

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ/NUCLEAR POWER PLANTS, FUEL CYCLE, RADIATION SAFETY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГАЛЛУАЗИТА

Научная статья

Широнина А.М.^{1,*}, Воронин И.П.², Ташлыков О.Л.³, Ярков В.Ю.⁴

³ ORCID : 0000-0001-6397-015X;

^{1, 2, 3} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

⁴ Институт реакторных материалов, Заречный, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (shironina-03[at]mail.ru)

Аннотация

В данной статье подробно рассматривается вопрос, касающийся оптимизации методов радиационной защиты для персонала атомной энергетики. Традиционные подходы к обеспечению защиты не всегда удобны в практике эксплуатации, что подчеркивает необходимость разработки новых и более эффективных материалов. Одним из таких инновационных материалов является галлуазит, который представляет собой перспективный композитный материал для использования в качестве радиационной защиты. В рамках работы представлен отчет о проведенном исследовании галлуазита: его химический состав, особенности строения и физические свойства. На основании данных, полученных с помощью программного пакета NIST XCOM, сделан вывод о его возможностях применения в сфере использования атомной энергетики.

Ключевые слова: галлуазит, композитные материалы, радиационная защита, рентгеноспектральный анализ.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RADIATION-PROTECTIVE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON HALLOYSITE

Research article

Shironina A.M.^{1,*}, Voronin I.P.², Tashlykov O.L.³, Yarkov V.Y.⁴

³ ORCID : 0000-0001-6397-015X;

^{1, 2, 3} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

⁴ Institute of Reactor Materials, Zarechny, Russian Federation

* Corresponding author (shironina-03[at]mail.ru)

Abstract

This article examines in detail the issue of optimising radiation protection methods for nuclear power personnel. Traditional approaches to protection are not always practical in operation, which highlights the necessity of developing new and more effective materials. One such innovative material is halloysite, which is a promising composite material for use as radiation protection. The paper presents a report on the study of halloysite: its chemical composition, structural traits, and physical properties. Based on data obtained using the NIST XCOM software package, a conclusion is made about its potential applications in the field of nuclear energy.

Keywords: halloysite, composite materials, radiation protection, X-ray spectral analysis.

Введение

Повышение эффективности радиационной защиты персонала требует постоянного совершенствования материалов, используемых на ОИАЭ. Первым и главным требованием, предъявляемым к материалам, предназначенным для защиты, являются их высокие защитные свойства как против нейтронного, так и против гамма-излучения. В связи с этим активно проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на совершенствование существующих и разработку новых нетоксичных материалов, обеспечивающих эффективную радиационную защиту [1], [2].

В настоящее время особое внимание уделяется композитным материалам, где в качестве матрицы могут быть использованы полимеры, цемент или глина. Композитные материалы широко применяются в качестве радиационной защиты благодаря возможности изменять состав наполнителя, их весу, механическим свойствам и хорошей способности ослаблять излучение. Композитный материал представляет собой структуру, состоящую из двух и более компонентов с различными физико-химическими свойствами. Комбинирование этих компонентов позволяет получить материал с новыми, улучшенными характеристиками, отличающимися от свойств исходных составляющих. Путем варьирования состава, пропорций компонентов и ориентации наполнителя, можно создавать широкий спектр материалов с заданными свойствами. В большинстве случаев композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по механическим характеристикам, что позволяет снизить массу конструкций без потери прочности и других эксплуатационных параметров [3].

Галлуазит — это уникальный природный слоистый материал, состоящий из алюмосиликатной глины, сформированной в нанотрубки. По своему химическому составу он схож с каолинитом, а его нанотрубки можно представить как свернутые слои каолина. Длина этих трубок варьируется от 0,5 до 1,5 мкм, а их внешний диаметр

составляет 50–80 нм. Формирование трубчатой структуры обусловлено различиями в периодах слоев диоксида кремния и оксида алюминия с октаэдрической структурой [4, С. 1227]. Помимо уникальной трубчатой структуры, галлуазит обладает химическими свойствами составляющих его алюмосиликатов. Благодаря своей низкой токсичности он находит применение в качестве экологически безопасных и доступных сорбентов, носителей лекарственных препаратов и материалов для тканевой инженерии. Однако, учитывая его относительно невысокую плотность ($2\text{--}2,2\text{ г/см}^3$), галлуазит обладает ограниченной способностью ослаблять высокоэнергетические фотоны.

Целью работы является исследование радиационно-защитных свойств галлуазита в качестве матрицы для композитных материалов. Перспективным направлением использования изделий из галлуазита, как в чистом виде с повышенной плотностью, так и с добавлением различных промышленных отходов, могут стать блоки (кирпичи) для быстровозводимых конструкций радиационной защиты. Эти изделия могут эффективно использоваться для экранирования высокоактивного оборудования в процессе его ремонта и демонтажа, обеспечивая безопасность и защиту персонала атомной энергетики от потенциального радиационного воздействия.

Методы и принципы исследования

Исследование микроструктуры галлуазита было проведено с помощью микроскопа TESCAN Mira 3 LMU (см. рисунок 1).

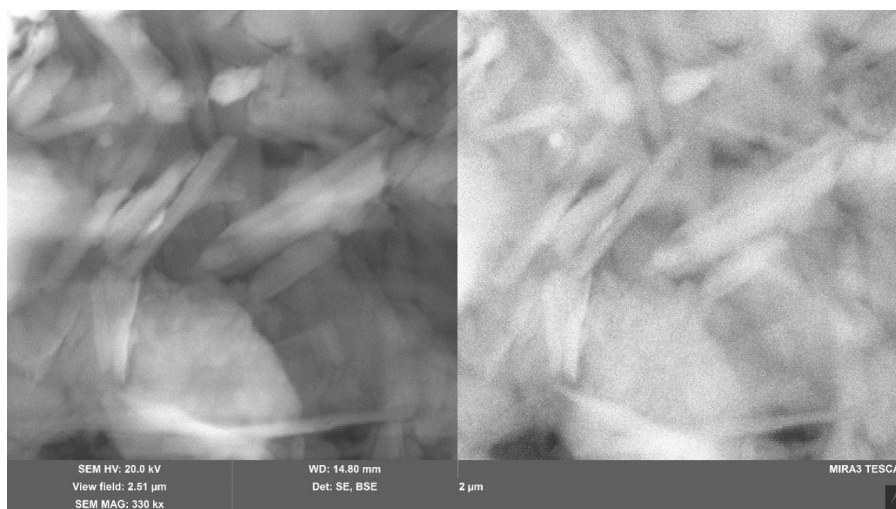


Рисунок 1 - Изображение нанотрубок галлуазита, полученное при помощи электронного микроскопа
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33.1>

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) предназначен для детального изучения поверхности материалов, предоставляя изображения с высоким разрешением и информацию о составе, структуре и других характеристиках приповерхностных слоев. СЭМ формирует изображение путем сканирования поверхности образца сфокусированным электронным пучком. Этот метод особенно эффективен для анализа трехмерных электронно-плотных образцов. С помощью СЭМ можно исследовать форму и морфологию поверхности частиц, анализировать покрытия, шероховатость и волнообразность поверхности, изучать поры и волокна с заданными свойствами, при этом увеличения варьируются от 4 до 10^6 раз, а ускоряющее напряжение — от 200 В до 30 кВ. Использование катода Шоттки с высокой яркостью обеспечивает получение изображений с высоким разрешением, отличной контрастностью и низким уровнем шума [5].

По 5 полученным спектрам были определены усредненные значения элементов химического состава. Галлуазит состоит из 40,28% кислорода, 27,25% алюминия, 29,72% кремния, 1,27% калия и 1,48% железа (см. рисунок 2).

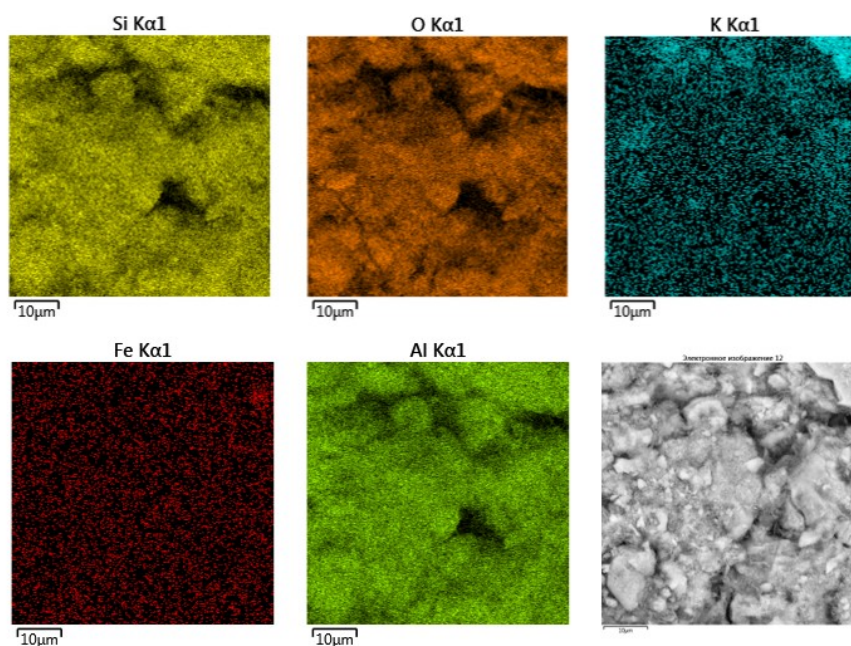


Рисунок 2 - Карта распределения химических элементов в составе галлуазита
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33.2>

Были изготовлены 4 образца из галлуазита с добавлением 10% эпоксидной смолы и 0%, 10%, 20%, 40% металлических отходов (см. рисунок 3). Образцы были подвергнуты процессу прессования, который осуществлялся под давлением 114,24 МПа [6]. Прессование было направлено на значительное повышение их плотности, что, в свою очередь, должно было улучшить физические и механические характеристики материала. Прессование помогло более равномерно распределить структуру образцов, что положительно сказалось на их общей прочности и устойчивости к внешним воздействиям.

Плотность измеряли с помощью плотномера МН-300А. Плотномер МН-300А — экономичный цифровой прибор с диапазоном измерения с 0,01 г до 300 г. Благодаря использованию метода Архимеда плотномер напрямую может точно показывать плотность исследуемого образца. Погрешность измерения находится в пределах $\pm 0,01$ г/см³.



Рисунок 3 - Образцы из галлуазита с различным содержанием металлических отходов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33.3>

Для теоретической оценки экранирующих свойств материала, а именно массового коэффициента ослабления, был применен программный комплекс NIST XCOM. В основе XCOM лежит база данных сечений взаимодействия фотонов, разработанная Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST). XCOM позволяет рассчитать полные и парциальные сечения различных процессов взаимодействия фотонов с веществом, включая некогерентное и когерентное рассеяние, фотоэлектрическое поглощение, а также образование электрон-позитронных пар в поле атомного ядра и электронов [7].

В таблице 1 приведены квантово-теоретические модели, использованные для определения сечений вышеупомянутых процессов.

Таблица 1 - Теоретические модели, используемые в базе данных XCOM

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33.4>

| Механизм взаимодействия | Модели |
|--------------------------|--|
| Некогерентное рассеяние | Уравнение Нисима-Клейна и нерелятивистские функции некогерентного рассеяния Хартри-Фока [8] |
| Когерентное рассеяние | Формула Томсона и релятивистские атомные формфакторы Хартри-Фока [9] |
| Фотоэлектрический эффект | $\leq 1,5$ МэВ уравнение Скофилда [10] $> 1,5$ МэВ Полуэмпирическое уравнение, рассчитанное Праттом |
| Образование пар | Теория Бете-Гайтлера [11] |

Основные результаты

Массовый коэффициент ослабления был получен с помощью программного пакета NIST XCOM. Далее по формулам рассчитывался линейный коэффициент ослабления (см. рисунок 4) и толщина слоя половинного ослабления (см. рисунок 5).

Линейный коэффициент ослабления μ зависит от энергии гамма-излучения, атомного номера Z и плотности ρ поглотителя. Гамма-кванты взаимодействуют, в основном, с атомными электронами, следовательно, коэффициент ослабления должен быть пропорционален плотности электронов P , которая пропорциональна объемной плотности поглощающего материала.

Линейный коэффициент ослабления рассчитывался по формуле:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho \quad (1)$$

где μ_m — массовый коэффициент ослабления образца,

ρ — плотность образца.

Стоит также отметить, что одной из важных характеристик защитных материалов является толщина половинного ослабления $x_{1/2}$. Данная характеристика показывает, какая должна быть толщина слоя ослабляющего материала, чтобы обеспечить снижение интенсивности гамма-излучения в два раза.

Слой половинного ослабления рассчитывался по формуле:

$$x_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2)$$

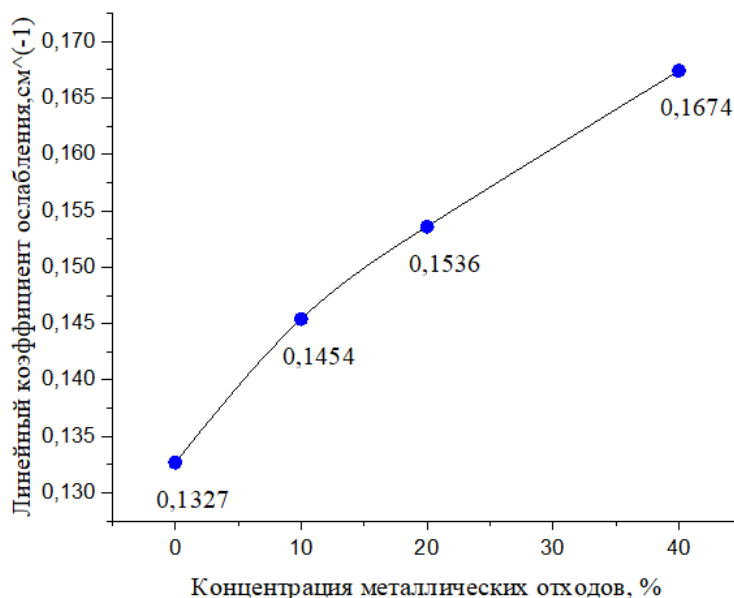


Рисунок 4 - Зависимость линейного коэффициента ослабления от концентрации металлических отходов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33.5>

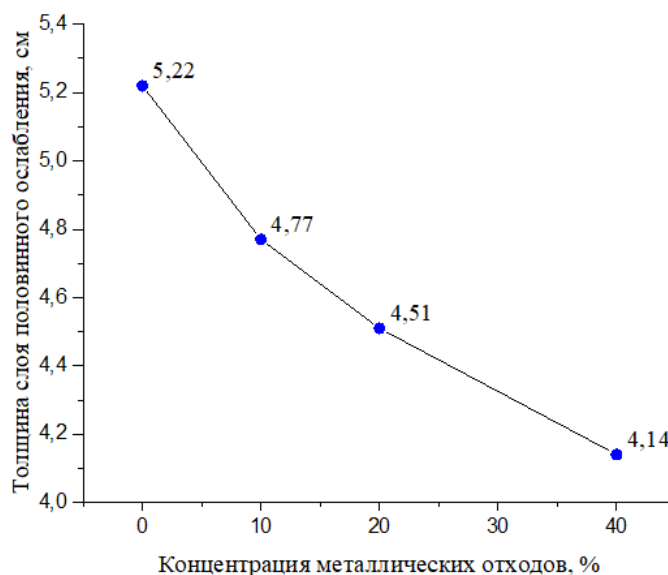


Рисунок 5 - Зависимость толщины слоя половинного ослабления от концентрации металлических отходов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.33.6>

Заключение

В ходе проведенных исследований был получен химический состав галлуазита, который включает в себя преимущественно легкие элементы. Эти элементы, несмотря на свою широкий спектр использования в различных областях, обеспечивают недостаточные экранирующие свойства. Их большой удельный объем и низкая плотность не позволяют им эффективно поглощать радиоактивное излучение и использоваться в качестве радиационной защиты.

Поэтому для повышения радиационно-защитных свойств галлузита, он был использован в качестве матрицы с наполнителем из металлических отходов. Также образцы подвергались прессованию для повышения из плотности. Эти меры привели к значительному улучшению защитных характеристик. При увеличении концентрации металлических отходов линейный коэффициент ослабления увеличился на 26%. В то же время толщина слоя половинного ослабления изменилась с 5,22 см до 4,14 см.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Киселёва М.Ф. МКРЗ. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите / М.Ф. Киселёва, Н.К. Шандалы. — Москва: ООО ПКФ «Алана», 2009. — 344 с.
2. Sayyed M.I. Enhancement of the Shielding Capability of Soda–Lime Glasses with Sb₂O₃ Dopant: A Potential Material for Radiation Safety in Nuclear Installations. / M.I. Sayyed, K.A. Mahmoud, O.L. Tashlykov // Applied Sciences (Switzerland). — 2021. — 1. — P. 1–15.
3. Вселенная композитов // Вестник атомпрома. — URL: <https://atomvestnik.ru/2024/04/01/vselennaja-kompozitov/?ysclid=m59r0r9ts0580476134> (дата обращения: 29.12.24)
4. Lvov Y. Halloysite Clay Nanotubes for Loading and Sustained Release of Functional Compounds. / Y. Lvov, W. Wang, L. Zhang // Advanced Materials. — 2016. — 6. — P. 1227–1250.
5. TESCANA Mira 3 LMU // Политех. — URL: https://design4amlab.spbstu.ru/tescan_mira_3_lmu (дата обращения: 29.12.24)
6. Широнова А.М. Улучшение радиационно-защитных свойств диатомитовых глинистых материалов при воздействии давления. / А.М. Широнова, И.П. Воронин, К.А.Г. Махмуд и др. // Энергетика и автоматизация в современном обществе; — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023.
7. Berger K.O.M.J. XCOM: Photon Cross Sections Database / K.O.M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer // NIST. Physical measurement laboratory. — 2010. — URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>. (дата обращения: 30.07.25) doi: 10.18434/T48G6X
8. Hubbell J.H. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections. / J.H. Hubbell, Wm.J. Veigele, E.A. Briggs // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1975. — 3. — P. 471–538.
9. Hubbell J.H. Relativistic atomic form factors and photon coherent scattering cross sections. / J.H. Hubbell, I.O. Verbo // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1979. — 1. — P. 69–106.
10. Scofield J. H. Physics theoretical photoionization cross sections from 1 to 1500 keV: UCRL-51326 / J. H. Scofield. — Livermore, California, 1973. — 65 p.
11. Hubbell J.H. Pair, Triplet, and Total Atomic Cross Sections (and Mass Attenuation Coefficients) for 1 MeV–100 GeV Photons in Elements Z = 1 to 100. / J.H. Hubbell, H.A. Gimm, I.O. Verbo // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1980. — 4. — P. 1023–1148.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kiselyova M.F. MKRZ. Publikaciya 103 Mezhdunarodnoj Komissii po radiacionnoj zashhite [MKRZ. Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection] / M.F. Kiselyova, N.K. Shandaly'. — Moscow: ООО ПКФ «Алана», 2009. — 344 p. [in Russian]
2. Sayyed M.I. Enhancement of the Shielding Capability of Soda–Lime Glasses with Sb₂O₃ Dopant: A Potential Material for Radiation Safety in Nuclear Installations. / M.I. Sayyed, K.A. Mahmoud, O.L. Tashlykov // Applied Sciences (Switzerland). — 2021. — 1. — P. 1–15.
3. Vselennaya kompozitov [The universe of composites] // Bulletin of Atomprom. — URL: <https://atomvestnik.ru/2024/04/01/vselennaja-kompozitov/?ysclid=m59r0r9ts0580476134> (accessed: 29.12.24) [in Russian]
4. Lvov Y. Halloysite Clay Nanotubes for Loading and Sustained Release of Functional Compounds. / Y. Lvov, W. Wang, L. Zhang // Advanced Materials. — 2016. — 6. — P. 1227–1250.
5. TESCANA Mira 3 LMU [TESCANA Mira 3 LMU] // Polytech. — URL: https://design4amlab.spbstu.ru/tescan_mira_3_lmu (accessed: 29.12.24) [in Russian]
6. Shironina A.M. Uluchshenie radiacionno-zashhitny'x svojstv diatomitovy'x glinisty'x materialov pri vozdeystvii davleniya [Improvement of radiation-protective properties of diatomaceous clay materials under pressure]. / A.M. Shironina, I.P. Voronin, K.A.G. Maxmud et al. // Energy and automation in modern society; — Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny'j universitet promy'shlenny'x tehnologij i dizajna, 2023. [in Russian]
7. Berger K.O.M.J. XCOM: Photon Cross Sections Database / K.O.M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer // NIST. Physical measurement laboratory. — 2010. — URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>. (accessed: 30.07.25) doi: 10.18434/T48G6X

8. Hubbell J.H. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections. / J.H. Hubbell, Wm.J. Veigele, E.A. Briggs // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1975. — 3. — P. 471–538.
9. Hubbell J.H. Relativistic atomic form factors and photon coherent scattering cross sections. / J.H. Hubbell, I.O. Verbo // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1979. — 1. — P. 69–106.
10. Scofield J. H. Physics theoretical photoionization cross sections from 1 to 1500 keV: UCRL-51326 / J. H. Scofield. — Livermore, California, 1973. — 65 p.
11. Hubbell J.H. Pair, Triplet, and Total Atomic Cross Sections (and Mass Attenuation Coefficients) for 1 MeV-100 GeV Photons in Elements $Z = 1$ to 100. / J.H. Hubbell, H.A. Gimm, I.O. Verbo // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 1980. — 4. — P. 1023–1148.