

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173>

РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИДИМЕТИЛСИЛОКСАНА, ПОЛИУРЕТАНА С НАПОЛНИТЕЛЯМИ ИЗ НАНОПОРОШКОВ ZNO/TIO₂

Научная статья

Воложенинов Т.П.¹, Касков Д.О.², Юзбашиева К.Ш.³, Аладайлах М.В.^{4,*}, Ташлыков О.Л.⁵

¹ ORCID : 0000-0003-4538-0951;

² ORCID : 0000-0002-0942-9191;

³ ORCID : 0000-0003-0060-6064;

⁴ ORCID : 0000-0002-8675-0608;

⁵ ORCID : 0000-0001-6397-015X;

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

⁵ Уральский Федеральный Университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aladailehmotaz[at]gmail.com)

Аннотация

Исследователями Уральского федерального университета в сотрудничестве с Иорданским университетом науки и технологий (JUST – Jordan University of Science and Technologies) были синтезированы полимерные композиты с матрицей из полидиметилсилоксана (PDMS) и полиуретана (PU) с нанопорошками TiO₂ и ZnO в качестве наполнителей. Была проведена оптическая спектроскопия образцов типа PDMS + TiO₂. Спектры пропускания показывают, что при увеличении концентрации TiO₂ длина волны $\lambda_{\text{среза}}$ смещалась в сторону больших значений, а цвет полимера становился более насыщенным белым. При помощи базы данных XCOM были рассчитаны массовый и линейный коэффициенты ослабления для гамма-излучения в диапазоне энергий от 0,071 до 2,754 МэВ. База данных Phy-X/PSD была использована для определения дополнительных радиационно-защитных характеристик. Были рассчитаны значения слоя половинного ослабления и на основании этого параметра проведен сравнительный анализ с полимерами, схожими с исследуемыми по составу наполнителя: полимерная смесь и нанопорошок BaTiO₃, полиэтилен высокой плотности и порошок/нанопорошок ZnO. Сделан вывод о перспективности полиуретана как матрицы полимерных радиационно-защитных композитов, а также об общей пригодности исследуемых образцов полимеров для создания радиационно-защитных структур.

Ключевые слова: полимерные композиты, радиационная защита, база данных XCOM, слой половинного ослабления, линейный коэффициент ослабления.

RADIATION PROTECTION PROPERTIES OF POLYLIDIMETHYLSILOXANE, POLYURETHANE WITH Z_NO/T_IO₂ NANO-POWDER FILLERS

Research article

Volozheninov T.P.¹, Kaskov D.O.², Yuzbashieva K.S.³, Aladailakh M.V.^{4,*}, Tashlykov O.L.⁵

¹ ORCID : 0000-0003-4538-0951;

² ORCID : 0000-0002-0942-9191;

³ ORCID : 0000-0003-0060-6064;

⁴ ORCID : 0000-0002-8675-0608;

⁵ ORCID : 0000-0001-6397-015X;

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

⁵ Ural Federal University named after B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (aladailehmotaz[at]gmail.com)

Abstract

Researchers of the Ural Federal University in cooperation with the Jordan University of Science and Technologies (JUST) have synthesized polymer composites with a matrix of polydimethylsiloxane (PDMS) and polyurethane (PU) with TiO₂ and ZnO nanopowders as fillers. Optical spectroscopy of PDMS + TiO₂ type samples was carried out. The transmission spectra show that with increasing TiO₂ concentration, the λ_{cut} wavelength shifted towards higher values and the colour of the polymer became more saturated white. Using the XCOM database, mass and linear attenuation coefficients were calculated for gamma rays in the energy range from 0.071 to 2.754 MeV. The Phy-X/PSD database was used to determine additional radiation shielding characteristics. The values of the half attenuation layer were calculated and on the basis of this parameter a comparative analysis was carried out with polymers similar to the studied ones in terms of filler composition: polymer blend and BaTiO₃ nanopowder, high density polyethylene and ZnO powder/nanopowder. It is concluded that polyurethane is promising as a matrix of polymer radiation-protective composites, as well as the general suitability of the investigated polymer samples for the creation of radiation protective structures.

Keywords: polymer composites, radiation shielding, XCOM database, half attenuation layer, linear attenuation coefficient.

Введение

В последние несколько десятилетий наблюдается быстрый рост использования радиоактивных материалов в различных областях, включая медицину, фундаментальную науку, гражданскую и военную промышленность, энергетику [1], [2]. Как следствие, большой интерес представляет разработка материалов по защите от различных видов ионизирующего излучения. Среди всех видов ионизирующих излучений гамма-излучение представляет наибольшую угрозу, поскольку оно может легко проходить через материю и попадать в организм человека, вызывая болезни и патологии.

Для создания эффективных экранирующих покрытий, способных снизить воздействие гамма-излучения, можно применять материалы с большой атомной массой, например, свинец или определенные типы бетонов. Свинцовые материалы превосходят аналоги благодаря своей высокой плотности, большому атомному весу и низкой стоимости. Однако свинец обладает недостатками, которые ограничивают его применение: высокая токсичность и масса, низкая механическая и химическая стабильность [3]. Возможной альтернативой свинцовым экранирующим материалам в некоторых отраслях промышленности могут послужить полимерные композиты.

Полимерные композиты обладают рядом преимуществ перед традиционными видами экранирующих материалов: гибкость, дешевизна, легкость, механическая и химическая стабильность [4], [5]. Вышеперечисленные свойства обуславливают широкое применение полимерных композитов в областях промышленности, требующих малый вес и габариты экранирующих покрытий – к примеру, для создания индивидуальной защиты.

В данном исследовании для изготовления полимерных композитов в качестве полимерных матриц выбраны полидиметилсилоксан (PDMS – polydimethylsiloxane) и полиуретан (PU – polyurethane). Наполнитель для матриц – нанопорошки оксида титана (TiO₂) и оксида цинка (ZnO).

Проводимые расчетно-экспериментальные исследования комбинированных радиационно-защитных материалов направлены на реализацию одного из основных принципов радиационной защиты – принципа оптимизации [6].

Методы и методы исследования

Образцы полимеров изготовлены путем смешивания 20 мл ацетона, используемого в качестве растворителя, и 20 г полиуретана (C₂₇H₃₆N₂O₁₀). К готовой смеси в чашках Петри добавлялись порошки оксидов металлов. После образцы подвергли вращению с частотой 6 оборотов в секунду, добавив к смеси магнитную полосу для ускорения процесса гомогенизации. Далее образцы дегазировались ультразвуком, в целях удаления пузырьков воздуха с поверхности. Затем образцы были оставлены на стенде до затвердевания на 24 часа.

В таблице 1 приведены плотности образцов, измеренные на электронном денсиметре МН-300А, и массовые доли каждого из элементов, полученные в программе XCOM [7].

Образцы полимеров изготовлены путем смешивания 20 мл ацетона, используемого в качестве растворителя, и 20 г полиуретана (C₂₇H₃₆N₂O₁₀). К готовой смеси в чашках Петри добавлялись порошки оксидов металлов. После образцы подвергли вращению с частотой 6 оборотов в секунду, добавив к смеси магнитную полосу для ускорения процесса гомогенизации. Далее образцы дегазировались ультразвуком, в целях удаления пузырьков воздуха с поверхности. Затем образцы были оставлены на стенде до затвердевания на 24 часа.

В таблице 1 приведены плотности образцов, измеренные на электронном денсиметре МН-300А, и массовые доли каждого из элементов, полученные в программе XCOM [7].

Таблица 1 - Плотности и химические составы PU/ZnO, PU/TiO₂

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.1>

Образец	C ₂₇ H ₃₆ N ₂ O ₁₀	ZnO	TiO ₂	Элементный состав (массовая доля)	Плотность, г/см ³
100 C ₂₇ H ₃₆ N ₂ O ₁₀	100	0	0	H(0,066144),C(0,591146),O(0,291646),N(0,051064)	1,360
95 C ₂₇ H ₃₆ N ₂ O ₁₀ + 5ZnO	95	5	0	H(0,062837),C(0,561589),O(0,286893),N(0,048511),Zn(0,040171)	1,389
95 C ₂₇ H ₃₆ N ₂ O ₁₀ + 5TiO ₂	95	0	5	H(0,062837),C(0,561589),O(0,297093),N(0,048511),Ti(0,029970)	1,331

Образцы полидиметилсилоксана (C₂H₆OSi) были изготовлены путем смешивания базового силиконового эластомера и отвердителя в массовом соотношении 10:1 соответственно. Готовая смесь разливалась в чашки Петри. С помощью микровесов взвешивались и добавлялись порции нанопорошков TiO₂. После доведения до однородного

состояния путём перемешивания образцы помещались в вакуумную камеру для дегазации. Далее готовые полимеры помещались на термостат на 24 часа при температуре 95°C, до затвердевания. Образцы в готовом состоянии показаны на рис. 1.

В таблице 2 приведены плотности и толщина образцов.

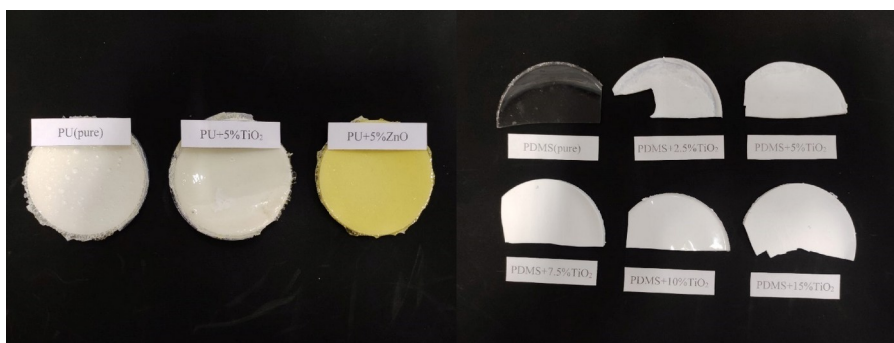


Рисунок 1 - Готовые образцы полимерных композитов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.2>

Таблица 2 - Химический состав, плотность, толщина образцов PDMS/TiO₂
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.3>

Образец	C ₂ H ₆ OSi	TiO ₂	Плотность, g/cm ³	Толщина, mm
100C ₂ H ₆ OSi	100	0	1,018	2,0
97,5C ₂ H ₆ OSi+2,5 TiO ₂	97,5	2,5	1,037	1,2
95 C ₂ H ₆ OSi+5 TiO ₂	95	5	1,051	1,5
92,5C ₂ H ₆ OSi+7,5 TiO ₂	92,5	7,5	1.086	2,0
90 C ₂ H ₆ OSi+10 TiO ₂	90	10	1,106	1,0
85 C ₂ H ₆ OSi+15 TiO ₂	85	15	1,135	2,0

Для определения способности к ослаблению излучения подготовленных образцов, был рассчитан массовый коэффициент ослабления (μ_m). В данной работе (μ_m) рассчитывается из базы данных XCOM для спектра энергий следующих изотопов: ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ¹⁹⁸Au, ⁵⁴Mn и ²⁴Na. Значения μ_m использовались для оценки эффективности радиационной защиты подготовленных образцов и расчета линейного коэффициента ослабления.

Линейный коэффициент ослабления рассчитывается из следующего уравнения [8]:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho$$

где ρ (г/см³) – плотность образца.

Слой половинного ($\Delta_{1/2}$) и десятичного (Δ_{10}) ослабления – это толщина вещества, при которой интенсивность падающего излучения уменьшается в два и в десять раз соответственно. Для вычисления значений (в см) используются следующие уравнения [8]:

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad \Delta_{10} = \frac{\ln 10}{\mu}$$

Длина свободного пробега (MFP) – среднее расстояние, пройденное частицей между двумя столкновениями. Для вычисления значений MFP в см используется следующее уравнение:

$$MFP = \frac{1}{\mu}$$

Эффективный атомный номер (Z_{eff}) определяет радиационное поведение мультиэлемента при взаимодействии фотонов, электронов и альфа-частиц в материале. Мы использовали следующую формулу для определения эффективного атомного номера [8].

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i (\mu_m)_i}{\sum_j \frac{A_j}{Z_j} (\mu_m)_j}$$

где f_i , A_i и Z_i – массовая доля, атомный вес и атомный номер i -ого элемента соответственно.

Аналогично, эффективная электронная плотность (N_{eff}) вычисляется по следующему уравнению на основе Z_{eff} :

$$N_{eff} = N_a \frac{Z_{eff}^2}{\langle A \rangle}$$

где $\langle A \rangle = \sum_i A_i f_i$, $\langle A \rangle$ и N_a – средняя атомная масса и число Авогадро соответственно.

Для исследуемых образцов PDMS/TiO₂ была проведена оптическая спектроскопия в УФ-видимом диапазоне с использованием спектрометра Shimadzu UV-2550.

Из результатов спектроскопии (рис.2) видно, что чистый образец PDMS, представляющий из себя бесцветный полимер, не имеет явного поглощения в видимом диапазоне. Пропускная способность образцов резко уменьшается с добавлением TiO₂. Такое снижение пропускания обусловлено рассеянием света на внедренных частицах TiO₂ в полимере. Длина волны среза ($\lambda_{\text{среза}}$) – это длина волны, при которой процент пропускания равен нулю. При увеличении концентрации TiO₂ длина волны $\lambda_{\text{среза}}$ смещается в сторону больших значений, а цвет полимера становится более насыщенным белым.

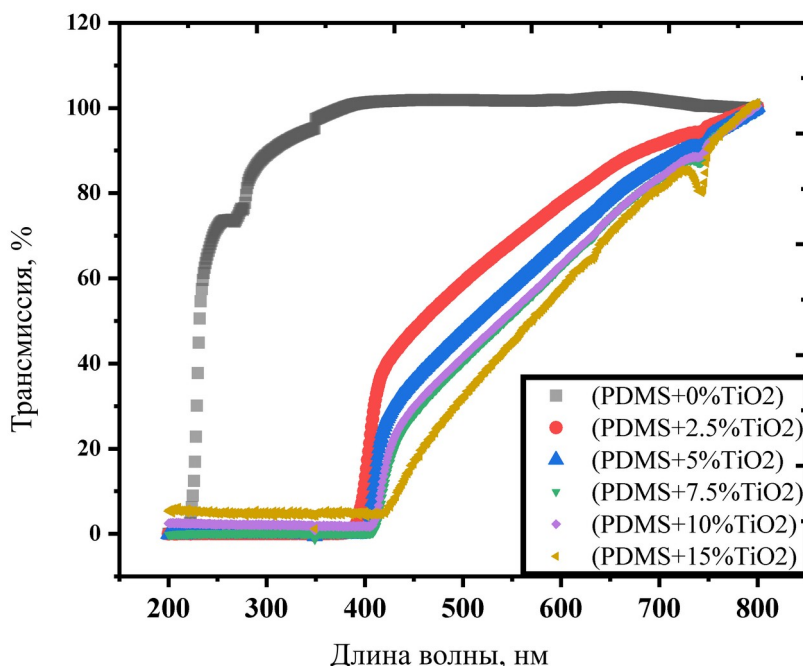


Рисунок 2 - Спектры пропускания образцов PDMS/ TiO₂
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.4>

Основные результаты и обсуждение

По данным таблицы 3 и таблицы 4 можно сделать вывод, что значения μ_m высоки в зоне низких энергий и резко уменьшаются с увеличением энергии фотонов. Исследованный вероятностный механизм взаимодействия гамма-лучей с приготовленными образцами полимеров объясняет тенденцию массового коэффициента ослабления, в которой фотоэлектрический эффект взаимодействия преобладает в зоне низких энергий фотонов; эффект Комптона является доминирующим в зоне средних энергий, а образование пар – в зоне высоких энергий.

Таблица 3 - Значения μ_m (см²/г) для образцов PDMS+TiO₂

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.5>

Энергия (МэВ)	Процент TiO ₂ в образце					
	0%TiO ₂	2,5%TiO ₂	5%TiO ₂	7,5%TiO ₂	10%TiO ₂	15%TiO ₂
0,071	0,21410	0,21830	0,22250	0,22670	0,23090	0,23930
0,08	0,19800	0,20080	0,20360	0,20640	0,20920	0,21480
0,412	0,10220	0,10190	0,10170	0,10140	0,10110	0,10060
0,511	0,09343	0,09317	0,09292	0,09267	0,09241	0,09190
0,676	0,08264	0,08241	0,08218	0,08195	0,08171	0,08125
0,69	0,08188	0,08165	0,08142	0,08119	0,08096	0,08050
0,811	0,07600	0,07579	0,07557	0,07535	0,07514	0,07470
0,835	0,07496	0,07475	0,07454	0,07432	0,07411	0,07368
0,864	0,07376	0,07355	0,07334	0,07312	0,07291	0,07249

1,088	0,06596	0,06577	0,06558	0,06539	0,06520	0,06481
1,173	0,06351	0,06332	0,06314	0,06295	0,06277	0,06240
1,333	0,05948	0,05931	0,05914	0,05897	0,05880	0,05845
1,369	0,05867	0,05850	0,05834	0,05817	0,05800	0,05766
1,675	0,05284	0,05269	0,05254	0,05239	0,05225	0,05195
2,754	0,04065	0,04056	0,04046	0,04037	0,04027	0,04008

Таблица 4 - Значения $\mu_m(\text{см}^2/\text{г})$ для образцов PU+ZnO/TiO₂DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.6>

Энергия (МэВ)	PU (чистый)	PU+5%TiO ₂	PU+5%ZnO
0,071	0,1795	0,1896	0,2176
0,08	0,1729	0,1798	0,1995
0,412	0,1005	0,1001	0,1002
0,511	0,09202	0,09158	0,09162
0,676	0,08145	0,08104	0,08104
0,69	0,0807	0,0803	0,08029
0,811	0,07492	0,07454	0,07452
0,835	0,0739	0,07352	0,0735
0,864	0,07271	0,07234	0,07232
1,088	0,06506	0,06472	0,06469
1,173	0,06264	0,06231	0,06228
1,333	0,05865	0,05835	0,05832
1,369	0,05785	0,05756	0,05753
1,675	0,05207	0,05181	0,05179
2,754	0,03977	0,03962	0,03965

Значения линейного коэффициента ослабления образцов показаны в таблице 5 и таблице 6. Зависимости линейного коэффициента от энергии падающего излучения проиллюстрирована на рис. 3а. Значения линейного коэффициента ослабления высоки в зоне низких энергий и резко уменьшаются с увеличением энергии фотонов. По данным графиков рис. 3а и таблиц 5-6 видно, что образец PU+5%ZnO имеет самые высокие значения линейных коэффициентов ослабления.

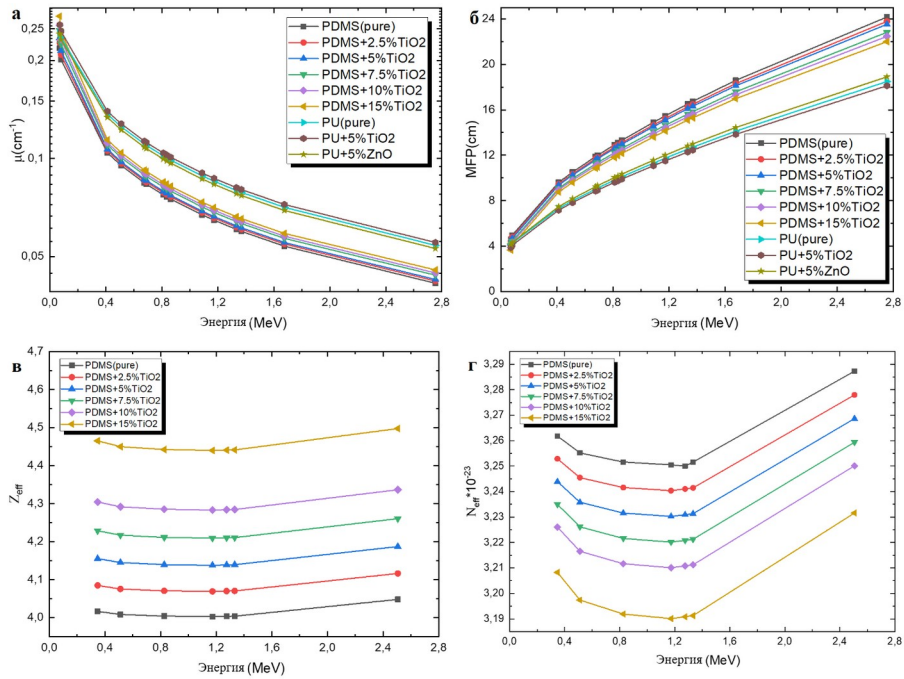


Рисунок 3 - Результаты расчета
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.7>

Примечание: а – линейного коэффициента ослабления; б – длины свободного пробега; в – эффективного атомного номера; г – эффективной электронной плотности

Таблица 5 - Значения $\mu(\text{см}^{-1})$ для образцов PDMS+TiO₂
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.8>

Энергия (МэВ)	Процент TiO ₂ в образце					
	0%TiO ₂	2,5%TiO ₂	5%TiO ₂	7,5%TiO ₂	10%TiO ₂	15%TiO ₂
0,071	0,21795	0,22679	0,23458	0,24717	0,25670	0,27354
0,08	0,20156	0,20844	0,21440	0,22480	0,23215	0,24505
0,412	0,10404	0,10567	0,10678	0,11001	0,11171	0,11407
0,511	0,09511	0,09661	0,09762	0,10057	0,10213	0,10419
0,676	0,08413	0,08544	0,08633	0,08894	0,09030	0,09212
0,69	0,08335	0,08465	0,08554	0,08812	0,08948	0,09127
0,811	0,07737	0,07857	0,07939	0,08179	0,08304	0,08469
0,835	0,07631	0,07750	0,07830	0,08067	0,08190	0,08354
0,864	0,07509	0,07625	0,07704	0,07936	0,08058	0,08219
1,088	0,06715	0,06819	0,06889	0,07097	0,07204	0,07348
1,173	0,06465	0,06565	0,06633	0,06832	0,06937	0,07074
1,333	0,06055	0,06149	0,06212	0,06400	0,06498	0,06627
1,369	0,05973	0,06065	0,06128	0,06313	0,06409	0,06536
1,675	0,05379	0,05463	0,05520	0,05686	0,05773	0,05890
2,754	0,04138	0,04205	0,04251	0,04382	0,04452	0,04546

Таблица 6 - Значения $\mu(\text{см}^{-1})$ для образцов PU+ZnO/TiO₂
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.9>

Энергия (МэВ)	PU (чистый)	PU+5%ZnO	PU+5%TiO ₂
---------------	-------------	----------	-----------------------

0,071	0,24412	0,2575206	0,240911
0,08	0,235144	0,2459919	0,231594
0,412	0,13668	0,1395945	0,1337655
0,511	0,1251472	0,12771855	0,12238545
0,676	0,110772	0,11303682	0,10833009
0,69	0,109752	0,11200896	0,10733184
0,811	0,1018912	0,10398054	0,09963866
0,835	0,100504	0,10256376	0,09828104
0,864	0,0988856	0,10091085	0,09669715
1,088	0,0884816	0,090285	0,08652831
1,173	0,0851904	0,08692362	0,08330729
1,333	0,079764	0,0813954	0,07800991
1,369	0,078676	0,0802842	0,07694511
1,675	0,0708152	0,07225578	0,06925193
2,754	0,0540872	0,05521275	0,05290725

Таблица 7 - Значения Z_{eff} для образцов PDMS+TiO₂DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.10>

Энергия (МэВ)	Процент TiO ₂ в образце					
	0%TiO ₂	2,5%TiO ₂	5%TiO ₂	7,5%TiO ₂	10%TiO ₂	15%TiO ₂
0,3471	4,01649	4,084629	4,155222	4,228403	4,304318	4,464986
0,511	4,008291	4,075351	4,144836	4,216879	4,291623	4,44985
0,8261	4,003918	4,07047	4,139431	4,210936	4,285128	4,442201
1,173	4,002564	4,068941	4,137724	4,209046	4,28305	4,439731
1,275	4,003357	4,069764	4,138577	4,209929	4,283963	4,440708
1,333	4,003868	4,070294	4,139126	4,210498	4,284552	4,441339
2,506	4,047836	4,116164	4,186945	4,260312	4,336411	4,497436

Таблица 8 - Значения $N_{eff} \cdot 10^{-23}$ для образцов PDMS+TiO₂DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.11>

Энергия (МэВ)	Процент TiO ₂ в образце					
	0%TiO ₂	2,5%TiO ₂	5%TiO ₂	7,5%TiO ₂	10%TiO ₂	15%TiO ₂
0,3471	3,2618	3,25287	3,24391	3,23497	3,22605	3,22605
0,511	3,2552	3,24548	3,2358	3,22616	3,21654	3,21654
0,8261	3,2516	3,24159	3,23158	3,22161	3,21167	3,21167
1,173	3,2505	3,24037	3,23025	3,22016	3,21011	3,21011
1,275	3,25	3,24103	3,23092	3,22084	3,2108	3,2108
1,333	3,2516	3,24145	3,23134	3,22127	3,21124	3,21124
2,506	3,2873	3,27798	3,26868	3,25939	3,25011	3,25011

Для объективной оценки радиационно-защитных свойств исследуемых полимерных композитов был проведен сравнительный анализ исследований схожих по составу наполнителя полимеров: объемные/нано-частицы ZnO в матрице из полиэтилена высокой плотности (HDPE – High Density Polyethylene) [9] и наночастицы титаната бария (BaTiO₃) в матрице из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (UHMWPE - Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene) [10].

Опираясь на данные исследований полимеров BaTiO₃+UHMWPE и ZnO+HDPE, для рассматриваемых в этой работе полимеров рассчитаны дополнительные значения радиационно-защитных параметров для спектра энергий, рассматриваемого в исследованиях (¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹³¹I). На рис. 4 проиллюстрирована зависимость слоя половинного ослабления для сравниваемых образцов.

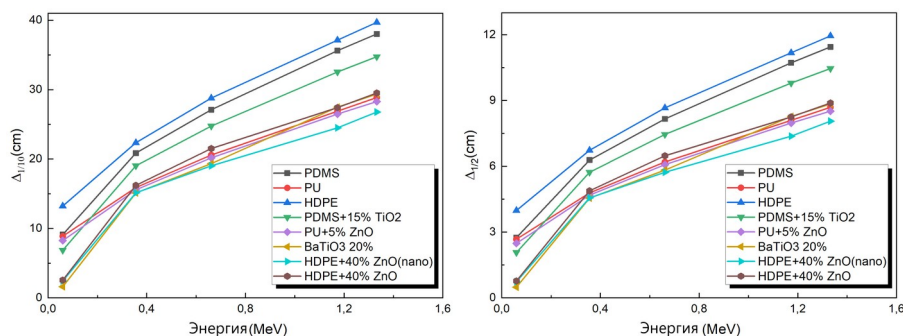


Рисунок 4 - График зависимости $\Delta_{1/2}$ и $\Delta_{1/10}$ от энергии излучения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.173.12>

По данным рис. 4 можно заметить, что среди изученных в данной работе полимеров лучшими радиационно-защитными свойствами обладают образцы PDMS+TiO₂ (15%) и PU+ZnO (5%). Лучшими ослабляющими свойствами обладает композит HDPE+нанопорошок ZnO (40%), В целом, можно говорить о конкурентоспособности образцов PU+ZnO и PDMS+TiO₂ по отношению к полимерам, изученным в других работах.

Также следует отметить, что чистый PU обладает хорошими радиационно-защитными свойствами, что говорит о его перспективности в качестве матрицы полимерных композитов, а также о необходимости дальнейших исследований, например увеличения концентрации нанопорошка ZnO в составе композита или использования в качестве наполнителя нанопорошков оксидов свинца или других элементов с высоким атомным номером.

Заключение

Были рассчитаны экранирующие способности девяти образцов полимеров с составом компонентов PDMS+TiO₂, PU+ZnO, PU+TiO₂. Массовый коэффициент ослабления был получен с помощью программы XCOM, плотность с помощью специальных весов. Кроме того, для полимеров PDMS+TiO₂ были рассчитаны длина свободного пробега, эффективный атомный номер, эффективная электронная плотность.

В результате этого исследования можно сделать следующие выводы:

- Полиуретан является наиболее перспективным материалом из рассматриваемых для матриц полимерных экранирующих композитов
- Из исследованных полимеров наилучшие свойства ослабления демонстрируют PDMS+15%TiO₂ и PU+5%ZnO
- Наполнители из наночастиц показывают лучшие радиационно-защитные параметры, чем микро- или крупнодисперсные наполнители

Таким образом, исследованные образцы являются перспективными материалами для дальнейших исследований и возможного использования в качестве радиационно-защитных материалов на радиационно-опасных промышленных и научно-исследовательских объектах.

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. Akman F. Gamma-ray Attenuation Parameters for Polymer Composites Reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ Compounds / F. Akman [et al.] // Progress in Nuclear Energy. — vol. 121. — 2020. — P. 103257.
2. Singleterry Jr.R.C. Materials for Low-energy Neutron Radiation Shielding / Jr. R. C. Singleterry, S. A. Thibeault // NASA, Langley Research Center, Hampton, Virginia. — №.L-17773 — 2000.
3. Русских И.М. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом / Русских И.М. [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. — том 5. — №5. — 2014. — с. 449-455.
4. Бормотов А.Н. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации: монография / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, Ю.М. Баженов [и др.]. — Москва: Издательство «Палеолит», 2006. — 272 с.
5. Xie F. Degradation and Stabilization of Polyurethane Elastomers. / Xie F. [et al.] // Progress in Polymer Science. — vol. 90. — 2019. — p. 211-268.
6. Михайлова А.Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А.Ф. Михайлова, О.Л. Ташлыкков // Ядерная физика и инжиниринг. — Том 9. — № 4. — 2018. — С. 393-401.
7. Berger M.J. XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer / M.J. Berger, J. Hubbell // National Bureau of Standards, Washington, DC (USA), Center for Radiation -1987. — URL: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (accessed: 05.02.2024)

8. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: справочник / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. — 4е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоатомиздат, 1995. — 496 с.
9. Alsayed Z. Study of Some γ -ray Attenuation Parameters for New Shielding Materials Composed of Nano ZnO Blended with High Density Polyethylene / Alsayed Z. [et al.] // Nuclear Technology and Radiation Protection. — vol. 34. — №4. — 2019. — P. 342-352.
10. Alyaa H. Abdalsalam Study of Gamma Attenuation Property of UHMWPE/Bi2O3 Nanocomposites / H. Alyaa Abdalsalam [et al.] // Chemical Physics. — 2019. — vol. 523. — P. 92-98.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Akman F. Gamma-ray Attenuation Parameters for Polymer Composites Reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ Compounds / F. Akman [et al.] // Progress in Nuclear Energy. — vol. 121. — 2020. — P. 103257.
2. Singleterry Jr.R.C. Materials for Low-energy Neutron Radiation Shielding / Jr. R. C. Singleterry, S. A. Thibeault // NASA, Langley Research Center, Hmapton, Virginia. — №L-17773 — 2000.
3. Russkih I.M. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie organometallicheskih radiacionno-zashchitnyh materialov, adaptirovannyh k istochnikam izlucheniya so slozhnym izotopnym sostavom [Experimental and Theoretical Study of Organometallic Radiation Protection Materials Adapted to Radiation Sources with Such a Complex Isotopic Composition] / Russkih I.M. [et al.] // YAdernaya fizika i inzhiniring [Nuclear Physics and Engineering]. — V. 5. — №5. — 2014. — P. 449-455 [in Russian].
4. Bormotov A.N. Polimernye kompozicionnye materialy dlya zashchity ot radiacii: monografiya [Polymer Composite Materials for Radiation Protection: monograph] / A.N. Bormotov, A.P. Proshin, YU.M. Bazhenov [et al.]. — Moscow: Paleolith Publishing House, 2006. — 272 p. [in Russian]
5. Xie F. Degradation and Stabilization of Polyurethane Elastomers. / Xie F. [et al.] // Progress in Polymer Science. — vol. 90. — 2019. — p. 211-268.
6. Mihajlova A.F. Puti realizacii principa optimizacii v radiologicheskoj zashchite personala [Ways to Implement the Principle of Optimization in Radiological Protection of Personnel] / A.F. Mihajlova, O.L. Tashlykov // YAdernaya fizika i inzhiniring [Nuclear Physics and Engineering]. — V. 9. — № 4. — 2018. — P. 393-401 [in Russian].
7. Berger M.J. XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer / M.J. Berger, J. Hubbell // National Bureau of Standards, Washington, DC (USA), Center for Radiation -1987. — URL: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (accessed: 05.02.2024)
8. Mashkovich V.P. Zashchita ot ioniziruyushchih izluchenij: spravochnik [Protection from Ionizing Radiation: a reference book] / V.P. Mashkovich, A.V. Kudryavceva. — 4th ed., reprint. and additional. — Moscow: Energoatomizdat, 1995. — 496 p. [in Russian]
9. Alsayed Z. Study of Some γ -ray Attenuation Parameters for New Shielding Materials Composed of Nano ZnO Blended with High Density Polyethylene / Alsayed Z. [et al.] // Nuclear Technology and Radiation Protection. — vol. 34. — №4. — 2019. — P. 342-352.
10. Alyaa H. Abdalsalam Study of Gamma Attenuation Property of UHMWPE/Bi2O3 Nanocomposites / H. Alyaa Abdalsalam [et al.] // Chemical Physics. — 2019. — vol. 523. — P. 92-98.