
- Подготовка в процессе эксплуатации нового ИЯР высококвалифицированных специалистов в области ядерной науки и технологий, руководителей и менеджеров для реализации проектов по строительству ядерных объектов, способствующих долгосрочному развитию атомной энергетики страны [116]. Реализация проекта ЦЯНТ Вьетнама с новым ИЯР до прекращения эксплуатации Далатского ИЯР будет способствовать сохранению и продолжению подготовки кадров для атомной энергетики. Вьетнам может участвовать в подготовке научных кадров для стран ЮВА и других стран.

- Создание продуктов и технических услуг в области использования атомной энергии, которые могут быть коммерциализированы для обслуживания медицинской, сельскохозяйственной, строительной и других отраслей (например, услуга по облучению кремния для производства полупроводников).
- Продвижение в освоении и развитии технологий в области использования атомной энергии в будущем, применении радиации и радиоизотопов в социально-экономических секторах, исследованиях и разработке новых технологий (например, облучение в испытательных целях материалов для космических и ядерных технологий) в долгосрочной перспективе.
- Нарращивание национального потенциала по анализу, прогнозированию и реагированию на радиационные и ядерные инциденты в контексте того, что вблизи границы Вьетнама введены в эксплуатацию, а также будут строиться в ближайшем будущем АЭС, в том числе плавучие.

После ввода ЦЯНТ в эксплуатацию, реактор станет эффективным инструментом в создании и повышении потенциала атомной отрасли страны, содействии развития смежных отраслей промышленности. С новым ИЯР большой мощности будет активно продвигаться применение атомной энергии в отраслях экономики, особенно в здравоохранении, сельском хозяйстве, промышленности, в гидрологии, геологии и разработке полезных ископаемых. Это находит отражение в том, что сейчас в мире эксплуатируются 226 ИЯР в 54 странах, большинство из которых являются развивающимися странами, не имеющими АЭС¹³.

5.1.3 Географическое положение проекта ЦЯНТ

Место строительства Северного компонента находится по адресу 140, ул. Нгуен Туан, район Тхань Суан, город Ханой, Вьетнам. Данное место является существующим объектом VINATOM и еще есть место для строительства нового здания с площадью застройки около 720 м².

¹³ Главная — База данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам (RRDB). URL: <https://nucleus.iaea.org/trdb/#/home> (дата обращения: 03.04.2024)

Согласно предложению специалистов Росатома и опыту других стран, необходимая площадь для строительства ЦЯНТ с многоцелевым ИЯР мощностью более 10 МВт составляет порядка 150–200 га. Территория, занимаемая ИЯР, должна соответствовать требованиям обеспечения радиационной безопасности для населения и окружающей среды (необходимо иметь зону радиационного контроля на расстоянии около 300–500 м от вентиляционной трубы в соответствии с действующими нормативными документами для Далатского ИЯР) и условиям обеспечения безопасности ОИАЭ (необходимо иметь физическую защиту для важных строений для обеспечения безопасности – 500 м от строения¹⁴). Для этого требуется комплекс сооружений площадью до 150 га, но строительные работы сосредоточены на площади около 10 га (100 000 м²) при плотности застройки < 25 %.



Рисунок 5.1. Проект ЦЯНТ Вьетнама с новым ИЯР и его место расположения

Южный компонент ЦЯНТ будет расположен в коммуне Суой Че, на оси дороги Суой Че - Бинь Лок (недалеко от промышленного парка Лонгхань), город Лонгхань, провинция Донгнай (координаты центра проектной зоны: 10^o58'26.4"С; 107^o12'12.0"В) (рис. 5.1). Площадка расположена к востоку от города Бьенхоа и к северо-западу от города Лонгхань. Расстояние от площадки до города Бьенхоа: 39/45 км (прямая дорога/автомобильная дорога) по

¹⁴ Постановление Правительства Вьетнама № 126/2008/ND-CP от 11.12.2008 — Подробные положения и руководство по выполнению ряда статей указа об охране важных объектов, связанных с национальной безопасностью». URL: <https://vanbanphapluat.co/126-2008-pd-cp> (дата обращения: 03.04.2024).

национальной трассе QL1A. Расстояние от площадки до города Лонгхань составляет около 7 км. Район площадки находится рядом с небольшим ручьем и озером Суой Че. Ближайший аэропорт Таншоннят находится в 62/77 км (по шоссе Хошимин - Дау Гиай) и 25/30 км от строящегося аэропорта Лонгхань (по шоссе Хошимин - Дау Гиай). Ближайшая железнодорожная станция (станция Лонгхань) находится в 6/7 км, ближайший морской порт (порт Фуми) – в 45/65 км, по нацтрассе QL1A и QL56. Проект расположен вдали от химических заводов, нефте- и газопроводов, но вблизи объектов вспомогательной промышленности, материального производства и перерабатывающей промышленности. Через территорию проекта проходит линия национальной электросети 110 кВ. Территория проекта находится вдали от курортов, заповедников, историко-культурных памятников национального уровня [117].

5.1.4 Основные объекты ЦЯНТ

Территориально ЦЯНТ Вьетнама состоит из двух компонентов:

- **Северный компонент** (усиление и дополнение новых исследовательских направлений для существующих научно-исследовательских и учебных подразделений на Севере):

Инвестиции в Северный компонент направлены в строительство 2-х зданий (включая здание центра исследований рисков и безопасности и здание центра исследований и оценки реакторных материалов) площадью около 720 м² для проведения исследований – внедрения и обучения с целью укрепления потенциала существующих институтов и центров при VINATOM в Ханое. Здесь будут развиваться компетенции по моделированию, прогнозному анализу, изучению структуры материалов и коррозии реакторных материалов и др.

- **Южный компонент** (строительство нового ИЯР на Юге):

Южный компонент включает ИЯР мощностью 10 МВт (с возможностью увеличения до 15 МВт), лаборатории и оборудование для исследований, связанных с эксплуатацией ИЯР. Это основной компонент ЦЯНТ, который

предназначен для фундаментальных и экспериментальных исследований в области ядерной физики, материаловедения, в областях, связанных с технологией ядерных реакторов (реакторная физика, материаловедение, облученные материалы, переработка РАО, защита от радиации, и т.д.); производства открытых и закрытых радиоизотопных источников для использования в медицине, промышленности, сельском хозяйстве.

Планируется, что Южный компонент будет располагаться на площади около 150 га в коммуне Суой Че, городе Лонгхань, провинции Донгнай, из которых площадь для строительства объектов проекта составляет около 10 га с плотностью застройки менее 25 %, остальное – зеленый защитный пояс (лес) для обеспечения радиационной безопасности окружающей среды и безопасности ОИАЭ (рис. 5.2). Предусмотрено более 30 строительных объектов, из которых три основных объекта должны быть расположены последовательно: здания ИЯР, исследования и производства радиоизотопов и исследования облученных материалов. Другие объекты, здания технического и технологического обеспечения, административное и экспериментальное и др., будут построены по принципу удобства в эксплуатации и использовании. Два объекта имеют высоту более 3-х этажей над землей. Здание ИЯР имеет высоту 25 м (подземная часть имеет глубину около 5 м), вентиляционная труба – 45 м, остальные объекты ниже 14 м. В комплексе сооружений ЦЯНТ зарезервирована площадь для объектов, сооружение которых предусмотрено после 2035 г. (например, здание для экспериментального исследования потока холодных нейтронов).

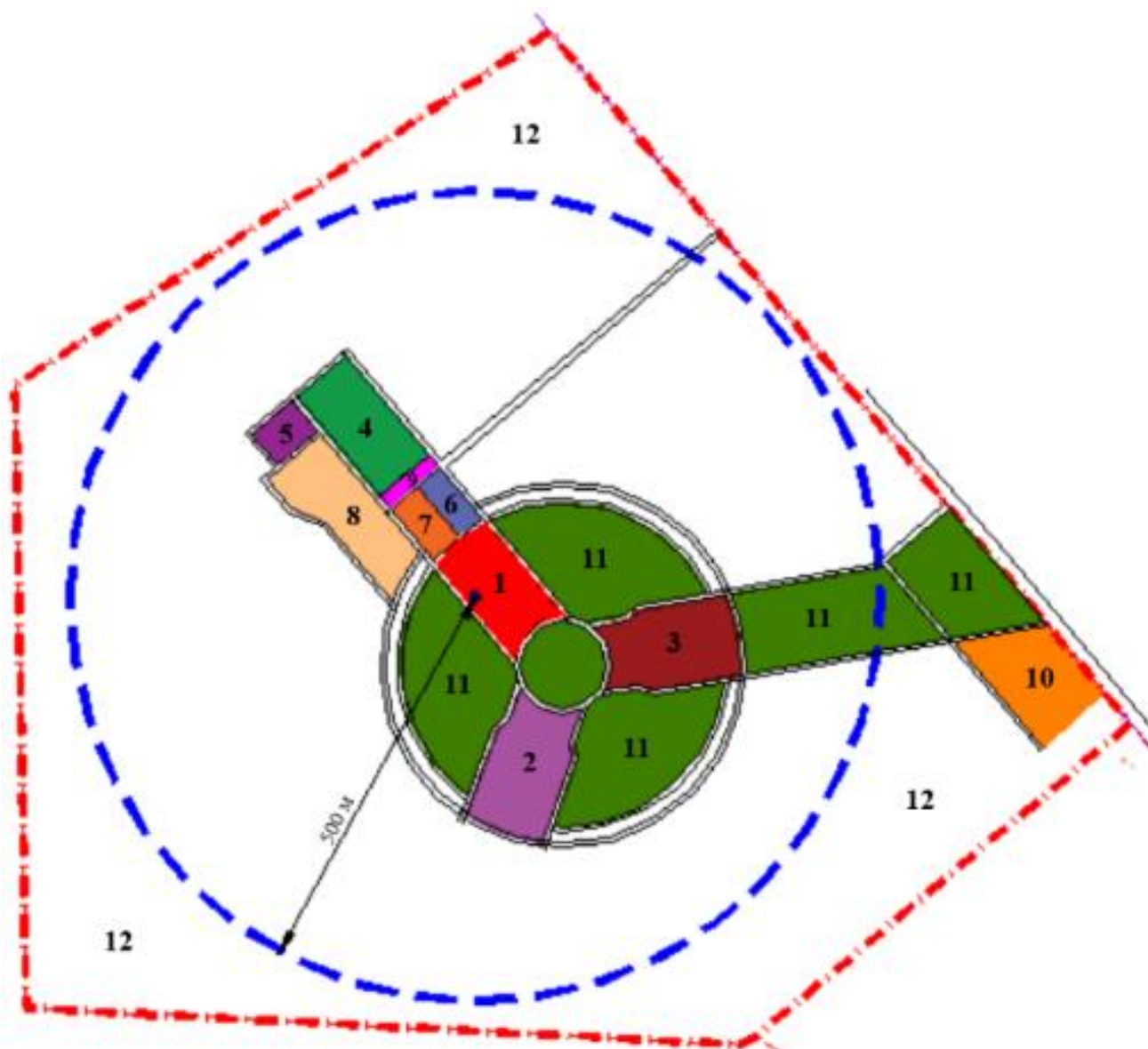


Рисунок 5.2. Планировка территории Южного компонента ЦЯНТ:

1 – зона ИЯР; 2 – зона материаловедения и радиоизотопии; 3 – зона обращения с РАО; 4 – цеховая и складская зона; 5 – зона энергоснабжения; 6 – зона охлаждения воды реактора; 7 – зона очистки промышленных сточных вод; 8 – зона очистки бытовых сточных вод; 9 – вспомогательная зона (вне зоны контроля радиационной безопасности); 10 – зона для служебного здания; 11 – зеленая деревья, водная гладь; 12 – буферная зона

Связь исследований, применения и обучения с научно-исследовательскими институтами, университетами, объектами по применению радиации и ядерной инженерией и т.д. на Севере и Юге имеет решающее значение для эффективности эксплуатации и использования ЦЯНТ (рис. 5.3).



Рисунок 5.3. Структура ЦЯНТ по географическому положению

5.1.5 Технологии и основные характеристики нового ИЯР Вьетнама

В настоящее время в мире всего несколько стран (Россия, Аргентина, Южная Корея, Китай, Германия и Франция) способны экспортировать многоцелевые ИЯР с мощностью более 5 МВт, отвечающие требованиям Вьетнама. В соответствии с межправительственным соглашением между Вьетнамом и Россией, подписанным 21 ноября 2011 г., о строительстве ЦЯНТ, Вьетнам выбрал Россию в качестве поставщика ИЯР и ссудного капитала. Вьетнаму необходимо определить конфигурацию и технологические компоненты ИЯР, чтобы наилучшим образом удовлетворить необходимые исследовательские и прикладные возможности Вьетнама. Поскольку средний срок эксплуатации ИЯР составляет около 60 лет, необходимо предусмотреть возможность замены, модернизации и обновления технологических систем ИЯР в процессе эксплуатации с минимальными затратами.

Новый ИЯР Вьетнама (бассейнового типа ВВР) – это реактор с тепловой мощностью 10 МВт (может быть модернизирован до 15 МВт), в котором для замедления нейтронов и охлаждения используется обычная вода и низкообогащенное топливо (19,7 % U-235) (см. табл. 5.1). Он предназначен для научных и прикладных исследовательских целей, оснащен вертикальными экспериментальными каналами в активной зоне (АЗ) и в отражателе, горизонтальными каналами и технологическими устройствами для проведения фундаментальных и прикладных исследований, облучения для создания продукции, услуг и подготовки ядерных кадров для страны.

При проектировании необходимо предусмотреть избыточность труднозаменяемых компонентов в течение срока службы реактора (~60 лет), таких как корпус реактора и бетон для биологической защиты, АЗ и отражатель, горизонтальные каналы через бетон, трубопроводы первого и второго контуров охлаждения и т.д. при модернизации с 10 МВт до 15 МВт. Это распространенная практика для ИЯР, особенно для развивающихся стран, потому что сложно построить другой ИЯР взамен существующего. Существуют реакторы, которые модернизировали 2–3 раза. Например, ИЯР «TRIGA Mark-II» (Индонезия), первоначально имел мощность 0,25 МВт, затем мощность была увеличена до 1 МВт, а с 2000 г. она увеличилась до 2 МВт; ИЯР «TRR-1/M1» (Тайланд) имел проектную мощность 0,25 МВт, а с 1977 г. она увеличена до 1,2 МВт.

Таблица 5.1. Технические характеристики нового ИЯР Вьетнама

№	Технические параметры	Значение
1	Тип реактора	Бассейновый реактор открытого типа
2	Тепловая мощность, МВт	10
3	Теплоноситель и замедлитель нейтронов	Обычная вода
4	Отражатель: - боковой - торцевой	Бериллий Химобессоленная вода
5	Тип топлива	ВВР-КН (VVR-KN)*
6	Обогащение топлива, % ²³⁵ U	19,7

7	Количество тепловыделяющих сборок (ТВС) в АЗ	До 45
8	Высота активной зоны, мм	600
9	Максимальная плотность потока тепловых нейтронов (при $E < 0,625$ эВ), $\times 10^{14}$ нейтрон \cdot см $^{-2}\cdot$ с $^{-1}$: - в центре АЗ - в бериллиевом отражателе	2,5 0,5
10	Плотность потока тепловых нейтронов (при $E < 0,625$ эВ) на вертикальных экспериментальных каналах в АЗ, $\times 10^{14}$ нейтрон \cdot см $^{-2}\cdot$ с $^{-1}$	1–2
11	Плотность потока нейтронов в кремниевом канале облучения \varnothing 205 мм, $\times 10^{13}$ нейтрон \cdot см $^{-2}\cdot$ с $^{-1}$: - тепловые нейтроны ($E < 0,625$ эВ) - быстрые нейтроны ($E > 0,82$ МэВ)	До 3 До 0,03
12	Плотность потока нейтронов на выходе горизонтального канала, $\times 10^{10}$ нейтрон \cdot см $^{-2}\cdot$ с $^{-1}$: - тепловые нейтроны ($E < 0,625$ эВ) - быстрые нейтроны ($E > 0,82$ МэВ)	0,1–0,6 0,001–0,02
13	Плотность потока тепловых нейтронов ($E < 0,625$ эВ) в положении размещение каналов облучения, переносящих проб пневматическим способом, $\times 10^{13}$ нейтрон \cdot см $^{-2}\cdot$ с $^{-1}$	0,5
14	Коэффициент неравномерности потока нейтронов по объему АЗ	2,7
15	Направление принудительной циркуляции через АЗ	Сверху вниз
16	Температура теплоносителя на входе в АЗ, °С	45
17	Количество горизонтальных экспериментальных каналов	4–6
18	Количество вертикальных экспериментальных каналов, в том числе: - для облучения кремния (\varnothing 6 дюймов, 200 мм, 300 мм) - для облучения проб и производства изотопов в АЗ и отражателе - канал передачи проб пневматическим способом	До 18 3 10–12 3–4
19	Число рабочих органов СУЗ: - компенсационных стержней - системы автоматического регулирования - аварийной защиты	16 12 1 3
20	Абсорбирующий материал рабочих органов СУЗ	B ₄ C
21	Максимальный запас реактивности, % $\Delta K/K$	17,34
22	Температурный коэффициент реактивности, % $\Delta K/K$	- 0,15
23	Годовой расход ТВС, пучок: - тип 5 твэлов - тип 8 твэлов	До 17 До 35
24	Количество измерительных каналов СУЗ	До 9
25	Положение размещения двигателей для управления рабочих органов СУЗ	Ниже активной зоны
(*) <u>Примечание:</u> Стандартная ТВС «ВВР-КН» состоит из 8 тепловыделяющих элементов (твэлов), из которых 7 твэлов шестигранной формы, а внутренний твэл имеет круглую форму. ТВС для установки регулирующих стержней внутри имеют только 5 наружных твэлов. Средняя глубина выгорания по массе топлива при выгрузке из реактора составляет 50 %.		

5.2 Подготовка руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама

5.2.1 Общие требования к ОВОС для ИЯР

Защита окружающей среды подразумевает защиту и сохранение диких видов животных и растений; экологических товаров и услуг (производство продуктов питания и кормов); ресурсов, используемых в сельском и лесном хозяйстве, рыболовстве и туризме; объектов, используемых в духовной, культурной и развлекательной деятельности; почвы, воды и воздуха; естественных процессов (например, круговорот углерода, азота и воды) [118].

ОВОС представляет собой анализ и прогноз воздействия на окружающую среду, которое может возникнуть в результате реализации проектов. На его основе вырабатываются решения и меры по усилению положительного и минимизации негативных воздействий, способствуя реализации инвестпроекта. Точность прогноза воздействия зависит от двух основных групп факторов: входных данных для прогноза и методов прогнозирования.

Для полноценности входных данных, важно учитывать основные объекты: *объект, вызывающий воздействие* (мероприятия по реализации проекта способны оказывать воздействие на окружающую среду) и *объект воздействия* (компоненты окружающей среды, включая соответствующие социально-экономические факторы, которые могут быть затронуты проектом). Требуемый уровень и доступность входных данных сильно различаются в зависимости от типа проекта, его местоположения и применяемого метода прогнозирования.

Метод прогнозирования также зависит от многих факторов (уровень доступности входных данных, тип проекта, место его расположения и т.д.).

Таблица 5.2. Виды экспертиз для обзоров ОВОС [119]

Науки	Инженерное дело	Социальные науки	Прочие дисциплины
Экологическая наука	Экологическая инженерия	Демография	Планирование чрезвычайных ситуаций

Биология, в том числе здоровье человека	Геотехнология	Право	Безопасность
Метеорология	Визуальная инженерия	Экономика	Управление проектами
Океанография	Акустика	Экологическая справедливость	Управление качеством
Гидрология	Застроенное землепользование	Археология и изучение культуры	Участие заинтересованных сторон
Геология	Сетевая инфраструктура	-	Управление разрешениями и лицензиями
Сейсмология	Электромагнетизм	-	-
Вулканология	Внешние техногенные события	-	-

ОВОС в целом и экспертиза отчета об ОВОС в частности является одним из направлений деятельности государственного управления в области окружающей среды, играющим важную роль в обеспечении гармоничного урегулирования взаимосвязи между социально-экономическим развитием и охраной окружающей среды. ОВОС проводится заказчиками, проектными организациями в целях [120]:

- всестороннего рассмотрения возможных последствий в области охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов и связанных с ними социально-экономических последствий, иных последствий планируемой деятельности для окружающей среды, включая здоровье и безопасность людей, животный мир, растительный мир, земли (включая почвы), недра, атмосферный воздух, водные ресурсы, климат, ландшафт, а также для объектов историко-культурных ценностей и (при наличии) взаимосвязей между этими последствиями до принятия решения о ее реализации;
- поиска обоснованных проектных решений (с учетом экологических и экономических факторов), способствующих предотвращению или

минимизации возможного воздействия планируемой деятельности на окружающую среду и здоровье человека;

- принятия эффективных мер по минимизации вредного воздействия планируемой деятельности на окружающую среду и здоровье человека;
- определения возможности (невозможности) реализации планируемой деятельности на конкретном земельном участке.

Материалы ОВОС являются документом, обобщающим результаты исследований по ОВОС реализации проектных решений по проекту ЦЯНТ и вариантов технических решений, проведенных на основании прогнозных оценок, государственных докладов, официальных баз данных, фондовых и литературных источников с привлечением экспертов по отдельным вопросам. В соответствии с Техническим заданием работа по ОВОС не предполагала проведение новых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также инженерно-экологических изысканий. При выявлении недостатка в исходных данных и других неопределенностей по оценке воздействия намечаемой деятельности на окружающую среду необходимо было описать данные неопределенности, оценить степень их значимости и разработать рекомендации по их устранению на последующих этапах проектирования [121].

Содержание и порядок изложения информации в материалах ОВОС должны быть структурированы и логически последовательны. Структура материалов ОВОС предполагает:

- последовательное рассмотрение всех элементов и факторов, взаимодействие которых ожидается в результате реализации инвестиционного проекта ЦЯНТ (виды и источники возможного воздействия, факторы природной среды, включая социально-экономические и медико-биологические аспекты);

- анализ природных закономерностей многочисленных процессов, протекающих в данном регионе, оценку существующего уровня нарушений и изменений и прогноз изменения состояния компонентов окружающей среды в результате реализации намечаемой деятельности в области атомной энергии.

ОВОС предусматривает активное участие общественности и обеспечивает учет общественного мнения при принятии окончательного решения о размещении ЦЯНТ и о его радиационной и экологической безопасности в процессе строительства, эксплуатации, модернизации и выводе из эксплуатации.

Основные положения Руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама с целью соблюдения требований Законов об охране окружающей среды (2020) и об атомной энергии (2008), международных договоров сформулированы на следующих принципах:

- акцентирование на технических инструкциях и рекомендациях по выполнению;
- включение в Руководство глав и разделов в соответствии со структурой отчета по ОВОС, указанной в Постановлении Правительства [122] и Циркуляре MONRE [123];
- структуризация глав Руководства в соответствии со следующими требованиями: цели четко определяют роль и значение каждой главы для отчета по ОВОС; используется принцип включения необходимых требований и инструкций, чтобы гарантировать необходимую полноту, научность и точность отчета по ОВОС; содержание каждой главы основывается на вьетнамских правилах, аналогичных руководящих документах МАГАТЭ и стран с развитой ядерной энергетикой;
- использование признанных в мире методов моделирования, расчета, конкретных данных, информации из действующих инструкций, исследовательских проектов и ОИАЭ ведущих стран мира.

5.2.2 Методы, применяемые при ОВОС

Для проекта ЦЯНТ ОВОС может проводиться следующими методами [124]:

❖ Метод полевого обследования и исследования

- Сбор документов и фактические изыскания, в том числе: топография, геология, метеорология, гидрология, социально-экономические условия, экосистемы и т.д.

- Сбор документов по инфраструктуре: водоснабжение и водоотведение; дорожная система; система связи; система электроснабжения; система сбора твердых отходов и т.д.

- Обследование текущего состояния природной среды на территории проекта: обследование текущего состояния качества атмосферного воздуха, поверхностных вод, подземных вод, земли, осадка и т.д.

❖ **Метод модели**

- Полуэкспериментальная модель для оценки выбросов пыли в связи с транспортными средствами на дорогах (согласно Air Chief, Агентство по охране окружающей среды США, 1995 г.).

- Модель для расчета концентрации выхлопных газов/выбросов от дорожных источников (модифицированная модель Саттона).

- Модели радиоактивного рассеяния.

❖ **Метод статистики**

Обработка и статистический анализ данных измерений и мониторинга по качеству атмосферного воздуха, шума, водной и почвенной среды на территории реализации проекта.

❖ **Метод анализа проб**

Метод анализа проб основан на вьетнамских стандартах и базовых стандартах лабораторий VILAS 519, VILAS 525 (достигающих стандартов ISO/IEC 17025:2008) Института ядерных исследований.

❖ **Метод перечисления**

- Перечисление воздействия на окружающую среду в результате строительных работ по проекту.

- Перечисление воздействия на окружающую среду, вызванные эксплуатацией проекта, в том числе факторы, вызывающие загрязнение

окружающей среды: сточные воды, выхлопные газы, твердые отходы, охрана труда, пожаровзрывоопасность, экологическая санитария.

- Прогноз воздействия на природную среду, на социально-экономический аспект на территории, вызванного проектной деятельностью.

❖ **Метод сравнения**

Сравнение технических и экономических выгод, выбор и предложение вариантов по минимизации воздействия проектной деятельности на окружающую среду, экономику и общество.

❖ **Метод экспресс-оценки**

На основе коэффициентов выбросов Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) для расчета загрязняющей нагрузки и оценки влияния источников загрязнения. Это очень полезный метод для ОВОС, особенно в тех случаях, когда невозможно определить конкретные расчетные параметры.

❖ **Экспертный метод**

Основано на знаниях и опыте в области наук об окружающей среде экспертов (или сотрудников), работающих в Институте ядерных исследований и некоторых других подразделений VINATOM.

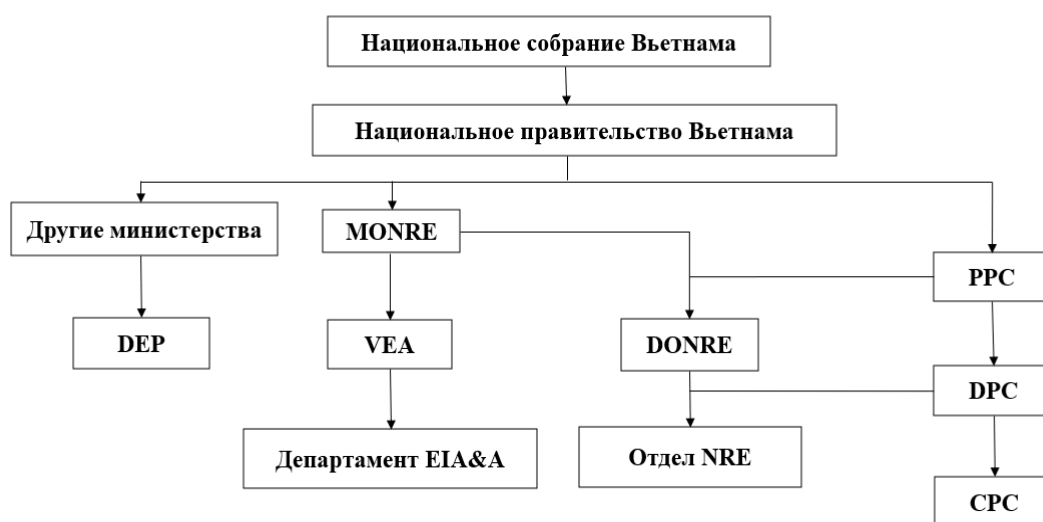
5.2.3 Регулирующие органы и правовая основа для подготовки и экспертизы отчета по ОВОС

МАГАТЭ обеспечивает стандарты безопасности для государств-членов и всех стран, использующих ядерную энергию. Это особенно необходимо для стран-новичков в ядерной сфере, таких как Вьетнам, для разработки стандартов ядерной безопасности, национальной нормативно-правовой базы по охране окружающей среды в области атомной энергетики и постепенного создания ЯИ для развития собственной атомной энергетики.

В настоящее время во Вьетнаме система юридических документов по ОВОС дополнена законами, постановлениями и циркулярами, регулирующими подготовку отчетов по ОВОС для различных типов инвестиционных проектов. Кроме того, Правительство создало аппарат государственного управления по

охране окружающей среды от центрального до местного уровня. В дополнение к MONRE, провинциальный народный комитет, другие министерства/секторы и отделы управления индустриальных зон также имеют право оценивать и утверждать отчеты по ОВОС. Административный орган определяется в зависимости от типа, местоположения и размера проекта. Административная основа Вьетнама для ОВОС показана на рис. 5.4.

Система ОВОС во Вьетнаме регулируется Законом об охране окружающей среды, Постановлением Правительства №08/2022/ND-CP [122] и Циркуляром MONRE №02/2022/ТТ-ВТНМТ [123]. Основные требования, предусмотренные в области безопасности ИЯР, установлены в Циркуляре MOST №05/2020/ТТ-ВКНСН [125].



MONRE: Министерство природных ресурсов и окружающей среды

VEA: Управление по охране окружающей среды Вьетнама

EIA&A: Оценка и экспертиза воздействия на окружающую среду

DEP: Департамент охраны окружающей среды

NRE: Природные ресурсы и окружающая среда

PPC: Народный комитет провинции

DPC: Народный комитет района

CPC: Народный комитет коммуны

Рисунок 5.4. Административная основа Вьетнама для ОВОС [126]

С помощью ОВОС можно определить и оценить воздействие ядерных установок на окружающую среду. Международные подходы и руководства указывают на то, что странам-новичкам в ядерной отрасли, таким как Вьетнам, необходимо обеспечить, чтобы национальная нормативно-правовая база по охране окружающей среды учитывала уникальные аспекты безопасности и

экологии, связанные с такой деятельностью. В частности, могут потребоваться изменения и/или дополнения существующих законов. Кроме того, необходимо будет законодательно определить обязанности природоохранного агентства и органа ядерного регулирования в области экологического надзора за ядерными установками, чтобы предотвратить дублирование обязанностей и свести к минимуму возможность задержки проекта.

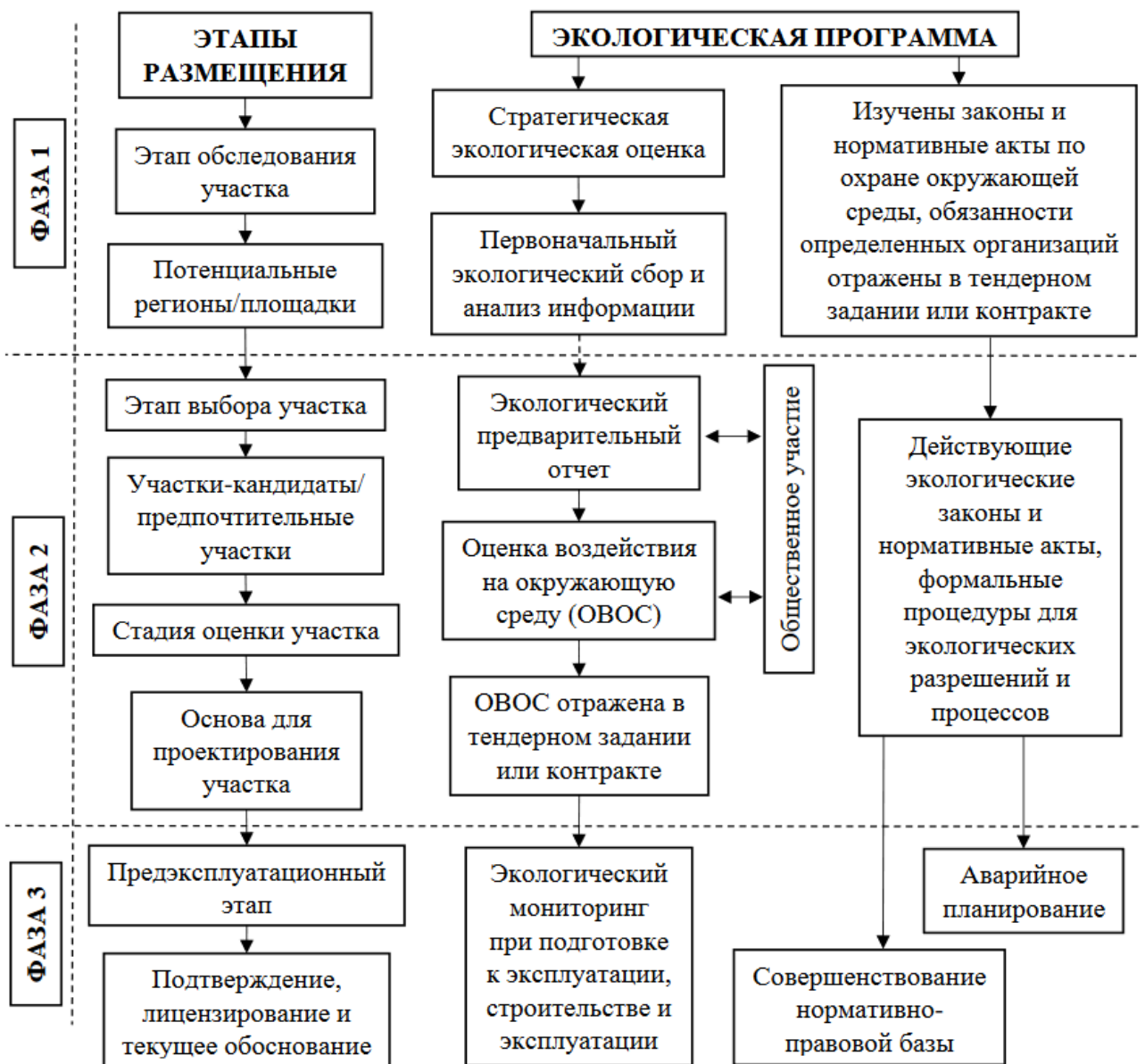


Рисунок 5.5. Поэтапный подход к решению экологических проблем в новых ядерно-энергетических программах [119]

Ядерная программа Вьетнама регулируется Законом по атомной энергии (2008). В этом Законе в Статье 38 «Утверждение площадки для строительства

ядерных объектов» говорится, что отчет по ОВОС является одним из обязательных документов, которые необходимо включить в Досье по согласованию для утверждения площадки строительства.

В постановлении Правительства Вьетнама [122] изложены общие положения для содержания отчетов по ОВОС для всех секторов производства. В Приложении I этого документа приведен перечень стратегий развития промышленности, национального планирования отраслей, для которых требуется стратегическая экологическая оценка (включая план развития атомной энергетики), а в Приложении III перечислены инвестпроекты группы I с высоким риском негативного воздействия на окружающую среду, указанные в Пункте 3 Статьи 28 Закона об охране окружающей среды, к которым относятся проекты строительства ОИАЭ. Однако конкретных регламентов по проведению ОВОС для объектов ИЯР (содержание, связанное с радиацией) не существует.

Поэтому потребовалось разработать отдельное Руководство по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС применительно к ЦЯНТ для повышения качества оценки и экспертизы. Особенностью проекта ЦЯНТ является наличие ядерного топлива, следовательно, необходимо использовать международные договоры и документы МАГАТЭ по ОВОС для ОИАЭ. При этом в ОВОС ЦЯНТ Вьетнама важно использовать опыт в реализации аналогичных проектов стран с развитой ядерной инфраструктурой (например, Россия, США, Япония, Корея и т.д.).

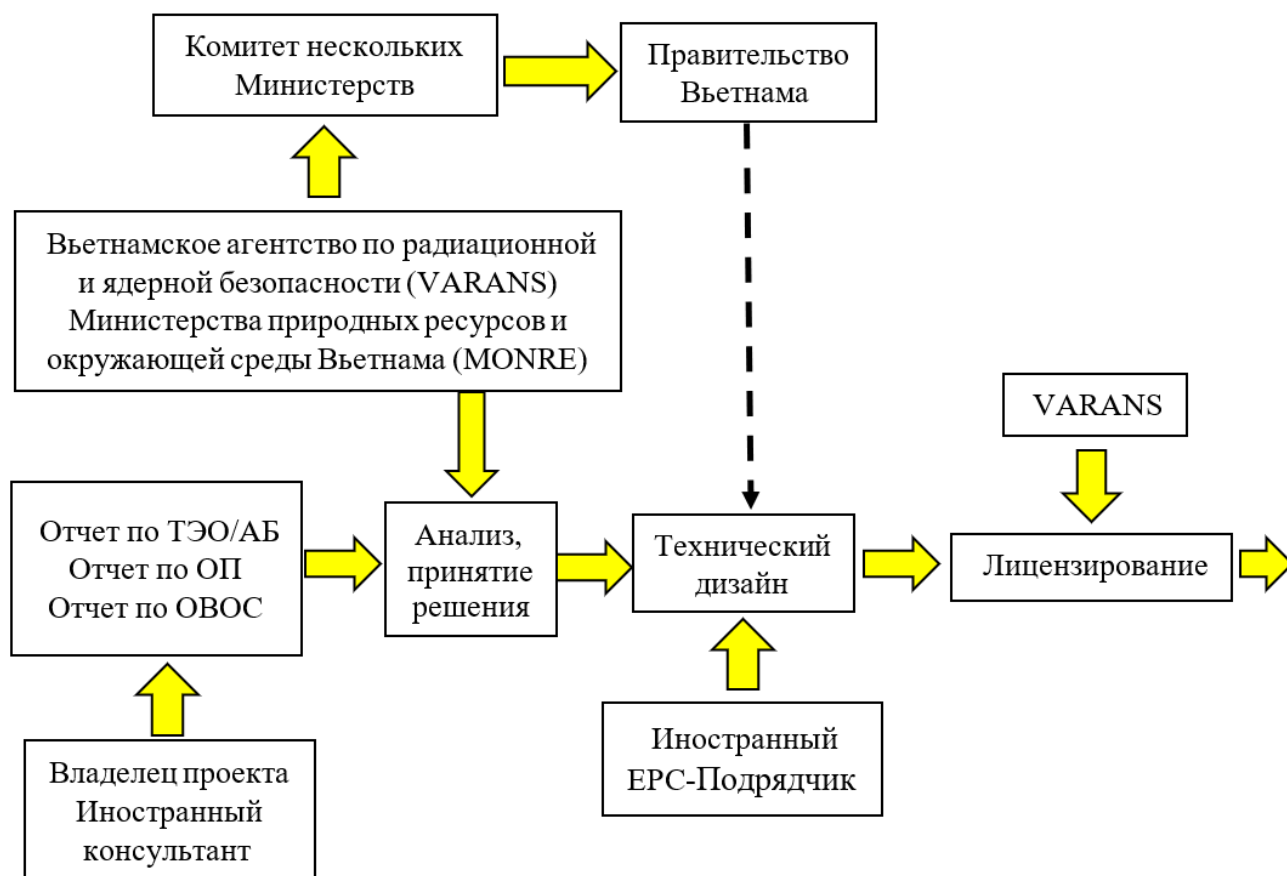


Рисунок 5.6. Нормативные процедуры для реализации проекта ЦЯНТ Вьетнама: ТЭО – технико-экономическое обоснование, АБ – анализ безопасности, ОП – оценка площадки, ОВОС – оценка воздействия на окружающую среду, ЕРС (от англ. Engineering, Procurement and Construction) – способ контрактования в строительной отрасли [127]

Далатский ИЯР находится в Далатском институте ядерных исследований, который является частью VINATOM. Во Вьетнаме существует несколько регулирующих органов, в соответствии с законодательством, но большинство функций по обеспечению безопасности, защиты и гарантий выполняет VARANS, которое находится в ведении MOST. VARANS занимается разработкой юридических документов, лицензированием, инспекцией, аварийным реагированием, обучением и обслуживанием национальной информационной системы, а также участвует в международном сотрудничестве в области радиационной безопасности и физической ядерной безопасности (рис. 5.6). Помимо VARANS и VINATOM продвигать использование ядерной энергии в стране поручено VAEA [128].

5.2.4 Формат и содержание Руководства по подготовке и экспертизе отчета по ОВОС

Благодаря использованию, анализу и исследованию вьетнамских и международных материалов (Указания MONRE, MOST, МАГАТЭ), а также правил и норм России, США в области использования атомной энергии мы обобщили и разработали основное содержание, требуемое в Руководстве по подготовке отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама.

Руководство по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ создается в соответствии с документами Республики Вьетнам [122, 123]; документами о руководстве по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС Агентства по охране окружающей среды США (U.S. EPA) [129], Комиссии по ядерному регулированию США (U.S. NRC) [130], РФ [131], ЕС [132], МАГАТЭ [133–135], при сотрудничестве с Департаментом по экспертизе и оценке воздействия на окружающую среду, MONRE и группой экспертов-экологов Вьетнама. Эти документы предназначены для руководства по подготовке и экспертизе содержания отчета об ОВОС на основе следующих критериев: полнота, актуальность, достоверность входной информации, методы оценки.

Руководство по подготовке отчета по ОВОС состоит из следующих основных частей: введение; краткое описание проекта (Глава 1); природные, социально-экономические условия и текущее состояние окружающей среды на территории проекта (Глава 2); оценка и прогноз воздействия проекта на окружающую среду, а также предложение мер и работ по охране окружающей среды и реагированию на чрезвычайные экологические ситуации (Глава 3); программа экологического менеджмента и надзора (Глава 4); результаты консультации (Глава 5); заключение, предложения и обязательства [136].

Руководство по экспертизе отчета об ОВОС состоит из девяти основных частей-экспертиз по «Досье, представленному для экспертизы отчета об ОВОС»; «Основанию для проведения ОВОС» (например, правовые основания, технические основания и т.д.); «Краткому описанию проекта» (общая информация о проекте, строительных предметах, технологии производства,

эксплуатации и т.д.); «Описанию природных, социально-экономических условий и текущего состояния окружающей среды на территории реализации проекта»; «ОВОС» (этап строительства, ввода в эксплуатацию и вывода из эксплуатации); «Мерах по предотвращению, минимизации негативных воздействий и предупреждению, реагированию экологических происшествий»; «Программе экологического менеджмента и надзора»; «Консультации с общественностью»; «Заключению, предложениям и обязательствам» [137].

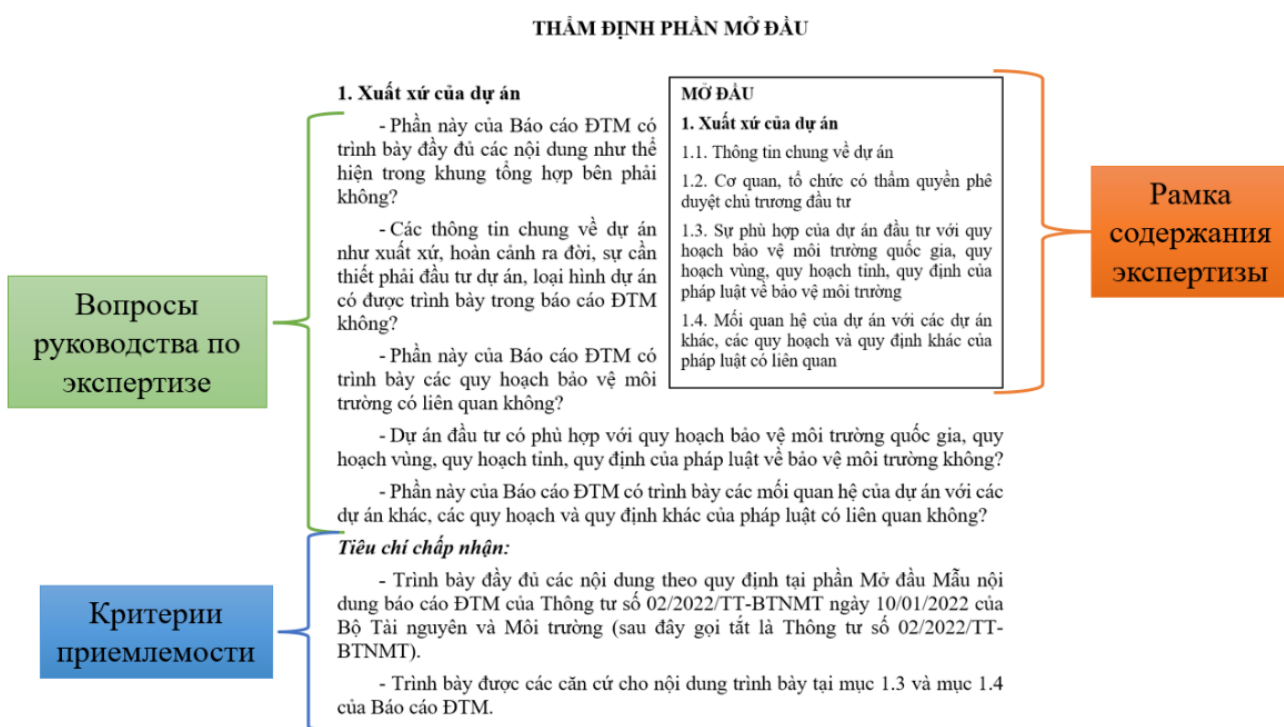


Рисунок 5.7. Структура Руководства по экспертизе отчета об ОВОС

Структура представления руководства по экспертизе включает в себя: название содержания экспертизы, определяющее объем экспертизы; вопросы; требования к содержанию, которое должно быть представлено/описано; критерии приемлемости, требования; процесс экспертизы; результаты оценки.

5.2.5 Вопросы, которые необходимо учитывать в связи с радиологическим аспектом при подготовке и экспертизе отчета об ОВОС

Оценка радиологического воздействия на окружающую среду направлена на подтверждение того, что радиологическая доза за пределами площадки от

радиоактивного материала, выброшенного с объекта, не превышает нормативных критериев в целях укрепления здоровья и безопасности жителей вокруг ядерных объектов. В таблице выше приведен пример содержания отчета об радиологической ОВОС.

Таблица 5.3. Пункты радиологической ОВОС для получения разрешения на эксплуатацию [138]

Предметы	Содержание
1. Обзор плана строительства	1.1 Необходимость строительства / 1.2 Основание для ОВОС / 1.3 Ход работ / 1.4 План строительства / 1.5 Причина выбора площадки
2. Экологическое состояние	2.1 Статус площадки / 2.2 Землепользование / 2.3 Использование моря / 2.4 Погода и атмосферная диффузия / 2.5 Диффузия воды и водосборных бассейнов / 2.6 Океаническая и морская диффузия / 2.7 Население / 2.8 Радиация окружающей среды/эксплуатационное состояние
3. Состояние ядерной установки	3.1 Внешний вид / 3.2 Реакторы и паровые электрические системы / 3.3 Хранилище топлива / 3.4 Система обращения с РАО / 3.5 Источник излучения
4. Воздействие от строительства	4.1 Модель расчета дозы / 4.2 Допущения для расчета дозы / 4.3 Расчет дозы / 4.4 Сводная информация о годовой дозе облучения
5. Воздействие от эксплуатации	5.1 Путь облучения / 5.2 Оценка дозы облучения
6. Воздействие аварий	6.1 Предположения об аварии / 6.2 Источник излучения / 6.3 Метод оценки / 6.4 Оценка экспозиционной дозы / 6.5 Меры по защите населения
7. План экологического мониторинга	7.1 Мониторинг окружающей среды до начала эксплуатации / 7.2 Мониторинг окружающей среды во время эксплуатации
8. Общая оценка	8.1 Обзор / 8.2 Оценка по каждому конкретному случаю / 8.3 Результаты оценки



Рисунок 5.8. Компоненты оценки радиологического воздействия на окружающую среду для защиты населения при нормальной эксплуатации (а), и оценки для рассмотрения потенциального облучения (б) [118]

5.2.5.1 Воздействие радиоактивных элементов на этапе строительства

Содержание, которое нужно упомянуть:

а) Источники, вызывающие воздействия: В этом разделе необходимо представить радиоактивные источники и радиационное оборудование, которое предполагается использовать при строительстве, например, радиоактивные источники, радиационно-опасное оборудование, используемое в целях контроля качества сварных соединений и металла (радиография).

б) Оценка воздействия радиоактивных источников и радиационно-опасного оборудования на здоровье человека и окружающую среду: Оценка воздействия при использовании, транспортировке и хранении радиоактивных источников и радиационно-опасного оборудования. Оценка эффективной дозы для персонала и населения от вышеуказанных деятельности (уровень воздействия оценивается на основе сравнения с нормативами о предельных дозах профессионального облучения, дозы облучения населения).

в) Оценка воздействия транспортных происшествий: аварии при транспортировке ядерного топлива, радиоактивных источников.

г) Меры по защите окружающей среды для радиационной деятельности при строительстве: Представление мер, соответствующих принципу ALARA (в частности: время контакта, экранирование, расстояние). Предварительное представление мер по предотвращению и реагированию на возможные радиационные и ядерные инциденты, риски и аварии.

Оценочные вопросы:

На этапе строительства проекта, некоторые работы, связанные с радиационным воздействием, требуют использования радиоактивных источников и радиационно-опасного оборудования для геологической оценки, качества строительства и т.д. Это работы не входят в рамки проекта. Эти радиационно-опасные работы будут оцениваться с точки зрения безопасности и лицензироваться отдельно. Таким образом, экспертиза в этом разделе сосредоточена на следующих моментах: в разделе должен быть полный перечень радиационно-опасных работ; должно быть подтверждение соответствия условий выполнения этих работ требованиям норм и правил, касающихся лицензирования на проведение радиационно-опасных работ.

Критерии приемлемости:

(1) Соответствие положениям Закона об атомной энергии (2008 г.); (2) Полное выполнение требований по разъяснению оценки воздействия на этапах строительства [123]; (3) Отчет об ОВОС должен содержать конкретную оценку воздействия на социально-экономические и экологические проблемы; (4) Воздействия должны оцениваться конкретно для потенциально затрагиваемых объектов, с уточнением уровня воздействия, пораженного диапазона; (5) Уровень воздействия должен оцениваться на основе национальных стандартов и технических регламентов на окружающую среду; (6) Радиационно-опасные работы, перечисленные в разделе, должны соответствовать положениям о лицензировании проведения таких работ [139]); (7) Полное описание

потенциальных радиационных рисков и инцидентов при проведении радиационно-опасных работ.

5.2.5.2 Воздействие радиоактивных элементов на этапе опытной эксплуатации

Информация, которую необходимо указать:

а) Источники, вызывающие радиационное воздействие: Транспортировка и загрузка ядерного топлива; радиоактивные выбросы (содержание, описанное в этом разделе, должно отражать масштаб, характер и уровень воздействия от источников, вызывающих потенциальное радиационное облучение).

б) Оценка соответствия технических параметров устройств мониторинга и предупреждения по дизайну для радиоактивных элементов: Оценка наличия проектных устройств мониторинга и предупреждения для радиоактивных элементов; Проверка соответствия технических параметров при опытной эксплуатации (включая оценку параметров газовых и водяных выбросов из реактора; измерение и оценку мощности дозы внутри и снаружи реакторного здания в установленных точках мониторинга) [140].

в) Оценка потенциальных проблем во время опытной эксплуатации: В этом разделе необходимо представить потенциальные проблемы, которые могут возникнуть во время опытной эксплуатации и оценить уровень воздействия. Особое внимание следует уделить процессу транспортировки топлива и загрузки топлива в реактор.

Оценочные вопросы:

(1) Достаточно ли в этой части отчета об ОВОС представлены источники, вызывающих воздействия от радиоактивных элементов?; (2) Представлена ли в этой части отчета об ОВОС оценка о степени влияния источников, вызывающих радиационное воздействия (в зоне контроля, зоне мониторинга и жилой зоне)?; (3) Подходят ли приборы для мониторинга радиоактивных элементов, методы оценки воздействия из радиоактивных элементов?

Критерии приемлемости:

(1) Полное представление ожидаемых источников воздействия по дизайну; меры по предотвращению, реагированию и минимизации негативных воздействий на этапе опытной эксплуатации; (2) Параметры выбросов радиоактивных отходов, представленные в отчете об ОВОС, должны соответствовать отчету ТЭО (содержание, связанное с дизайном); (3) Инциденты (радиоактивные, нерадиоактивные) полностью представлены в соответствии с Отчетом ТЭО (содержание, связанное с дизайном). Примечание: Это содержание будет переоценено в процессе оценки, чтобы выдать официальную лицензию на эксплуатацию и будет обновлено в отчете об ОВОС.

5.2.5.3 Воздействие радиоактивных элементов на этапе нормальной эксплуатации

Сведения, которые необходимо указать:

а) Источники, вызывающие воздействие (свежее и отработавшее ядерное топливо; радиоактивные отходы (твердые, жидкие, газообразные); процесс производства фармацевтических субстанций, радиоизотопов; научно-исследовательская деятельность; продукты облучения из реактора) и указать количество и характер каждого типа радиоактивных отходов (РАО), возникающих в результате эксплуатации.

б) Спрос и уровень потребления ядерного топлива, продукции и образующихся радиоактивных отходов: Необходимо представить потребность в свежем ядерном топливе (годовая, максимальный резерв); уровень потребления ядерного топлива, статистика радиоактивной в выгоревшем топливе; количество радиоактивных веществ для фармацевтических субстанций и продуктов облучения в реакторе; количество образующихся РАО (включая твердые, жидкие и газообразные отходы).

в) Метод оценки потребности в свежем ядерном топливе, общей радиоактивной активности, количества образующихся РАО (твердых, жидких, газообразных); метод оценки рассеяния радиоактивных веществ в водной и воздушной среде.

г) Оценка воздействия указанных радиоактивных элементов на персонал, население, окружающая среда - экология (воздух, почва, вода, животные, растения).

Оценочные вопросы:

(1) Полностью ли в этой части отчета об ОВОС представлены радиоактивные элементы (радиоактивные источники, ядерное топливо, радиоактивные отходы и т.д.) вместе с их характеристиками, свойствами и радиоактивным составом от деятельности исследовательской реакторной установки?; (2) Сопровождается ли эта часть отчета об ОВОС диаграммой, показывающей расположение точек происхождения источников радиоактивных выбросов?; (3) Представлена ли в этой части отчета об ОВОС оценка о степени влияния источников, вызывающих радиационного воздействия (в зоне контроля, зоне мониторинга и жилой зоне)?; (4) Представлены ли в этой части отчета об ОВОС варианты хранения и обработки радиоактивных веществ, РАО и ядерного топлива?; (5) Представлены ли в этом разделе отчета об ОВОС методы расчета и оценки источников выбросов?; (6) Представлены ли в этом разделе отчета об ОВОС методы оценки воздействия на объекты (персонал, общественность, окружающая среда, существо)?

Критерии приемлемости:

(1) Соответствие требованиям к оценке воздействия на этапе эксплуатации проекта [123]; (2) Соблюдение положения Циркуляров MOST [141–143]; (3) Уровень воздействия должен оцениваться на основании технических регламентов на окружающую среду. Примечание: Расчетные методы и модели, входные параметры и условия расчета учитывались в процессе проектирования. Таким образом, экспертиза в этом разделе только ограничивается при оценке соответствия результатов, представленных в отчете об ОВОС, положениям закона, например, для зон контроля, зон мониторинга и уровней выбросов газа и жидкости в окружающую среду. Эти результаты будут проверены еще раз путем выездной комиссией в процессе лицензирования для эксплуатации. Эти результаты будут обновлены в отчете ОВОС.

5.2.6 Результаты и их обсуждение

У Вьетнама есть длительный опыт управления, безопасной и эффективной эксплуатации ИЯР. Вьетнам полностью освоил вопросы ядерной науки и техники в производстве импортозамещающих радиоактивных фармацевтических препаратов для удовлетворения внутренних и экспортных потребностей. В технологической революции 4.0, помимо незаменимой роли в диагностике и лечении опасных заболеваний людей, радиоактивные изотопы из ядерных реакторов также играют решающую роль во многих областях, таких как: облучение, обслуживающее экспорт сельскохозяйственной продукции; подтверждение качества и трекинг пищевых продуктов и продуктов питания; неразрушающая оценка; оценка водных ресурсов; исследовательская гидрогеология, инженерная геология; защита окружающей среды и т.д. Далатский ИЯР сможет эксплуатироваться примерно до 2028 г., когда израсходуется имеющееся ядерное топливо. Он станет одним из реакторов с самым долгим сроком службы в мире. Необходимо строительство ЦЯНТ для развития атомной науки и техники страны с почти 100-миллионным населением (к 2025 г.), чтобы не только сохранить, но и расширить применение ядерных технологий, производство радиоизотопов обеспечить подготовку специалистов для использования ядерной энергии во Вьетнаме [144].

Сооружение ЦЯНТ станет новой вехой в развитии атомной науки и техники Вьетнама. Страна будет иметь региональный ядерный исследовательский центр с современным оборудованием. Проект будет иметь множество социально-экономических положительных последствий за счет содействия применению ядерных технологий в здравоохранении, промышленности и сельском хозяйстве; и будет местом встречи сотен вьетнамских и международных ученых и специалистов в ядерной сфере для работы и проведения научных исследований, развития технологий и подготовки кадров. Успешная реализация этого проекта улучшит ЯИ Вьетнама и станет надежной ступенькой для дальнейшего развития атомной энергетики.

При разработке Руководства автор диссертации в составе группы вьетнамских специалистов из VINATOM использовал системный подход. Проведенные работы включают: сбор документов, результатов отечественных и зарубежных исследований; анализ и оценка используемых методов и результатов соответствующих исследований, которые были проведены, чтобы служить основой для выбора методов, соответствующих фактическим требованиям, а также для преодоления ограничений предыдущих работ.

Некоторые важные этапы:

- Обзор документов МАГАТЭ по контролю и оценке воздействия ОИАЭ на население и окружающую среду; правовых норм России, США, ЕС об ОВОС по радиологическом аспекте для объектов использования атомной энергии при плановом облучении и аварийных ситуациях;
- Обзор и анализ, оценка норм и правил радиационной безопасности МАГАТЭ, Вьетнама, России, США, ЕС применительно к ОИАЭ;
- Обобщение правовых основ по ОВОС Вьетнама, разработка информационных контенты о проекте, которые должны быть представлены в отчете по ОВОС;
- Обобщение правовых основ и разработка содержания, которое необходимо оценить для природных, социально-экономических условий и текущего состояния окружающей среды на территории реализации проекта;
- Обобщение правовых основ по оценке воздействия нерадиоактивных и радиоактивных отходов на людей и окружающую среду;
- Обобщение содержания, относящегося к нерадиоактивным и радиоактивным отходам (твердым, жидким, газообразным) проекта, которые необходимо оценить и спрогнозировать воздействие на окружающую среду и людей; работам, мерам по сбору, хранению и обращению с радиоактивными и нерадиоактивными отходами; программе экологического менеджмента и надзора.

Учитывая все вышеизложенное, мы обобщили и разработали основное содержание, требуемое в Руководстве по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ Вьетнама, а также уточнение радиологических аспектов, которые следует учитывать в руководстве по подготовке и экспертизе этого отчета в соответствии с вьетнамскими законами, нормами, правилами и требованиями, а также с учетом международного опыта и рекомендаций экспертов МАГАТЭ.

Кроме того, авторы обобщили некоторые ключевые моменты содержания, на которые Вьетнаму необходимо обратить внимание в связи с вопросом «Ограничение, контроль дозы и риска» при экспертизе отчета об ОВОС: контроль облучения в случае радиационных, ядерных аварий и других особых случаев; оценка и контроль потенциального облучения; оценка по уровневому подходу; оценка кумулятивного воздействия; оценка трансграничного воздействия; правила обращения с отходами и использованными радиоактивными источниками; правила готовности и реагирования на радиационные и ядерные инциденты; радиационный мониторинг окружающей среды. При этом необходимо обращать внимание на технические стандарты/правила, применяемые при анализе проб окружающей среды: анализ радионуклидов в пробах почвы, воды, воздуха, растений, продуктов питания и в пищевых пробах; анализ общей альфа- и бета-активности в пробах воды, почвы и воздуха; измерение мощность дозы гамма-излучения в окружающей среде.

Что касается действующих стандартов/правил Вьетнама в области атомной энергетики, в процессе изучения и осмысления документов МАГАТЭ и развитых стран с развитой атомной энергетикой в мире, авторы обнаружили, что перечень стандартов/правил этих стран очень разнообразен, довольно много документов, которых нет во Вьетнаме. Следовательно, изучение этих документов крайне необходимо для уточнения соответствия нормативных актов Вьетнама и дополнения недостающего содержания, позволяющего применять их во Вьетнаме. В то же время авторы предполагают, что Вьетнаму

необходимо изучить и разработать новые стандарты/правила, аналогичные другим странам, подходящие для условий Вьетнама; и создать четкую, методичную, последовательную систему правовых документов, в соответствии с мировыми стандартами, которая будет использоваться в будущем, когда атомная энергетика Вьетнама будет развиваться.

5.3 Планы и результаты подготовки людских ресурсов в области атомной энергетике Вьетнама до и после остановки проекта АЭС Ниньтхуан

5.3.1 Резюме результатов обучения в соответствии с утвержденными проектами по обучению кадров

- По вопросам бакалавриата и послевузовского обучения была поручена реализация проекта [145]. С 2010 по 2018 гг., Министерство образования и профессиональной подготовки (МОЕТ) Вьетнама направило 447 студента для обучения на университетском уровне в области атомной энергетике в России; в Венгрию направило более 200 кадров и преподавателей из университетов для проведения фундаментальных исследований в области атомной энергетике.

- О подготовке кадров по управлению, исследованию, развертыванию и технической поддержке. В соответствии с планом [146], MOST утвердило и реализовало План по обучению кадров для развития атомной энергетике с 2015 по 2016 гг., а также организовало 46 учебных курсов в стране и за рубежом для около 420 сотрудников соответствующих Министерств и ведомств.

- О подготовке кадров для проектов АЭС в провинции Ниньтхуан. Для реализации проекта [147], EVN направила на обучение более 275 студентов для АЭС «Ниньтхуан-1»: самостоятельно обучились 31 человек (29 человек в РФ и 2 человека во Франции); 244 человека были направлены МОЕТ в рамках проекта [145]); направила 24 человека в Японию на двухлетнее обучение, чтобы они стали основным персоналом АЭС «Ниньтхуан-2». Кроме того, EVN организовала множество внутренних семинаров для более чем 500 кадров, а

также направила множество сотрудников на краткосрочные курсы обучения менеджменту и инженерии в Японию, Южную Корею, США, РФ и т.д.

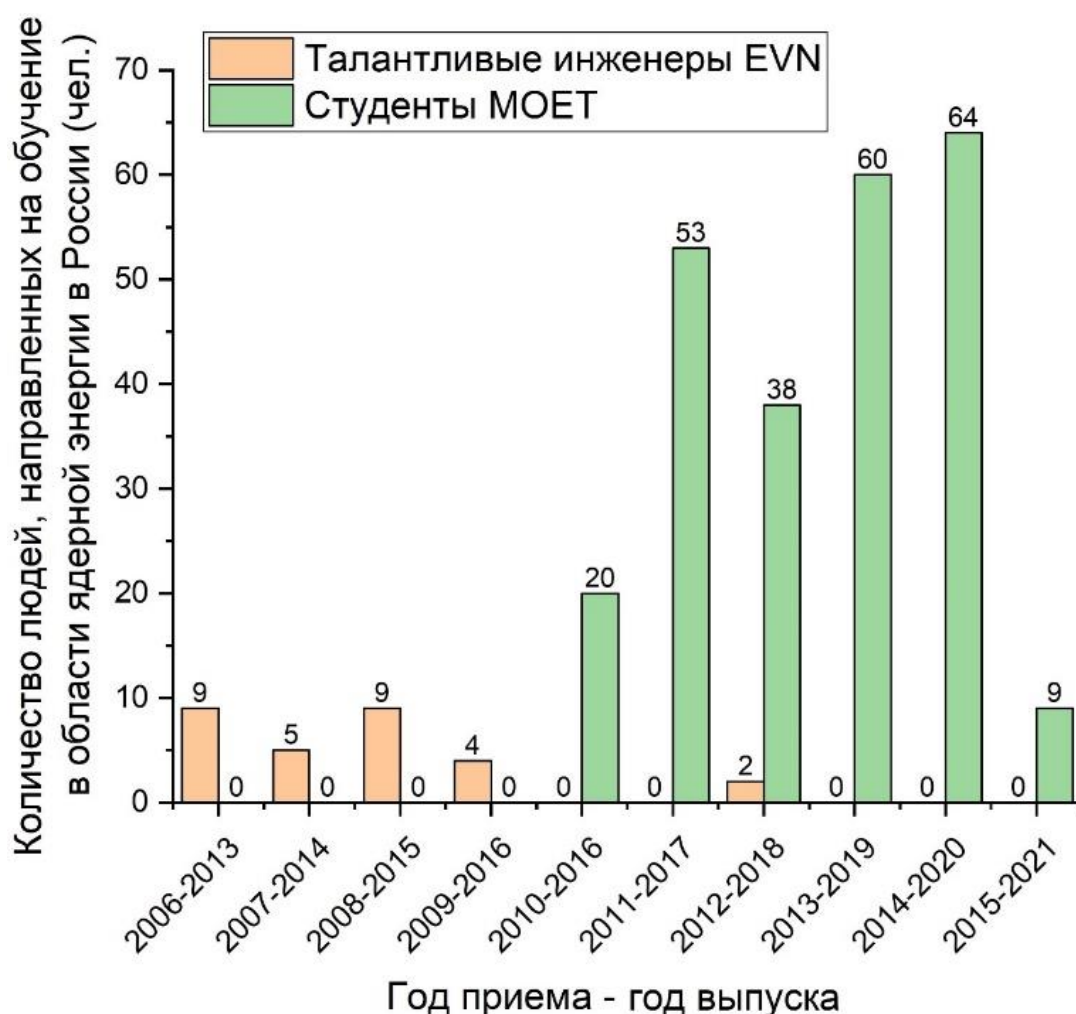


Рисунок 5.9. Количество людей, направленных на обучение в области ядерной энергии в России по данным электроэнергетической корпорацией Вьетнама (EVN): Талантливые инженеры EVN – высококвалифицированные инженеры, тщательно отобранные корпорацией EVN для отправки на обучение за границу; Студенты МОЕТ¹⁵ – студенты Министерства образования и профессиональной подготовки Вьетнама (МОЕТ) [148]

5.3.2 План приема и распределения на работу вьетнамских выпускников в России перед остановкой проекта АЭС Ниньтхуан

5.3.2.1 Общая оценка

- Количество инженеров/специалистов, имеющих опыт работы в области управления, строительства и эксплуатации АЭС EVN невелико, особенно что

¹⁵ В период 2010–2018 гг. Министерство образования и профессиональной подготовки Вьетнама (МОЕТ) направило 447 студента в Россию для обучения по специальностям, связанных с ядерной энергетикой, из которых 244 студента подписали обязательство с EVN (по состоянию на 16.03.2016), что после окончания учебы вернутся и будут работать в проекте АЭС Ниньтхуан (среди них 88 студентов из Ниньтхуана).

касается инженеров по специальности атомной энергии, прошедших обучение за рубежом. Следовательно, прием этих инженеров станет для EVN дополнительным источником высококвалифицированных кадров в области атомной энергетики.

- Для персонала, работающего в атомной энергетике, помимо прохождения профессиональной подготовки в отечественных и зарубежных вузах, непрерывное обучение в процессе работы по специальности и по другим необходимым вспомогательным навыкам (например, работа с правовыми документами, связанными с атомной энергетикой; дисциплина и индустриальный стиль для работы в атомной энергетике) имеет большое значение для успеха в строительстве и эксплуатации первой АЭС во Вьетнаме. Следовательно, прием на работу этих выпускников-атомщиков сразу после их окончания учебы создаст благоприятные условия для непрерывного и системного продолжения их обучения, тренировки и подготовки необходимым знаниям.

- Рабочая среда в области атомной энергетики, в целом, и управления проектами, эксплуатации и обслуживания АЭС, в частности, отличается от других традиционных источников энергии из-за культуры безопасности (КБ). МАГАТЭ регулярно выпускает рекомендации и заботится об этом вопросе. Следовательно, прием на работу этих выпускников сразу после окончания вуза открывает для них возможность работать прямо в среде корпоративной культуры EVN, EVNNPB. Это помогает персоналу на ранних стадиях формировать мышление и рабочие привычки в соответствии с высокими стандартами КБ, физической безопасности и защиты.

5.3.2.2 Распределение на работу

После приема, исходя из опыта персонала и фактической ситуации проекта АЭС «Ниньтхуан-1», EVNNPB поручит новым кадрам соответствующую работу. В то же время EVNNPB будет координировать свои действия с международными и отечественными организациями и учебными программами EVN для планирования и реализации необходимых учебных

курсов, в том числе: обучение на рабочем месте; практическое рабочее обучение в Далатском институте ядерных исследований, VINATOM; обучение на ТЭС-проектах EVN; обучение английскому языку и т.д. Данные меры способствуют поддержанию и повышению квалификации новых кадров, их знаний и других навыков в области управления проектами, подготовки производства, эксплуатации и обслуживания АЭС «Ниньтхуан-1».

Некоторое конкретное содержание заключается в следующем [149]:

- Назначение новых инженеров для работы в Отделе подготовки производства для выполнения основных задач, таких как: разработка правил и процедур по эксплуатации и техническому обслуживанию АЭС; участие в управлении качеством строительно-монтажных работ по категории объектов строительства и оборудования АЭС «Ниньтхуан-1» и подготовка к приему и эксплуатации энергоблоков АЭС; практика по эксплуатации, ремонту и техническому обслуживанию на ТЭС; и участие в соответствующих учебных курсах для подготовки к приему и эксплуатации всей АЭС.

- Назначение новых инженеров для работы в подразделениях Отдела управления проектами (ОУП) с функциями и обязанностями по непосредственному управлению работ по инвестициям и строительству проекта АЭС «Ниньтхуан-1». А именно:

- Организационно-кадровый отдел: выполнение задач, связанных с обучением и развитием людских ресурсов; обеспечением безопасности и физической защитой ядерных материалов; подготовкой команды к приему Учебно-тренировочного центра АЭС «Ниньтхуан-1» в провинции Ниньтхуан.

- Планово-экономический отдел: выполнение задач, связанных с проведением торгов; подготовкой договоров на строительно-монтажные работы; закупочной деятельностью и управлением материалами и оборудованием при проектировании, строительстве и эксплуатации АЭС.

- Технический отдел: выполнение задач, связанных с техническим управлением по прогрессу и объему работы, технической поддержке и контролю качества.

- Правовой отдел и отдел безопасности: выполнение задач, связанных с ядерной безопасностью; радиационной безопасностью при строительстве и монтаже, пуско-наладочных работах, эксплуатации; и с работами, связанными с ядерным правовым управлением, на разных этапах проекта.

5.3.2.3 Программы обучения

Программы обучения проводятся с целью повышения квалификации, навыков выпускников из России, которым по-прежнему не хватает практических знаний и опыта в области управления проектами, надзора за строительством, монтажа оборудования, строительства и эксплуатации завода. Таким образом, после приема и назначения работы, обучение будет развернуто ОУП своевременно и в соответствии с ходом реализации проекта со следующим конкретным содержанием:

Обучение в соответствии с содержанием Проекта [147]:

Программы обучения в рамках Проекта [147] в основном связаны с работой по обучению после трудоустройства, направленной на повышение квалификации персонала, участвующего в управлении проектами; а также на обеспечение подготовки вводимого персонала и передачи их ЕРС-подрядчикам для обучения эксплуатации и обслуживанию АЭС и включает в себе:

- Курсы общей подготовки: персонал, участвующий в проекте АЭС Ниньтхуан (включая персонал, эксплуатирующий, обслуживающий и ремонтирующий АЭС), должен пройти курс обучения общим знаниям. Учебные курсы включают в себя: обучение мягким навыкам¹⁶; обучение культуре безопасности; обучение по работе АЭС, технологиям АЭС и безопасности АЭС. Внутренние и международные семинары и учебные курсы по актуальным темам для каждого этапа проекта будут проводиться ежегодно в рамках программы сотрудничества с МАГАТЭ международными организациями и странами, развившими атомной энергетики.

- Обучение управлению и консалтингу включает в себя:

¹⁶ Мягкие навыки (soft skills) — это универсальные компетенции, которые помогают решать различные жизненные задачи и взаимодействовать с окружающими людьми и миром вокруг.

- Учебный курс В2.2: обучение знаниям по ТЭС и стажировку в ОУП по ТЭС-проектах EVN для инженеров ОУП. Ориентировочное время обучения по каждому курсу от 5-6 месяцев, ежегодное обучение по плану;

- Учебный курс В2.3: для персонала ОУП, непосредственно управляющим проектом АЭС Ниньтхуан. Ориентировочное время обучения в течение 3 месяцев на АЭС стран-партнеров, непосредственное участие в ряде должностей по управлению строящимися атомно-энергетическими проектами под руководством и наставничеством опытных зарубежных специалистов для пополнения знаний по моделям практического обучения на рабочем месте (ОJT) об управлении проектами;

- Учебный курс В3.1: обучение персонала навыкам эксплуатации и обслуживания для повышения практических знаний посредством краткосрочных курсов обучения на действующих ТЭС во Вьетнаме.

- Курс обучения навыкам эксплуатации, обслуживания и ремонта включает: (1) Подготовку ключевого персонала для проекта АЭС «Ниньтхуан-1»: подбор инженеров для участия в 2-летней программе обучения в России. Ожидается, что с 2023 г. 200 инженеров будут разделены на 6 групп; (2) Обучение персонала навыкам обслуживания и ремонта сроком на 6 месяцев в России, ожидается с 2025 г.

Содержание обучения, относящееся к области атомной энергетики, спонсируется отечественными и международными организациями:

Через программы двустороннего сотрудничества со странами, развившими атомной энергетикой, ежегодно многие краткосрочные учебные курсы организуются и спонсируются Японией, РФ, МАГАТЭ и т.д. Данные программы нацелены на проработку культуры безопасности, управления воздействия на окружающую среду, управления проектами по ЕРС-контракту, на работу по общественному одобрению проектов атомной энергетикой, по физической защите объектов и т.д. С российской стороны, краткосрочные курсы обучения возможны через координацию сотрудничества с рабочей группой Росатома.

Внутреннее обучение для повышения знаний и квалификации персонала ОУП (EVNNPB):

- Вводное обучение новых выпускников для их более тщательного ознакомления с работой ОУП, EVN. Данное обучение также необходимо, чтобы вооружить выпускников знаниями по управлению проектами, связанных с законами, указами, циркулярами, положениями, правилами EVN, ОУП;

- Подготовка, профессиональная переподготовка и повышение квалификации: ежегодно ОУП организует обучение по подготовке кадров к управлению проектами, к работе с базовыми тендерами и по стройнадзору;

- Ежегодно ОУП организует для персонала курсы базового и повышенного обучения русскому языку по специальности атомной энергетики;

- Обучение практической рабочей программе на крупных ТЭС-проектах EVN по «управлению проектами» и «консультацией, надзору за качеством строительства». Особенно важно практическое обучение на рабочем месте (ОJT) посредством внутренних семинаров с передачей знаний от экспертов разных подразделений, которые долгое время работали в ОУП.

- Дополнительное обучение базовым знаниям в области электротехники; механики; сварочной технологии и техники; материалов изготовления оборудования; строительства; принципов и структуры систем насосов высокого давления, систем подачи охлаждающей воды и т.д.

- Обучение основному содержанию контрактов с иностранными партнерами (FIDIC-контракты) в сфере строительства; передача опыта управления и выполнения международных контрактов, разработка EPC-контрактов по проектированию, изготовлению, поставке, строительству и монтажу и т.д. для проекта АЭС. Особое внимание уделяется OJT обучению в повседневной работе. Опытные сотрудники, эксперты будут непосредственно инструктировать и обучать на рабочем месте нового персонала.

- В процессе обучения, необходимо интегрировать знания по культуре ядерной безопасности в целях повышения сознательности, осведомленности и ответственности на работе для нового персонала, работающего в этой сфере.

5.4 Разработка и подготовка к изданию специализированной учебной русско-вьетнамской литературы для подготовки специалистов для атомной отрасли Вьетнама

5.4.1 Общие сведения

Согласно Решениям Премьер-министра [150, 151] Вьетнам должен был построить АЭС мощностью 2000–4000 МВт к 2020 г. Предполагалось, что строительство первой АЭС Вьетнама начнется в 2014 г. (проект «АЭС-92», два блока с ВВЭР-1000). Планировался пуск первого блока АЭС «Фьюкзинь» до 2020 г., второго – до 2021 г.; других АЭС – до 2030 г. Ядерная энергетика должна была стать важной составляющей национальной электроэнергетики.

После аварии в 2011 г. на АЭС «Фукусима-1» все вопросы, связанные с обеспечением безопасности будущей АЭС, исследовались повторно. АЭС «Фьюкзинь» была переименована в АЭС «Ниньтхуан-1», АЭС «Виньхай» была переименована в АЭС «Ниньтхуан-2». АЭС «Ниньтхуан-1» должна была стать первой АЭС во Вьетнаме (рис. 5.10).



Рисунок 5.10. Проект АЭС «Ниньтхуан-1» во Вьетнаме

Проект АЭС «Ниньтхуан-1» реализуется очень осторожно после аварии на АЭС «Фукусима-1» с целью для того, что найти самые безопасные варианты для первой АЭС Вьетнама. В этом проекте предусмотрены активные и пассивные системы безопасности, которые предотвращают развитие любых аварийных ситуаций. В качестве базового проекта АЭС Вьетнам был выбран

российский проект «АЭС-2006» с ВВЭР-1200 поколения III+ с улучшенными технико-экономическими показателями.

После принятия решения о строительстве АЭС для подготовки специалистов для ее эксплуатации и обслуживания вьетнамские студенты приступили к обучению в университетах России. В Уральском федеральном университете (УрФУ) обучение студентов из Вьетнама по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг» началось в 2014 г. (рис. 5.11) [152]. В ходе реализации проекта АЭС Ниньтхуан ситуация в экономике изменилась по сравнению с моментом принятия решения об инвестировании проекта, поэтому в ноябре 2016 г. Национальное собрание Вьетнама проголосовало за прекращение строительства АЭС по экономическим причинам. Однако, страна может вернуться к вопросу строительства АЭС в будущем. Поэтому сохранение квалификации обученных вьетнамских выпускников из российских вузов является важной задачей.

На данный момент Вьетнам продолжает программу по развитию мирного атома, ведется подготовка вьетнамских специалистов-ядерщиков, планируется создание центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ) с новым исследовательским ядерным реактором (ИЯР). Вьетнамские выпускники из российских вузов (в том числе выпускники из УрФУ) могут работать в проектируемом ЦЯНТ Вьетнама.



Рисунок 5.11. Группа вьетнамских студентов (УрФУ), специальность «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг»: (а) окончание первого курса (2014), (б) защита дипломных проектов, шестой курс (2020)

5.4.2 Постановка проблемы

Термины, используемые в области ядерной энергетики, обычно представляют собой английские или русские слова. Большинство вьетнамских студентов, обучающихся по специальности 14.05.02 – Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг, часто используют эти термины как есть или переводят их на вьетнамский язык в соответствии со своим собственным пониманием, что приводит к расхождениям значений при переводе: многие русские термины трудно или даже невозможно перевести на вьетнамский язык, а если они и есть во вьетнамском лексиконе, то вариантов перевода этих терминов может быть много, что затрудняет процесс обучения вьетнамских студентов.

Существует острая потребность в специальной литературе по ядерной энергетике на вьетнамском языке. Кроме того, наличие качественного русско-вьетнамского словаря является важной составляющей процесса обучения вьетнамских студентов и специалистов [153, 154]. Сейчас выполнен перевод на вьетнамский язык учебника «Основы ядерной энергетики» [155], разработан учебный словарь технических терминов для студентов-вьетнамцев «Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике». Эти материалы помогут первокурсникам ознакомиться со специальными терминами и базовыми знаниями, чтобы получить прочную основу для учебы в последующие годы.

При работе над учебным пособием и словарем основные сложности возникали при подборе специальных терминов. Многие документы по атомной энергетике отсутствуют во Вьетнаме, невозможно найти специфические термины, приходилось составлять новые словосочетания, брать слова из других областей энергетики. Для иллюстрации ниже приведены несколько примеров перевода терминов с русского на вьетнамский язык.

a)

1. Chu kỳ hoạt động của nhiên liệu = Кампания топлива (fuel residence time)			
Chu kỳ	Hoạt động	Cửa nhiên liệu	
Период	Действие	Топлива	
↓			
Кампания топлива			
2. Phòng vệ sinh phóng xạ = Саншлюз (санитарный шлюз)			
Phòng	Vệ sinh	Phóng xạ	
Камера	Гигиена	Радиоактивность	
↓			
Саншлюз (санитарный шлюз)			
3. Phản ứng ô-xy hóa vỏ thanh nhiên liệu = Пароциркониевая реакция (zirconium-steam reaction)			
Phản ứng	Ô-xy hóa	Vỏ	Thanh nhiên liệu
Реакция	Окисление	Оболочка	ТВЭЛ
↓			
Пароциркониевая реакция			



Рисунок 5.12. (a) Примеры перевода терминов с русского на вьетнамский язык и (b) Русско-вьетнамские словарь и учебник по ядерной энергетике

В связи со спецификой деятельности в области ядерной энергетики владение терминологией является важнейшим навыком для работы в этой сфере. Именно поэтому было принято решение о разработке русско-вьетнамского терминологического словаря. До сих пор во Вьетнаме не существует русско-вьетнамского словаря по ядерной энергетике. Именно поэтому было решено изучить и собрать термины на русском языке из множества разных источников, а затем перевести их на вьетнамский язык, включая материалы из других переводов, а также создать совершенно новый перевод на вьетнамский язык. Подготовленный проект словаря после доработки был одобрен экспертами.

Цель русско-вьетнамского словаря по ядерной энергетике – способствовать унификации терминов в области ядерной энергетики на русском и вьетнамском языках при обучении в России вьетнамских студентов. Также словарь может помочь сотрудникам, работающим в области ядерной энергетики, и экспертам. Это первая попытка создания русско-вьетнамского словаря по ядерной энергетике. А учебник «Основы ядерной энергетики» предназначен для изучения физических и технических основ ядерной энергетики для вьетнамских студентов, включая основные знания из ядерной и нейтронной физики, физические и конструкционные особенности ядерных реакторов различных типов, основные виды ядерного топлива, тепловые схемы и основное оборудование АЭС, безопасность атомных станций.

5.4.3 Требования к переводным изданиям

Для перевода русского текста на вьетнамский можно использовать различные инструменты (инструменты онлайн-перевода, использование искусственного интеллекта и т.д.). Однако создать качественный перевод – это сложное дело, требующее глубоких знаний в данной области науки и техники, значительных трудозатрат, обширных консультаций со специалистами в данной и смежных областях предприятий и организаций Вьетнама. Как и любой другой язык, квалифицированный перевод должен обеспечивать следующие элементы:

- Избегать перевода слово в слово;
- Минимизировать ошибки в словарном составе языка и грамматике;
- Точное и хорошее выражение и соответствие характеристикам документа;
- Полностью переводить каждый абзац, символ и т.д.;
- Отсутствие орфографических ошибок;
- Легкое понимание перевода с использованием местных выражений или распространенных выражений терминов в данной области;
- Бережное отношение к оригиналу (не вносить в перевод личную точку зрения).

Важность языкового перевода заключается в понимании и освоении основных методов перевода для получения идеального и качественного перевода. Тем самым помогая правильно перевести документ и передать полный смысл исходного текста. Это особенно важно для перевода терминологии, связанной с техническими и другими специализированными дисциплинами (например, атомной энергетикой). В настоящее время в мире существует множество методов перевода, применяемых в сфере языкового перевода. Согласно исследованию автора, существует 7 основных и наиболее популярных методов перевода, которыми переводчикам необходимо овладеть [156, 157].

Специализированные технические термины в русско-вьетнамском словаре по ядерной энергетике и учебнике «Основы ядерной энергетике»

переведены с русского на вьетнамский язык с использованием все 7 указанных выше способов. Это помогло переводить документы максимально точно, помогая читателям, являющимся студентами и экспертами в области атомной энергетики, легко понимать и сравнивать термины в тексте на двух языках для изучения.

5.4.4. Методы перевода специальной русско-вьетнамской учебной литературы для подготовки специалистов для атомной отрасли Вьетнама

5.4.4.1 Метод транспозиции (Transposition technique)

Транспозиция – переход слова из одной части речи в другую или использование одной языковой формы в функции другой [158]. Метод транспозиции означает, что переводчик заменяет одно слово другим, не меняя при этом смысла предложения или подтекста/сообщения, которое хочет передать автор. Этот метод применяется ко многим различным типам слов, а не только к существительным и глаголам. Например, одно слово переводится в сложное слово (с русского на вьетнамский язык), как показано в табл. 5.4.

Иногда некоторые слова можно перевести разными способами. Например, слово «Тра́верса» можно перевести по методу транспозиции «Thanh ngang / Dầm ngang» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «Горизонтáльная бáлка / Поперéчная тра́верса») и по методу адаптации «Vô (thanh, giá) nâng đỡ hàng» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «Комплéкт (набóр) для подьéма и опускáния гру́зов»). Это объясняется тем, что слово на русском языке может иметь множество значений на вьетнамском языке, а на вьетнамском языке значение этого русского слова в данной отрасли (например, в строительной отрасли) может иметь разное значение по сравнению с другой отраслью (например, в атомной энергетике).

Таблица 5.4. Примеры переводов по методу транспозиции

Метод транспозиции	
Русский язык (оригинал)	Вьетнамский язык (перевод)

Излучение	Bức xạ
Дозиметр	Liều lượng kế / Liều kế
Замедлитель	Chất làm chậm
Градирня	Tháp làm mát / Tháp giải nhiệt
Деаэра́тор	Máy khử khí / Bộ khử khí
Изотоп	Đồng vị
Испаритель	Thiết bị bay hơi (bốc hơi) / Dàn bay hơi (bốc hơi) / Bộ bay hơi (bốc hơi)
Ёмкость	Dung tích / Dung lượng / Bình chứa / Bể chứa
Задви́жка	Van công
Экономáйзер	Thiết bị (bộ) hâm nước

5.4.4.2 Метод модуляции (Modulation technique)

Метод модуляции – способ перевода с использованием незначительных изменений значения или изменений точки восприятия в зависимости от контекста. Бывают случаи, когда, если перевести буквально слово в слово, предложение окажется весьма натянутым и трудным для понимания. Настало время применить эту форму перевода. Метод модуляции означает изменение сообщения из-за точки зрения, отличной от оригинала, то есть того же сообщения, но если его перевести близко к оригиналу, читатель не поймет или у него возникнут трудности с пониманием, поэтому необходим этот способ перевода [159]. В методе перевода модуляции можно разделить два типа: (1) Свободная модуляция: это форма перевода, при которой свободно выбираются структуры и слова на переводимом языке для выражения идей; (2) Принудительная модуляция: это форма способа перевода модуляции, при которой у переводчика нет выбора, поскольку это единственное или меньшинственное выражение, используемое местным населением.

Примеры модулирующих форм перевода приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5. Примеры переводов по методу модуляции

Метод модуляции		
Русский язык (оригинал)	→ Вьетнамский язык (перевод)	→ Обратный перевод с вьетнамского на русский язык
Энергетический пуск	Khởi động phát điện	Запуск для электрогенерации
Внутренняя самозащщённость	Đặc tính an toàn nội tại của lò phản ứng	Внутренняя безопасная характеристика реактора

реактора (свойство безопасности)		
Выгорódка активной зóны	Bao vùng hoạt / Bao lõi	Чехóл активной зóны / Чехóл ядра
Глубокоэшелонированная защита	Bảo vệ an toàn hạt nhân theo chiều sâu / Bảo vệ nhiều lớp theo chiều sâu	Защита ядерной безопасности по глубинé / Многоурóвневая защита по глубинé
Зóна контролируемого доступа	Khu vực kiểm soát và cấp phép vào (vùng nghiêm ngặt)	Зóна контроля и дóпуска на вход (стрóгая зóна)
Кампáния реактора	Chu kỳ hoạt động của lò phản ứng	Эксплуатациóнный цикл реактора
Кампáния тóплива	Chu kỳ hoạt động của nhiên liệu	Эксплуатациóнный цикл тóплива
Обрátный клапан	Van một chiều	Односторóнный клапан
Интегрáльная компоновка	Bố trí theo kiểu tích hợp	Компоновка по тóпу интеграции
Лучевáя болéзнь	Bệnh phóng xạ	Радиациóнная болéзнь
Вальцóвка	Thiết bị nong (cán) ống	Трубопрокáтное оборудóвание / Устрóйство для расширения трóбки

5.4.4.3 Метод эквивалентности (Equivalence technique)

Этот метод перевода часто применяется, когда два языка описывают одну и ту же ситуацию или выражают одинаковый оттенок и значение исходного слова, но имеют различия в стиле, нюансах выражения и структурных средствах. То есть переводчик добавит к предложению несколько слов или выберет ограниченное количество слов с одинаковым значением для эквивалентного перевода. Типичный пример этого метода перевода можно увидеть в переводе идиом и пословиц [160].

Таблица 5.6. Примеры переводов по методу эквивалентности

Метод эквивалентности		
Русский язык (оригинал)	Вьетнамский язык (перевод)	Обратный перевод с вьетнамского на русский язык
Атомная стáнция теплоснабжéния (АСТ)	Nhà máy nhiệt hạt nhân (NMNHN)	Ядерная тепловáя стáнция
Атомная теплоэлектрóцентраль (АТЭЦ)	Nhà máy đồng phát hạt nhân (NMĐPHN)	Ядерная когенерациóнная стáнция

Атомный лихтеровоз-контейнеровоз (АЛК)	Tàu phá băng nguyên tử vận chuyển công-te-nơ / Tàu công-te-nơ chở hàng chạy bằng năng lượng nguyên tử	Атомный ледокол для перевозки контейнеры / Грузовой контейнеровоз, работающий на атомной энергии
Бак-приёмник запаса воды с бórной кислотой низкой концентрации	Bể ngầm dự trữ nước chứa axit boric nồng độ thấp	Подземный резервуар для хранения воды с бórной кислотой низкой концентрации
Барабан отработавших сбóрок (БОС)	Tang quay bó nhiên liệu đã cháy	Барабан сгоревших топливных сбóрок
Барабан свежих сбóрок (БСС)	Tang quay bó nhiên liệu mới	Барабан новых топливных сбóрок
Пусконаладочные работы	Các công việc hiệu chuẩn phục vụ thử nghiệm	Калибровочные работы для испытаний
Внутрикорпусные устройства (ВКУ)	Các thiết bị (bộ phận) bên trong thùng lò	Оборудование (элементы) внутри корпуса реактора
Главный разъем реактора	Mối kết nối chính của lò phản ứng	Главное соединение реактора
Главный циркуляционный контур (ГЦК)	Vòng tuần hoàn chất tải nhiệt chính (vòng làm mát sơ cấp)	Главный циркуляционный контур теплоносителя (первичный контур охлаждения)
Глубина выгорания ядерного топлива	Độ cháy nhiên liệu hạt nhân / Độ sâu cháy / Mức đốt cháy	Степень сгорания ядерного топлива / Глубина горения / Уровень горения
Организованная протечка	Nước rò rỉ có tổ chức	Организованная утечка воды
Неорганизованная протечка	Nước rò rỉ không tổ chức	Неорганизованная утечка воды
Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ)	Hệ số công suất (HSCS)	Коэффициент мощности

5.4.4.4 Метод адаптации (Adaptation technique)

Это метод перевода, который только берет смысл исходного предложения и передает его совершенно по-другому. Причина такого метода перевода кроется в несовместимости двух языков. Когда переводчик не может найти выражение, похожее на исходный текст, он будет использовать метод адаптации. Этот метод также можно считать более высокой версией метода эквивалентного перевода (эквивалентного перевода по смыслу). Метод

адаптации часто применяется в таких произведениях искусства, как поэзия, проза, песни и т.д. или такие области, как маркетинг, слоганы, рекламные баннеры и т.д. больше, чем в других областях, потому что эти области требуют высокой креативности [161].

Таблица 5.7. Примеры переводов по методу адаптации

Метод адаптации		
Русский язык (оригинал)	Вьетнамский язык (перевод)	Обратный перевод с вьетнамского на русский язык
Выход осколков деления	Biểu đồ xác suất tạo thành các mảnh vỡ (mảnh phân hạch)	График вероятности образования осколков деления
Коэффициент полезного действия (КПД)	Hiệu suất	Эффективность
Дозиметрический наряд	Lệnh viết	Письменный приказ (для проведения радиационных работ)
Бассейн выдержки	Bể chứa nhiên liệu đã cháy	Бак для хранения сожженного топлива
Бассейн перегрузки	Bể chứa nhiên liệu mới	Бак для хранения нового топлива
Весовой множитель излучения (W_R)	Trọng số bức xạ (W_R)	Радиационный взвешивающий коэффициент
Консервация	Bảo quản thiết bị kỹ thuật	Сохранение технического оборудования
Расконсервация	Ngừng bảo quản thiết bị kỹ thuật	Прекращение сохранения технического оборудования

5.4.4.5 Метод заимствований (Borrowing technique)

Заимствование – это слово, знакомое каждому, обозначающее акт присвоения чего-то у кого-то другого как своего по определенной причине или цели. Метод заимствований – распространенный метод перевода специализированных переводческих документов. Поскольку лексика целевого языка не может выразить состояние оригинала или не имеет такие понятия, поэтому переводчик вынужден использовать дословные слова исходного текста. В случае заполнения смыслового пробела (например, новая техника,

неизвестная концепция) метод заимствований является самым простым из всех методов [162].

В некоторых случаях термины переводятся с использованием этого метода, также могут быть переведены другим методом. Например, термин «Кермет» можно перевести на вьетнамский язык по методу заимствований «Cermet» или по методу адаптации «Gốm kim loại» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «Металлокерамика»).

Таблица 5.8. Примеры переводов по методу заимствований

Метод заимствований	
Русский язык (оригинал)	Вьетнамский язык (перевод)
Битум <i>(заимствование не меняет формы и значения)</i>	Bitum
Гексафторид урана (ГФУ) <i>(заимствование меняет форму, но не меняет смысла)</i>	Urani hexafluoride (UF ₆)
Битумирование радиоактивных отходов <i>(объединение оба типа выше)</i>	Bitum hóa chất thải phóng xạ
Лопатки турбины	Các cánh tua bin
Малые модульные реакторы (ММР)	Lò phản ứng mô đun nhỏ (SMR)
Разгрузочно-загрузочная машина (РЗМ)	Thiết bị nạp - dỡ nhiên liệu RZM
Контаймент / контеймент (защитная оболочка реакторного здания АЭС)	Containment (vỏ bọc bảo vệ tòa nhà lò của NĐHHN)
Бетатрон (ускоритель)	Máy gia tốc betatron
Альфа-содержащие отходы	Chất thải phóng xạ chứa hạt alpha
ЕРС-контракт	Hợp đồng EPC
Черенковское излучение	Bức xạ Cherenkov
Нейтронное поле	Trường neutron
Обеднённый уран	Urani nghèo

5.4.4.6 Метод калькирования (Calque technique)

Калькирование – это способ, при котором заимствуются ассоциативное значение и структурная модель слова или словосочетания. Кальками называются заимствования в виде буквального перевода иностранного слова или выражения.

Этот метод перевода чем-то похож на метод заимствований, но более конкретно, при использовании этого метода весь заимствованный синтаксис

будет заменен и интерпретирован, что поможет более буквально перевести отдельные компоненты. Метод калькирования – это, по сути, особая форма способа перевода заимствований. Однако эти два метода перевода также имеют довольно большие различия [163].

В то время как метод заимствований предполагает дословное использование слов из исходного (оригинального) текста или с не слишком большими изменениями, а метод калькирования – это метод перевода, при котором переводчик переводит точное значение исходного (оригинального) слова для создания нового слова. Метод заимствований имеет сходство между переведенным словом и исходным словом как в семантике, так и в фонетике. Метод калькирования полностью передает смысловые оттенки, но фонетические оттенки различны. Метод калькирования часто применяется в специализированных документах, при переводе договоров, досье, технических терминов, конкретных профессий или предметов и т.п.

Примеры применения данного метода перевода в атомной энергетике приведены в табл. 5.9. Некоторые термины можно перевести с помощью различных методов перевода. Например, термин «Маши́нный зал АЭС» можно перевести на вьетнамский язык с помощью метода калькирования «*Buồng máy của NĐHN*» и метода модуляции «*Nhà tuabin của NĐHN*» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «Турби́нное зда́ние АЭС»). А термин «Пароциркониевая ре́акция» – с помощью метода калькирования «*Phản ứng zirconium - hơi*» и метода модуляции «*Phản ứng oxy hóa vỏ thanh nhiên liệu*» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «Реакция окисления оболочки твэла»).

Таблица 5.9. Примеры переводов по методу калькирования

Метод калькирования	
Русский язык (оригинал)	Вьетнамский язык (перевод)
Конденсатный насос (КН)	<i>Máy bơm nước ngưng</i>
Крышка реактора	<i>Nắp lò</i>
Отравление реактора	<i>Nhiễm độc lò phản ứng</i>
Открытый топливный цикл	<i>Chu trình nhiên liệu mở</i>

Нарушение нормальной эксплуатации АЭС	Vi phạm vận hành bình thường NMTĐHN
Культура безопасности	Văn hóa an toàn (VHAT)
Жидкое ядерное топливо	Nhiên liệu hạt nhân lỏng
Область быстрых нейтронов	Miền neutron nhanh
Обработка радиоактивных отходов	Xử lý chất thải phóng xạ
Зависимый отказ	Sai hỏng phụ thuộc

5.4.4.7 Метод буквального перевода (Literal technique)

Этот метод перевода по сути представляет собой замену слов и конструкций исходного текста эквивалентными словами и конструкциями на целевом языке. Метод буквального перевода практически не имеет слишком больших изменений слов и является практически наиболее точным по оригинальному тексту. Переводчику не нужно вносить изменения, кроме тех, которые требуются грамматикой переводимого языка.

Преимущество этого метода перевода в том, что перевод может достигать практически абсолютной точности. Хотя семантическую точность можно гарантировать, но если этот метод применять слишком часто, он сделает перевод неестественным, неубедительным и даже попадет в ситуацию дословного перевода. Этот метод перевода часто применяется преимущественно в языках с одинаковой генеалогией и культурой [164].

Некоторые примеры этого метода приведены в табл. 5.10. В некоторых случаях для перевода ядерных технических терминов можно использовать этот метод или несколько других методов, например:

- Термин «ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор» можно перевести на вьетнамский язык с помощью метода буквального перевода «VVER – Lò phản ứng năng lượng nước - nước» или метода эквивалентности «VVER – Lò phản ứng nước áp lực kiểu Nga» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «ВВЭР – реактор с водой под давлением российского типа»).
- Термин «ВВЭР-С – реакторная установка со спектральным регулированием» можно перевести на вьетнамский язык с помощью метода буквального перевода «VVER-S – Cụm thiết bị lò phản ứng điều

chỉnh quang phổ» или метода эквивалентности «VVER-S – Lò phản ứng nước áp lực điều chỉnh quang phổ» (обратный перевод с вьетнамского на русский язык: «ВВЭР-С – реактор с водой под давлением со спектральным регулированием»).

Таблица 5.10. Примеры переводов по методу буквального перевода

Метод буквального перевода	
Русский язык (оригинал)	Вьетнамский язык (перевод)
Заготовка обечайки активной зоны корпуса реактора	Phôi ống vách vùng hoạt của thùng lò phản ứng
Острое и хроническое внутреннее облучение	Chiếu trong cấp tính và mạn tính
Тепловая схема одноконтурная, двухконтурная и трехконтурная АЭС	Sơ đồ nhiệt của NMDHN có một, hai và ba vòng tuần hoàn
Теплообменник системы аварийного охлаждения активной зоны (ТО CAOЗ)	Bộ trao đổi nhiệt của hệ thống làm mát vùng hoạt khẩn cấp
BR, BOR, BREST – российские исследовательские реакторы на быстрых нейтронах (БР, БОР, БРЕСТ)	Các lò phản ứng nghiên cứu neutron nhanh của Nga (BR, BOR, BREST)
MBIR – российский многоцелевой исследовательский реактор на быстрых нейтронах (МБИР)	Lò phản ứng nghiên cứu neutron nhanh đa mục tiêu của Nga (MBIR)
IVV-2M – российский исследовательский реактор на тепловых нейтронах (ИВВ-2М)	Lò phản ứng nghiên cứu neutron nhiệt của Nga (IVV-2M)
ВВЭР-ТОИ – типовой оптимизированный и информатизированный проект АЭС с водородным энергетическим реактором	VVER-TOI – Dự án tối ưu và thông tin hóa NMDHN kiểu mẫu sử dụng lò phản ứng năng lượng nước - nước
Ключевые агентства и организации, связанные с развитием инфраструктуры атомной энергетики Вьетнама	Các cơ quan và tổ chức chủ trì liên quan đến việc phát triển cơ sở hạ tầng điện hạt nhân của Việt Nam
Подкомитет по реакторной технологии, ядерному топливу и радиоактивным отходам	Tiểu ban công nghệ lò phản ứng, nhiên liệu hạt nhân và chất thải phóng xạ

5.4.5 Результаты и обсуждения

Разработанные учебный словарь технических терминов для студентов-вьетнамцев «Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике» и учебник «Основы ядерной энергетике» рекомендованы методическим советом Уральского федерального университета для иностранных студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 14.05.02 – Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг.

В словаре приведено более 800 терминов из области ядерной энергетики на русском и вьетнамском языке. Словарь предназначен студентам-вьетнамцам, обучающимся по программам ядерной энергетики в российских вузах, а также всем, интересующимся терминологией в области ядерной энергетики. Термины в словаре расположены в соответствии с русским алфавитом от «А» до «Я», сопровождаются подробными пояснениями на вьетнамском языке. Также для удобства в каждой словарной статье приведён перевод технических терминов на английский язык [165].

Слова в словаре расположены в алфавитном порядке. Словарная статья имеет две части – левую и правую. В левой части приводится заголовочное слово, его сокращенный вариант (если есть), аббревиатура (если имеется), англоязычный аналог термина, а также однокоренные с заголовочным словом термины или слова, близкие заголовочному слову по значению. В правой части словарной статьи приводится подробное толкование термина на вьетнамском языке.

Заголовочное слово даётся полужирным прописным шрифтом: **ДЕЗАКТИВÁЦИЯ.**

Курсивом приводится перевод заголовочного слова и терминов, близких ему по значению, на английский язык:

Механіческое напряжéние

mechanical stress

Если слово имеет добавочный способ употребления, сокращенный вариант и/или аббревиатуру, то они приводятся после заглавного слова в скобках: **БИТУМА́ТОР / БИТУМИЗÁТОР, ПУНКТ ХРАНЕ́НИЯ РАДИОАКТИ́ВНЫХ ОТХО́ДОВ (ПХРО).**

Заголовочное слово может иметь синоним. В словарной статье синоним приводится через косую черту (слеш): **АВА́РИЯ / ИНЦИДЕ́НТ.** Аналогично приводится и перевод термина на английский язык: *accident / incident.*

Словарная статья может содержать однокоренные с заголовочным словом термины или слова, близкие заголовочному слову по значению. Они приведены с прописной буквы полужирным шрифтом:

НЕЙТРО́ННОЕ ПО́ЛЕ

- **Пло́тность нейтро́нов**
- **Пото́к нейтро́нов**
- **Пло́тность пото́ка нейтро́нов**
- **Флю́енс нейтро́нов**

Основной термин может иметь уточняющее значение, оно приведено в скобках: **ГАЗОСБО́РНИК (ПРОДУ́КТОВ ДЕЛÉНИЯ)**, аналогичное уточнение дано в переводе на английский язык: *gas collector (fission products)*.

В некоторых случаях в левой части словарной статьи сначала приведена аббревиатура, затем расшифровка на русском языке и перевод на английский язык. Это связано с традицией употребления терминоединицы именно в таком – сокращенном – виде:

ЛСОЕ – НОРМИ́РОВАННАЯ СТО́ИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНÉРГИИ

LCOE – Levelized Cost of Energy, or Levelized Cost of Electricity.

Такая подача материала вызвана стремлением авторов максимально унифицировать термины из области ядерной энергетики на русском и вьетнамском языках.

Статистика относительного количества технических терминов в русско-вьетнамском словаре по ядерной энергетике и их классификация приведена в табл. 5.11. Видно, что количество терминов, которые можно перевести с русского на вьетнамский язык (менее распространены, редко используются или отсутствуют во вьетнамских технических документах) и количество переведенных и созданных терминов совершенно новое составляют более половины (> 50 %) от общего числа терминов. Это показывает новизну и ценность составленного словаря, а также облегчает вьетнамским студентам изучение русских терминов во время учебы. Постепенно, по мере того, как русскоязычная лексика вьетнамских студентов увеличивается, они могут

изучать эти технические термины непосредственно с русскими документами из различных источников (интернет, книги, статьи, газеты и т.д.), чтобы глубже понять значение этих терминов. Или они могут даже перевести и создать новые термины для добавления в этот словарь. Таким образом, данный словарь «Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике», как и учебник «Основы ядерной энергетике», можно считать стартовой базой для вьетнамских студентов при обучении по специальности атомной энергетике в России!

Таблица 5.11. Статистика относительного количества технических терминов в русско-вьетнамском словаре по ядерной энергетике и их классификация

Буквы	Количество терминов, которые можно перевести с русского на вьетнамский язык (популярны и распространены во вьетнамских технических документах)	Количество терминов, которые можно перевести с русского на вьетнамский язык (менее распространены, редко используются или отсутствуют во вьетнамских технических документах)	Количество переведенных и созданных терминов совершенно новое	Итого
А	20	22	2	44
Б	4	15	14	33
В	15	23	12	50
Г	23	13	6	42
Д	26	15	1	42
Е	6	3	0	9
Ж	3	6	3	12
З	6	7	7	20
И	11	7	1	19
К	29	25	17	71
Л	8	4	1	13
М	24	10	1	35
Н	25	15	2	42
О	14	25	6	45
П	23	39	3	65
Р	34	38	3	75
С	24	17	8	49
Т	16	23	9	48
У	12	2	5	19
Ф	12	2	3	17
Х	2	5	2	9
Ц	9	6	0	15
Ш	2	4	0	6
Э	16	4	0	20
Я	33	8	0	41
Итого	397	338	106	841

5.5 Выводы к главе 5

Закон об охране окружающей среды (2020) Вьетнама определяет содержание отчета об ОВОС. Однако в отечественных нормативных актах приведены только общие положения и содержание отчета об ОВОС, отсутствует конкретное руководство об ОВОС для ОИАЭ по радиологическому аспекту, а также их конкретное содержание.

В данной главе описана основная информация о проекте строительства ЦЯНТ Вьетнама с новым ИЯР (используемая технология, технические параметры, географическое положение проекта и т.д.). Автор диссертации в составе группы вьетнамских специалистов из VINATOM принимал участие в проведении комплексного анализа основных требований и применимых методов при проведении ОВОС, правовой базы Вьетнама в целом в области ОВОС для различных отраслей и для атомной энергетики, в частности.

В этой главе представлены результаты разработки руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС, проанализированы соответствующие руководства МАГАТЭ и развитых стран мира с большим опытом работы в атомной сфере (РФ, США и др.); указаны факторы, связанные с радиацией, которые требуют внимания, чтобы сосредоточиться на оценке и представлении в отчете об ОВОС на этапах реализации проекта ЦЯНТ; представлены критерии приемлемости, которые должны быть соблюдены и как будет проводиться экспертиза. Все вышеперечисленное направлено на решение ограничений и устранение недостатков, связанных с положениями вьетнамского закона об ОВОС для ОИАЭ, и способствует тому, чтобы сделать процесс подготовки и экспертизы отчета об ОВОС простым и методически понятным.

Разработанное автором диссертации в составе группы специалистов VINATOM Руководство по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС, способствуя повышению качества отчетности, качества оценки и экспертизы, а также обеспечения эффективной реализации проектов, связанных с ядерной отраслью Вьетнама в будущем, являются полезным инструментом и важным

справочным материалом Руководства для соответствующих органов управления, организаций и подрядчиков.

Основным источником квалифицированных кадров для атомной энергетики являются образовательные учреждения, и в первую очередь, высшие учебные заведения. Чтобы обеспечить подготовку необходимого количества высококлассных специалистов, способных приступить к работе сразу после окончания учебного заведения без их «подгонки» к требованиям конкретного предприятия, необходима тесная интеграция образовательных учреждений и предприятий. Подготовка специалистов для атомной энергетики имеет ряд особенностей, связанных с высоким технологическим уровнем отрасли, потенциальной опасностью ядерных технологий, значительным временем обучения. Для достижения, улучшения и поддержания высокого уровня знаний и навыков персонала и качества его работы должен использоваться систематический подход к обучению. Кроме того, наличие качественного русско-вьетнамского словаря и учебника является важной составляющей процесса обучения вьетнамских студентов-ядерщиков и специалистов.

На самом деле важно изучать языки стран-поставщика ядерных услуг для повышения качества процесса подготовки специалистов-ядерщиков. При этом очень важно читать в оригинале техническую документацию, литературу и т.д. Согласно личному опыту автора диссертации, чтобы иметь возможность хорошо и правильно перевести документ/текст с русского на вьетнамский язык в любой области, необходимо постоянно развивать, дополнять и совершенствовать следующие вещи (много читать, много переводить, укреплять свою вьетнамскую лексику). Перевод – это не просто процесс преобразования языка. Необходимо определить характер документа, чтобы выбрать подходящий метод перевода. Для каждого типа документа подойдет отдельный метод перевода, или даже в рамках одного документа можно применять множество разных методов перевода. Переводчикам необходимо не только знание языка, но и множество других навыков, таких как: навыки

понимания прочитанного, навыки классификации документов, умение использовать родной язык, умение искать и выбирать информацию и т.д. Если применить неподходящий метод перевода, перевод будет неубедительным, трудным для понимания или не соответствующим оригиналу. Например, в отношении документов, содержащих стихи, песни и музыку, переводчики часто применяют метод адаптации. Для специализированных документов (например, в атомной энергетике) переводчики часто комбинируют множество методов перевода, таких как метод буквального перевода, метод эквивалентности, метод калькирования и т.д.

Разработанный и подготовленный к изданию русско-вьетнамский учебник «Основы ядерной энергетике», а также впервые разработанный и изданный «Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике» будут использованы для учебной работы и подготовки в России вьетнамских студентов, а также для лиц, заинтересованных в области ядерной энергетике, должностных лиц и экспертов, работающих в ядерной энергетике Вьетнама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом диссертационной работы являются результаты расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств природных минералов Вьетнама (различные виды природных камней, композиты на основе красного и белого глинистого минерала с наполнителем в виде промышленных металлических отходов) с целью оценки потенциальной возможности использования местных природных минералов при сооружении радиационной защиты ОИАЭ во Вьетнаме. Радиационно-защитные характеристики этих материалов исследовались экспериментально детекторами NaI (Tl) и теоретически с помощью компьютерного моделирования методом Монте-Карло с использованием расчетного кода MCNP-5 и программы XCOM. Кроме того, теоретическая и практическая значимость результатов исследований в данной диссертации можно отметить следующие: анализ перспектив развития атомной энергетики и ядерной инфраструктуры (ЯИ) Вьетнама; разработка отдельных составляющих элементов ЯИ Вьетнама, таких как разработка Руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС для проекта ЦЯНТ, разработка и подготовка к изданию специализированной учебной русско-вьетнамской литературы для подготовки специалистов для атомной отрасли Вьетнама и т.д. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Защитные свойства от γ -излучения исследуемых образцов на основе красной и белой глины Вьетнама (PR серии) были улучшены за счет повышения давления при изготовлении образцов. При увеличении давления изготовления образцов от 7,61 до 114,22 МПа:

- Линейный коэффициент ослабления образцов на основе красной глины увеличился на 32% и 36% (для образцов на основе белой глины – увеличился на 14% и 17%) при E_γ 0,662 и 1,332 МэВ, соответственно.

- Слой половинного ослабления образцов на основе красной глины уменьшается на 24% и 27% (для образцов на основе белой глины – уменьшается на 12% и 15%) при E_γ 0,662 и 1,332 МэВ, соответственно.

- При толщине 30 см изготовленных образцов минералов способна поглотить выше 80% падающих γ -фотонов с энергией (E_γ) 1,252 МэВ.

2. Защитные свойства от γ -излучения исследуемых композитных образцов на основе красной и белой глины Вьетнама (RW и WW серии) с наполнителем в виде промышленных отходов были улучшены за счет повышения концентрации промышленных металлических отходов в образцах от 0 до 70%, при этом:

- Линейный коэффициент ослабления композитных образцов на основе красной глины увеличился на 24% и 16% (для образцов на основе белой глины – увеличился на 27% и 21%) при E_γ 0,662 и 1,332 МэВ, соответственно.

- Слой половинного ослабления композитных образцов на основе красной глины уменьшается на 24% и 17% (для композитных образцов на основе белой глины – уменьшается на 27% и 20%) при E_γ 0,662 и 1,332 МэВ, соответственно.

- При толщине 30 см изготовленных композитных образцов РЗМ способна поглотить выше 90% падающих γ -фотонов с E_γ 0,662 и 1,332 МэВ.

- Значения пористости для образцов RW70 и WW70 достигли высокого показателя $< 1\%$ (стандартная величина для обычных кирпичей – от 6 до 10%). Хорошая водостойкость этих материалов позволяет соединить их с водой для создания двухслойной биозащитной структуры (кирпич-вода), повышающей радиационную защиту.

3. На основании результатов расчетно-экспериментальных исследований и моделирования с помощью MCNP-5 выявлено, что зеленый гранит (образец GG 8) и мрамор (М 3) обладают наибольшей экранирующей способностью среди изученных образцов камней Вьетнама. Они могут использоваться в качестве природных бессвинцовых экранирующих материалов, а также в качестве наполнителя бетона при сооружении ОИАЭ во Вьетнаме:

- Зеленый гранит имеет наименьшую пористость среди собранных камней (0,15%). Образцы с низкой пористостью имеют низкий коэффициент водопоглощения.

- При увеличении концентрации Fe+Ca в исследуемых природных образцах камней Вьетнама от 3,21% до 65,97%, линейный коэффициент ослабления увеличивается на 13% при энергии 1,332 МэВ.

4. Благодаря фактической ситуации о разворачивании проекта АЭС Ниньтхуан, ранее подготовленной ядерной инфраструктуры, людских ресурсов и наличные природные условия Вьетнама об урановых ресурсах и т.д., Вьетнам имеет все необходимые условия для того, чтобы вернуться и продолжить развитие своей ядерно-энергетической программы в будущем.

5. Результат разработки руководства по подготовке и экспертизе отчета об ОВОС, способствуя повышению качества отчетности, качества оценки и экспертизы, а также обеспечения эффективной реализации проектов, связанных с ядерной отраслью Вьетнама в будущем (в том числе проект ЦЯНТ), являются полезным инструментом и важным справочным материалом руководства для соответствующих органов управления, организаций и подрядчиков.

6. Был разработан и издан русско-вьетнамский словарь терминов в области использования атомной энергии (всего 840 терминов, из которых 106 разработаны впервые) и подготовлен к изданию учебник «Основы ядерной энергетики» на русском и вьетнамском языках для подготовки вьетнамских студентов и специалистов в вузах России и их обучения русскому языку.

Перспективы дальнейшего развития темы исследования заключаются в развитии следующих направлений:

- Оптимизация состава РЗМ с использованием в качестве наполнителя различных промышленных отходов Социалистической Республики Вьетнам для применения в области радиационной защиты.
- Расчетно-экспериментальные исследования других каменных и глинистых радиационно-защитных материалов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Буквы латинского алфавита

BIS	Спецификация для приглашения к участию (Bid Invitation Specifications)
DBT	Проектная основная угроза (Design Basis Threat)
EVN	Электроэнергетическая корпорация Вьетнама (Vietnam Electricity)
EVNNPB	Отдел управления проектами АЭС Ниньтхуан (Ninh Thuan Nuclear Power Projects Management Board)
ЕРС-контракт	Способ контрактования в строительной отрасли (от англ. Engineering, Procurement and Construction)
EDXRF	Дисперсноэнергетический рентгенофлуоресцентный анализ
FIDIC-контракты	Унифицированные документы, разработанные Международной ассоциацией инженеров-консультантов с целью регулирования отношений участников международной инвестиционно-строительной деятельности
MOST	Министерство науки и технологий (Ministry of Science and Technology)
MOIT	Министерство промышленности и торговли (Ministry of Industry and Trade)
MONRE	Министерство природных ресурсов и окружающей среды (Ministry of Natural Resources and Environment)
MOET	Министерство образования и профессиональной подготовки (Ministry of Education and Training)
MOF	Министерство финансов (Ministry of Finance)
MND	Министерство обороны (Ministry of National Defence)
MPS	Министерство общественной безопасности (Ministry of Public Security)
MOFA	Министерство иностранных дел (Ministry of Foreign Affairs)
MIC	Министерство информации и коммуникаций (Ministry of Information and Communications)
MOLISA	Министерство по труду, делам инвалидов войны и социального обеспечения (Ministry of Labour - Invalids and Social Affairs)
MCNP-5	Код переноса N-частиц по методу Монте-Карло, версия 5
OJT	Модель практического обучения на рабочем месте (On-the-job Training)
PDF	Базы данных порошковой рентгеновской дифракции

SAD	Досье по согласованию для утверждения площадки строительства (Site Approval Dossier)
VAEA	Агентство по атомной энергии Вьетнама (Vietnam Atomic Energy Agency)
VARANS	Агентство по радиационной и ядерной безопасности (Vietnam Agency for Radiation and Nuclear Safety)
VINATOM	Институт атомной энергии (Vietnam Atomic Energy Institute)
XRD	Дифракция рентгеновских лучей

Буквы русского алфавита

АЭС	Атомная электрическая станция
ВВР	Водо-водяные реакторы
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
ВВП	Валовой внутренний продукт
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ГРК	Государственный руководящий комитет
ГЭС	Гидровая электростанция
ИНИР	Комплексное рассмотрение ядерной инфраструктуры
ИНИР-РР	Комплексное рассмотрение ядерной инфраструктуры для исследовательских реакторов
ИЯР	Исследовательский ядерный реактор
КПД	Коэффициент полезного действия
МАГАТЭ	Международное агенство по атомной энергии
ОВОС	Оценка воздействия на окружающую среду
ОИАЭ	Объект использования атомной энергии
ОУП	Отдел управления проектами
ОЯТ	Отработавшее ядерное топливо
РАО	Радиоактивные отходы
ТЭО	Технико-экономическое обоснование
ТЭС	Тепловая электростанция
ЦЯНТ	Центр ядерной науки и технологий
ЮВА	Юго-Восточная Азия
ЯИ	Ядерная инфраструктура
ЯЭП	Ядерно-энергетическая программа

Обозначения

NaI (Tl)	Сцинтилляционный кристалл йодида натрия, легированный таллием
PR	Различные значения давления при изготовлении кирпичных образцов
RW, WW	Кирпичные образцы, изготовленные на основе красного и белого глинистого минерала Вьетнама, соответственно
N_0	Интенсивность излучения без защитного материала
N_t	Интенсивность излучения прошедшего защитный материал
N_a	Число поглощенных фотонов в защитном материале
E_γ	Энергия гамма-излучения
μ	Линейный коэффициент ослабления
μ_m	Массовый коэффициент ослабления
$\Delta_{0,5}$	Слой половинного ослабления
Δ_{eq}	Эквивалентная толщина свинца
λ	Длина свободного пробега
TF	Коэффициент пропускания
RPE	Эффективность радиационной защиты
K	Коэффициент водопоглощения
ρ	Плотность
ρ_L	Плотность воды
$x\rho$	Массовая толщина
W_a	Масса приготовленных образцов в воздухе
W_L	Масса приготовленных образцов в жидкой воде
Φ	Пористость
V_p	Объем пор
V_b	Насыпный объем
Z_{eff}	Эффективный атомный номер
N_{eff}	Плотность электронов
XRF	Метод рентгенофлуоресцентного анализа
ATL	Средняя длина пути
Cs-137, Co-60	Источники γ -излучения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Та Ван Тхьонг, Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Фам К.Т., Чан Б.Ш. Анализ состояния энергетической структуры и оценка условий для развития атомной энергетики во Вьетнаме // Альтерна. энерг. и экол. (ISJAEE). 2023. V. 2. С. 43–53.

[2] IAEA. Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSR-1. 2019.

[3] IAEA. Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-35. 2015.

[4] Le V.H., Tran C.T. Địa điểm xây dựng nhà máy điện hạt nhân: Một quá trình lâu dài và tốn kém // NĂNG LƯỢNG VIỆT NAM: вьетнам. энерг. журн. 2024. URL: <https://nangluongvietnam.vn/dia-diem-xay-dung-nha-may-dien-hat-nhan-mot-qua-trinh-lau-dai-va-ton-kem-ky-3-22036.html> (дата обращения: 15.02.2024).

[5] Руководство по предварительной оценке ядерной безопасности для площадки строительства АЭС в стадии принятия решения об инвестиционной политике: Циркуляр MOST от 20.5.2009, №13/2009/ТТ-ВКНСН / Министерство науки и технологий Вьетнама (MOST). Ханой: MOST, 2009. 6 с.

[6] Об инвестполитике АЭС Ниньтхуан: Резолюция Национального собрания от 25.11.2009, №41/2009/QH12 / Национальное собрание Вьетнама. Ханой: Здание Национального собрания Вьетнама, 2009. 3 с.

[7] Nguyen M.H. Preparation of Vietnam Electricity for the first Ninh Thuan NPP projects // Fukui International Meeting on Human Resources Development for Nuclear Energy in Asia. Fukui: FPG, IAEA, 2014. P. 30.

[8] Утверждение плана зонирования для разведки, разработки, переработки и использования драгоценных камней, редкоземельных и урановых руд на период до 2015 г. с перспективой до 2025 г: Решение МОИТ от 4.8.2008, №25/2008/QĐ-VСТ / Министер. промыш. и торговли Вьетнама (МОИТ). Ханой: МОИТ, 2008. 7 с.

[9] Новиков Г.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Безопасное использование ядерной энергии: правовые аспекты и методы управления, регулирования и обеспечения ядерной и радиационной безопасности: учебное пособие; под общ. ред. Г.А. Новикова. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 510 с.

[10] IAEA. Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1 (Rev. 1). 2015.

[11] Islam Md.S., Faisal S.I., Khan S. Development and strengthening of the nuclear and radiation safety infrastructure for nuclear power program of Bangladesh // Nuclear Engineering and Technology. 2021. Vol. 53. P. 1705–1716.

[12] Об утверждении национальной стратегии развития энергетики Вьетнама до 2020 г. с видением до 2050 г.: Решение Премьер-министра от 27.12.2007, №1855/QĐ-ТТг / Правительство Вьетнама. Ханой: Правительств. Офис, 2007. 9 с.

[13] Hoang A.T. Some issues on the development of nuclear power infrastructure: presentation. Hoa Binh: VAEA, 2014. P. 33.

[14] Mission report on the integrated nuclear infrastructure review: analytical report / IAEA, INIR Mission. Ha Noi: MOST, 2012. 78 p.

[15] Mission report on the integrated nuclear infrastructure review Follow-up Mission: analytical report / IAEA, INIR Follow-up Mission. Ha Noi: MOST, 2014. 28 p.

[16] Matt F. Nuclear infrastructure development to reap the benefits of research reactors: IAEA Bulletin. Vienna: IAEA, 2019. P. 2.

[17] IAEA. Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.1. 2012.

[18] Andrey S. IAEA Support to Member States for New Research Reactor Programmes // European Research Reactor Conference. Helsinki: ENS, 2021. P. 38.

[19] Mission report on the integrated nuclear infrastructure review for a new research reactor: analytical report / IAEA, INIR-RR Mission. Ha Noi: MOST, 2018.

[20] Та Ван Тхьонг, Ха Х.М., Ташлыков О.Л. О месте АЭС в развитии энергетики Вьетнама // Энергетика и автоматизация в современном обществе: материалы ежегодной III Всероссийской науч.-практ. конф. обучающихся и преподавателей. Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. С. 78–84.

[21] Та Ван Тхьонг Проект АЭС с РУ ВВЭР-1200 Системы безопасности: выпуск. квалиф. работа. Екатеринбург: УрФУ, 2020. 165 с.

[22] Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011. 232 с.

[23] Tashlykov O., Shcheklein S., Nosov Y., Smyshlaeva O. Ecological foresight in the nuclear power of XXI century // International Journal of Energy Production and Management. 2016. Vol. 1. P. 133–140.

[24] Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.

[25] Tashlykov O.L., Sesekin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Development of Methods for Route Optimization of Work in Inhomogeneous Radiation Fields to Minimize the Dose Load of Personnel // Energies. 2022. Vol. 15. P. 4788.

[26] Tashlykov O.L., Grigoryev A.M., Kropachev Y.A. Reducing the Exposure Dose by Optimizing the Route of Personnel Movement When Visiting Specified Points and Taking into Account the Avoidance of Obstacles // Energies. 2022. Vol. 15. P. 8222.

- [27] Khalaf M.A., Ban C.C., Ramli M. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review // *Cons. and Build. Mate.* 2019. Vol. 215. P. 73–89.
- [28] Roslan M.K.A., Ismail M., Kueh A.B.H., Zin M.R.M. High-density concrete: Exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding // *Construction and Building Materials.* 2019. Vol. 215. P. 718–725.
- [29] Oto B., Yıldız N., Akdemir F., Kavaz E. Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores // *Progr. in Nuc. Ener.* 2015. Vol. 85. P. 391–403.
- [30] Parirenyatwa S., Escudero-Castejon L., Sanchez-Segado S., Hara Y., Jha A. Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals // *Hydrometallurgy.* 2016. Vol. 165. P. 213–226.
- [31] Aita R.S., Abdel Ghany H.A., Ibrahim E.M., El-Feky M.G., El Aassy I.E., Mahmoud K.A. Gamma-rays attenuation by mineralized siltstone and dolostone rocks: Monte Carlo simulation, theoretical and experimental evaluations // *Radiation Physics and Chemistry.* 2022. Vol. 198. P. 110281.
- [32] Obaid S.S., Gaikwad D.K., Pawar P.P. Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete // *Rad. Phys. and Chem.* 2018. Vol. 144. P. 356–360.
- [33] Obaid S.S., Sayyed M.I., Gaikwad D.K., Pawar P.P. Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications // *Radiation Physics and Chemistry.* 2018. Vol. 148. P. 86–94.
- [34] Mahmoud K.A., Sayyed M.I., Tashlykov O.L. Gamma ray shielding characteristics and exposure buildup factor for some natural rocks using MCNP-5 code // *Nuclear Engineering and Technology.* 2019. Vol. 51. P. 1835–1841.
- [35] Mansour A., Sayyed M.I., Mahmoud K.A., Şakar E., Kovaleva E.G. Modified halloysite minerals for radiation shielding purposes // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences.* 2020. Vol. 13. P. 94–101.
- [36] Baltas H., Sirin M., Celik A., Ustabas İ., El-Khayatt A.M. Radiation shielding properties of mortars with minerals and ores additives // *Cement and Concrete Composites.* 2019. Vol. 97. P. 268–278.
- [37] Ta Van Thuong, Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. Lightweight bricks based Vietnamese red clay for radiation protection: A deep look for the impacts of compressive strength on the characterization, and gamma ray shielding evaluation // *Radiation Physics and Chemistry.* 2024. Vol. 218. P. 111583.
- [38] Kearsley E.P., Wainwright P.J. Porosity and permeability of foamed concrete // *Cement and Concrete Research.* 2001. Vol. 31. P. 805–812.
- [39] Akkurt I., Akyıldırım H. Radiation transmission of concrete including pumice for 662, 1173 and 1332keV gamma rays // *Nuclear Engineering and Design.* 2012. Vol. 252. P. 163–166.

[40] X-5 Monte Carlo Team. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 // La-Ur-03-1987. 2003. Vol. II.

[41] Лямцев И.А. Развитие метода расчета радиационной защиты на основе комбинирования детерминистического и стохастического методов и его применение к расчету защиты ЯЭУ: дис. канд. техн. наук / И.А. Лямцев: Физико-энергетический институт. – Обнинск, 2021. – 130 с.

[42] Махмуд К.А.Г. Расчетно-экспериментальные исследования радиационно-защитных свойств природных минералов Республики Египет и некоторых композитных материалов: дис. канд. техн. наук / К.А.Г. Махмуд: Уральский федеральный университет. – Екатеринбург, 2022. – 180 с.

[43] Kilic G., Ilik E., Mahmoud K.A., El-Mallawany R., El-Agawany F.I., Rammah Y.S. Novel zinc vanadyl boro-phosphate glasses: ZnO–V₂O₅– P₂O₅–B₂O₃: Physical, thermal, and nuclear radiation shielding properties // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. P. 19318–19327.

[44] Mahmoud K.A., Tashlykov O.L., El Wakil A.F., Zakaly H.M.H., El Aassy I.E. Investigation of radiation shielding properties for some building materials reinforced by basalt powder // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2174. P. 020036.

[45] Hendricks J.S., Frankle S.C., Court J.D. ENDF/B-VI Data for MCNP TM: Los Alamos National Laboratory report, LA-12891, 1994. 55 p.

[46] Hannachi E., Sayyed M.I., Slimani Y., Mahmoud K.G. Synthesis of pristine CaZrO₃ and CaZrO₃/Pr₆O₁₁ ceramic samples and assessment of their radiation protection features // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2023. Vol. 181. P. 111498.

[47] Rammah Y.S., Mahmoud K.A., Mohammed F.Q., Sayyed M.I., Tashlykov O.L., El-Mallawany R. Gamma ray exposure buildup factor and shielding features for some binary alloys using MCNP-5 simulation code // *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. Vol. 53. P. 2661–2668.

[48] Mavi B. Experimental investigation of γ -ray attenuation coefficients for granites // *Annals of Nuclear Energy*. 2012. Vol. 44. P. 22–25.

[49] Al-Hamarneh I.F. Investigation of gamma-ray shielding effectiveness of natural marble used for external wall cladding of buildings in Riyadh, Saudi Arabia // *Results in Physics*. 2017. Vol. 7. P. 1792–1798.

[50] Najam L.A., Hashim A.K., Ahmed H.A., Hassan I.M. Study the Attenuation Coefficient of Granite to Use It as Shields against Gamma Ray // *Detection*. 2016. Vol. 4. P. 33–39.

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

[52] Kropachev Y.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Optimization of radiation protection at the NPP unit decommissioning stage // *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019. Vol. 1. P. 119–130.

[53] Mikhailova A.F., Tashlykov O.L. The Ways of Implementation of the Optimization Principle in the Personnel Radiological Protection // *Physics of Atomic Nuclei*. 2020. Vol. 83. P. 1718–1726.

[54] IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. 2014.

[55] Sayyed M.I., Rammah Y.S., Abouhaswa A.S., Tekin H.O., Elbashir B.O. ZnO-B₂O₃-PbO glasses: Synthesis and radiation shielding characterization // *Physica B: Condensed Matter*. 2018. Vol. 548. P. 20–26.

[56] Kilicoglu O., Akman F., Ogul H., Agar O., Kara U. Nuclear radiation shielding performance of borosilicate glasses: Numerical simulations and theoretical analyses // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 204. P. 110676.

[57] Almurayshid M., Alsagabi S., Alssalim Y., Alotaibi Z., Almsalam R. Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield // *Radiation Physics and Chemistry*. 2021. Vol. 183. P. 109425.

[58] Şahin N., Bozkurt M., Karabul Y., Kılıç M., Özdemir Z.G. Low cost radiation shielding material for low energy radiation applications: Epoxy/Yahyali Stone composites // *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Vol. 135. P. 103703.

[59] Sayyed M.I., Hannachi E., Slimani Y., Khandaker M.U., Elsafi M. Radiation shielding properties of bi-ferroic ceramics added with CNTs // *Radiation Physics and Chemistry*. 2022. Vol. 200. P. 110096.

[60] Hannachi E., Sayyed M.I., Mahmoud K.A., Slimani Y. Gadolinium-based ceramics doped with lead oxide for γ -ray shielding // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 291. P. 126731.

[61] Roslan M.K.A., Ismail M., Kueh A.B.H., Zin M.R.M. High-density concrete: Exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. P. 718–725.

[62] Mahmoud K.G., Alqahtani M.S., Tashlykov O.L., Semenishchev V.S., Hanfi M.Y. The influence of heavy metallic wastes on the physical properties and gamma-ray shielding performance of ordinary concrete: Experimental evaluations // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 206. P. 110793.

[63] Singh J., Singh H., Sharma J., Singh T., Singh P.S. Fusible alloys: A potential candidate for gamma rays shield design // *Prog. in Nuc. Ener.* 2018. Vol. 106. P. 387–395.

[64] Akman F., Kaçal M.R., Sayyed M.I., Karataş H.A. Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 782. P. 315–322.

[65] Alorfi H.S., Hussein M.A., Tijani S.A. The use of rocks in lieu of bricks and concrete as radiation shielding barriers at low gamma and nuclear medicine energies // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 251. P. 118908.

[66] Mahmoud K.A., Tashlykov O.L., Mhareb M.H.A., Almuqrin A.H., Alajerami Y.S.M., Sayyed M.I. A new heavy-mineral doped clay brick for gamma-ray protection purposes // *Applied Radiation and Isotopes*. 2021. Vol. 173. P. 109720.

[67] Mahmoud K.A., El-Soad A.M.A., Kovaleva E.G., Almousa N., Sayyed M.I., Tashlykov O.L. Modeling a three-layer container based on halloysite nano-clay for radioactive waste disposal // *Progress in Nuclear Energy*. 2022. Vol. 152. P. 104379.

[68] Mann H.S., Brar G.S., Mann K.S., Mudahar G.S. Experimental Investigation of Clay Fly Ash Bricks for Gamma-Ray Shielding // *Nuclear Engineering and Technology*. 2016. Vol. 48. P. 1230–1236.

[69] Mahmoud K.A., Tashlykov O.L., El Wakil A.F., El Aassy I.E. Aggregates grain size and press rate dependence of the shielding parameters for some concretes // *Progress in Nuclear Energy*. 2020. Vol. 118. P. 103092.

[70] 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 // *Nuc. Engin. and Tech*. 2024. Vol. 56. P. 666–672.

[71] Sayyed M.I., Hanfi M.Y., Mahmoud K.A., Abdelaziem A. Theoretical Investigation of the radiation-protection properties of the CBS glass family // *Optik*. 2022. Vol. 258. P. 168851.

[72] Abualsayed M.I. Radiation attenuation attributes for BaO-TiO₂-SiO₂-GeO₂ glass series: a comprehensive study using Phy-X software // *Radiochimica Acta*. 2023. Vol. 111. P. 211–216.

[73] Tashlykov O.L., Vlasova S.G., Kovyazina I.S., Mahmoud K.A. Repercussions of yttrium oxides on radiation shielding capacity of sodium-silicate glass system: experimental and Monte Carlo simulation study // *The European Physical Journal Plus*. 2021. Vol. 136. P. 428.

[74] Sayyed M.I., Mhareb M.H.A., Alajerami Y.S.M., Mahmoud K.A., Imheidat M. A., Alshahri F., Alqahtani M., Al-Abdullah T. Optical and radiation shielding features for a new series of borate glass samples // *Optik*. 2021. Vol. 239. P. 166790.

[75] Naseer K.A., Marimuthu K., Mahmoud K.A., Sayyed M.I. Impact of Bi₂O₃ modifier concentration on barium–zincborate glasses: physical, structural, elastic, and radiation-shielding properties // *The European Phys. Journ. Plus*. 2021. Vol. 136. P. 116.

[76] Share Isfahani H., Abtahi S.M., Roshanzamir M.A., Shirani A., Hejazi S.M. Permeability and Gamma-Ray Shielding Efficiency of Clay Modified by Barite Powder // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019. Vol. 37. P. 845–855.

[77] Elgamouz, A., Tijani, N., Shehadi, I., Hasan, K., Al-Farooq Kawam, M. Characterization of the firing behaviour of an illite-kaolinite clay mineral and its potential use as membrane support // *Heliyon*. 2019. Vol. 5. P. e02281.

- [78] Azejjel, H., Ordax, J.M., Draoui, K., Rodríguez-Cruz, M.S., Sánchez-Martín, M.J. Effect of cosolvents on the adsorption of ethofumesate by modified Moroccan bentonite and common clay // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 49. P. 120–126.
- [79] Isfahani H.S., Abtahi S.M., Roshanzamir M.A., Shirani A., Hejazi S.M. Investigation on gamma-ray shielding and permeability of clay-steel slag mixture // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019. Vol. 78. P. 4589–4598.
- [80] Echeweozo E.O., Asiegbu A.D., Efurumibe E.L. Investigation of kaolin - Granite composite bricks for gamma radiation shielding // *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*. 2021. Vol. 3. P. 194–199.
- [81] Dogan B., Altinsoy N. Investigation of photon attenuation coefficient of some building materials used in Turkey // *AIP Conference Proceedings*. 2015. Vol. 1653. P. 020033.
- [82] Desouky O., Ding N., Zhou G. Targeted and non-targeted effects of ionizing radiation // *Journ. of Radia. Resea. and App. Sci*. 2015. Vol. 8. P. 247–254.
- [83] Du W., Zhang L., Li X., Ling G., Zhang P. Nuclear targeting Subcellular-delivery nanosystems for precise cancer treatment // *International Journal of Pharmaceutics*. 2022. Vol. 619. P. 121735.
- [84] Marcone M.F., Wang S., Albabish W., Nie S., Somnarain D., Hill A. Diverse food-based applications of nuclear magnetic resonance (NMR) technology // *Food Research International*. 2013. Vol. 51. P. 729–747.
- [85] Parker H.M.O., Joyce M.J. The use of ionising radiation to image nuclear fuel: A review // *Progress in Nuclear Energy*. 2015. Vol. 85. P. 297–318.
- [86] Sadiq M., Wen F., Dagestani A.A. Environmental footprint impacts of nuclear energy consumption: The role of environmental technology and globalization in ten largest ecological footprint countries // *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Vol. 54. P. 3672–3681.
- [87] Grigoryev A.M., Tashlykov O.L., Popel A.A., Kropachev Yu.A. Determination of radiation field parameters for the problems of routing optimization based on interpolation with radial basis functions // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2313. P. 020007.
- [88] ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3). 1991.
- [89] ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3). 1997.
- [90] IAEA. International Principal Safety Standards for Protection from Ionizing Radiation and Safe Handling of Sources of Radiation, Safety Series No. 115. 1997.
- [91] Yang L., Liu Y., Peng M., Ayodeji A., Chen Z., Long Z. Radioactive gas diffusion simulation and inhaled effective dose evaluation during nuclear decommissioning // *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. Vol. 54. P. 293–300.

- [92] Grigoryev A.M., Tashlykov O.L. Route optimization during works in non-stationary radiation fields with obstacles // *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2174. P. 020216.
- [93] Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Luk'yanenko V.Y., Mikhajlova A.F., Russkikh I.M., Seleznyov E.N., Kozlov A.V. The optimization of radiation protection composition // *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika.* 2015. Vol. 4. P. 36–42.
- [94] Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Russkikh I.M., Seleznev E.N., Kozlov A.V. Composition Optimization of Homogeneous Radiation-Protective Materials for Planned Irradiation Conditions // *Atomic Energy.* 2017. Vol. 121. P. 303–307.
- [95] Dhandapani Y., Santhanam M. Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination // *Cement and Concrete Research.* 2020. Vol. 129. P. 105959.
- [96] Durak H., Kavaz E., Oto B., Aras A. The impact of Co addition on neutron-photon protection characteristics of red and yellow clays-based bricks: An experimental study // *Progress in Nuclear Energy.* 2022. Vol. 143. P. 104047.
- [97] Mann H.S., Brar G.S., Mudahar G.S. Gamma-ray shielding effectiveness of novel light-weight clay-flyash bricks // *Rad. Phys. and Chem.* 2016. Vol. 127. P. 97–101.
- [98] Kiatwattanacharoen S., Srimaroeng P., Kothan S., Jumpee C., Kim H.J., Kaewjaeng S. A study of x-ray radiation shielding properties of bricks contained barium sulfate // *AIP Conference Proceedings.* 2020. Vol. 2279. P. 060004.
- [99] Khozemy E.E., Salem E.F., Ali A.E.H. Radiation shielding and enhanced thermal characteristics of high-density polyethylene reinforced with $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Pb}_2\text{O}_3$ for radioactive waste management // *Rad. Phys. and Chem.* 2022. Vol. 193. P. 109976.
- [100] Sidhu B.S., Dhaliwal A.S., Kahlon K.S., Singh S. On the use of flyash-lime-gypsum (FaLG) bricks in the storage facilities for low level nuclear waste // *Nuclear Engineering and Technology.* 2022. Vol. 54. P. 674–680.
- [101] Escalera-Velasco L.A., De León-Martínez H.A., Hernández-Murillo C.G., Vega-Carrillo H.R., Molina-Contreras J.R., Palos-Barba V., Sánchez-Ortiz A. Radiation shielding and dosimetric parameters of mexican artisanal bricks // *Applied Radiation and Isotopes.* 2022. Vol. 188. P. 110355.
- [102] Escalera-Velasco L.A., Molina-Contreras J.R., Hernández-Murillo C.G., De León-Martínez H.A., Vega-Carrillo H.R., Rodríguez-Rodríguez J.A., López-Salas I.A. Shielding behavior of artisanal bricks against ionizing photons // *Applied Radiation and Isotopes.* 2020. Vol. 161. P. 109167.
- [103] Ta Van Thuong, Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. A unique Vietnam's red clay-based brick reinforced with metallic wastes for γ -ray shielding purposes: Fabrication, characterization, and γ -ray attenuation properties // *Nuclear Engineering and Technology.* 2024. Vol. 56. P. 1544–1551.

[104] Kilic G., Ilik E., Mahmoud K.A., El-Agawany F.I., Alomairy S., Rammah Y.S. The role of B₂O₃ on the structural, thermal, and radiation protection efficacy of vanadium phosphate glasses // *Applied Physics A*. 2021. Vol. 127. P. 265.

[105] Sayyed M.I., Mahmoud K.A., Islam S., Tashlykov O.L., Lacomme E., Kaky K.M., Application of the MCNP 5 code to simulate the shielding features of concrete samples with different aggregates // *Rad. Phys. and Chem.* 2020. Vol. 174. P. 108925.

[106] IAEA. *Research Reactors: Purpose and Future, 60 Years Atoms for Peace and Development*. 2016.

[107] Russkikh I.M., Seleznev E.N., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Experimental and theoretical study of organometallic radiation-protective materials adapted to radiation sources with a complex isotopic composition // *Physics of Atomic Nuclei*. 2015. Vol. 78. P. 1451–1456.

[108] Chusov I.A., Shelegov A.S., Kochnov O.Yu. Design features of water-cooled research reactors // *Nuclear Energy and Technology*. 2016. Vol. 2. P. 287–293.

[109] Tran Q.D., Nguyen K.C., Luong B.V., Huynh T.N., Pham Q.H., Dang Vo D.H., Nguyen N.D. Determination of the Activity Inventory in the Structural Components of the Dalat Nuclear Research Reactor for Its Decommissioning Planning // *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2022. Vol. 2022. P. 5174696.

[110] Та Ван Тхьонг, Ха Х.М., Ташлыков О.Л. Развитие энергетики Вьетнама // *Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы междунар. конф.* Екатеринбург: УрФУ, 2020. С. 504–509.

[111] Tran C.T., Nguyen N.D. Status of the Project on Research Center for Nuclear Science and Technology and Proposing Main Research and Application Directions of the New Research Reactor // *Vietnam Conference on Nuclear Science and Technology VINANST-14. Agenda and Abstracts*. Da Lat: VINATOM, 2021. P. 2.

[112] Litvinov D.N., Kostarev V.S., Tashlykov O.L., Klimova V.A., Aristov N.M., Zlokazov S.B. Thermal hydraulic simulation of a channel with targets for production of selenium-75 isotope // *AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2313. P. 070011.

[113] Nguyen K.C., Huynh T.N., Le V.V., Luong B.V. The Role of a Research Reactor in the National Nuclear Energy Programme in Vietnam: Present and Future // *International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization*. Morocco: IAEA, 2012. P. 8.

[114] Do Q.B., Phan T.T.G., Nguyen K.C., Ngo Q.H., Tran H.N. Criticality and rod worth analysis of the DNRR research reactor using the SRAC and MCNP5 codes // *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 343. P. 197–209.

[115] Nguyen K.C., Le V.V., Huynh T.N., Luong B.V., Nguyen N.D. Steady-State Thermal-Hydraulic Analysis of the LEU-Fueled Dalat Nuclear Research Reactor // *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2021. Vol. 2021. P. 6673162.

[116] Phan G., Tran H.N., Nguyen K.C., Tran V.P., Hoang V.K., Pham N.V.H., Hoang A.T.K. Comparative Analysis of the Dalat Nuclear Research Reactor with HEU Fuel Using SRAC and MCNP5 // Science and Technology of Nuclear Installations. 2017. Vol. 2017. P. 2615409.

[117] Pre-feasibility study report of Nuclear Science and Technology Center Project: analytical report / MOST, Joint venture PECC1 - Nuclear Research Institute. Ha Noi: MOST, 2017. 196 p.

[118] IAEA. Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSG-10. 2018.

[119] IAEA. Managing Environmental Impact Assessment for Construction and Operation in New Nuclear Power Programmes, No. NG-T-3.11. 2014.

[120] О некоторых вопросах государственной экологической экспертизы, оценки воздействия на окружающую среду и стратегической экологической оценки: Постановление Совета Министров Беларуси от 19.01.2017, №47 / Правительство Беларуси. Минск: Дом правительства, 2017. 25 с.

[121] Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении исследовательской ядерной установки многоцелевой исследовательский реактор на быстрых нейтронах (МБИР) в пределах промплощадки ОАО «ГНЦ НИИАР»: аналит. отчет, книга 1, март 2014 / РОСАТОМ, ОАО «ГНЦ НИИАР». Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2014. 312 с.

[122] Detailing a number of articles of the Law on Environmental Protection: Government Decree dated 10.01.2022, No.08/2022/ND-CP / Vietnamese Government. Ha Noi: Government Office, 2022. 132 p.

[123] Detailing a number of articles of the Law on Environmental Protection: Circular MONRE dated 10.01.2022, No.02/2022/TT-BTNMT / Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE). Ha Noi: MONRE, 2022. 52 p.

[124] Environmental impact assessment report of the Nuclear Science and Technology Center Project: analytical report / MOST, Nuclear Research Institute. Ha Noi: MOST, 2017. 107 p.

[125] Regulations on Nuclear Safety for Research Reactors: Circular MOST dated 30.10.2020, No.05/2020/TT-BKHCN / Ministry of Science and Technology (MOST). Ha Noi: MOST, 2020. 11 p.

[126] Clarke B.D., Vu C.C. EIA effectiveness in Vietnam: key stakeholder perceptions // Heliyon. 2021. Vol. 7. P. 1–11.

[127] Та Ван Тхьонг, Ташлыков О.Л., Фам Х.Т., Ву Х.Х. Разработка руководства по подготовке отчета об оценке воздействия на окружающую среду для центра ядерной науки и технологий Вьетнама // Физика. Технологии. Инновации: сборник статей VIII междунар. молодеж. науч. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2021. С. 353–364.

[128] Nur A.P. The dynamics of nuclear energy among ASEAN member states // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 143. P. 585–590.

[129] U.S. EPA. §309 Reviewers Guidance for New Nuclear Power Plant Environmental Impact Statements, EPA Publication 315-X-08-001. 2008.

[130] U.S. NRC. Standard Review Plans for Environmental Reviews for Nuclear Power Plants: Environmental Standard Review Plan, NUREG-1555. 1999.

[131] Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок (НП-033-11) // ФБУ «НТЦ ЯРБ»: электронный веб-сайт. 2024. URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_033_11/ (дата обращения: 20.01.2024).

[132] EU. Environmental Impact Assessment of Projects: Guidance on the Preparation of the Environmental Impact Assessment Report. 2017.

[133] IAEA. Safety Assessment for Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis Report, IAEA Safety Standards Series No. SSG-20 (Rev. 1). 2012.

[134] IAEA. Radiation Protection of the Public and the Environment, IAEA Safety Standards Series No. GSG-8. 2018.

[135] IAEA. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, IAEA Safety Standards Series No. GSG-9. 2018.

[136] Ta Van Thuong, Tashlykov O., Tuyen P.K., Hai V.H. Development of Guidance on the Preparation of the Environmental Impact Assessment Report for the Center for Nuclear Science and Technology of Vietnam // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 575. P. 2900–2907.

[137] Ta Van Thuong, Tashlykov O.L., Pham K.T. Preparation of guidance on the appraisal of the environmental impact assessment report for the center for nuclear science and technology of Vietnam // *E3S Web of Conf*. 2023. Vol. 389. P. 09057.

[138] Lee S.H., Seo H.W., Kim C.L. Preparation of Radiological Environmental Impact Assessment for the Decommissioning of Nuclear Power Plant in Korea // *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*. 2018. Vol. 16. P. 107–122.

[139] On implementation of radiation-related affairs and provision of auxiliary services for atomic energy application: Government Decree dated 09.12.2020, No.142/2020/ND-CP / Government. Ha Noi: Government Office, 2020. 42 p.

[140] Dinh T.H., Cao V.H., Pham D.K., Nguyen X.H., Nguyen N.A., Tran D.T., Dinh K.C., Nguyen N.D., Nguyen T.A. A Confident Configuration for an Environmental Radiation Monitoring System // *IEEE Trans. on Nuc. Sci*. 2020. Vol. 67. P. 2224–2230.

[141] On occupational radiation protection and public radiation protection: Circular MOST dated 08.11.2012, No.19/2012/TT-BKHCHN / Ministry of Science and Technology (MOST). Ha Noi: MOST, 2012. 8 p.

[142] On the management of radioactive wastes and used radioactive sources: Circular MOST dated 25.08.2014, No.22/2014/TT-BKHCHN / Ministry of Science and Technology (MOST). Ha Noi: MOST, 2014. 18 p.

[143] Prescribing the assurance of security of radioactive sources: Circular MOST dated 30.05.2019, No.01/2019/TT-BKHCN / Ministry of Science and Technology (MOST). Ha Noi: MOST, 2019. 25 p.

[144] Pham D.H. Assessment of Benefits of Research Reactors in Less Developed Countries. A Case Study of the Dalat Reactor in Vietnam // JAERI-Conf. 99-006: Proc. of the Sixth Asian symp. on research reactors. Mito: JAERI, 1999. P. 61–71.

[145] Подготовка и развитие людских ресурсов в области атомной энергии: Решение Премьер-министра от 18.8.2010, №1558/QĐ-TTg / Правительство Вьетнама. Ханой: Правительственный Офис, 2010. 8 с.

[146] План по обучению и развитию людских ресурсов госуправления по исследованию, развертыванию и технической поддержке до 2020 г. для реализации целей развития ядерной энергетики: Решение Премьер-министра от 15.10.2015, №1756/QĐ-TTg / Правительство Вьетнама. Ханой: Правительств. Офис, 2015. 5 с.

[147] Подготовка людских ресурсов для проектов АЭС в провинции Ниньтхуан: Решение Премьер-министра от 11.4.2013, №584/QĐ-TTg / Правительство Вьетнама. Ханой: Правительственный Офис, 2013.

[148] Отчет о состоянии и результатах выполнения трех задач EVN в Решении 2241/QĐ-TTg Премьер-министра от 11.12.2014: Отчет Директора EVNNPB от 5.7.2016, №771/BC-EVNNPB / Отдел управления проектами АЭС Ниньтхуан. Ninh Thuan: EVNNPB, 2016. 4 с.

[149] Отчет о плане приема и распределения работы вьетнамским выпускникам в России для работы в Отделе управления проектами и Отделе подготовки производства АЭС Ниньтхуан: Отчет Директора EVNNPB от 16.3.2016, №291/BC-EVNNPB / Отдел управления проектами АЭС Ниньтхуан. Ninh Thuan: EVNNPB, 2016. 22 с.

[150] Об утверждении стратегии мирного применения атомной энергии до 2020 г.: Решение Премьер-министра от 3.1.2006, №01/2006/QĐ-TTg / Правительство Вьетнама. Ханой: Правительственный Офис, 2006. 30 с.

[151] Об утверждении генерального плана реализации стратегии мирного применения атомной энергии до 2020 г.: Решение Премьер-министра от 23.7.2007, №114/2007/QĐ-TTg / Правительство Вьетнама. Ханой: Правительственный Офис, 2006. 11 с.

[152] Ташлыков О.Л., Климова В.А., Та Ван Тхыонг О проблемах подготовки иностранных специалистов для атомной энергетики стран-партнеров Росатома в УрФУ // Новые образовательные технологии в ВУЗе: сборник статей XII междунар. науч.-методи. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 189–195.

[153] Климова В.А., Ташлыков О.Л., Та Ван Тхыонг, Ха Х.М. Особенности подготовки иностранных специалистов для атомной энергетики стран-партнеров

Росатома в УрФУ // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров: материалы науч.-практ. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 32–36.

[154] Та Ван Тхьонг, Ха Х.М., Ташлыков О.Л. Разработка учебных материалов на вьетнамском языке для подготовки специалистов для атомной энергетики Вьетнама // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы междунар. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2019. С. 773–776.

[155] Ташлыков О.Л. Основы ядерной энергетики: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 225 с.

[156] Илюшкина М.Ю. Теория перевода: основные понятия и проблемы: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 86 с.

[157] Алексеева И.С. Введение в переводоведение: учебное пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 352 с.

[158] Шамилова З.М. К вопросу об общем понятии транспозиции // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №2–1. С. 1–3.

[159] Rahmatillah K. Modulation in Translation Process // Ethical Lingua: Journal of Language Teaching and Literature. 2017. Vol. 4. P. 68–75.

[160] Брыкина С.В., Широкова Д.А. Эквивалентность перевода: лексематический аспект // Известия ПГУ им. В.Г. Белинского. 2012. №27. С. 230–235.

[161] Нелюбова Н.Ю., Фомина П.С. Использование приема адаптации при переводе художественных произведений, относящихся к различным типам культур (западной и русской) // Вестник славян. культур. 2018. №2. С. 211–224.

[162] Сарангаева Ж.Н., Даржинова Л.В. Роль заимствований в английском языке // Вестник калмыцкого университета. 2015. №27. С. 22–26.

[163] Сагитова М.В. Калькирование терминов (на материале книги «Cloud Computing») // Актуальные вопросы филологической науки XXI века: сборник статей по материалам III Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 329–336.

[164] Баринаева И.А., Нестерова Н.М. Перевод: «поверженный / неповерженный» буквализм // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №6. С. 66–77.

[165] Ташлыков О.Л., Та Ван Тхьонг Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике: учеб. словарь. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. 175 с.