
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 614

DOI: 10.7868/S3034530825060011

Структурообразование цементных материалов, модифицированных шламами, полученными после переработки хромсодержащих растворов

А.А. Юдаков✉, Р.С. Федюк

Александр Алексеевич Юдаков

доктор технических наук

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

etcih@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7264-2761>

Роман Сергеевич Федюк

доктор технических наук, профессор

Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству,

Владивосток, Россия

roman44@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Аннотация. Утилизация шламов, содержащих хромат бария является важной задачей; при этом, если в процессе утилизации удаётся получить тяжелый бетон с приемлемыми для эксплуатации структурой и свойствами, то эта задача становится весьма перспективной. Разработаны составы бетонной смеси с содержанием шлама до 20% от массы жидкой фазы. Установлено, что удельная эффективная активность радионуклидов в шламесоставе составляет 76 Бк/кг, т.е. он пригоден в качестве компонента бетона. Исследованы процессы структурообразования этих материалов, начиная с характеристик подвижности затворенной смеси, физических свойств смеси в динамике формирования структуры, механических характеристик и заканчивая подтверждением полученных результатов с помощью сканирующей электронной микроскопии. Все разработанные составы характеризуются подвижностью, способной обеспечить нормативную удобоукладываемость бетонной смеси. Упрочнение структуры практически на треть объясняется тем, что помимо традиционных гидросиликатов кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ упаковка гидратных новообразований уплотняется благодаря формированию высокопрочных частиц $\text{Ba}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ключевые слова: аминокислота, глицин, комплексный фторид галлия(III), ИК и КР спектры

Ключевые слова: структурообразование, цемент, материал, модификация, шлам, барий, хром, раствор

Для цитирования: Юдаков А.А., Федюк Р.С. Структурообразование цементных материалов, модифицированных шламами, полученными после переработки хромсодержащих растворов // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 6. С. 5–14. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825060011>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института химии ДВО РАН, Тема № FWFN(0205)-2025-0002.

Original article

Structure formation of cement materials modified by sludges obtained after processing of chromium-containing solutions

A.A. Yudakov, R.S. Fediuk

Alexander A. Yudakov

Doctor of Engineering Sciences

Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

etcih@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7264-2761>

Roman S. Fediuk

Doctor of Engineering Sciences, Professor

Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Branch of the Federal State Budgetary Institution “CNIIP of the Ministry of Construction of Russia” Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction, Vladivostok, Russia

roman44@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Abstract. The disposal of sludge containing barium chromate is an important task; however, if the disposal process allows one to obtain heavy concrete with an acceptable structure and properties for operation, then this task becomes very promising. Compositions of concrete mix with sludge content up to 20% of the liquid phase weight have been developed. It has been established that the specific effective activity of radionuclides in the sludge is 76 Bq/kg, i.e. it is suitable as a component of concrete. The processes of structure formation of these materials have been studied, starting with the characteristics of the workability of the sealed mixture, the physical properties of the mixture in the dynamics of structure formation, mechanical characteristics and ending with confirmation of the obtained results using scanning electron microscopy. All the developed compositions are characterized by workability capable of providing the standard workability of the concrete mix. The strengthening of the structure by almost a third is explained by the fact that, in addition to traditional calcium silicate hydrates $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, the packing of hydrated new formations is compacted due to the formation of high-strength $\text{Ba}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ particles.

Keywords: structure formation, cement, material, modification, sludge, barium, chromium, solution

For citation: Yudakov A.A., Fediuk R.S. Structure formation of cement materials modified by sludges obtained after processing chromium-containing solutions. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(6):5–14. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825060011>

Funding. The work was carried out within the State Assignment for the Institute of Chemistry FEB RAS, Project No. FWFN(0205)–2025–0002.

Введение

В процессе утилизации хромсодержащих растворов из цистерн биологической защиты атомных подводных лодок образуются шламы, содержащие хромат бария – бариевую соль хромовой кислоты, имеющую химическую формулу BaCrO_4 [1]. Эти шламы уже не имеют радиоактивного фона, однако хромат бария токсичен [2], поэтому требует надежной утилизации (захоронения). Эффективными материалами для этой цели служат тяжёлые бетоны [3]. Благодаря низкой стоимости, простоте изготовления, физико-механическим свойствам, высокой универсальности, долговечности и эффективности бетон может быть использован в качестве надежного защитного материала от ионизирующего излучения, как это видно из многочисленных работ по теме. Если же выдвинуть научную гипотезу, что некоторое количество хромсодержащего шлама способно оптимизировать структурообразование цементного материала (чем по сути и является бетон), то тематика статьи приобретает значительную актуальность. В результате появляется возможность не только утилизации хромата бария, но и придания этим тяжёлым бетонам радиационно-защитных свойств [4–8]. Плотность цементных композитов с различным процентным содержанием этих компонентов является одним из ключевых факторов, влияющих на способность ослабления гамма-излучения [9–11].

Традиционные радиационно-защитные материалы, содержащие свинец, вызывают все большую озабоченность из-за потенциальных рисков для здоровья человека и потенциального долгосрочного вреда окружающей среде [12]. Свинец может быть заменен во многих продуктах более устойчивыми и экологически чистыми нетоксичными и экономичными элементами, такими как соединения бария. Поскольку ионы бария могут защищать от различных форм радиации, их интеграция в цементную матрицу может дать вяжущее с экранирующими свойствами. Относительно легкие, химически стабильные, экономичные и не столь токсичные, как свинец, материалы пользуются растущим спросом в качестве материалов радиационной защиты. Недавно Seenappa et al. [12] опубликовали обзорную статью, посвященную добавлению соединений бария в бетон, защищающий от радиации. Соединения, содержащие барий, являются наиболее перспективными и предпочтительными материалами радиационной защиты из-за их высокой эффективности экранирования [14]. Сульфат бария (BaSO_4), вольфрамат бария (BaWO_4), хлорид бария (BaCl_2), карбонат бария (BaCO_3), нитрат бария ($\text{Ba(NO}_3)_2$), фторид бария (BaF_2) и хромат бария (BaCrO_4) являются одной из важнейших групп материалов среди соединений бария с важностью эффективной радиационной защиты [15, 16].

В настоящее время основной техникой подход к проектированию бетонов с радиационной защитой использует специальные заполнители с высоким удельным весом, цемент, добавки и воду. Заполнители являются основным (по объему) компонентом бетона (70–80%), и поэтому можно ожидать, что они будут оказывать важное влияние на их защитные свойства [17]. Следовательно, работы по тяжелому бетону для радиационной защиты в основном были сосредоточены на тяжелых заполнителях [18, 19]. Существует два типа заполнителей, используемых для этой цели: во-первых, природные минеральные заполнители либо высокой плотности, либо с высоким содержанием кристаллической воды, либо и того, и другого, и, во-вторых, синтетические заполнители. Первая группа включает такие материалы, как барит, магнетит, гематит, ильменит и серпентин [20]. Синтетические заполнители включают железные и стальные шлаки, феррофосфор, боросиликатную фритту, карбид бора, карбид кальция и активированные щелочью шлаковые композиты, включающие цементные клинкерные заполнители [21]. Предлагаются различные типы цемента, включая обычный портландцемент, кальцево-силикатный цемент, кальцево-алюминатный цемент, бариево-силикатный цемент, стронциево-силикатный цемент, высокомагнезиальный портландцемент, борсодержащий цемент, гипсоалюминатный цемент, бор- и железосодержащий фосфатный цемент и специальный огнеупорный цемент [22]. Недавние исследовательские работы в области производства портландцемента были направлены на смягчение его воздействия на окружающую среду

[23–25]. Перспективными альтернативами, исследуемыми в этом направлении, являются цементы на основе алюминатов, которые предлагают явные преимущества с точки зрения экологической чистоты и экономической эффективности по сравнению с традиционными портландцементами [26].

Несмотря на большое количество работ по исследованию структурообразования бетонов различного назначения, в литературе отсутствуют вопросы управления процессами формирования микроструктуры цементных материалов, модифицированных шламами, полученными после переработки хромсодержащих растворов (что и является целью исследования). Задачами по достижению данной цели служат: разработка материалов, исследование их физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик и выводы об эффективности структурообразования.

Материалы и методы

Материалы

Вязущей основой для бетонов был портландцемент ЦЕМ I 32,5Н производства «Спасскцемент» (табл. 1). Этот портландцемент – самый распространенный в строительной индустрии, что позволяет считать полученные результаты практически значимыми.

В качестве мелкого заполнителя был применен песок Раздольненского карьера (Приморский край) с модулем крупности 2,4 (табл. 2).

Для затворения вяжущего применялась вода городской системы водоснабжения.

Предмет исследования составлял полученный авторами при утилизации хромсодержащих растворов на реальном объекте шлам, содержащий хромат бария (табл. 3).

Проектирование составов

В традиционный состав бетонной смеси был добавлен шлам в количестве 5, 10, 15 и 20% от массы твердых компонентов (табл. 4).

Химико-минералогический состав ЦЕМ I 32,5Н, мас. %

Таблица 1

Химический состав					Минералогический состав			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Алит	Белит	Трехкальциевый алюминат	Четырехкальциевый алюмоферрит
64,8	21,0	5,3	4,3	3,6	64,1	13,9	6,7	15,3

Гранулометрический состав мелкого заполнителя

Таблица 2

Размер сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частный остаток на сите, мас. %	–	2,1	6,6	34,4	41,6	12,9	2,4
Полный остаток на сите, мас. %	–	2,1	8,7	43,1	84,7	97,6	100

Содержание хромата бария в шламе, мас. %

Таблица 3

Показатель	Фактически	Норма
Содержание Cr в CrO ₃	38,7	Не менее 36,5
Содержание Вав ВаО	59,5	Не менее 56

Таблица 4

Пропорции разработанных составов, мас. %

Маркировка	Твердые компоненты		Жидкие компоненты	
	Портландцемент	Песок	Шлам	Вода
0	25	75	–	100
5	25	75	5	95
10	25	75	10	90
15	25	75	15	85
20	25	75	20	80
	100		100	
Соотношение твердых и жидких компонентов – 0,35				

Методы

Математическое планирование экспериментов проводилось в программном комплексе “Develve”. В процессе обработки результатов стремились, чтобы погрешность для всех экспериментов была не выше 5%.

Удельная эффективная активность радионуклидов шлама определялась с использованием универсального спектрометрического комплекса УСК «Гамма Плюс».

Оценка подвижности бетонных смесей осуществлялась по осадке и расплыву конуса.

Средняя плотность затвердевших образцов рассчитывалась частным от массы и объема.

Прочность на сжатие определялась по методике ГОСТ 310.4-81 на кубических образцах размером 70 × 70 × 70 мм, а на изгиб – по трехточечному методу на призматических образцах размером 40 × 40 × 160 мм.

Модуль упругости вычислялся по формуле

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}},$$

где σ_1 – приращение напряжения при 30%-ном значении от разрушающей нагрузки, а ε_{1y} – прирост соответствующее деформации образца.

Эффективность структурообразования модифицированных цементных материалов определялась с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA3LMU.

Результаты и дискуссия

Учитывая то, что исследуемый шлам получен путем переработки растворов с атомных подводных лодок, необходимо было убедиться, что в нем отсутствует радиационный фон. Для этого на УСК «Гамма Плюс» оценивалась удельная эффективная активность радионуклидов хромсодержащего шлама. Установлено, что активность ^{19}K составляет 281 Бк/кг, ^{90}Th – 20 Бк/кг, ^{88}Ra – 26 Бк/кг. Удельную эффективную активность радионуклидов вычисляем по формуле:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31A_{\text{Th}} + 0,085A_{\text{K}} = 76 \text{ Бк/кг}.$$

Нормативное значение для строительных материалов $A_{\text{эфф}} < 370 \text{ Бк/кг}$, т.е. шлам пригоден в качестве компонента бетона.

Каждый состав бетонов был выбран таким образом, чтобы процесс превращения метастабильных гидратов в стабильные продукты контролировался и ингибировался. Таким образом, явления откола, трещин и снижения прочности в зависимости от времени хранения не наблюдались.

Исследование подвижности бетонной смеси показало, что при равном количестве во всех составах жидкой фазы повышение концентрации шлама отрицательно сказывается на реологических характеристиках. Однако все разработанные составы характеризуются подвижностью, способной обеспечить нормативную удобоукладываемость бетонной смеси (рис. 1).

Это подтверждается значениями средней плотности затворённой смеси, растущими с повышением содержания шлама. Несмотря на снижение средней плотности для 28-суточных затвердевших образцов (что объясняется испарением части воды), барий в составе шлама связывается в гидратные новообразования, уплотняя материал (рис. 2).

Большую практическую значимость при исследовании структурообразования цементного материала имеет оценка его физико-механических свойств. Согласно рис. 3, повышение всего комплекса прочностных характеристик практически на треть происходит до содержания шлама на уровне 15%, после чего начинается снижение.

Перед микроструктурным анализом образцы были разрезаны, залиты в смолу, отшлифованы, отполированы и, наконец, покрыты углеродом.

Микроструктурный анализ доказывает, что упрочнение структуры объясняется тем, что помимо традиционных гидросиликатов кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ упаковка гидратных новообразований уплотняется благодаря формированию высокопрочных частиц $\text{Ba}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 4).

В этом контексте следует учитывать, что ионы Ba позволили стабилизировать структуру гидратов, изначально образованных в образцах бетона.

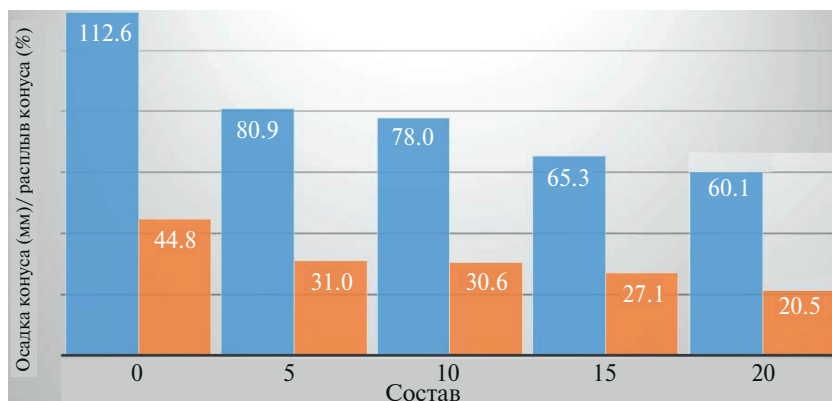


Рис. 1. Характеристики подвижности разработанных составов

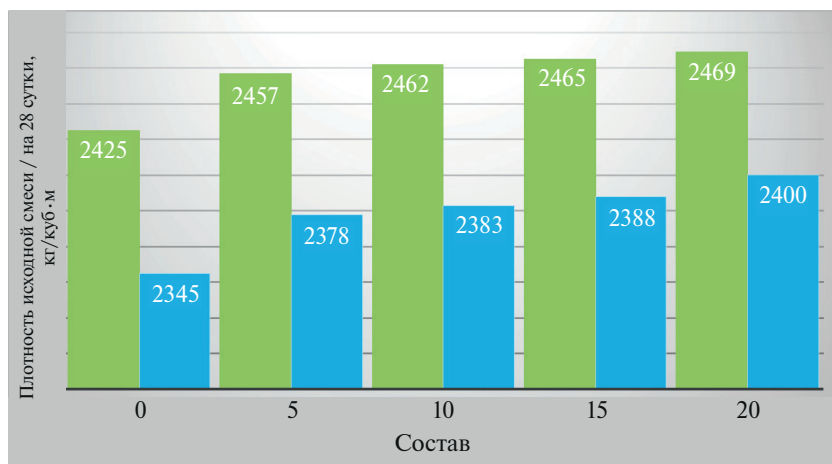


Рис. 2. Изменение средней плотности материалов

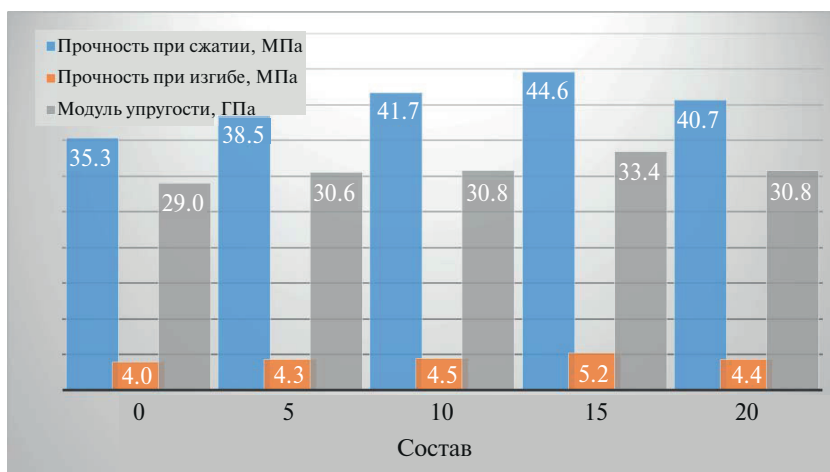


Рис. 3. Физико-механические свойства 28-суточных образцов

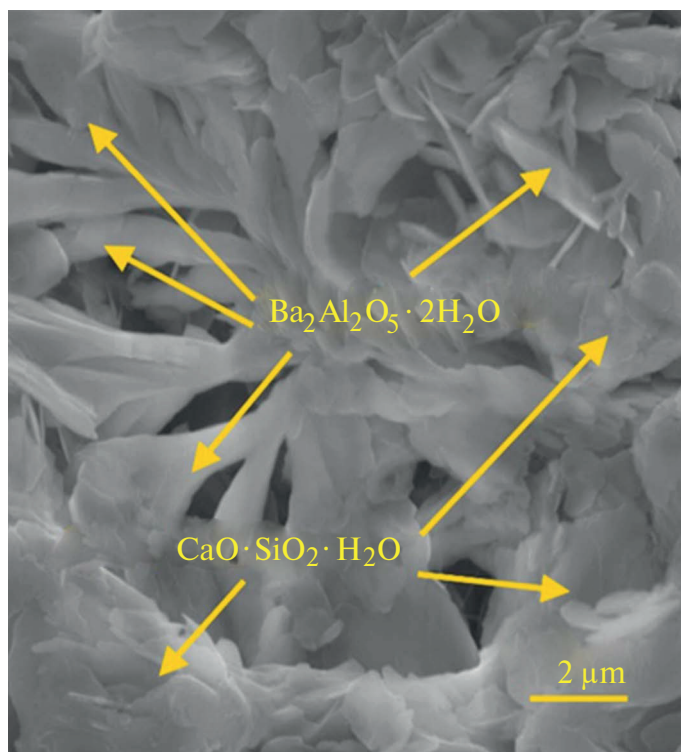


Рис. 4. Микроструктура состава 15

Заключение

Изучено структурообразование цементных материалов, модифицированных шламами, полученными после переработки хромосодержащих растворов. В результате комплексного исследования получены следующие основные выводы:

Разработаны составы бетонной смеси с содержанием шлама до 20% от массы жидкой фазы. Установлено, что удельная эффективная активность радионуклидов в шламе составляет 76 Бк/кг, т.е. он пригоден в качестве компонента бетона.

Все разработанные составы характеризуются подвижностью, способной обеспечить нормативную удобоукладываемость бетонной смеси.

Несмотря на снижение средней плотности для 28-суточных затвердевших образцов (что объясняется испарением части воды), барий в составе шлама связывается в гидратные новообразования, уплотняя материал.

Повышение всего комплекса прочностных характеристик практически на треть происходит до содержания шлама на уровне 15%, после чего начинается снижение.

Микроструктурный анализ доказывает, что упрочнение структуры объясняется тем, что помимо традиционных гидросиликатов кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ упаковка гидратных новообразований уплотняется благодаря формирований высокопрочных частиц $\text{Ba}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О ядерных реакторах и их творцах: продолжение традиций / под ред. В.К. Уласевича. М.: ГУП НИКИЭТ, 2002. 116 с.
2. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Емельянов В.В. Поиск альтернативы хроматным пигментам (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). С. 96–107. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-96-107.
3. Баженов Ю.М., Королев Е.В., Самошин А.П., Королева О.В. Выбор заполнителя для радиационно-защитных бетонов вариативно-каркасной структуры // Региональная архитектура и строительство. 2009. № 1. С. 9–13.
4. Kanagaraj B., Anand N., Andrushia A.D., Naser M.Z. Recent developments of radiation shielding concrete in nuclear and radioactive waste storage facilities – a state of the art review // Construct. Build. Mater. 2023. Vol. 404. Art. 133260.
5. Thomas C., Rico J., Tamayo P., Setién J., Ballester F., Polanco J.A. Neutron shielding concrete incorporating B4C and PVA fibers exposed to high temperatures // J. Build. Eng. 2019. Vol. 26. Art. 100859.
6. Erkoyuncu İ., Demirkol İ., Akman F., Dilsiz K., Kaçal M.R., Polat H. A detailed investigation of gamma and neutron shielding capabilities of concrete doped with bronze and boron carbide // Radiat. Phys. Chem. 2024. Vol. 215. Art. 111358.
7. Amin M., Elemam W.E., Kandil M.A., Samy M. Effect of heavy-weight recycled materials on radiation shielding and properties of high-strength concrete with CEM III // J. Build. Eng. 2023. Vol. 79. Art. 107819.
8. Manjunatha H.C., Seenappa L., Chandrika B.M., Hanumantharayappa C. A study of photon interaction parameters in barium compounds // Ann. Nucl. Energy. 2017. 109. P. 310–317.
9. Vishnu C.V., Joseph A. Gamma-ray shielding analysis on natural rubber composites fortified with barium tungstate (BaWO_4) // Radiat. Phys. Chem. 2024. Vol. 216. Art. 111389.
10. Chandrika B.M., Shastry Manjunatha H.C., Sridhar K.N., Ambika M.R., Seenappa L., Manjunatha S., Munirathnam R., Clement Lourduraj A.J. Synthesis, physical, optical and radiation shielding properties of barium-bismuth oxide borate-A novel nanomaterial // Nucl. Eng. Technol. 2023. Vol. 55 (5). P. 1783–1790.
11. Abualroos N.J., Yaacob K.A., Zainon R. Radiation attenuation effectiveness of polymer-based radiation shielding materials for gamma radiation // Radiat. Phys. Chem. 2023. Vol. 212. Art. 111070.
12. Seenappa L., Manjunatha H.C., Chandrika B.M., H. Chikka. A study of shielding properties of X-ray and gamma in barium compounds // Journal of Radiation Protection and Research. 2017. Vol. 42 (1). P. 26–32.
13. Sathish K.V., Manjunatha H.C., Vidya Y.S., Sridhar K.N., Seenappa L., Chinnappa Reddy B., Alfred Cecil Raj S., Damodara Gupta P.S. X-rays/gamma rays radiation shielding properties of barium-nickel-iron oxide nanocomposite synthesized via low temperature solution combustion method // Radiat. Phys. Chem. Vol. 2022. Vol. 194. Art. 110053.
14. Kim S.-C., Dong K.-R., Chung W.-K. Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds // Ann. Nucl. Energy. 2012. Vol. 47. P. 1–5.
15. Abouhaswa A.S., El-Agawany F.I., Ahmed E.M., Rammah Y.S. Optical, magnetic characteristics, and nuclear radiation shielding capacity of newly synthesized barium boro-vanadate glasses: B_2O_3 - BaF_2 - Na_2O - V_2O_5 // Radiat. Phys. Chem. 2022. Vol. 192. Art. 109922.
16. Polat R., Yalçın Z., İçelli O. The absorption jump factor of effective atomic number and electronic density for some barium compounds // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 2011. Vol. 629 (1). P. 185–191.

17. Chandru U., Bahurudeen A., Senthilkumar R. Systematic comparison of different recycled fine aggregates from construction and demolition wastes in OPC concrete and PPC concrete // *J. Build. Eng.* 2023. Vol. 75. Art. 106768.
18. Gunoglu K., Akkurt İ. Radiation shielding properties of concrete containing magnetite // *Prog. Nucl. Energy.* 2021. Vol. 137. Art. 103776.
19. Wang Q., Wang Y., Zhou B., Wang L., Fang Y., Xu S. Influence of polypropylene fibers on the mechanical properties of radiation shielding concrete with barite aggregates // *J. Build. Eng.* 2023. Vol. 79. Art. 107820.
20. Dąbrowski M., Jozwiak-Niedzwiedzka D., Bogusz K., Glinicki M.A. Influence of serpentinite aggregate on the microstructure and durability of radiation shielding concrete // *Construct. Build. Mater.* 2022. Vol. 337. Art. 127536.
21. Lardhi M., Mukhtar F. Radiation shielding performance of seawater-mixed concrete incorporating recycled coarse aggregate and steel slag // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences.* 2023. Vol. 16(1). Art. 100528.
22. Han B., Zhang L., Ou J. *Smart and Multifunctional Concrete toward Sustainable Infrastructures* // Springer Singapore. 2017.
23. Amran M., Abdelgader H.S., Onaizi A.M., Fediuk R., Ozbakkaloglu T., Rashid R.S.M., Murali G. 3D-printable alkali-activated concretes for building applications: a critical review // *Construction and Building Materials.* 2022. Vol. 319. 126126. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126126.
24. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики / Экология и развитие обществ: труды IX Международной конференции. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). 2005. С. 12–21.
25. de Oliveira L.B., Marvila M.T., Pereira E.C., Vieira C.M.F., de Azevedo A.R.G., Fediuk R. Durability of geopolymers with industrial waste // *Case Studies in Construction Materials.* 2022. Vol. 16. e00839. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00839.
26. Левкина Е.В., Лялина Ж.И., Локша А.В., Савостина С.Е. Финансовые аспекты обеспечения экономической безопасности: многоуровневый подход. Владивосток, 2022. 169 с.

REFERENCES

1. О ядерных реакторах и их творцах: продолжение традиций = [About nuclear reactors and their creators: continuation of traditions] / ed. by V.K. Ulasevich. Moscow: GUP NIKIET; 2002. 116 p. (In Russ.).
2. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Emelianov V.V. Poisk al'ternativy khromatnym pigmentam (obzor) = [Search for an alternative to chromate pigments (review)] *Proceedings of VIAM.* 2020;12(94): 96–107. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-96-107 (In Russ.).
3. Bazhenov Yu.M., Korolev E.V., Samoshin A.P., Koroleva O.V. Vybór zapolnitelya dlya radiatsionno-zashchitnykh betonov variatropno-karkasnoi struktury = [Selection of filler for radiation shielding concrete of variotropic frame structure]. *Regional architecture and construction.* 2009;(1):9–13. (In Russ.).
4. Kanagaraj B., Anand N., Andrushia A.D., Naser M.Z. Recent developments of radiation shielding concrete in nuclear and radioactive waste storage facilities – a state of the art review. *Construct. Build. Mater.* 2023;(404):133260.
5. Thomas C., Rico J., Tamayo P., Setién J., Ballester F., Polanco J.A. Neutron shielding concrete incorporating B4C and PVA fibers exposed to high temperatures. *J. Build. Eng.* 2019;(26):100859.
6. Erkoyuncu İ., Demirkol İ., Akman F., Dilsiz K., Kaçal M.R., Polat H. A detailed investigation of gamma and neutron shielding capabilities of concrete doped with bronze and boron carbide. *Radiat. Phys. Chem.* 2024;(215):111358.
7. Amin M., Elemam W.E., Kandil M.A., Samy M. Effect of heavy-weight recycled materials on radiation shielding and properties of high-strength concrete with CEM III.J. *Build. Eng.* 2023;(79):107819.
8. Manjunatha H.C., Seenappa L., Chandrika B.M., Hanumantharayappa C. A study of photon interaction parameters in barium compounds. *Ann. Nucl. Energy.* 2017;(109):310–317.
9. Vishnu C.V., Joseph A. Gamma-ray shielding analysis on natural rubber composites fortified with barium tungstate (BaWO₄). *Radiat. Phys. Chem.* 2024;(216):111389.

10. Chandrika B.M., Shastry Manjunatha H.C., Sridhar K.N., Ambika M.R., Seenappa L., Manjunatha S., Munirathnam R., Clement Lourduraj A.J. Synthesis, physical, optical and radiation shielding properties of barium-bismuth oxide borate-A novel nanomaterial. *Nucl. Eng. Technol.* 2023;55(5):1783–1790.
11. Abualroos N.J., Yaacob K.A., Zainon R. Radiation attenuation effectiveness of polymer-based radiation shielding materials for gamma radiation. *Radiat. Phys. Chem.* 2023;(212):111070.
12. Seenappa L., Manjunatha H.C., Chandrika B.M., Chikka H. A study of shielding properties of X-ray and gamma in barium compounds. *Journal of Radiation Protection and Research.* 2017;42(1):26–32.
13. Sathish K.V., Manjunatha H.C., Vidya Y.S., Sridhar K.N., Seenappa L., Chinnappa Reddy B., Alfred Cecil Raj S., Damodara Gupta P.S. X-rays/gamma rays radiation shielding properties of barium-nickel-iron oxide nanocomposite synthesized via low temperature solution combustion method. *Radiat. Phys. Chem.* 2022;(194):110053.
14. Kim S.-C., Dong K.-R., Chung W.-K. Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds. *Ann. Nucl. Energy.* 2012;(47):1–5.
15. Abouhaswa A.S., El-Agawany F.I., Ahmed E.M., Rammah Y.S. Optical, magnetic characteristics, and nuclear radiation shielding capacity of newly synthesized barium boro-vanadate glasses: B_2O_3 - BaF_2 - Na_2O - V_2O_5 . *Radiat. Phys. Chem.* 2022;(192):09922.
16. Polat R., Yalcin Z., İçelli O. The absorption jump factor of effective atomic number and electronic density for some barium compounds. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 2011;629(1):185–191.
17. Chandru U., Bahurudeen A., Senthilkumar R. Systematic comparison of different recycled fine aggregates from construction and demolition wastes in OPC concrete and PPC concrete. *J. Build. Eng.* 2023;(75):106768.
18. Gunoglu K., Akkurt I. Radiation shielding properties of concrete containing magnetite. *Prog. Nucl. Energy.* 2021;(137):103776.
19. Wang Q., Wang Y., Zhou B., Wang L., Fang Y., Xu S. Influence of polypropylene fibers on the mechanical properties of radiation shielding concrete with barite aggregates. *J. Build. Eng.* 2023;(79):107820.
20. Dąbrowski M., Jozwiak-Niedzwiedzka D., Bogusz K., Glinicki M.A. Influence of serpentinite aggregate on the microstructure and durability of radiation shielding concrete. *Construct. Build. Mater.* 2022;(337):127536.
21. Lardhi M., Mukhtar F. Radiation shielding performance of seawater-mixed concrete incorporated recycled coarse aggregate and steel slag. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences.* 2023;16(1):100528.
22. Han B., Zhang L., Ou J. Smart and Multifunctional Concrete towards Sustainable Infrastructures. *Springer Singapore.* 2017.
23. Amran M., Abdelgader H.S., Onaizi A.M., Fediuk R., Ozbakkaloglu T., Rashid R.S.M., Murali G. 3D-printable alkali-activated concretes for building applications: a critical review. *Construction and Building Materials.* 2022;(319):126126. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126126.
24. Alekseiko L.N., Taskin A.V. O kompleksnoi pererabotke zoloshlakovykh otkhodov ehnergetiki = [On the integrated processing of ash and slag waste from the energy sector]. *Ecology and development of society. Proceedings of the IX International Conference. International Academy of Sciences of Ecology, Human and Nature Safety (MANEB).* 2005:12–21. (In Russ.).
25. de Oliveira L.B., Marvila M.T., Pereira E.C., Vieira C.M.F., de Azevedo A.R.G., Fediuk R. Durability of geopolymers with industrial waste. *Case Studies in Construction Materials.* 2022;(16): e00839. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00839.
26. Levkina E.V., Lyalina Zh.I., Loksha A.V., Savostina S.E. Finansovye aspekty obespecheniya ehkonomicheskoi bezopasnosti: mnogourovnevnyi podkhod = [Financial aspects of economic security: a multi-level approach]. Vladivostok; 2022. 169 p. (In Russ.).