

О возможности использования устойчивого к радиационному воздействию высокомолекулярного полиэтилена в защитных сооружениях гражданской обороны

ISSN 1996-8493

© Технологии гражданской безопасности, 2023

К.А. Агеева, М.В. Кузнецов

Аннотация

В работе представлен краткий анализ радиационно-защитных свойств высокомолекулярного полиэтилена (далее — ВМПЭ). Рассмотрена возможность использования ВМПЭ в виде специально подобранных по формам и размерам блоков (листов) с целью защиты быстровозводимых убежищ от радиационного воздействия, особенно в местах установки защитно-герметических дверей. Существенным технологическим преимуществом использования ВМПЭ является возможность уменьшения толщины бетонных блоков, используемых при строительстве защитных сооружений.

Ключевые слова: высокомолекулярный полиэтилен (ВМПЭ); радиационная защита; защитные сооружения гражданской обороны; МЧС России; конструкционные улучшения.

On the Possibility of Using Radiation-Resistant High-Molecular Polyethylene in Civil Defense Protective Structures

ISSN 1996-8493

© Civil Security Technology, 2023

K. Ageeva, M. Kuznetsov

Abstract

The paper presents brief analysis of the radiation-protective properties of high-molecular polyethylene (hereinafter — HMPE). The possibility of using HMPE in the form of specially selected blocks (sheets) in shapes and sizes in order to protect prefabricated shelters from radiation exposure, especially in places where protective and hermetic doors are installed, is considered. Significant technological advantage of using HMPE is the possibility to reduce the thickness of concrete blocks used in the construction of protective structures.

Key words: high molecular weight polyethylene (HMPE); radiation protection; civil defense protective structures; Emercom of Russia; structural improvements.

04.09.2023

Введение

В задачи МЧС России входит защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, включающая в себя в том числе, защиту от возможных последствий ядерного удара, путем установки защитных сооружений гражданской обороны (ЗС ГО). Основными и традиционными противорадиационными материалами, применяемыми в ЗС ГО, являются бетон, стальные листы и др. [1]. В этой работе рассматривается возможность применения нового конструкционного материала, а именно: ВМПЭ с радиационно-поглощающими частицами для повышения эффективности противорадиационной защиты. Повреждения, причиняемые радиацией органам и тканям человека, зависят от: полученной или поглощенной дозы радиации; типа радиационного воздействия и чувствительности тех или иных тканей и органов [2–7]. Материалы, подвергнутые облучению высокоэнергичными частицами, часто испытывают серьезные повреждения в виде резкого увеличения плотности дефектов и значительного ухудшения их механических и физических свойств. Образование новых химических связей после облучения также обычно приводит к необратимым эффектам. Как правило, имеют место изменения внешнего вида, химического и физического состояния, а также механических, электрических и термических свойств.

Радиационные эффекты в полимерах проявляются самым разнообразным образом. Полимерные композиты являются наиболее подходящими материалами такого класса для защиты от вредного излучения благодаря многим преимуществам, в том числе возможности изготовления гибких композитных листов [8]. Наиболее широкое распространение для создания экранов, защищающих от рентгеновского излучения, в настоящее время получили полимерные композиты. Обычно такие композиты представляют собой полимерные материалы, армированные металлами или оксидами металлов [9–14].

Радиационная стойкость полимера зависит от химической структуры материала, поскольку радиационная устойчивость, индуцированная возбуждением, не связана с химической системой в целом, а часто локализована на определенной связи. Добавление в химическую структуру материала поглощающих энергию частиц значительно увеличивает радиационную стойкость некоторых полимеров, способствуя перераспределению энергии возбуждения по всему материалу [15]. В облученных полимерах обычно имеют место два типа реакций: сшивание и/или разрыв цепи. Процесс сшивания приводит к образованию химических связей между двумя соседними молекулами полимера. Эта реакция увеличивает молекулярную массу полимера до тех пор, пока в материале в конечном итоге не сформируется нерастворимая трехмерная сетка. Разрыв цепи или разрыв молекул полимера снижает его молекулярную массу и увеличивает растворимость. Обе реакции могут в значительной степени изменить физические свойства полимера [16–18]. Гамма-излучение является радиационным излучением, наиболее часто используемым

для сшивания и придания совместимости различным полимерным смесям, а также композитным системам с участием полимеров. В зависимости от мощности дозы излучения можно контролировать также и степень полимеризации. Когда полимеры подвергаются воздействию высокоэнергетического излучения, то наблюдаются противоположные процессы с преобладающим эффектом сшивания или разрыва цепи в зависимости от химической природы и физических характеристик материала [19–21].

ВМПЭ представляет собой линейный полиолефин с повторяющейся единицей $-CH_2CH_2-$, соединенной между собой длинными цепями и молекулярной массой, равной $2 \times 10^6 - 6 \times 10^6$ г/моль [22–26]. Это поликристаллический полимер с набором упорядоченных областей, встроенных в неупорядоченную аморфную фазу, как показано на рис. 1.

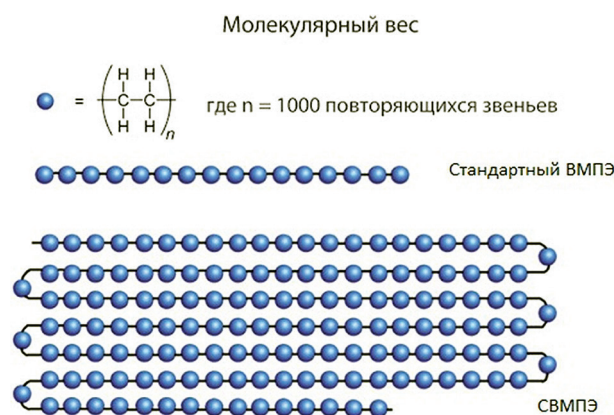


Рис. 1. Молекулярная структура ВМПЭ [<https://www.sunnysteel.com/uhmwpe-mining-pipes.php>]

ВМПЭ имеет низкий коэффициент трения, высокую износостойкость, широкий интервал рабочих температур ($-200^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$), высокую ударную прочность (до 170 кДж/м²), низкую газопроницаемость; обладает водоотталкивающими и виброизолирующими свойствами, а также демонстрирует высокую стойкость к коррозионным химическим веществам (рис. 2). Кроме того, ВМПЭ обладает меньшей плотностью ($\sim 0.93 - 0.94$ г/см³, с добавками — 0.95 г/см³) по сравнению с фторопластом ($2.02 - 2.10$ г/см³), вследствие чего изделия из него обладают меньшим весом и значительно выигрывают в цене в связи с меньшей стоимостью исходных материалов.



Рис. 2. Лист PE-1000 ВМПЭ [https://apolimer.ru/product/polietilen_sverhvyssokomolekuljarnyj_listovoj_re1000_10x2000x4000/?ysclid=lpqorv68g1716136248]

Для получения ВМПЭ с молекулярной массой более 1 млн г/моль используют суспензионную полимеризацию этилена при низком давлении и модифицированные

металлоорганические катализаторы. Повышение молекулярной массы полимера способствует повышению вязкости его расплава, показателей прочности, а также стойкости к удару и растрескиванию [27]. Основными компонентами для производства ВМПЭ являются этилен (реактивный газ), водород и тетрачлорид титана (катализатор). Полимеризация происходит в растворителе, используемом для массо- и теплообмена. ВМПЭ в дальнейшем перерабатывают по-разному: прессованием, штамповкой, формованием из геля и спеканием. Несколько европейских компаний начали компрессионное формование ВМПЭ еще в начале 1960-х годов [28, 29].

В настоящее время обычные методы обработки все еще не могут обеспечить эффективное промышленное производство ВМПЭ. Наибольшую перспективу имеет технология экструзионной обработки ВМПЭ. Суть технологии состоит в том, что полиэтиленовый порошок сжимается в однородную массу при помощи плунжерного экструдера (рис. 3), который состоит в основном из: бункера загрузки; камеры с нагревательным устройством; горизонтального возвратно-поступательного плунжера; нагреваемой формовочной головки, а также охлаждающего и формовочного устройств.

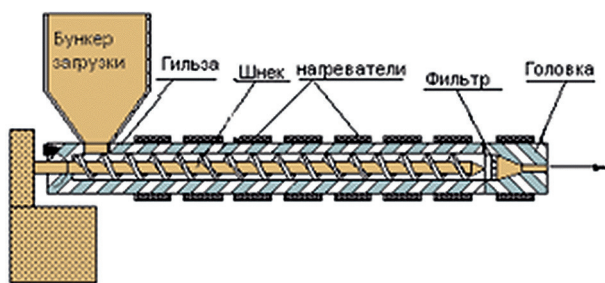


Рис. 3. Схема плунжерного экструдера [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fxlom.ru%2Foborudovanie%2Fekstruder&psig=AOvWaw1edoJ_0Ck_mZn3sDATFwWi&ust=1701429127786000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjynbnHy-uCAxXuAhAIHefnB-EQr4kDegQIARBg]

Температура плавления ВМПЭ составляет около 155 °С, а частицы полимерного порошка могут полностью интегрироваться в расплав только при температуре выше 200 °С, в связи с чем полученная масса подвергается пластификации при температуре от 180 °С до 200 °С под давлением. В процессе прядения нагретый

гель ВМПЭ экструдирован через фильеру. Экструдат пропускают через слой воздуха и затем охлаждают на водяной бане (рис. 4), после чего при помощи шнековых машин прессуется под давлением при температуре от 130 °С до 170 °С. Конечным результатом технологического процесса является получение волокон с высокой степенью молекулярной ориентации и, следовательно, с исключительной прочностью на разрыв.

Особенности формирования геля зависят от изоляции отдельных молекул в цепи от растворителя, так что вероятность межмолекулярного спутывания, затрудняющего ориентацию цепи и снижающую прочность конечного продукта, минимальна [30]. Однако практически невозможно экструдировать ВМПЭ без каких-либо технологических добавок в связи с чрезвычайно высокой вязкостью и низкой текучестью расплава [31–34]. Также очень сложно осуществлять литье под давлением из-за плохой текучести ВМПЭ. Тем не менее, в работах [35, 36] были получены формованные детали из смеси, содержащей 90 мас.% коммерческого ВМПЭ и 10 мас.% полиэтилена сверхнизкой молекулярной массы (СНМПЭ), при помощи модифицированного метода литья под давлением. Поэтому для изготовления деталей из ВМПЭ со сложными профилями (таких, как искусственные протезы, коленные суставы и т.п.) обычно используется метод многостадийной обработки [37].

В качестве наиболее эффективных замедлителей быстрых нейтронов можно выделить: водород- и углеродсодержащие вещества, полиэтилен, а тепловых нейтронов: частицы бора и борсодержащих элементов, сталь, кадмий, графит, бетон, то есть материалы с большим сечением поглощения. В силу своей большой молекулярной массы и количества водорода на единицу объема ВМПЭ при нейтронном облучении затормаживает быстрые нейтроны с высокой энергией от 0.1 МэВ до тепловых с энергией от 0.025 эВ. Сечение реакции — это величина, характеризующая вероятность взаимодействия элементарной частицы с атомным ядром или другой частицей. Единица измерения эффективного сечения — барн (1 барн = 10⁻²⁸ м²). Типичные сечения захвата теплового нейтрона ядрами составляют порядка 1 барна (близко к геометрическому поперечному сечению ядра), но у бора этот показатель гораздо выше — 3837 барна. Гамма-излучение представляет собой поток фотонов, обладающих высокой энергией (гамма-квантов). Условно считается, что

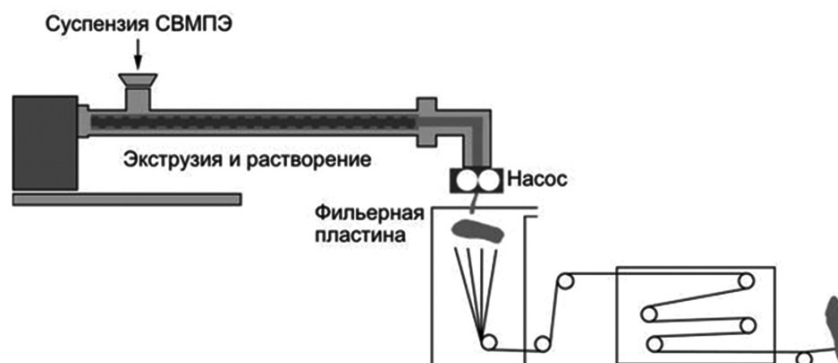


Рис. 4. Схема производства ВМПЭ методом гель-формования [https://ozlib.com/879403/tehnika/gelformovanie_svmp_evolokon]

энергия квантов гамма-излучения превышает 10^5 эВ, хотя резкая граница между гамма- и рентгеновским излучением до конца не определена. Рентгеновское излучение возникает в результате торможения электронов, испускаемых катодами и ускоряемых электрическим полем, на аноде рентгеновской трубки. При этом возникают тормозное и характеристическое излучения, имеющие непрерывный и линейчатый спектр, соответственно, тогда как гамма-излучение имеет внутриадронное происхождение [38]. Гамма-излучение вызывает образование свободных радикалов за счет разрыва цепи. После гамма-облучения свободные радикалы все еще могут присутствовать в полимере и реагировать с доступными формами кислорода, вызывая вредное окисление [39]. Хотя ВМПЭ обладает повышенной износостойкостью, другие его свойства, такие как: пластичность, трещиностойкость, сопротивление усталости и предел прочности при растяжении, могут изменяться под действием гамма-облучения [40–41].

В качестве материалов, способных поглощать гамма-излучение, используются составы, содержащие в своем составе элементы с большим атомным весом, такие как: вольфрам, свинец, обедненный уран и висмут. Кроме того были разработаны новые радиационно-защитные материалы путем включения этих элементов в полимерные матрицы. В ранее опубликованных работах [42–44] было показано, что включение карбида вольфрама, кобальта и бора, оксида висмута, сульфата бария и частиц олова в эпоксидную матрицу повышает эффективность защиты материалов на основе полимеров от радиационного излучения, в частности — от гамма-излучения. Также была исследована эффективность ослабления гамма-излучения при использовании полимерных нанокмозитов, содержащих в своем составе малотоксичные соединения на основе пост-переходных металлов, таких как висмут. Использование в структуре материала наноразмерных частиц позволяет обеспечить более высокую эффективность ослабления гамма-излучения по сравнению с использованием микрочастиц в аналогичных изделиях [45].

Расчетные и экспериментальные результаты

Так как при расчете степени ослабления радиационного воздействия для защитных сооружений учитываются как гамма-излучение, так и нейтронное излучение, то

для смешанного излучения эквивалентная доза определяется как сумма произведений значений поглощенной дозы D_{TR} отдельных видов излучений на соответствующие значения взвешивающих коэффициентов w_R этих излучений [46] по формуле 1:

$$H_T = \sum_R w_R D_{TR}. \quad (1)$$

Исходя из этого, предлагается использовать ВМПЭ с радиационно-поглощающими частицами, такими как: вольфрам (W) и карбид бора (B_4C), в качестве радиационно-защитного материала для ЗС ГО [47].

В работе [46] были рассчитаны коэффициент ослабления нейтронного излучения K_n , равный 4.3, и коэффициент поглощения рентгеновского излучения K_γ , равный 1.40585, для ВМПЭ с содержанием 30% W и 20% B_4C .

В табл. 1 представлены значения коэффициентов K_n и K_γ для бетона плотностью ρ , равной 2400 кг/м³, влажностью 10% [48].

Методом экстраполяции значения коэффициентов были рассчитаны для бетона толщиной 1 см с целью обеспечения возможной корреляции рассчитанных степеней ослабления радиации (рис. 5 и 6), которые рассчитываются в соответствии с формулой 2:

$$A \leq \frac{2K_{\gamma i} K_{ni}}{K_{\gamma i} + K_{ni}} K_p, \quad (2)$$

где:

A — требуемая степень ослабления, принимаемая равной 1000;

$K_{\gamma i}$ — коэффициент ослабления дозы гамма-излучения преградой из i -ых слоев материала, равный произведению значений для каждого слоя, принимаемых по табл. 1;

K_{ni} — коэффициент ослабления дозы нейтронов преградой из слоев материала, равный произведению значений для каждого слоя, принимаемых по табл. 1;

K_p — коэффициент условий расположения убежищ, принимаемый по формуле 3:

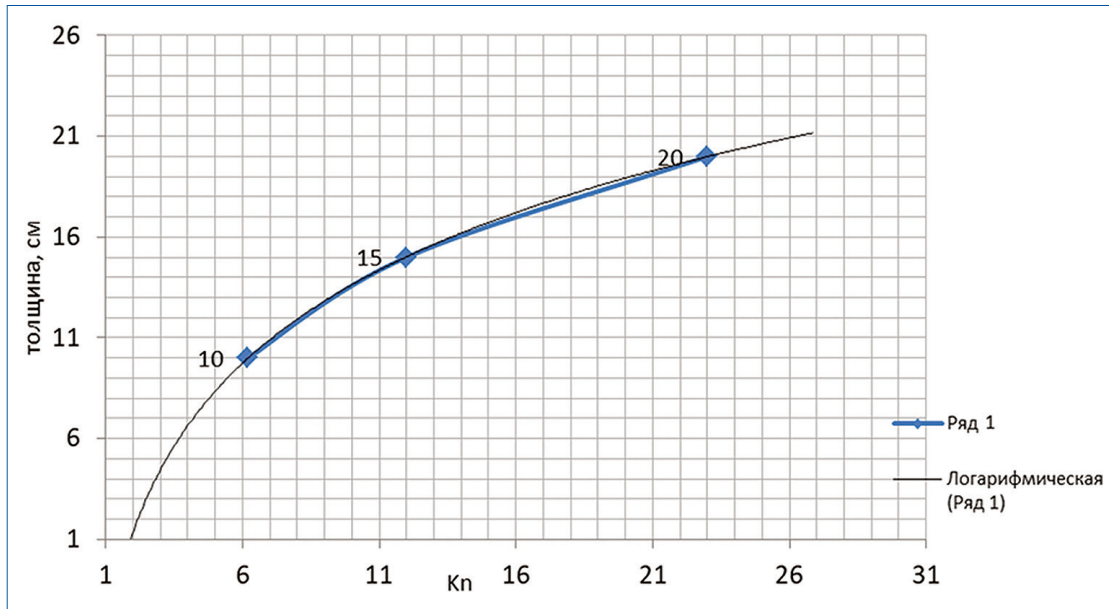
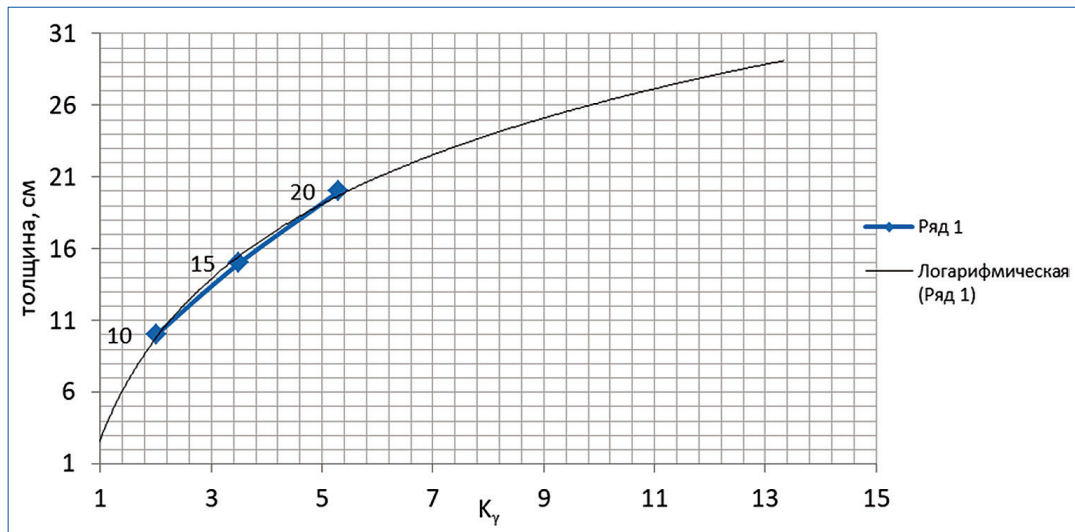
$$K_p = \frac{K_{зас}}{K_{зо}}, \quad (3)$$

где $K_{зас}$ — коэффициент, учитывающий снижение дозы проникающей радиации в застройке. Коэффициент $K_{зо}$ для отдельно стоящих убежищ принимается равным единице.

Таблица 1

Коэффициент ослабления дозы гамма-излучения и нейтронов проникающей радиации для различных материалов [48]

Толщина слоя материала, см	Коэффициент ослабления дозы гамма-излучения и нейтронов проникающей радиации											
	Бетон $\rho = 2400$ кг/м ³ , влажность 10%		Кирпич $\rho = 1840$ кг/м ³ , влажность 5%		Грунт $\rho = 950$ кг/м ³ , влажность 19%		Дерево $\rho = 700$ кг/м ³ , влажность 30%		Полиэтилен $\rho = 940$ кг/м ³		Сталь $\rho = 7800$ кг/м ³	
	K_n	K_γ	K_n	K_γ	K_n	K_γ	K_n	K_γ	K_n	K_γ	K_n	K_γ
10	6.2	2.0	3.7	1.7	6.5	1.7	12	1.0	22	1.0	4.7	17
15	12	3.5	5.5	2.5	13	2.5	30	1.2	53	1.3	6.5	56
20	23	5.3	8.2	3.7	26	3.8	59	1.3	130	1.7	8.8	150
40	230	30	34	14	280	17	550	2.5	1600	3.8	21	900

Рис. 5. Кривая экстраполяции для K_n бетонаРис. 6. Кривая экстраполяции для K_γ бетона

Исходя из данных [49] и ранее выполненных Бойковым А. А. с соавторами исследовании [50] были рассчитаны сравнительные характеристики, значения которых представлены в табл. 3 и 4.

Таким образом, из данных табл. 3 следует, что то же значение коэффициента ослабления K_γ может быть достигнуто за счет использования покрытия из модифицированного ВМПЭ в ~ 14.4 раза меньшей толщины, чем толщина бетонного покрытия. То есть, чтобы достичь того же значения K_γ по сравнению с толщиной бетонного покрытия 10 см, необходимо использовать покрытие из модифицированного ВМПЭ толщиной 0.7 см. При этом цена за 1 м² бетона (М500), при стандартной толщине 10 см, из расчета количества этого материала в готовом бетоне для стяжки, составляет порядка 600 руб., а стоимость модифицированного ВМПЭ покрытия толщиной порядка 0.7 см составляет порядка 900 руб.

Испытания образцов материала ВМПЭ+20 масс.% W+20 масс.% В₄C+20 масс.% С на нейтронном пучке

были выполнены на горизонтальном экспериментальном канале № 7 (ГЭК-7) реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт». Методика измерений позволяла учитывать небольшой вклад нейтронов с энергией $E > 0.5$ эВ путем использования заслонки из кадмия.

Коэффициент ослабления K_n пучка тепловых нейтронов, проходящего сквозь образец, определялся по формуле 4:

$$K_n = \frac{N - N_{Cd}}{N^* - N_{Cd}^*} = \exp\left(d \sum_i n_i \sigma_i\right), \quad (4)$$

где:

N — скорость счета детектора без образца и без кадмиевой заслонки;

N_{Cd} — скорость счета детектора без образца, но пучок перекрыт кадмиевой заслонкой;

N^* — скорость счета детектора с образцом и без кадмиевой заслонки;

Таблица 2

Данные расчета степени ослабления

Толщина слоя материала, см	Бетон $\rho = 2400$ кг/м ³ , влажность 10%		ВМПЭ + 30 % W + 20 % В4С	
	K_n	K_γ	K_n	K_γ
1	2.098	1.064	4.3	1.40585
A, степень ослабления радиации	1.412	2.12		

Таблица 3

Сравнительные данные коэффициентов ослабления гамма-излучения ВМПЭ и бетона

$E_\gamma = 0.2$ МэВ	Бетон $\rho = 2400$ кг/м ³ , влажность 10%	ВМПЭ + 20 масс.% W + 20 масс.% В4С + 20 масс.% С
K_γ	1.5	1.4
Толщина d, см	4.7	0.35

Таблица 4

Сравнительные данные коэффициентов ослабления нейтронного излучения ВМПЭ и бетона

Коэффициент ослабления нейтронного излучения; толщина, см	Бетон $\rho = 2400$ кг/м ³ , влажность 10%	
	$E_n = 0.2$ МэВ	$E_n > 0.5$ эВ
K_n	130	16.5
d	d > 35	0.35

N_{Cd}^* — скорость счета детектора с образцом, пучок перекрыт кадмиевой заслонкой;

d — толщина образца;

K_n — величина линейного коэффициента ослабления нейтрона в веществе, рассчитанная по формуле 5:

$$K_n = \sigma n, \quad (5)$$

где σ — полное микроскопическое сечение (количество взаимодействий N частиц одного сорта в единицу времени n_1 со скоростью v_1 на мишень из частиц другого сорта с плотностью частиц n_2 и объемом V), а n — число ядер элемента на единицу объема вещества.

В настоящее время в Центре композитных материалов НИТУ МИСиС осуществляется синтез и испытания изделий из ВМПЭ, что создает положительные перспективы их дальнейшего производства и применения в России.

Вывод

Степень ослабления уровня радиационного гамма-излучения изделием на основе материала (ВМПЭ+30%W+20%B₄C) в 1.5 раза превышает степень ослабления уровня аналогичного излучения бетоном равной толщины.

Материал на основе ВМПЭ с добавками из нанопорошка вольфрама, карбида бора и технического углерода (ВМПЭ + 20 масс.% W + 20 масс.% В₄C + 20 масс.% С) демонстрирует сравнительно большую способность к ослаблению гамма-излучения, чем бетон, при энергии излучения порядка 0.2 МэВ. Таким образом, для уменьшения толщины бетонного покрытия на 10 см может быть использовано модифицированное покрытие на базе ВМПЭ толщиной 0.7 см.

Этот материал (ВМПЭ + 20 масс.% W + 20 масс.% В₄C + 20 масс.% С) также отличается способностью поглощать тепловые и подтепловые нейтроны с энергией от 0.025 эВ до 0.5 кэВ при толщине образца от 0.35 см, а также способностью замедлять быстрые нейтроны за счет присутствия карбида бора и технического углерода в матрице.

Технические характеристики полученных материалов дают возможность предложить использование пластин на основе ВМПЭ с радиопоглощающими частицами в качестве элементов дополнительной защиты поверхности бетонных блоков или футеровки определенных областей поверхности защитного сооружения (например, быстровозводимого убежища типа «Куб-М») в качестве материала, защищающего от радиационного излучения. При этом появляется возможность уменьшить расход бетона за счет уменьшения его толщины примерно на 10 см при сопоставимых ценовых затратах.

Литература

1. Гусев. Н. Г. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1–2. Защита от ионизирующих излучений / Е. Е. Ковалев, В. П. Машкович, А. П. Суворов. М.: Энергоатомиздат 1990. 864 с.
2. CA Cancer Clin J. Mar-Apr; 62(2):75–100. doi: 10.3322/саас.21132. Cancerrisk sassociated with external radiation from diagnostic imaging procedures. Martha S. Linet, Thomas L. Slovis, Donald L. Miller, Ruth Kleinerman, Choonsik Lee, Preetha Rajaraman, Amy Berrington de Gonzalez. 2012.
3. Health Phys.; 85(1):47–59. doi: 10.1097/00004032–200307000–00011. Cancer risks from medical radiation. Elaine Ron. 2003.
4. AJR Am J Roentgenol. 1992;158(1):191–3. doi: 10.2214/аjr.158.1.1530763. The relationship between back pain and lead apron use in radiologists. B. Moore, E. Van Sonnenberg, G. Casola, R. A. Novelline.
5. Stewart C. Bushong. Radiologic Science for Technologists — E-Book: Radiologic Science for Technologists — E-Book. Elsevier Health Sciences. 2012. P. 672.
6. Miller D. L. et al. Radiation Doses in Interventional Radiology Procedures: The RAD-IR Study Part I: Overall Measures of Dose. J VascInterv Radiology.2003; Vol. 14. P. 711–727.
7. Brambilla M. et al. Patient radiation doses and references levels in interventional radiology. Radiol Med. 2004. Vol. 107. P. 408–418.
8. Peyman Atashi, Sohrab Rahmani, Behzad Ahadi & Akbar Rahmati. Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/W/Bi₂O₃ for gamma ray shielding application. Journal of Materials Science: Materials in Electronics.2018. Vol. 29. P. 12306–12322.

9. Shruti Nambiar and John T.W. Yeow. Polymer-Composite Materials for Radiation Protection. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2012. Vol. 4. Issue 11. P. 5717–5726.
10. N. Asari Shik, L. Gholamzadeh. X-ray shielding performance of the EPVC composites with micro- or nanoparticles of WO_3 , PbO or Bi_2O_3 . Appl. Radiat. Isot. 2018; 139:61–65. doi: 10.1016/j.apradi-so.2018.03.025.
11. Fontainha CCP et al. P(VDF-TrFE)/ ZrO_2 Polymer-Composites for X-ray Shielding. Mat Res. 2016. Vol. 19. P. 91–99.
12. Jaafar Hussein Sabri, Abdel Hameedalsarraf, Khalid Hadi Mahdi. A Comparative Study for Micro and Nano shield of (PbO) composite for gamma Radiation. Energy Procedia. 2019. Vol. 157. P. 802–814.
13. Nurul Zahirah, Binti Noor Azman. Design of Nanostructured Polymeric Materials for Radiation Shielding of Ionizing. Journal of Applied Polymer Science. 2013.
14. Abhijit Bijanu, Rahul Arya, Varsha Agrawal, Akshay Singh Tomar, V. Sorna Gowri, Sunil Kumar Sanghi, Deepti Mishra & Shabi Thankaraj Salammal. Metal-polymer composites for radiation protection: a review. Journal of Polymer Research. Vol. 28. Article number: 392 (2021).
15. Nambiar S. and Yeow J.T.W. Polymer-Composite Materials for Radiation Protection. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2012; vol. 4: pp. 5717–5726.
16. Sadulla R. Allayarov, Matthew P. Confer, Svetlana A. Bogdanova, Ilgiza F. Shaimukhametova, Yuliya A. Shigabieva, David A. Dixon. Influence of γ -radiation on thermal destruction of a cross-linked acrylic polymer. Polymer Degradation and Stability. 2021. Vol. 191. P. 109697.
17. Rosiak. J.M. Radiation Effects of Polymers. ACS Symposium Series; Clough. R.L., Shalaby. S.W. Eds.; American Chemical Society: Washington. DC. USA. 1991; vol. 475.
18. Singh. A.; Silverman. J. (Eds.) Radiation Processing of Polymers; Hanser: Muenchen. Germany. 1992.
19. Amol Tarachand Naikwadi, Bhuwanesh Kumar Sharma, Keyur D. Bhatt, Prakash A. Mahanwar. Gamma Radiation Processed Polymeric Materials for High Performance Applications: A Review. Front. Chem. Polymer Chemistry. 2022. Vol. 10.
20. Aiysha Ashfaq, Marie-Claude Clochard, Xavier Coqueret, Clelia Dispenza, Mark S. Driscoll, Piotr Ulański and Mohamad Al-Sheikhly. Polymerization Reactions and Modifications of Polymers by Ionizing Radiation. Polymers. 2020. Vol. 12. Issue 12. P. 2877.
21. V. S. Ivanov. Radiation Chemistry of Polymers. 1992. P. 320.
22. ТУ 2211-068-70353562-2006. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен.
23. Xu T., Farris R.J. Matrix Free Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber-Reinforced Composites: Process. Structure. Properties and Applications // New Polymeric Materials (American Chemical Society).— 2005.— Vol. 916.— P. 391–405.
24. Gao C., Yu L., Liu H., Chen L. Development of self-reinforced polymer composites. Progress in Polymer Science.— 2012.— Vol. 37. № 6.— P. 767–780.
25. Kmetty A., Barany T., Karger-Kocsis J. Self-reinforced polymeric materials: A review // Progress in Polymer Science.— 2010.— Vol. 35. № 10.— P. 1288–1310.
26. Matabola K.P., Vries A.R.D., Moolman F.S., Luyt A.S. Single polymer composites: a review // Journal of Material Science.— 2009.— Vol. 44. № 23.— P. 6213–6222.
27. Шиц Е. Ю. Создание инструментальных алмазосодержащих материалов на полиолефиновых матрицах с заданным комплексом свойств: Диссертация. Комсомольск-на-Амуре, 2015.
28. Чуков Д. И., Жеребцов Д. Д., Нематуллоев С. Г. Исследование структуры и свойств самоармированных композиционных материалов на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Фундаментальные исследования. 2017. № 11-1. С. 145–150.
29. Timothy Frederick Llewellyn McKenna, Montree Namkajorn, Arash Alizadeh. Method for the preparation of ultra-high molecular weight polyethylene. International Publication Number: WO 2017/001882 A1.
30. Haichen Zhang and Yong Liang. Extrusion Processing of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. 2017.
31. Ronca S., Igarashi T., Forte G., Rastogi S. Metallic-like thermal conductivity in a lightweight insulator: Solid-state processed ultra high molecular weight polyethylene tapes and films. Polymer. 2017. Vol. 123. P. 203–210.
32. Wood W. Processing. Wear. and Mechanical Properties of Polyethylene Composites Prepared with Pristine and Organosilane-Treated Carbon Nanofibers. Washington State University; 2012.
33. Robert D., Hufen J., Lüdtke K., Rinker B., Ehlers J. Process for producing high molecular weight polyethylene. 2015. US Patents.
34. Spencer LP, Kirschner JM. Polymerization processes for high molecular weight polymers. 2017. US Patents.
35. Huang Y., Xu J., Zhang Z., Xu L., Li L., Li J., Li Z. Melt processing and structural manipulation of highly linear disentangled ultrahigh molecular weight polyethylene. Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 315. P. 132–141.
36. Huang Y., Zhang Z., Xu J. Simultaneously improving wear resistance and mechanical performance of ultrahigh molecular weight polyethylene via cross-linking and structural manipulation. Polymer. 2016. Vol. 90. P. 222–231.
37. Kurtz S.M. UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices. Academic Press; 2009.
38. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. Изд. 3-е. Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1976. 504 с.
39. Premnath. V., Harris. W.H. et al. Gamma sterilization of UHMWPE articular implants: an analysis of oxidation problem. Ultra High Molecular Weight Poly Ethylene. Biomaterials. 1996. Vol. 17. № 18. P. 1741–1753.
40. G. Lewis. Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene. Biomaterials. 2001. Vol. 22. P. 371–401.
41. Berger L., Kausch H. H. Plummer C. J.G. Structure and deformation mechanisms in UHMWPE-fibres. Polymer. 2003. Vol. 44. Issue 19. P. 5877–5884.
42. Nadin Jamal Abualroos, Khatijah Aisha Yaacob, Rafidah Zainon. Radiation attenuation effectiveness of polymer-based radiation shielding materials for gamma radiation. Radiation Physics and Chemistry. 2023. Vol. 212. P. 111070.
43. Alparslan Erol, Isa Pöcan, Emre Yanbay, Onur Alp Ersoz, Fatma Yurt Lambrecht. Radiation shielding of polymer composite materials with wolfram carbide and boron carbide. Radiation Protection and Environment. 2016. Vol. 39. Issue 1. P. 3–6.
44. Vignesh S., Winowlin Jappes J. T., Nagaveena S., Krishna Sharma R., Adam Khan M. Boron carbide dispersed epoxy composites for gamma radiation shielding applications. Vacuum. 2022. Vol. 205. P. 111474.
45. Angel Acevedo-Del-Castillo, Ernesto Águila-Toledo, Santiago Maldonado-Magner and Héctor Aguilar-Bolados. A Brief Review on the High-Energy Electromagnetic Radiation-Shielding Materials Based on Polymer Nanocomposites. Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. Issue 16. P. 9079.
46. Голиков И. Г. Лекции по дозиметрии и защите. СПб.: Политехн. ун-т., 2016. 150 с.
47. RU2561 989 C1 (73) Опубликовано: 10.09.2015 Бюл. № 25 «Радиационно-защитный материал на полимерной основе с повышенными рентгенозащитными и нейтронозащитными свойствами».
48. СП 88.13330.2014 Свод правил «Защитные сооружения гражданской обороны» СНиП II-11–77*.
49. Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы / Л. А. Аликбаева, М. А. Афонин, А. П. Ермолаева-Маковская. Л. И. Ключкова, Б. Ю. Лалаев, М. А. Меркурьева, Е. В. Платыгина. В. В. Семенова, В. Ф. Теплых, Г. И. Чернова, А. В. Москвин. 2005. 1142 с.
50. Бойков А. А. Нанокмозиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для комплексной радио- и радиационной защиты: Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2016. 141 с.

Сведения об авторах

Агеева Ксения Андреевна: ФБГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), м. н. с. науч.-исслед. отдела. Москва, Россия. SPIN-код: 6592-7972.

Кузнецов Максим Валерьевич: д. х. н., ФБГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), гл. н. с. науч.-исслед. центра. Москва, Россия. SPIN-код: 6127-9141.

Information about authors

Ageeva Ksenia A.: VNIi GOChS (FC), Junior Researcher, Research Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 6592-7972.

Kuznetsov Maxim V.: ScD (Chemical Sc.), VNIi GOChS (FC), Chief Researcher, Research Center. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 6127-9141.