

УДК 504.06:614.895

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ПОЛИМЕРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ

© 2025 А.В. Васильев, В.В. Ермаков, А.С. Чипура

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Рассмотрены особенности определения состава и свойств полимерсодержащих композитных материалов строительного назначения на основе активности радионуклидов. Проведен анализ существующих методик определения радиационных свойств материалов, рассмотрены классы строительных материалов по содержанию радионуклидов. Предложена новая методика, включающая математический блок системы неразрушающего контроля строительных композитов, основанный на анализе данных отдельных радионуклидов, гамма-линий, а также двумерных инфракрасных (ИК) изображений поверхности и срезов образцов. Рассмотрено использование предлагаемой методики на примере анализа радиационных характеристик золошлаковых отходов. Использование методики позволяет количественно связывать содержание золы с радиационной активностью композитного материала, использовать уравнение градуировки для прогнозирования активности при различных дозировках золы, а также формировать многомерное пространство признаков, которое используется для статистического сравнения образцов золошлаков и их последующего классификационного анализа.

Ключевые слова: полимерсодержащие композитные материалы, экологические и эксплуатационные характеристики, активность радионуклидов, методика, золошлаковые отходы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-452-458

EDN: XLEUJK

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-69-00012

В связи с ростом применения полимерных композитных материалов возникает необходимость диагностики их физико-химических свойств, а также создания новых композитных материалов с улучшенными экологическими и эксплуатационными характеристиками [1, 2, 13, 14].

Для полимерсодержащих строительных композитов существенное значение приобретает их соответствие требованиям по радиационным свойствам [3-5, 12]. Для оценки радиационных свойств материалов, в том числе композитных материалов, широко используются методы оценки активности радионуклидов.

Нормативные ограничения на содержание радионуклидов в строительных материалах в России регулируются следующими основными документами:

- СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)»;
- ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов»;
- СанПиН 2.6.1.2800-10 «Требования радиационной безопасности при облучении населения природными источниками ионизирующего излучения».

Основной контролируемый параметр – удельная эффективная активность природных радионуклидов (Аэфф), измеряемая в Беккерелях на килограмм (Бк/кг), включает суммарную активность радия-226, тория-232 и калия-40 с учетом их биологического воздействия.

Классы строительных материалов по содержанию радионуклидов и разрешенное применение:

- Материалы I класса: Аэфф до 370 Бк/кг — допускается применение во всех видах строительства, включая жилые и общественные здания;
- Материалы II класса: Аэфф до 740 Бк/кг — разрешены для промышленного и дорожного строительства в населенных пунктах и зонах перспективной застройки;

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность и управление качеством», директор научно-исследовательского центра техносферной безопасности и новых материалов. E-mail: vasilyev.av@samgtu.ru

Ермаков Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химическая технология и промышленная экология». E-mail: nspre@mail.ru

Чипура Александр Сергеевич, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра техносферной безопасности и новых материалов. E-mail: al_five@mail.ru

- Материалы III класса: Аэфф до 1500 Бк/кг — применяются в дорожном строительстве за пределами населенных пунктов;
- Материалы IV класса: Аэфф выше 1500 Бк/кг — использование возможно только по специальному разрешению федеральных органов.

Использование сырья и материалов с эффективной удельной активностью природных радионуклидов выше 1500 Бк/кг в жилом, общественном и большинстве производственных строений запрещено.

Все строительные материалы должны иметь санитарно-гигиенические сертификаты с указанием удельной эффективной активности радионуклидов, а контроль за содержанием радионуклидов обязателен как при производстве, так и при применении строительных материалов.

Отсюда возникает значимая потребность контроля состава строительных материалов для определения уровня активности на этапе производства.

Для определения состава и свойств полимерсодержащих композитных материалов на основе оценки активности радионуклидов могут применяться следующие методики:

1. Гамма-спектрометрия с германиевыми детекторами - основной метод для определения удельной активности природных радионуклидов (например, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) в минеральной части композита. Позволяет количественно оценить содержание радионуклидов без разрушения образца.

2. Радиохимические методы выделения радионуклидов применяются для изолирования отдельных радионуклидов (например, ^{210}Pb , ^{210}Po) с последующим измерением альфа- и бета-активности, что даёт более высокую точность при сложных составах.

3. Индикаторные методы с анализом гамма-линий используются для оценки характера минерального наполнителя по спектральным данным и выявления специфических элементов, влияющих на свойства композита.

4. Визуально-измерительные и неразрушающие методы контроля состава и свойств композитов включают ультразвуковой контроль, тепловизионный анализ и шерографию, которые могут быть дополнением к радионуклидному анализу для оценки микроструктуры и дефектности.

5. Аналитические химические методы, включающие ИК-спектроскопию, масс-спектрометрию, ядерный магнитный резонанс и рентгеновскую флуоресценцию для комплексного изучения полимерной матрицы и наполнителей [6, 11].

Эти методы в совокупности позволяют не только определить состав композитного материала, но и сделать выводы о его структуре, механических и физических свойствах, а также о безопасности и долговечности изделия на основе анализа радионуклидной активности минеральной части и химического состава. Вместе с тем, существующие методы не в полной мере позволяют осуществлять многомерную обработку полученных экспериментальных и расчетных данных и проводить их пространственно-структурный анализ.

Предлагаемая методика включает математический блок системы неразрушающего контроля строительных композитов, основанный на анализе данных отдельных радионуклидов, гамма-линий, а также двумерных инфракрасных (ИК) изображений поверхности и срезов образцов. В отличие от спектрально-регрессионных моделей, которые исследуют численные зависимости между интенсивностью спектра и составом материала, данный раздел ориентирован на пространственно-структурный анализ распределения численных значений, фаз, однородности радионуклидной активности полимерных композитных материалов с использованием инструментов цифровой морфометрии и статистической обработки изображений. Научная новизна методики заключается в синтезе трёх уровней представления данных – спектрального, структурного и семантического – в единой вычислительной схеме.

Математическая цель методики заключается в построении отображения:

$$\Phi: I(x, y) \rightarrow F(I) = f\{f_1, f_2, \dots, f_n\} \rightarrow R, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ – матрица интенсивностей ИК-снимка, $F(I)$ – вектор вычисленных признаков, а R – пространство интерпретационных решений («однородный материал», «зона переувлажнения», «дефектная область» и т. д.).

Массивы экспериментальных данных и ИК-изображения подвергаются нормализации по интенсивности и контрасту, коррекции фона и фильтрации экспериментальных данных. В качестве математической основы применяются линейные и нелинейные фильтры низких частот, медианные и вейвлет-преобразования, сохраняющие локальные особенности при устранении высокочастотных искажений. Для устранения вариаций освещённости используется адаптивное выравнивание контраста (метод CLANE), обеспечивающее сопоставимость амплитудных характеристик по всей площади кадра.

Полученные данные стандартизируются до единого диапазона интенсивностей $I^*(x, y) \in [0, 1]$, что необходимо для корректного вычисления статистических и фрактальных дескрипторов.

Для каждого нормализованного изображения вычисляется набор количественных характеристик, отражающих микроструктуру материала. Математическая формализация включает:

- статистические признаки первого и второго порядка (математическое ожидание, дисперсия, коэффициент вариации, энергия и энтропия распределения интенсивностей);
- текстурные признаки, основанные на матрице совместной встречаемости уровней серого (GLCM) – контраст, корреляция, однородность и энтропия Харалика;
- локальные бинарные шаблоны (LBP) для описания мелкомасштабной неоднородности поверхности;
- вейвлет-декомпозицию для разделения высоко- и низкочастотных компонентов, отражающих распределение фаз и микродефектов;
- фрактальные признаки (размерность DDD и показатель микрошероховатости SSS), связывающие геометрическую сложность структуры с физико-механическими свойствами композита [7].

Таким образом, формируется многомерное пространство признаков, которое используется для статистического сравнения образцов и последующего классификационного анализа:

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_n) \in \mathbb{R}^n, \quad (2)$$

Для интерпретации признаков пространства применяется комбинация кластеризационных и дискриминантных методов. На первом этапе выполняется несупервизорная кластеризация (*k-means*, DBSCAN) с целью разделения областей изображения по степени однородности. На втором этапе осуществляется обучение моделей классификации (линейный дискриминантный анализ, SVM, случайные леса), сопоставляющих признаки F с классами состояния материала.

В задачах пространственной сегментации могут применяться сверточные нейронные сети архитектур U-Net и PSPNet, зарекомендовавшие себя при анализе микроструктур бетонов и цементных систем [2]. Выходом блока является бинарная или многоклассовая карта данных, где каждой точке изображения (x, y) приписывается вероятность принадлежности к дефектной области $p_d(x, y)$.

На следующем уровне результаты математического анализа преобразуются в интерпретируемую форму. Вектор признаков F и карта дефектов $p_d(x, y)$ подаются в языковую модель, которая выполняет семантическое суммирование данных и формирует текстовый отчет. Алгоритм строится по принципу «математическая интерпретация → семантическое описание»:

$$T = \Psi(F, p_d(x, y)), \quad (3)$$

где T – текстовое заключение с элементами рассуждения и рекомендаций.

Модель использует заранее определённые правила и эмбединги признаков, связывая численные показатели с понятными категориями («материал однородный», «обнаружены поры», «неравномерное распределение полимера»).

Такой подход позволяет формировать стандартизированные отчёты, содержащие количественные результаты, краткий вербальный вывод и рекомендации по корректровке параметров полимеросодержащих строительных композитов, в том числе по их радиационной активности.

Рассмотрим использование предлагаемой методики на примере анализа радиационных характеристик золошлаковых отходов.

Золошлаки достаточно часто и широко применяются в строительных композитных материалах, в том числе для следующих целей:

- в качестве минеральной добавки к бетонам и цементным смесям, что позволяет улучшить прочностные и эксплуатационные характеристики, а также повысить долговечность конструкций и снизить расход портландцемента;
- в качестве добавок при нанесении автодорожных покрытий;
- при производстве кирпича, блоков и других строительных изделий из таких композитов, где золошлаковые компоненты улучшают структуру и свойства материала;
- золошлаки используются как самостоятельное или комплексное вяжущее средство, особенно если в составе достаточное содержание оксидов кальция и магния, обладающих гидравлической активностью.

Использование золошлаков позволяет экономить природные ресурсы, снижать себестоимость строительных материалов, переводить отходы энергетики в ценные материалы [8, 10]. При этом важно соблюдать требования по радиационной безопасности и учитывать физико-механические свойства золошлаков, такие как гранулометрия, плотность и морозостойкость.

В золошлаках и зольных отходах от сжигания угля, нефтепродуктов и отходов могут накапливаться следующие радионуклиды и элементы:

- Урановые радионуклиды: U^{238} , U^{234} – концентрируются в золошлаках примерно в 4-7 раз больше, чем в исходном угле.
- Радий: Ra^{226} – также значительно обогащается в золошлаках и летучей золе.
- Торий и дочерние продукты: Th^{232} , Th^{228} , Pb^{210} , Po^{210} – концентрируются в золошлаках, причем наиболее летучие переносчики (Pb^{210} , Po^{210}) преимущественно в летучей золе.

- Калий: в виде стабильного и радиоактивного изотопа K^{40} – также содержится в золошлаках и летучей золе, иногда в повышенных концентрациях.
- Цезий (Cs^{137}) – как искусственный радионуклид, может присутствовать в золошлаках при загрязнении вследствие техногенных аварий, хотя в природных золошлаках обычно не встречается.
- Стронций (Sr^{90}) – техногенный радионуклид, при обычном сжигании нехарактерен для золошлаков, но может присутствовать при радиоактивном загрязнении.

Таким образом, основные радионуклиды, которые концентрируются и накапливаются в золошлаках от сжигания углей и отходов, это урановые, ториевые радионуклиды, радий и калий-40. Цезий и стронций могут попадать в золошлаки при условии техногенного загрязнения.

Радионуклидные профили золошлаков от сжигания угля и мазута отличаются по составу, концентрации и распределению радионуклидов, что зависит от природы исходного топлива и технологических условий сжигания:

- В золошлаках от угля преобладают радионуклиды естественных радиационных серий: урановая серия (U^{238} , U^{234} , Ra^{226}), ториевая серия (Th^{232} , Th^{228}) и калий-40 (K^{40}). Эти радионуклиды концентрируются в минеральных остатках угля при сжигании, причем золошлаки могут содержать уровни радионуклидов значительно выше, чем в исходном угле. Радиоактивность золы и шлака от угля во многом зависит от типа угля (антрацит, каменный, бурый) и месторождения.

- В золошлаках от мазута радионуклидный состав и концентрация существенно ниже, поскольку мазут как продукт нефтепереработки содержит гораздо меньше естественных радионуклидов. Обычно мазут характеризуется низкой зольностью (<0.14%) и меньшим содержанием минеральных компонентов, что приводит к меньшему накоплению радионуклидов в золе. Тем не менее, зола мазута может содержать металлы (ванадий, никель, железо), но радионуклидный профиль по естественным изотопам обычно уступает угольным золошлакам.

- Технологические факторы, такие как температура сжигания и методы улавливания золы, влияют на распределение радионуклидов в золошлаках и шлаках.

В итоге золошлаки угольного сжигания обладают более выраженной и разнообразной радионуклидной активностью, связанной с природным содержанием радиоактивных элементов в угле, тогда как золошлаки мазута имеют меньшую и менее разнообразную радиационную характеристику.

Изменение дозировки золы в составе композитного материала влияет на его удельную эффективную активность радионуклидов пропорционально содержанию радионуклидов в самой золе относительно остальных компонентов. Если зола содержит повышенную активность радионуклидов, то с увеличением её дозировки удельная активность композита будет расти. Сопоставление активности исходного золошлака и матричного материала в композите позволит создать методику оценки содержания золы и косвенно определять связанные с этим характеристики материала.

Для построения градуировки удельной активности и косвенных определения свойств композитных материалов по дозировке золы выполняются стандартные операции. Готовятся тестовые образцы композита с различной дозировкой золы, например, 0%, 5%, 10%, 15%, ..., до максимальной предполагаемой концентрации. Для каждого образца необходимо измерить удельную эффективную активность радионуклидов с помощью гамма-спектрометрии. В нашем случае тестирование методики проводилось с использованием гамма-бета спектрометра МКС-АТ1315.

По причине того, что свойства материалов могут быть связаны с присутствием отдельных компонентов золошлаковых отходов, рекомендовано использовать многомерные калибровочные модели (например, проекцию на латентные структуры или регрессию на главные компоненты). Далее проводится анализ зависимостей согласно использования вышеописанной методики. При этом необходимо оценить, являются ли зависимости приблизительно линейными или требуют более сложной модели.

Результаты обработки изображений интегрируются с данными спектрально-регрессионного анализа, что создаёт единую математическую платформу для РАТ-контроля. Сочетание спектральных и морфологических дескрипторов позволяет строить комбинированные модели, связывающие форму спектра, текстуру изображения и физико-механические свойства материала. Подобный подход обеспечивает объективную и воспроизводимую оценку свойств полимерных неорганических композитов строительного назначения по их радиационным характеристикам, а также открывает возможность внедрения интеллектуальных систем автоматизированного контроля в производственные циклы строительных композитных материалов.

Использование предложенной методики применительно к определению радиационной активности золошлаков позволяет количественно связывать содержание золы с радиационной активностью композитного материала, использовать уравнение градуировки для прогнозирования активности при различных дозировках золы, а также формировать многомерное пространство признаков, которое используется для статистического сравнения образцов золошлаков и их последующего классификационного анализа.

На дальнейших этапах исследования предполагается проведение экспериментальных исследований радиационных и других характеристик полимерсодержащих строительных неорганических композитных материалов, анализ и обработка полученных результатов с использованием предложенной методики.

Следует отметить, что применение предложенной методики для анализа радиационной активности золошлаковых отходов имеет ряд ограничений. При низком содержании золы удельная активность композита будет близка к активности матричного материала. С увеличением дозы золы, если она характеризуется высокой радионуклидной активностью, общая активность композита увеличивается практически линейно. Если зола имеет низкую активность, влияние на общий профиль композита будет незначительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
2. Борисова, В.А. Исследование физико-химических свойств и эксплуатационных характеристик полимерных композиционных материалов, модифицированных углеродными структурами / В.А. Борисова // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». – 2022. – № 1. – С. 161–173.
3. Васильев, А.В. Методика экспериментальных исследований нефтесодержащих отходов с повышенной радиоактивностью как объекта экологического риска / А.В. Васильев, В.В. Ермаков, Д.Е. Щербаков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – №4. – С. 171–178. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-171-178.
4. Васильев, А.В. Результаты экспериментальных исследований нефтесодержащих отходов с повышенной радиоактивностью как объекта экологического риска / А.В. Васильев, В.В. Ермаков, Д.Е. Щербаков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 179–184. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-179-184.
5. Васильев, А.В. Анализ зависимостей распределения радионуклидов от способа переработки нефтесодержащих отходов / А.В. Васильев, В.В. Ермаков, Д.Е. Щербаков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 6. – С. 181–191. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-181-191.
6. Купцов, А.Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – М.: Физматлит, 2001. – 657 с.
7. Леденев, А.А. Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателей микроструктуры и свойств затвердевших цементных систем / А.А. Леденев, В.Т. Перцев, О.Б. Рудаков, С.М. Усачев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 326–334. – DOI 10.17308/kcmf.2022.24/9855.
8. Медведева, Г.А. Композиционные материалы строительного назначения на основе золошлаковых отходов ТЭЦ, модифицированные серой / Г.А. Медведева, Р.Т. Ахметова, И.Ш. Сафин, В.Ф. Строганов, Д.Р. Каримова // Вестник Казанского технологического университета, – 2011. – №17. – С. 70–74.
9. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб: Научные основы и технологии, 2008 – 822 с.
10. Мусатов, В.М. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ в золоцементных композитах для дорожного строительства / В.М. Мусатов, В.С. Петушков, В.Б. Петропавловская // Направления развития российской науки: теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тверь, 10–31 января 2021 г. Под редакцией Т.Б. Новиченковой. Часть 1. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. – С. 61–65.
11. Нуруллаев Э.М. Исследование инфракрасных спектров полимерного композитного материала, подвергнутого воздействию гамма-излучения / Э.М. Нуруллаев, Л.Л. Хименко, С.А. Астафьева // Оптический журнал. – 2020. – Т. 87. – № 9. – С. 70–75. – <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-09-70-75>.
12. Сидорова, Г.П. Радионуклиды в углях и продуктах их сжигания / Г.П. Сидорова, Д.А. Крылов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2016. – Т. 61. – № 2. – С. 75–78.
13. Чекуряев, А.Г. Анализ структуры композиционных систем с использованием фрактальных характеристик на примере системы BaTiO₃-фуллеренол-ЦЭП / А.Г. Чекуряев, М.М. Сычев, С.В. Мянкин // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, № 6. – С. 740–746. – DOI 10.21883/FTT.2021.06.50932.002.
14. Шаповалов, В.М. Экологические проблемы в получении и применении полимерных композитов в Республике Беларусь / В.М. Шаповалов // Полимерные материалы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 71–81. URL: <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-71-81> (дата обращения 12.08.2025).

METHOD FOR DETERMINING OF COMPOSITION OF POLYMER-CONTAINING COMPOSITE MATERIALS OF CONSTRUCTION PURPOSES ON THE BASIS OF RADIONUCLIDE ACTIVITY AND ITS REALIZATION ON THE EXAMPLE OF ASH AND SLUDGE WASTE

© 2025 A.V. Vasilyev, V.V. Ermakov, A.S. Chipura

Samara State Technical University, Samara, Russia

In this paper peculiarities of determining of composition and properties of polymer-containing composite materials of construction purposes on the basis of radionuclide activity have been considered. Analysis of existing methods of determining of radiation properties of materials has been carried out, classes of construction materials according to the radionuclide content have been considered. New method have been suggested, including mathematical block of the system of non-destructive testing of building composites on the basis of data analysis of individual radionuclides, gamma lines, two-dimensional infrared (IR) images of samples surface and sections. Application of suggested method have been considered on the example of analysis of radiation properties of ash and slag waste. Using of the method is allowing us to quantify ash content with radioactivity of composite material, to use the graduation equation at different dosages of ash, and also to form a multidimensional feature space which is using for statistical comparison of samples of ash and slag and their subsequent classification analysis.

Key words: polymer-containing composite materials, ecological and exploitation characteristic, analysis, radionuclide activity, method, ash and slag waste

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-452-458

EDN: XLEUJK

REFERENCES

1. Bataev, A.A. Kompozicionnye materialy: stroenie, poluchenie, primeneniye: uchebnik / A.A. Bataev, V.A. Bataev. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. – 384 s.
2. Borisova, V.A. Issledovanie fiziko-himicheskikh svoystvi ekspluatatsionnykh harakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov, modifitsirovannykh uglerodnymi strukturami / V.A. Borisova // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MChS Rossii». – 2022. – № 1. – S. 161–173.
3. Vasil'ev, A.V. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy neftesoderzhashchih othodov s povyshennoy radioaktivnost'yu kak ob'ekta ekologicheskogo riska / A.V. Vasil'ev, V.V. Ermakov, D.E. Shcherbakov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2023. – T. 25. – №4. – S. 171–178. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-171-178.
4. Vasil'ev, A.V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy neftesoderzhashchih othodov s povyshennoy radioaktivnost'yu kak ob'ekta ekologicheskogo riska / A.V. Vasil'ev, V.V. Ermakov, D.E. Shcherbakov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2023. – T. 25. – № 4. – S. 179–184. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-179-184.
5. Vasil'ev, A.V. Analiz zavisimostej raspredeleniya radionuklidov ot sposoba pererabotki neftesoderzhashchih othodov / A.V. Vasil'ev, V.V. Ermakov, D.E. Shcherbakov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2023. – T. 25. – № 6. – S. 181–191. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-181-191.
6. Kupcov, A.H. Fur'e-KR i Fur'e-IK spektry polimerov / A.H. Kupcov, G.N. Zhizhin. – M.: Fizmatlit, 2001. – 657 s.
7. Ledenev, A.A. Strukturno-fenomenologicheskij analiz vzaimosvyazi pokazatelej mikrostruktury i svoystv zatverdevshih cementnykh sistem / A.A. Ledenev, V.T. Percev, O.B. Rudakov, S.M. Usachev // Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granicy. – 2022. – T. 24. – № 3. – S. 326–334. – DOI 10.17308/kcmf.2022.24/9855.
8. Medvedeva, G.A. Kompozicionnye materialy stroitel'nogo naznacheniya na osnove zoloshlakovykh otvalov TEC, modifitsirovannyye seroj / G.A. Medvedeva, R.T. Ahmetova, I.Sh. Safin, V.F. Stroganov, D.R. Karimova // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, – 2011. – №17. – S. 70–74.
9. Mihajlin, Yu.A. Konstruktsionnye polimernyye kompozitsionnye materialy / Yu.A. Mihajlin. – SPb: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008 – 822 s.
10. Musatov, V.M. Ispol'zovanie zoloshlakovykh othodov TEC v zolocementnykh kompozitakh dlya dorozhnogo stroitel'stva / V.M. Musatov, V.S. Petushkov, V.B. Petropavlovskaya // Napravleniya razvitiya rossijskoj nauki: teoreticheskie issledovaniya i eksperimental'nye razrabotki studentov i aspirantov: Materialy Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoy konferencii, Tver', 10–31 yanvarya 2021 g. Pod redakciej T.B. Novichenkovej. Chast' 1. – Tver': Tverskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. – S. 61–65.

11. Nurullaev E.M. Issledovanie infrakrasnyh spektrov polimernogo kompozitnogo materiala, podvergnutogo vozdeystviyu gamma-izlucheniya / E.M. Nurullaev, L.L. Himenko, S.A. Astaf'eva // Opticheskij zhurnal. – 2020. – Т. 87. – № 9. – С. 70–75. – <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-09-70-75>.
12. Sidorova, G.P. Radionuklidy v uglyah i produktah ih szhiganiya / G.P. Sidorova, D.A. Krylov // Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'. – 2016. – Т. 61. – № 2. – С. 75–78.
13. Chekuryaev, A.G. Analiz struktury kompozicionnyh sistem s ispol'zovaniem fraktal'nyh harakteristik na primere sistemy BaTiO₃-fullerenol-CEP / A.G. Chekuryaev, M.M. Sychev, S.V. Myakin // Fizika tverdogo tela. – 2021. – Т. 63, № 6. – С. 740–746. – DOI 10.21883/FTT.2021.06.50932.002.
14. Shapovalov, V.M. Ekologicheskie problemy v poluchenii i primenenii polimernyh kompozitov v Respublike Belarus' / V.M. Shapovalov // Polimernye materialy i tekhnologii. 2023. Т. 9, № 1. С. 71–81. URL: <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-71-81> (data obrashcheniya 12.08.2025).

Andrey Vasilyev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Technosphere Safety and Quality Management, Director of Research and Development Center of Technosphere Safety and New Materials.

E-mail: vasilyev.av@samgtu.ru

Vasiliy Ermakov, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Industrial Ecology and Chemical Technology. E-mail: ncpe@mail.ru

Aleksandr Chipura, Junior Research Collaborator of Department of Technosphere Safety and Quality Management.

E-mail: al_five@mail.ru

Известия Самарского научного центра Российской академии наук

Учредитель: федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре, свидетельство ПИ № ФС77-61347 от 07.04.2015

Главный редактор: академик РАН Ф.В. Гречников

Том 27, номер 3(2)(125), 11.11.2025

Индекс: 36622. Распространяется бесплатно

Адрес учредителя, издателя и редакции – 443001, Самарская область,

г. Самара, Студенческий пер., 3а. Тел. 8 (846) 340-06-20

Издание не маркируется

Сдано в набор 09.09.2025 г.

Подписано к печати 11.11.2025 г.

Формат бумаги А4

Офсетная печать

Усл. печ. л. 28,133

Тираж 200 экз.

Зак. 40

Отпечатано в типографии ООО "Инсома-пресс.

Адрес типографии: 443080, Самарская обл., г. Самара, ул. Санфириковой, 110А, офис 22А. Тел. 8 (846) 222- 92 -40