

## Исследование экранирующих свойств композитов на основе силиконовой смолы и оксида висмута к гамма-излучению

© Н.И. Черкашина, В.И. Павленко, А.Ю. Ручий, Р.В. Сидельников, Д.Д. Мачукаев, Н.И. Бондаренко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
308012 Белгород, Россия  
e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 5 февраля 2026 г.

Представлено исследование радиационно-защитных композитов на основе силиконовой смолы с добавками оксида висмута в концентрациях 0 wt.%, 20 wt.%, 40 wt.% и 60 wt.%. Научный интерес работы заключается в определении максимальной концентрации оксида висмута в силиконовой матрице, при которой сохраняется баланс между способностью экранировать гамма-излучение и механической прочностью (на растяжение). В отличие от известных исследований с содержанием  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  10 wt.% – 30 wt.% здесь разработана технология синтеза и найден критический предел наполнения. Выполнен синтез материалов с целью повышения их способности экранировать гамма-излучение. Проведен микроскопический анализ поверхностной структуры композитов, а также исследованы физико-механические характеристики. Кроме того, оценена способность разработанных материалов ослаблять гамма-излучение. Результаты показали значительное улучшение экранирующей способности материала при концентрации оксида висмута 40 wt.%. Полученные результаты позволили оценить потенциал силиконовых композитов с оксидом висмута в качестве эффективных радиационно-защитных материалов.

**Ключевые слова:** силиконовая смола, оксид висмута, композит, гамма-излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63128.277-25

### Введение

Современные радиационно-защитные материалы играют ключевую роль в обеспечении безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения [1–4]. В связи с этим продолжается поиск новых композитов, обладающих высокой радиационной стойкостью, механической прочностью и технологической доступностью [5–8]. Традиционные металлические экраны с высоким  $Z$  (свинец, вольфрам, сталь) эффективны для защиты от гамма- и рентгеновского излучения, бетоны же эффективны в защите от гамма-излучения, а тяжелые бетоны с добавкой бора эффективны для экранирования нейтронного излучения. Однако массогабаритные характеристики данных материалов уступают полимерным композитам. Полимерные материалы с добавкой тяжелых металлов или их оксидов эффективно поглощают как гамма-, так и нейтронное излучение (из-за синергетического эффекта атомов водорода и металлов с высоким  $Z$ ). Полимерные композиты, наполненные атомами тяжелых металлов, как правило, легче своих металлических и бетонных аналогов при сопоставимой степени защиты. Их можно отливать в сложные геометрические формы, создавая детали сложной конфигурации. Композиты на основе полимеров могут быть гибкими и эластичными. Конструкционные полимеры инертны и устойчивы ко многим агрессивным средам, большинство из которых являются диэлектриками, что важно для защиты электроники [9]. Силиконовые смолы представ-

ляют собой многообещающую матрицу для разработки инновационных радиационно-защитных композитных материалов благодаря их выдающимся физико-химическим свойствам [10]. Силиконовая смола обладает рядом преимуществ по сравнению с другими полимерными матрицами: высокая энергия связи основной цепи  $\text{O}-\text{Si}$  ( $\sim 452 \text{ kJ/mol}$ ) по сравнению с энергией связи  $\text{C}-\text{C}$  ( $\sim 348 \text{ kJ/mol}$ ) в большинстве полимеров, что делает силикон более устойчивым к разрыву цепи под действием ионизирующего излучения; термостабильность в широком температурном диапазоне ( $-60^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$ ), что критически важно, так как ионизирующее воздействие сопровождается тепловыделением; высокая гибкость и эластичность, что позволяет поглощать механические напряжения, в том числе вибрации, ударные нагрузки, термическое расширение/сжатие; силиконовые смолы обладают высокими диэлектрическими свойствами (удельное объемное электрическое сопротивление составляет  $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ , а электрическая прочность —  $25-40 \text{ kW/mm}$  для вулканизированного каучука) [11]. Среди этих характеристик также следует отметить хорошую совместимость с тяжелыми элементами, такими как висмут [12,13]. Хотя эпоксидные смолы и полиэтилен могут превосходить силиконы по чистой механической прочности или нейтронной защите, их уникальные свойства и способность выдерживать экстремальные условия делают силиконы незаменимыми для критически важных применений в радиационно-защитной сфере.

Висмут, обладая высоким атомным номером ( $Z = 83$ ), демонстрирует высокую эффективность в поглощении гамма-излучения, что делает его ценным компонентом для радиационно-защитных материалов [14–17].

В контексте материаловедения силиконовые смолы выступают в роли многофункциональной основы, обеспечивая не только структурную целостность, но и необходимые эксплуатационные свойства композитов [18,19]. Их химическая инертность в широком диапазоне температур и агрессивных сред гарантирует долговечность и надежность готовых изделий. Эластичность силиконовых смол позволяет создавать материалы с высокой устойчивостью к механическим нагрузкам и деформациям, что особенно важно для конструкций, эксплуатируемых в условиях динамических воздействий [20].

Композиционные материалы на основе силиконовых смол с добавкой оксидов тяжелых металлов демонстрируют превосходные радиационно-защитные характеристики [21,22]. Висмут, благодаря своим уникальным ядерным свойствам, эффективно поглощает гамма-кванты, что значительно снижает уровень радиационного излучения [23,24]. Это делает такие композиты перспективными для использования в ядерной энергетике, медицине и других областях, где требуется защита от ионизирующего излучения [3].

В статье [5] рассматривается вопрос о применении полимерных композитов, содержащих наполнители с высоким атомным номером, для обеспечения радиационной защиты. Авторы статьи подчеркивают, что использование таких материалов позволяет создавать легкие, пластичные и удобные в обработке материалы.

В работе [6] исследователи синтезировали композит на основе полиимида с модифицированными частицами  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Проведенный анализ радиационной защиты показал, что массовый коэффициент ослабления гамма-излучения при наполнении 60 wt.% составил  $0.24 \text{ cm}^2/\text{g}$  при энергии излучения гамма-квантов 0.662 MeV. Ученые пришли к выводу, что, помимо высоких радиационно-защитных свойств, добавка оксида висмута в полимерную матрицу значительно повышает термостойкость материала.

В работе [25] исследован гибкий силиконовый композит с добавкой шлака из электронных отходов (порошкообразного шлака электронно-лучевой трубки (Cathode Ray Tube — CRT)) и показана его эффективность в экранировании гамма-излучения без снижения физико-механических характеристик, что демонстрирует современные подходы к экологичной разработке защитных материалов. Так, линейный коэффициент ослабления композита, содержащего 50 wt.% CRT, при энергии излучения 0.06 MeV составил  $2.025 \text{ cm}^{-1}$ , массовый —  $1.189 \text{ cm}^2/\text{g}$ , однако при энергии излучения 0.662 MeV массовые коэффициенты ослабления всех композитов сопоставимы ( $\sim 0.075 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

В исследовании [1] ученые создали композитные материалы на основе силикона, в состав которых были включены наночастицы оксидов тяжелых металлов. Эти

материалы продемонстрировали повышенную термическую стабильность, улучшенные физико-механические и радиационно-защитные характеристики. Так, при энергии излучения гамма-квантов 0.06 MeV линейный коэффициент ослабления для бездобавочного образца составил  $0.310 \text{ cm}^{-1}$ , для образца, содержащего по 15 wt.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Zr}_2\text{O}_3$  —  $9.414 \text{ cm}^{-1}$ , а при энергии излучения 0.662 MeV —  $0.110$  и  $0.260 \text{ cm}^{-1}$  соответственно.

В статье [18] рассмотрены материалы на основе силиконового каучука с добавкой  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CdO}$  и  $\text{SnO}_2$  в равных пропорциях в микро- и нанометрическом размере. Результаты исследования показали, что наибольшую прочность при растяжении имеет композит с содержанием 20 wt.% микроразмерной добавки. Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения для композитов с содержанием добавки 0 wt.%, 20 wt.%, 50 wt.% при энергии излучения 0.06 MeV составили 0.219, 1.166,  $2.558 \text{ cm}^{-1}$  соответственно, а при энергии излучения 0.662 MeV —  $0.107$ ,  $0.082$ ,  $0.084 \text{ cm}^{-1}$  соответственно.

Таким образом, силиконовые смолы, благодаря своим физико-химическим свойствам, а также хорошей совместимости с тяжелыми элементами, предоставляют широкие возможности для разработки передовых композитных материалов с требуемыми эксплуатационными параметрами.

В настоящей работе рассматривается синтез и комплексное исследование силиконовых композитов с различным содержанием оксида висмута, включая микроструктурный анализ, физико-механические свойства и стойкость к гамма-излучению, что позволит определить их применимость в радиационной защите.

Научный интерес настоящей работы заключается в исследовании пределов наполнения силиконовой матрицы оксидом висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) для создания высокоэффективных радиационно-защитных композитов. В отличие от большинства исследований, фокусирующихся на введении малых долей наполнителя (10 wt.% — 30 wt.%), целью настоящей работы является разработка технологичных методик синтеза и определение критической (максимально возможной) концентрации оксида висмута, при которой достигается оптимальный баланс между высокими радиационно-защитными характеристиками и сохранением ключевых физико-механических свойств, в первую очередь, прочности при растяжении.

## 1. Материалы и методы исследования

### 1.1. Материалы

В качестве полимерной матрицы для синтеза образцов использовали силиконовую резиновую смесь СП-111, изготовленную на основе синтетического силиконового каучука, производства ООО „НТЦ Резина“, РФ.

В качестве наполнителя использовали чистый (ч.) оксид висмута(III) ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) производства ООО „АО РЕАХИМ“, РФ. Преобладающая фракция частиц

оксида висмута —  $11.4 \mu\text{m}$ , удельная поверхность порошка —  $34\,780 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ .

## 1.2. Технология синтеза

Силиконовую смолу подмораживали при  $-2^\circ\text{C}$  в течение 24 h, затем измельчали вместе с наполнителем ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) в лабораторной шаровой мельнице IBMU-100-2 производства „HT Machinery“, Япония. Предварительно пресс-форму разогревали в сушильном шкафу КС-136 (производства ООО „Метротест“, РФ) при  $150^\circ\text{C}$  в течение 30–40 min, после чего загружали материал. Затем осуществляли предварительное прессование на машине испытательной универсальной РЭМ-100А-1-1 (производства ООО „Метротест“, РФ) в течение 1 min для равномерного распределения материала с нагрузкой не больше 30 МПа. Далее пресс-форму с материалом выдерживали в течение 40–50 min при температуре  $150^\circ\text{C}$ . После чего осуществляли основное прессование с нагрузкой 10 МПа. Вулканизацию материала осуществляли при  $200^\circ\text{C}$  в течение 24 h. Для проведения испытаний на растяжение композиты изготавливали в виде лопаток (рис. 1).

В ходе исследования было получено четыре вида образцов, которые содержали разное количество оксида висмута: 0 wt.%, 20 wt.%, 40 wt.% и 60 wt.%. Выбор максимальной загрузки в 60 wt.% обусловлен технологическим порогом: дальнейшее увеличение содержания оксида висмута приводит к резкой потере эластичности и механической целостности материала, а также к затруднению его обработки из-за чрезмерного увеличения вязкости композиции. При концентрации выше 60 wt.% образцы становились хрупкими и расслаивались.

## 1.3. Методы исследования

Для проведения количественного анализа компонентов и образцов применялись лабораторные весы модели ВК-600, изготовленные АО „МАССА-К“, РФ. Эти весы обладают разрешающей способностью в 0.01 g,

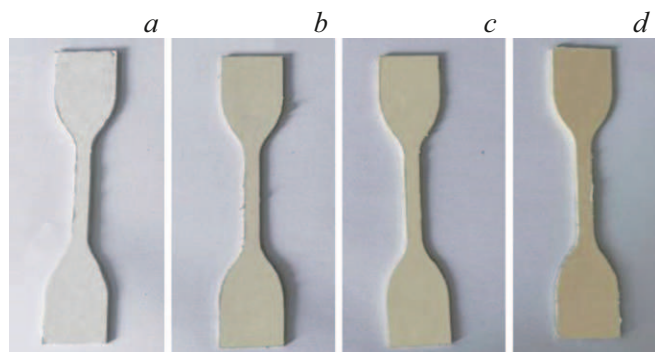


**Рис. 1.** Изображение полученных композитов на основе силиконовой смолы с добавкой  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ : *a* — 0 wt.%, *b* — 20 wt.%, *c* — 40 wt.%, *d* — 60 wt.%.

что позволяет обеспечивать необходимую точность при выполнении аналитических задач.

Для определения краевого угла смачивания образцов применялось оборудование „Krüss DSA30“ с диапазоном измерения от 0 до  $180^\circ$  и точностью  $0.3^\circ$  производства компании „Krüss“ GmbH, Германия.

Для изучения морфологии полученных образцов был использован метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) с применением микроскопа высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU. С помощью детектора обратно рассеянных электронов (BSE) были получены изображения поверхности образцов.

Исследование механических характеристик материалов, таких как испытания на растяжение, проводилось с использованием универсальной испытательной машины „РЭМ-100-А-1-1“, изготовленной ООО „Метротест“, РФ.

В ходе исследований на растяжение была использована стандартная методика, соответствующая ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) [26]. Для проведения испытаний были подготовлены по три образца первого типа каждого состава размером  $117 \times 25 \times 2 \text{ mm}$ . Расстояние между зажимами составляло 80 mm.

Предел прочности на разрыв ( $\sigma_{pm}$ , [МПа]) вычисляли по следующей формуле:

$$\sigma_{pm} = F_{pm}/A_0, \quad (1)$$

где  $F_{pm}$  — максимальная растягивающая нагрузка, [N];  $A_0$  — поперечное сечение образца до испытаний, [ $\text{mm}^2$ ].

Для определения степени радиационной защиты синтезированных материалов от гамма-излучения использовался дозиметр-радиометр „ДКС-96“ с блоком детектирования „БДКС-96Б“. На рис. 2 показана схема проведения испытаний образцов под воздействием гамма-излучения.

Сначала был измерен фон, значение которого было сохранено в устройстве. Затем в свинцовую емкость были помещены источники гамма-излучения, и был проведен замер эквивалентной дозы без защитного экрана ( $I_0$ , [ $\mu\text{Sv/h}$ ]). После этого в емкость был помещен исследуемый композит толщиной от 0.220 до 0.250 cm, закрепленный в специальном пазе. Таким образом, был создан защитный экран. Затем был проведен замер эквивалентной дозы ( $I$ , [ $\mu\text{Sv/h}$ ]). В качестве источников гамма-излучения использовались  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  с энергиями излучения 0.570, 0.662 и 1.252 MeV соответственно. Эквивалентная доза измерялась трижды для каждого материала.

Все источники гамма-квантов, изготовленные в соответствии с ОСГИ 4 [27,28], имеют форму дисков с диаметром 12.5 mm. Каждый диск покрыт полимерной оболочкой толщиной 3 mm. Внутри оболочки находится активный радионуклид. Данные источники излучения были произведены АО „Радиевый институт им. В.Г. Хлопина“, РФ.

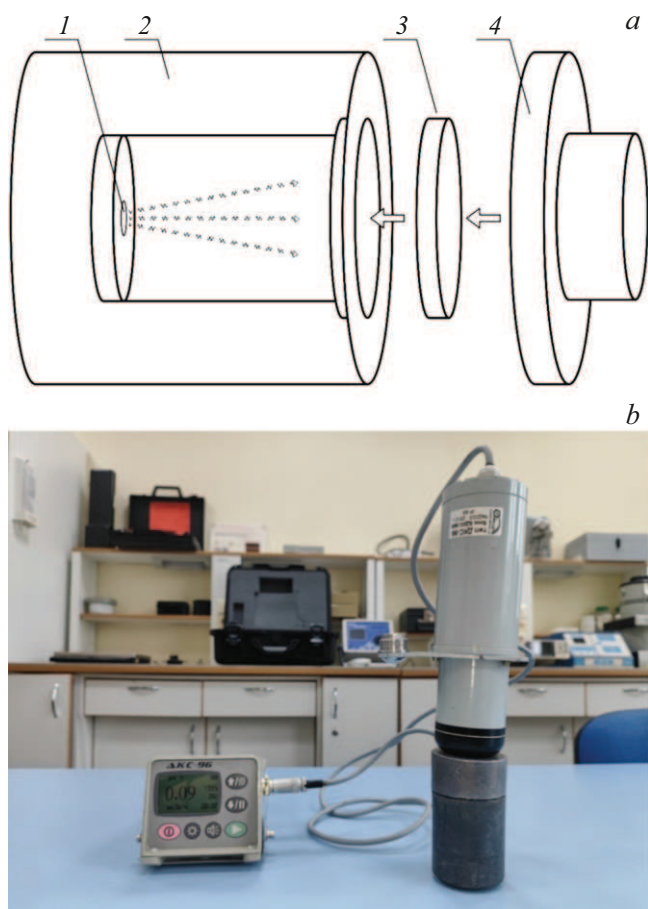


**Рис. 2.** *a* — схема проведения испытаний композитных материалов на радиационно-защитные характеристики к гамма-излучению: 1 — источник гамма-излучения; 2 — свинцовая емкость; 3 — образец для исследования; 4 — блок детектирования „БДКС-966“. Направление распространения излучения обозначено стрелками; *b* — изображение дозиметра „ДКС-96“ с блоком детектирования „БДКС-966“.

Линейный коэффициент ослабления гамма-излучения ( $\mu$ , [см<sup>-1</sup>]) рассчитывался по формуле

$$\mu = \ln(I_0/I)/d, \quad (1)$$

где  $I_0$  — мощность эквивалентной дозы в отсутствие защиты, [μSv/h];  $I$  — мощность эквивалентной дозы при наличии защиты, [μSv/h];  $d$  — толщина слоя защиты, [см].

Массовый коэффициент ослабления гамма-излучения ( $\mu_m$ , [см<sup>2</sup>/г]) рассчитывали по формуле

$$\mu_m = \mu/\rho, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность защиты, [г/см<sup>3</sup>].

Толщину слоя половинного ослабления гамма-квантов ( $d_{1/2}$ , [см]) рассчитывали по формуле

$$d_{1/2} = \ln(2)/\mu, \quad (3)$$

где  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления гамма-излучения, [см<sup>-1</sup>].

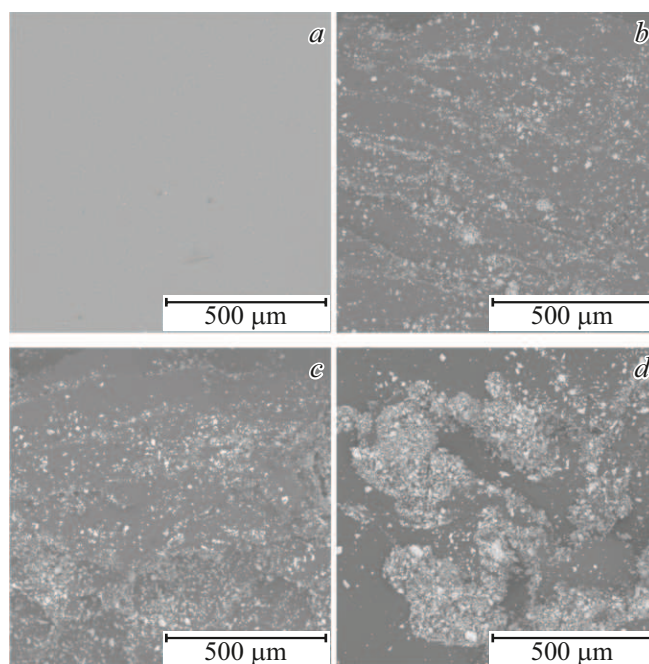


**Рис. 3.** СЭМ-изображения исследуемых композитов с добавкой: *a* — 0 wt.%, *b* — 20 wt.%, *c* — 40 wt.%, *d* — 60 wt.% Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Анализ морфологии исследуемых композитов

Для исследования структуры поверхности полученных материалов были сделаны снимки с помощью раствора электронного микроскопа в режиме регистрации электронов, отраженных от поверхности образца (рис. 3). На СЭМ-изображении можно увидеть, что в полимерной матрице есть светлые вкрапления, которые соответствуют оксиду висмута. Важно подчеркнуть, что во всех образцах, кроме образца с добавкой 60 wt.%, оксид висмута равномерно распределен по всей поверхности композита.

### 2.2. Исследование краевого угла смачивания

Результаты исследования краевого угла смачивания полученных композитов представлены на рис. 4.

На основе исследования краевого угла смачивания композитных материалов можно заключить, что при увеличении количества наполнителя в них происходит смещение баланса между гидрофобными и гидрофильными свойствами в сторону гидрофобности. В частности, при увеличении содержания Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в композитах от 0 wt.% до 60 wt.% краевой угол смачивания постепенно увеличивается с (93.85 ± 0.45)° до (121.40 ± 0.40)°. Исследование краевого угла смачивания проведено для косвенной оценки совместимости компонентов композита и его устойчивости к влаге. Рост гидрофобности с увеличением доли Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> свидетельствует о хорошей

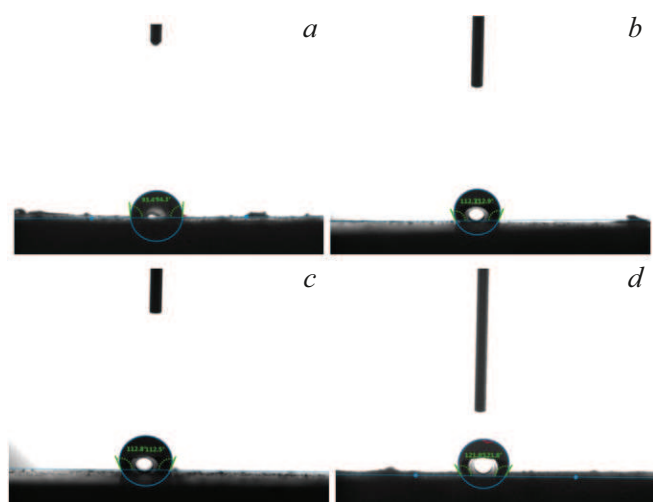


**Рис. 4.** Изображение капли воды на полученных композитах с добавкой: *a* — 0 wt.%, *b* — 20 wt.%, *c* — 40 wt.%, *d* — 60 wt.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .

степени дисперсии наполнителя в полимерной матрице и низкой вероятности расслоения. Это критически важно для долговечности материала в условиях реальной эксплуатации, где влага может способствовать коррозии и снижению защитных свойств.

### 2.3. Исследование физико-механических характеристик композитов

Результаты определения прочности при растяжении синтезированных композитов представлены на рис. 5.

В ходе исследования было установлено, что при добавлении 20 wt.% оксида висмута к материалу его прочность на разрыв увеличивается на 0.1 МПа. Если же содержание оксида висмута увеличивается до 40 wt.%, то прочность на разрыв снижается по сравнению с образцом без добавок на 0.9 МПа. Однако при максимальном содержании оксида висмута в количестве 60 wt.% прочность на разрыв составляет 6.1 МПа, что сопоставимо с прочностью образца без добавок, которая равна 6.4 МПа. Причиной повышения прочности на разрыв композита с содержанием 60 wt.% наполнителя, скорее всего, послужило неравномерное распределение оксида висмута в матрице полимера.

Также для полученных композитов был проведен анализ плотности гидростатическим методом, результаты которого представлены в табл. 1.

В рамках проведенного анализа была выявлена следующая закономерность: существует прямая корреляция между содержанием оксида висмута в композиции и ее плотностью. Установлено, что с увеличением процентного содержания оксида висмута наблюдается пропорциональное возрастание плотности композита, что подтверждает важность данного параметра в контексте совершенствования свойств материала. Наши ма-

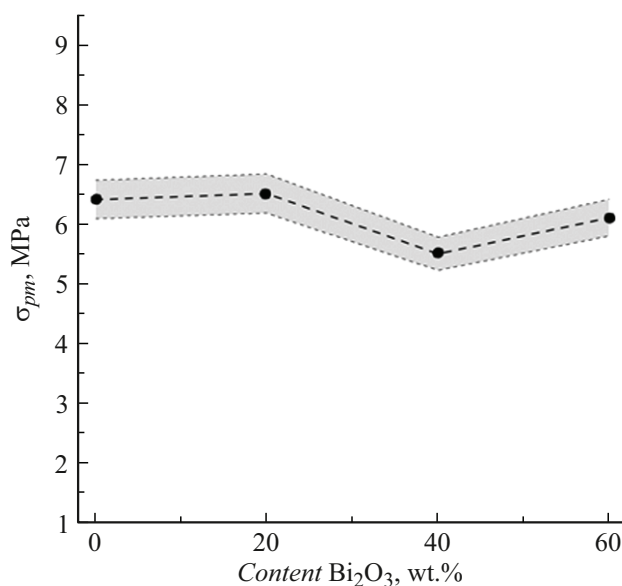


**Рис. 5.** Предел прочности полученных композитов при растяжении.

териалы могут конкурировать с другими полимерными радиационно-защитными материалами, значение плотности которых превышает  $4 \text{ g/cm}^3$ , так как массогабаритные характеристики весьма важный параметр при выборе необходимой защиты.

### 2.4. Исследование радиационно-защитных характеристик композитов к гамма-излучению

В ходе экспериментального облучения созданных композитных материалов были получены данные (табл. 2), которые легли в основу вычислений линейного коэффициента ослабления ( $\mu$ ,  $[\text{cm}^{-1}]$ ), массового коэффициента ослабления ( $\mu_m$ ,  $[\text{cm}^2/\text{g}]$ ) и толщины слоя половинного ослабления гамма-квантов ( $d_{1/2}$ ,  $[\text{cm}]$ ). Были проведены аналогичные опыты и вычисления для образца, изготовленного из бездобавочной силиконовой смолы. Итоги вычислений представлены в табл. 3.

В соответствии с данными табл. 3, можно сделать следующие выводы: чем больше энергия гамма-излучения, тем меньше линейный и массовый коэффициенты ослабления композитов. Это согласуется с увеличением слоя половинного ослабления. Важно подчеркнуть, что увеличение количества оксида висмута в материале от 0 wt.% до 60 wt.% приводит к увеличению линейного коэффициента ослабления и уменьшению слоя половинного ослабления. Показания массового коэффициента ослабления для композитов, содержащих 40 wt.% и 60 wt.% наполнителя, сопоставимы.

В ходе исследования было выявлено, что лучшим композитом для защиты от гамма-излучения является материал, содержащий 40 wt.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ввиду высоких

Таблица 1. Плотность полученных композитов

| Параметр                     | Содержание Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в композите, wt.% |              |              |              |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                              | 0                                                           | 20           | 40           | 60           |
| Плотность, g/cm <sup>3</sup> | 1.20 ± 0.036                                                | 1.47 ± 0.049 | 1.71 ± 0.060 | 2.43 ± 0.090 |

Таблица 2. Результаты измерений радиационно-защитных характеристик разработанных образцов

| Содержание наполнителя, wt.% | Толщина образца, см | Параметр              | Энергия, MeV                        |                            |                           |
|------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                              |                     |                       | 0.570 ( <sup>207</sup> Bi)          | 0.662 ( <sup>137</sup> Cs) | 1.252 ( <sup>60</sup> Co) |
|                              |                     |                       | Эквивалентная доза излучения, μSv/h |                            |                           |
| Без образца                  | —                   | <i>I</i> <sub>0</sub> | 3.230 ± 0.161                       | 3.751 ± 0.222              | 5.570 ± 0.390             |
| 0                            | 0.220 ± 0.003       | <i>I</i>              | 2.813 ± 0.141                       | 3.581 ± 0.183              | 5.460 ± 0.382             |
| 20                           | 0.225 ± 0.003       | <i>I</i>              | 2.517 ± 0.126                       | 3.525 ± 0.194              | 5.444 ± 0.352             |
| 40                           | 0.225 ± 0.003       | <i>I</i>              | 2.496 ± 0.125                       | 3.467 ± 0.166              | 5.317 ± 0.423             |
| 60                           | 0.250 ± 0.003       | <i>I</i>              | 2.154 ± 0.118                       | 3.323 ± 0.159              | 5.177 ± 0.393             |

Таблица 3. Радиационно-защитные показатели разработанных композитов

| Параметр                                            | Энергия, MeV               | Содержание Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в материале, wt.% |               |               |               |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                                     |                            | 0                                                           | 20            | 40            | 60            |
| Линейный коэффициент ослабления, см <sup>-1</sup>   | 0.570 ( <sup>207</sup> Bi) | 0.628 ± 0.050                                               | 1.109 ± 0.089 | 1.146 ± 0.092 | 1.621 ± 0.130 |
|                                                     | 0.662 ( <sup>137</sup> Cs) | 0.211 ± 0.017                                               | 0.276 ± 0.022 | 0.350 ± 0.028 | 0.485 ± 0.038 |
|                                                     | 1.252 ( <sup>60</sup> Co)  | 0.091 ± 0.007                                               | 0.102 ± 0.008 | 0.207 ± 0.017 | 0.293 ± 0.024 |
| Массовый коэффициент ослабления, см <sup>2</sup> /g | 0.570 ( <sup>207</sup> Bi) | 0.524 ± 0.042                                               | 0.754 ± 0.061 | 0.670 ± 0.054 | 0.667 ± 0.053 |
|                                                     | 0.662 ( <sup>137</sup> Cs) | 0.176 ± 0.014                                               | 0.188 ± 0.015 | 0.205 ± 0.016 | 0.199 ± 0.014 |
|                                                     | 1.252 ( <sup>60</sup> Co)  | 0.076 ± 0.006                                               | 0.069 ± 0.006 | 0.121 ± 0.010 | 0.120 ± 0.010 |
| Толщина слоя половинного ослабления, см             | 0.570 ( <sup>207</sup> Bi) | 1.103 ± 0.088                                               | 0.625 ± 0.050 | 0.605 ± 0.048 | 0.428 ± 0.035 |
|                                                     | 0.662 ( <sup>137</sup> Cs) | 3.288 ± 0.263                                               | 2.510 ± 0.199 | 1.981 ± 0.158 | 1.430 ± 0.115 |
|                                                     | 1.252 ( <sup>60</sup> Co)  | 7.645 ± 0.609                                               | 6.816 ± 0.544 | 3.355 ± 0.268 | 2.368 ± 0.189 |

показателей массового коэффициента ослабления и сопоставимой прочностью на разрыв с бездобавочным материалом. Дальнейшее увеличение содержания наполнителя в полимерной матрице приводит к высокой агрегации частиц, что сказывается на равномерности распределения оксида висмута в композите. Для того чтобы ослабить гамма-излучение с энергией 1.252 MeV в два раза, необходим защитный экран из чистой силиконовой смолы толщиной 7.645 см. Однако если использовать композит, содержащий 40 wt.% наполнителя, то толщина защитного экрана будет всего 3.355 см, что в 2.28 раза меньше. Стоит отметить, что использование композитов с добавкой 60 wt.% оксида висмута целесообразно использовать в тех случаях, когда очень

важна толщина защитного экрана. Так, в сравнении с композитом, содержащим 40 wt.% наполнителя, для экранирования гамма-излучения с энергией 0.662 MeV в два раза, толщина защитного экрана составит 1.981 против 1.430 см. Таким образом, лучшим радиационно-защитным материалом является композит с добавкой 40 wt.% наполнителя. Скорее всего, это связано с неравномерным распределением наполнителя в композите с содержанием 60 wt.% оксида висмута. Для решения этой проблемы в дальнейших исследованиях планируется применить отдельный помол сырьевых компонентов в мельнице криогенного помола.

Для демонстрации преимуществ разработанного радиационно-защитного композита был осуществлен

Таблица 4. Сравнительный анализ радиационно-защитных характеристик

| Состав композита                                                                                                                       | Энергия, MeV                |                                  |                             |                                  |                            |                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
|                                                                                                                                        | 0.570 ( $^{207}\text{Bi}$ ) |                                  | 0.662 ( $^{137}\text{Cs}$ ) |                                  | 1.252 ( $^{60}\text{Co}$ ) |                                  |
|                                                                                                                                        | $\mu$ , $\text{cm}^{-1}$    | $\mu_m$ , $\text{cm}^2/\text{g}$ | $\mu$ , $\text{cm}^{-1}$    | $\mu_m$ , $\text{cm}^2/\text{g}$ | $\mu$ , $\text{cm}^{-1}$   | $\mu_m$ , $\text{cm}^2/\text{g}$ |
| Силиконовая смола/40 wt.% $\text{Bi}_2\text{O}_3$<br>(разработанный)                                                                   | $1.146 \pm 0.092$           | $0.670 \pm 0.054$                | $0.350 \pm 0.028$           | $0.205 \pm 0.016$                | $0.207 \pm 0.017$          | $0.121 \pm 0.010$                |
| Силиконовая смола/50 wt.% CRT [25]                                                                                                     | 0.551                       | 0.248                            | 0.136                       | 0.075                            | 0.125                      | 0.063                            |
| Силиконовая смола/15 wt.% $\text{Bi}_2\text{O}_3$ /15 wt.%<br>$\text{WO}_3$ /15 wt.% $\text{BaO}$ /15 wt.% $\text{Zr}_2\text{O}_3$ [1] | 1.070                       | 0.410                            | 0.260                       | 0.100                            | 0.152                      | 0.058                            |
| Силиконовая смола/50 wt.%<br>micro- $(\text{Bi}_2\text{O}_3, \text{CdO}, \text{SnO}_2)$ [18]                                           | 0.173                       | 0.101                            | 0.148                       | 0.084                            | 0.110                      | 0.060                            |

сравнительный анализ с современными полимерными композитами, предназначенными для защиты от радиации. Исследование проводилось по двум ключевым параметрам: линейному и массовому коэффициенту ослабления гамма-излучения. Результаты анализа представлены в табл. 4.

Подводя итог, можно утверждать, что разработанный полимерный композит демонстрирует превосходные радиационно-защитные свойства по сравнению с современными материалами.

## Заключение

Результатом проделанной работы является установление возможности синтеза радиационно-защитных материалов на основе силиконовой смолы и оксида висмута. Введение оксида висмута в силиконовую матрицу существенно улучшает радиационно-защитные свойства композитов, при этом сохраняя их механическую прочность. Экспериментально определено, что прочности на растяжение композитов с добавкой 20 wt.%, 40 wt.% и 60 wt.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  сравнимы с бездобавочным образцом и составляют 6.5, 5.5 и 6.1 МПа соответственно. Также определено изменение гидрофобно-гидрофильного баланса поверхности композитов в сторону гидрофобности (краевой угол смачивания поверхности композита с добавкой 60 wt.% оксида висмута больше на  $27.55^\circ$  в сравнении с бездобавочным образцом). Микроскопический анализ выявил однородное распределение добавки по поверхности композитов при 20 wt.% и 40 wt.% наполнении, что позитивно сказывается на целостности материала. Композиты продемонстрировали хорошие экранирующие свойства к воздействию гамма-излучения, что подтверждает их перспективность для применения в радиационной защите. Полученные результаты подтверждают важность совершенствования состава и структуры композиционных материалов для достижения желаемых характеристик ослабления гамма-излучения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на

доработку состава и масштабирование синтеза для промышленного применения.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-79-10033 (<https://rscf.ru/project/24-79-10033/>), с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M.T. Alresheedi, M. Elsafi, Y.T. Aladadi, A.F. Abas, A.B. Ganam, M.I. Sayyed, M.A. Mahdi. *Polymers*, **15** (9), 2160 (2023). DOI: 10.3390/polym15092160
- [2] L. Gilys, E. Griškonis, P. Griškevičius, D. Adlienė. *Polymers*, **14** (9), 1696 (2022). DOI: 10.3390/polym14091696
- [3] E. Hannachi, M.I. Sayyed, Y. Slimani, M.A. Almessiere, A. Baykal, M. Elsafi. *J. Alloys Compounds*, **899**, 163173 (2022). DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.163173
- [4] М.С. Шейченко, Н.И. Алфимова, Я.Ю. Вишневская. *Вестник Белгородского гос. тех. ун-та им. В.Г. Шухова*, **5**, 15 (2017). DOI: 10.12737/article\_590878fa94e168.59204031
- [5] Q. Chang, S. Guo, X. Zhang. *Mater. Design*, **233**, 112253 (2023). DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112253
- [6] V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, R.N. Yastrebinsky. *Heliyon*, **5** (5), e01703 (2019). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01703
- [7] Z. Özkan, U. Gökmen. *Rad. Phys. Chem.*, **213**, 111250 (2023). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2023.111250
- [8] В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков, В.В. Поливкин. *Известия Волгоградского гос. тех. ун-та*, **23** (150), 43 (2014).
- [9] Д.Г. Тарасов, В.И. Павленко. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, **1** (6), 125 (2010).
- [10] R. Malekzadeh, V.S. Zali, O. Jahanbakhsh, M. Okutan, A. Mesbahi. *Nanomedicine J.*, **7** (4), 324 (2020). DOI: 10.22038/nmj.2020.07.00009

- [11] Е.А. Коленко. *Технология лабораторного эксперимента: измерения, конструкционные материалы и их обработка, теххимия и экспрессное материаловедение, микротехнология: справочник* (Политехника, СПб., 1994)
- [12] X. Liu, Q.-P. Zhang, J.-L. Li, R.-C. Chen, W.-D. Xu, Y.-T. Li, W.-B. Yang, Y.-L. Zhou. *J. Appl. Polym. Sci.*, **139** (15), e51914 (2022). DOI: 10.1002/app.51914
- [13] C.V. More, Z. Alsayed, M.S. Badawi, A.A. Thabet, P.P. Pawar. *Environ Chem. Lett.*, **19**, 2057 (2021). DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9
- [14] S.S. Kuttakaran, M.R. Ambika, C. Malathi, N. Nagaiah. *Mater. Today: Proceed.*, **89**, 75 (2023). DOI: 10.1016/j.matpr.82023.05.398
- [15] W.M. Al-Saleh, M. Elsafi, H.M. Almutairi, I.M. Nabil, M.A. El-Nahal. *Sci. Rep.*, **14**, 10014 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-60188-2
- [16] А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, А.В. Пчельников, Д.В. Ромашев. *Известия вуз. Строительство*, **12** (756), 24 (2021). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-756-12-24-33
- [17] Z.A. Alrowaili, E.O. Echeweozo, M. Kırkınar, F. Çalışkan, J.S. Alzahrani, M.S. Al-Buriahi. *J. Radiation Res. Appl. Sci.*, **17** (4), 101162 (2024). DOI: 10.1016/j.jrras.2024.101162
- [18] A.M. El-Khatib, K. Zard, M.I. Abbas, M.M. Gouda. *Sci. Rep.*, **14**, 1578 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-51965-0
- [19] N. Nagaraja, H.C. Manjunatha, L. Seenappa, K.N. Sridhar, H.B. Ramalingam. *Rad. Phys. Chem.*, **171**, 108723 (2020). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108723
- [20] A. Saeed, W.A. Abu-raia. *J. Polym. Res.*, **29**, 208 (2022). DOI: 10.1007/s10965-022-03055-w
- [21] B. Ahmed, G.B. Shah, A.H. Malik, Aurangzeb, M. Rizwan. *Appl. Radiat. Isotopes*, **155**, 108901 (2020). DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.108901
- [22] V.S. Zali, O. Jahanbakhsh, I. Ahadzadeh. *Radiation Phys. Chem.*, **197**, 110150 (2024). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110150
- [23] M. Shabib, E.K. Tawfik, A.M. Abdel Reheem, Afaf Nada, H.A. Ashry. *Appl. Radiat. Isotopes*, **225**, 112010 (2025). DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.112010
- [24] S. Prabhu, S.G. Bubbly, S.B. Gudennavar. *J. Appl. Polymer Sci.*, **138** (19), e50369 (2020). DOI: 10.1002/app.50369
- [25] D.A. Elsayed, M. Elsafi, E.H. Abdel-Gawad, S.M. Al-Balawi, M.I. Sayyed, I.H. Saleh. *Sci. Rep.*, **15**, 26458 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-10920-3
- [26] *Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) (Дата введения 01.10.2018)*
- [27] В.И. Павленко, Р.В. Сидельников, В.В. Кашибадзе, Д.С. Романюк, А.Ю. Ручий, С.Н. Домарев. *ЖТФ*, **94** (5), 762 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.05.57815.30-24
- [28] АО „РИТВЕРЦ“, РФ. <https://ritverc.com/ru> (Дата обращения: 15.07.2025)