УДК 691.535 DOI: 10.33979/2073-7416-2026-123-1-110-127

В.С. КОВАЛЬЧУК[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖИ НА СВОЙСТВА ТАМПОНАЖНЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. *Разработка цементных составов для повышения качества конструкции является одним из основных направлений в строительном материаловедении. Согласно анализу существующих исследований, использование углеродсодержащих добавок для повышения характеристик цементных смесей противоречиво и сильно зависит от доступности добавки и технического задания. Описан механизм взаимодействия углеродного модификатора с вяжущими материалами. Представлен минеральный и фазовый состав используемого стандартного тампонажного портландцемента. В статье рассмотрено влияние добавки в виде фуллереновой сажи на структурно-реологические свойства цементного теста. Рентгенофазовый состав модифицированных цементов зафиксировал отсутствие химического взаимодействия углеродной добавки с продуктами гидратации цемента. Полученные результаты физико-механических испытаний показали рост прочности цементного камня при твердении в условиях нормальных и умеренных температур. С помощью компьютерной томографии были рассчитаны показатели объема порового пространства и пористости образцов. Установлено оптимальное содержание фуллереновой добавки для повышения характеристик цементного состава. Представленное исследование предлагает одно из возможных решений проблемы разработки тампонажного материала для повышения герметичности и долговечности скважин.*

Ключевые слова: *цементирование скважин, прочность, пористость, углеродная добавка, фуллереновая сажа, тампонажная смесь.*

V.S. KOVALCHUK[1]
[1]Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

EFFECT OF FULLERENE SOOT ON THE PROPERTIES OF GROUTING MIXTURES

Abstract. *The development of cement mixtures to enhance the quality of construction is a major focus in the field of building materials research. Based on an analysis of existing literature, the use of carbon-based additives to improve the properties of cement pastes is contradictory and strongly depends on the availability of the additive and the technical specification. Moreover, the mechanism of interaction of a carbon modifier with binding materials is described. The mineral and phase composition of the standard grouting Portland cement used is presented. The article considers the effect of a fullerene soot additive on the structural and rheological properties of cement paste. The X-ray phase content of the modified cements revealed the absence of chemical interaction of the carbon additive with the cement hydration products. The analysis of the physical and mechanical tests showed an increase in the strength of the cement stone during curing at normal and moderate temperatures. Computed tomography was used to calculate the parameters of the pore volume and porosity of the samples. As a result, the optimal concentration of fullerene additives was established to enhance the characteristics of the cement composition. The presented study proposes one of the possible solutios to the challenge of developing a grouting material that enhances the tightness and longevity of wells.*

Keywords: *well cementing, strength, porosity, carbon additive, fullerene soot, grouting mixture.*

© Ковальчук В.С., 2026

1. Введение

Цементирование играет решающую роль при обеспечении безопасной эксплуатации конструкций различного назначения. Тампонажный портландцемент применяется при строительстве нагнетательных, водозаборных, инженерно-геологических и других видов скважин. Однако, в процессе затвердевания тампонажный материал находится в нестабильном состоянии, отличным от гидратации цемента при нормальных условиях. Для решения проблемы неточности экспериментальных тестов используются исследования в условиях, максимально приближенных к реальным. Кроме того, для улучшения свойств цементного теста и камня используются специальные добавки, которые регулируют необходимые параметры в соответствии с требованиями эксперимента. Существуют добавки, которые улучшают структурно-реологические свойства, а также повышают прочность цементного камня, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам [1, 2]. Кроме того, химические и минеральные добавки регулируют процесс гидратации, водопоглощения и пенообразования [3-5]. Несмотря на интенсивное строительство и широкий ассортимент материалов на рынке, проблема обеспечения качественного крепления скважин остаётся одной из ключевых задач для исследователей и инженеров.

Активное развитие углеродных материалов указывает на перспективность применения их в качестве добавок в строительные материалы [6-9]. Одним из перспективных наноразмерных модификаторов строительных материалов является углеродная добавка с высоким содержанием фуллеренов [10, 11]. Фуллеренами называют углеродные кластеры с четным, более 20, количеством атомов углерода. Молекула C_{60} обладает наибольшей стабильностью и активно применяется в промышленности чаще всего в виде фуллереновой сажи (ФС) [12, 13]. При модифицировании цементных составов ФС происходит улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств цемента и бетона за счет ускорения процесса гидратации портландцемента, улучшения микроструктуры и уменьшения пористости цементного камня [14]. В работе [15] были представлены результаты исследований, которые показали улучшение физико-механических свойств цементного камня с добавкой фуллереновой сажи 0,01 мас.%. Более того, пористость цементного камня с ФС снизилась, а также обнаружено улучшение прочности в разное время отверждения, морозостойкости, водопоглощения и водостойкости бетона. В ходе проведения исследований [16] было установлено, что прочность, достигаемая в бетоне с концентрацией фуллероидов в воде более 0,01 мас.%, по экономическим показателям не может представлять интереса для промышленности и строительства. Согласно полученным данным [17-19] использование фуллероидных углеродных наночастиц оказало положительное влияние не только на морозостойкость и водонепроницаемость, но и увеличило сопротивляемость бетона агрессивному воздействию внешней среды. Авторами было определено, что фуллероидные углеродные наночастицы не вызывают образование новых фаз вещества, отличных от имеющихся, но положительно влияют на кинетику процесса гидратации и способствуют углублению процессов твердения цементного камня, характеризующегося повышенной плотностью и однородностью. В статье [20] отмечено уменьшение количества технологических дефектов конструкции при внедрении фуллереновых нанодобавок в бетонные смеси при постоянном водоцементном отношении. Результаты показали, что прочность повышается до 10-15%, водонепроницаемость возрастает на 2-3 ступени, а морозостойкость - на 1-3 марки.

Для изучения влияния добавок на свойства цементгных составов помимо исследований по стандартным нормативам ученые часто используют дополнительные эксперименты по определению специальных свойств материалов. Так, активное применение получили средства анализа поровой структуры цементного камня. Изучение влияния пористости бетона авторами [21] показало, что равномерное распределение пустот повышает прочность на сжатие за счёт минимизации концентрации напряжений. В статье [22] было исследовано влияние характеристик пор на свойства пенобетона. Результаты рентгеновской компьютерной

томографии показали, что форма, размеры пор и значение плотности твердых частиц сильно влияют на разрушаемость бетона. С увеличением коэффициента пустотности уменьшается толщина стенок пор и снижается прочность цементных композитов [23].

Анализ мировых исследований, посвящённых использованию фуллеренсодержащих материалов в качестве добавок в бетоны, композиты и цементы, показал положительное влияние углеродного наномодификатора на физико-механические и эксплуатационные свойства цементного камня. Фуллереновые добавки позволяют повысить свойства цементых смесей в широком диапазоне. Однако, отмечается, что применение фуллереновой сажи не всегда является экономически целесообразным и технически возможным. Более того, на сегодняшний день не развито применение фуллеренсодержащих модификаторов в качестве добавок в составы тампонажных смесей для цементирования скважин.

Цель работы – проведение экспериментальных исследований для определения перспектив внедрения фуллереновой сажи в составы тампонажных смесей для строительства скважин в условиях нормальных и умеренных температур.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проведение экспериментальных исследований влияния фуллереновой сажи на реологические и прочностные свойства тампонажной смеси; определение влияния добавки фуллереновой сажи на пористость цементного камня; подбор оптимального количества добавки для получения цементного теста/камня с улучшенными эксплуатационными свойствами; оценка перспектив внедрения фуллеренового наномодификатора в составы тампонажных смесей для строительства скважин.

2. Модели и метод

При проведении экспериментальных исследований использовался стандартный тампонажный материал ПЦТ-I-50. Тампонажный портландцемент изготавливается в соответствии с требованиями ГОСТ 1581-2019, в котором регулируется содержание в клинкере оксида магния не более 5,0 мас.% и оксида серы (VI) в пределах 1,5-3,5 мас.%. Подробный состав клинкера представлен на рисунке 1. Углеродной добавкой выбрана фуллереновая сажа, полученная с помощью дугового разряда с графитовыми электродами и содержащая до 10 мас.% молекул C_{60} и C_{70} [24-26].

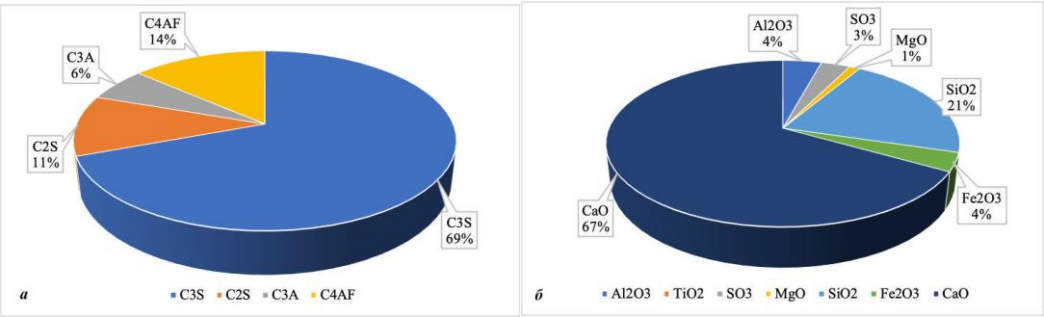

Рисунок 1 – Минеральный (а) и фазовый (б) состав вяжущего

Исследования строительных материалов осуществлялись согласно действующего норматива ГОСТ 34532-2019. Для элементного анализа фуллереновой сажи использовался рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu XRF1800. Также проводилась порошковая рентгеновская дифрактометрия на установке Shimadzu XRD-7000 для определения фазового состава цементного камня с добавкой ФС и компьютерная томография образцов для измерения открытой, закрытой и общей пористости, а также объема соответствующих пор с помощью рентгеновского микротомографа SkyScan 1173.

3. Результаты и анализ исследования

По результатам количественного анализа было определено, что 99% фуллереновой сажи состоит из углерода, а среди примесей наибольшее количество занимают фосфор, железо и кальций. Подробный элементный состав примесей ФС приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав примесей фуллереновой сажи

Элемент	P	Fe	Ca	S	Si	Ti	K	Na	Cl	Al
Содержание, %	29,34	21,01	19,36	7,61	5,49	4,54	2,74	2,46	2,24	1,90

После приготовления цементного теста с содержанием фуллереновой сажи 0,1…0,5 мас.% измерялись структурно-реологические параметры, включающие плотность, растекаемость, время загустевания до 30 Вс и водоотделение. В таблице 2 представлены нормативные требования к тампонажным составам, а также показатели исследований цементных смесей, модифицированных фуллереновой сажей 0,1…0,5 мас.%.

Таблица 2 – Результаты реологических исследований цементных составов

Состав	Плотность, г/см^3	Растекаемость, мм	Время загустевания до 30 Вс, мин	Водоотделение, мл
ГОСТ 34532-2019	-	≥ 200	≥ 90	≤ 8,7
ФС 0,1 мас.%	1,86	215	340	2,1
ФС 0,3 мас.%	1,86	210	320	1,9
ФС 0,5 мас.%.	1,85	200	300	1,8

В соответствии с полученными данными, добавление фуллереновой сажи до 0,5 мас.% удовлетворяет всем стандартным требованиям и является практически применимым. Для исследования влияния механических нагрузок и температуры твердения 70 °С в течение первых суток образцы тампонажных составов измерялись на прессе на изгиб через 2 суток и на одноосное сжатие через 1, 3 и 10 дней. Согласно полученным данным постепенное увеличение добавки ФС 0,1…0,5 мас.% приводит к стабильному росту прочности на изгиб на 5,5-10,9%. При твердении в условиях умеренных температур для аналогичных составов прочность растет на 3,5-10,5% относительно образцов, твердеющих при нормальной температуре. Изменение прочности на одноосное сжатие цементных составов после твердения при 22±2°С и 70°С отображено на рисунке 2.

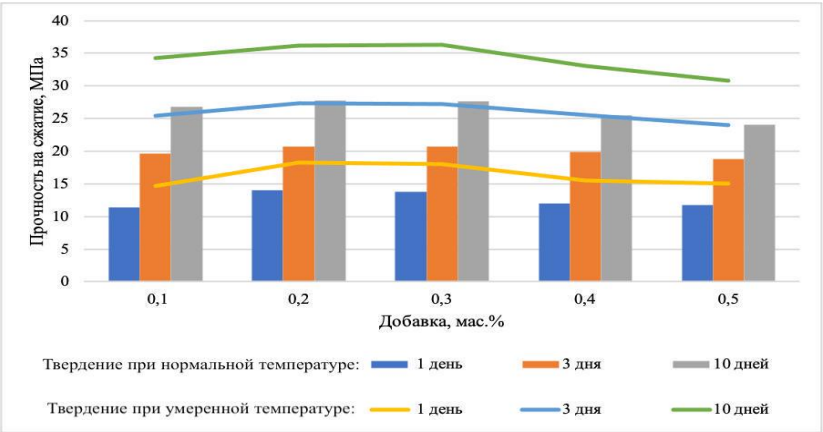

Рисунок 2 – Диаграмма изменения прочностина сжатие образцов цементного камня

Эксперименты по изучению физико-механических свойств цементного камня указывают на положительное влияние фуллереновой сажи в объеме 0,2-0,3 мас.%. Углеродная армирующая добавка регулирует свойства тампонажной смеси для цементирования скважин в условиях нормальных и умеренных температур. При температуре 70°С процесс гидратации ускоряется, поэтому наблюдается рост прочности до ~31% по сравнению с образцами, твердеющими при температуре 22±2°С.

Для дальнейшего детального изучения механизма взаимодействия фуллереновой сажи с вяжущим был проведен фазовый анализ и компьютерная томография цементного камня. Было решено использовать оптимальную дозировку 0,3 мас.% фуллереновой сажи для определения эффекта добавки на химические и физические свойства строительного материала

на основе тампонажного портландцемента. В таблице 3 представлен фазовый химический состав образцов.

Таблица 3 – Химический состав исследуемых образцов цементного камня

Добавка ФС, мас.%.	Химическая фаза					
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	K_2O
б/д	52,412	41,842	4,621	0,501	0,193	0,362
0,3	47,988	19,554	2,947	3,042	1,696	0,672

Согласно результату теста, наблюдается уменьшения содержания основных химических элементов цементного камня, а именно CaO, SiO_2 и Al_2O_3. В то же время происходит значительное увеличение содержания оксида железа, что указывает на возможный рост запаса прочности цемента. В таблице 4 приведены результаты расчета показателей пористости цементного камня.

Таблица 4 – Пористость образцов цементного камня

Показатель	Добавка ФС, мас.%.	
	б/д	0,3
Объем закрытых пор, мм^3	8,57	3,57
Объем открытого порового пространства, мм^3	1,37	0,27
Общий объем порового пространства, мм^3	9,94	3,84
Закрытая пористость, %	1,14	1,04
Открытая пористость, %	0,18	0,13
Общая пористость, %	1,32	1,17

Результаты исследований показали незначительное изменение химического состава наряду с резким снижением объема порового пространства на ~61%. Таким образом, фуллереновая сажа при структурообразовании цементного камня, не образуя химических связей, заполняет свободное пространство и является уплотняющим материалом. Значительное изменения объема закрытых и открытых пор цементного камня еще раз подтверждает утверждение об уплотнении структуры цементного камня, модифицированного фуллереновой сажей. Изменение пористости цементного камня при добавлении ФС наглядно представлено на компьютерном снимке на рисунке 3.

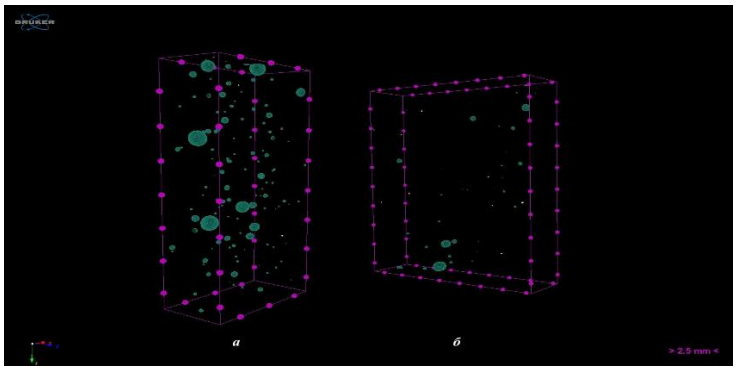

Рисунок 3 – Модель порового пространства образцов цементного камня: а) без добавок; б) ФС 0,3 мас.%

4. Заключение

1. Анализ экспериментальных результатов модификации тампонажных смесей на основе ПЦТ-I-50 фуллереновой сажей 0,1…0,5 мас.%. показал незначительное влияние на реологию цементного теста, одновременно с ростом прочности на одноосное сжатие и снижением объема пор.

2. Уменьшение пористости также положительно влияет на проницаемость, трещиностойкость и контракцию цемента, повышая однородность материала. Эти характеристики являются ключевыми для качественной изоляции ствола скважины, предотвращая негативное влияние окружающей среды.

3. Определено, что микроармирование цементного камня происходит до момента сбалансированного количества добавки, внедренной в свободное поровое пространство структуры цементной матрицы. При повышенных объемах модификатора структурно-реологические и физико-механические свойства тампонажной смеси снижаются и появляется необходимость внедрения добавок, например, пластификаторов для повышения подвижности смеси.

4. Для цементирования затрубного пространства скважины в условиях нормальных и умеренных температур оптимальное количество добавки фуллереновой сажи для комплексного улучшения свойств тампонажного состава составило 0,2-0,3 мас.%.

5. Фуллереновая сажа имеет высокий потенциал в качестве армирующей нанодобавки для получения цементного камня высокой прочности и низкой пористости без понижения требуемых реологических характеристик цементного теста.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют перспективность использования фуллереновой сажи в качестве добавки в тампонажные смеси, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности и долговечности скважины.

Целью последующего исследования является проведение более детальных физико-химических исследований взаимодейтсвия фуллереновой сажи с вящущим для обоснования механизма взаимодейтсвия нанодобавки с частицами цемента и воды. Кроме того, в план работы включено изучение взаимодействия фуллереновой сажи с другими модификаторами в составе цементной смеси, а также определение влияния температуры и давления на эксплуатационные характеристики цементного теста и камня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taiwo A. S., Ayre D. S., Khorami M., Rahatekar S. S. Assessment of the Mechanical and Microstructural Performance of Waste Kraft Fibre Reinforced Cement Composite Incorporating Sustainable Eco-Friendly Additives // Buildings. 2024. Vol. 14 (9). Article No. 2725. DOI: 10.3390/buildings14092725
2. Lima V. N., Skadsem H. J., Beltrán-Jiménez K., Velloso R. Q., de Andrade Silva, F. The effect of PVA microfiber reinforcement on the mechanical and rheological behavior of class G oil well cement pastes // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 391. Article No. 131806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131806
3. Roli A., Joel O., John A. Effect of Silica Flour and Potasium Chloride as Additives in the Rhelogical Properties of High Temperature High Pressure Gas Well Cement Slurry // Journal of Engineering Research and Reports. 2023. Vol. 25. P. 66-78. DOI: 10.9734/jerr/2023/v25i4903
4. Chen W., Wang C., Yao X., Song W., Zou Y. Effect of a 2-Acrylamido-2-methylpropanesulfonic Acid-Based Fluid Loss Additive on the Hydration of Oil Well Cement // ACS Omega. 2024. Vol. 9 (8). P. 9090-9097. DOI: 10.1021/acsomega.3c07890
5. Tang L., Fořt J., Černý R., He Z. Sustainable Utilization of Modified Electrolytic Manganese Residue as a Cement Retarder: Workability, Mechanical Properties, Hydration Mechanisms, Leaching Toxicity, and Environmental Benefits // Buildings. 2025. Vol. 15 (10). Article No. 1586. DOI: 10.3390/buildings15101586
6. Cai J., Wang M., Zhou S., Cheng X. Mechanical Properties of Graphite-Oil Well Cement Composites under High Temperature // ACS Omega. 2022. Vol. 7 (16). P. 14148-14159. DOI: 10.1021/acsomega.2c00717
7. Li M., Meng F., Guo X. Y. Mechanical Properties and Mechanism of Graphite Oxide Reinforced Oil Well Cement // Materials Science Forum. 2016. Vol. 847. P. 445-450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.445
8. Qian Z., Luan C., Yu, C., Huang Y., Zhou Z. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 346. Article No. 128455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455
9. Sammer T., Nasiri A., Kostoglou N., Ravi K., Raith J. Insight into Carbon Black and Silica Fume as Cement Additives for Geoenergy Wells: Linking Mineralogy to Mechanical and Physical Properties // C. 2024. Vol. 10 (3). Article No. 71. DOI: 10.3390/c10030071
10. Yunusov F., Larionova T. V., Tolochko O., Breki A. D. Tribological Properties of Al-Based Composites Reinforced with Fullerene Soot // Materials. 2021. Vol. 14 (21). Article No. 6438. DOI: 10.3390/ma14216438
11. Zeynalov E. B., Allen N. S., Magerramova M. Ya., Huseynov A. B. Evaluation of the antioxidative efficacy of fullerene soot doped by C_{60}/C_{70} (85/15) for low-density/high pressure polyethylene nanocomposites // Azerbaijan Chemical Journal. 2024. Vol. 4. P. 18-26. DOI: 10.32737/0005-2531-2024-4-18-26
12. Шпилевский Э. Фуллерены – новые молекулы для новых материалов // Наука и инновации. 2006. №5 (39). С. 32-38.
13. Daniel G. B., Nachimuthu K., Nallasivam J. L. Functionalization of [C_{60}] – Fullerene: A Recent Update // Cemistry - An Asian Journal. 2025. Vol. 20 (9). Article No. e202401800. DOI: 10.1002/asia.202401800
14. Urkhanova L. A., Lkhasaranov S. A., Buyantuev S. L. Modification of cement and concrete with carbon nanomaterials, obtained by plasma method // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9 (1). P. 652-656.

15. Урханова Л. А., Лхасаранов С. А., Буянтуев С. Л. Кузнецова А. Ю. О влиянии углеродных наноматериалов на свойства цемента и бетона // Нанотехнологии в строительстве. 2016. №8 (5). С. 16-41. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-5-16-41

16. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Никитин В. А., Летенко Д. Г., Староверов В. Д. Модифицирование цементных композитов смешанным наноуглеродным материалом фуллероидного типа // Технологии бетонов. 2013. №12 (89). С. 13-15.

17. Пухаренко Ю. В., Староверов В. Д., Рыжов Д. И. Фуллероидные углеродные наночастицы для модификации бетонов // Технологии бетонов. 2015. № 3-4 (104-105). С. 40-43.

18. Рыжов Д. И. Особенности изменения фазового состава цемента, модифицированного углеродными наночастицами, в процессе гидратации // Вестник гражданских инженеров. 2016. №6 (59). С. 141-146.

19. Пухаренко Ю. В., Рыжов Д. И., Староверов В. Д. Особенности структурообразования цеметных композитов в присутствии углеродных наночастиц фуллероидного типа // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. №7 (106). С. 718-723. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.718-723

20. Пухаренко, Ю. В., Староверов В. Д., Рыжов Д. И. Наномодифицированные добавки в бетоны для транспортного строительства // Транспорт Российской Федерации. 2014. №5 (54). С. 26-30.

21. Abou-Nouh F., Afraitane H., Farah M., Jaafri R. The Effects of Particle Radius, Porosity, and Void Distribution on the Compressive Strength of Cellular Concrete // Construction Materials. 2025. Vol. 5 (1). Article No. 15. DOI: 10.3390/constrmater5010015

22. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore Characteristics and Their Effects on the Material Properties of Foamed Concrete Evaluated Using Micro-CT Images and Numerical Approaches // Applied Sciences. 2017. Vol. 7 (6). Article No. 550. DOI: 10.3390/app7060550

23. Mia M. S., Medepalli S., Takahashi Y., Tsuchiya K., Ishida T. Effect of microstructure differences on the thermal and mechanical behaviors of porous cementitious composites using phase change materials // Journal of Intelligent Construction. 2025. Vol. 3 (1). Article No. 9180076. DOI: 10.26599/JIC.2025.9180076

24. Werner H., Herein D., Blöcker J., Henschke B., Tegtmeyer, U., Schedel-Niedrig Th., Keil M., Bradshaw A. M., Schlögl R. Spectroscopic and chemical characterisation of “fullerene black” // Chemical Physics Letters. 1992. Vol. 194. P. 62-66. DOI: 10.1016/0009-2614(92)85743-T

25. Alekseyev N. I., Dyuzhev G. A. Fullerene formation in an arc discharge // Carbon. 2003. Vol. 41 (7). P. 1343-1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00058-7

26. Kushch S. D., Kuyunko N. S. Fullerene black: Structure, properties and possible applications // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. P. 345-353. DOI: 10.1134/S1070363211020113

REFERENCES

1. Taiwo A. S., Ayre D. S., Khorami M., Rahatekar S. S. Assessment of the Mechanical and Microstructural Performance of Waste Kraft Fibre Reinforced Cement Composite Incorporating Sustainable Eco-Friendly Additives. *Buildings.* 2024. Vol. 14 (9). Article No. 2725. DOI: 10.3390/buildings14092725

2. Lima V. N., Skadsem H. J., Beltrán-Jiménez K., Velloso R. Q., de Andrade Silva, F. The effect of PVA microfiber reinforcement on the mechanical and rheological behavior of class G oil well cement pastes. *Construction and Building Materials.* 2023. Vol. 391. Article No. 131806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131806

3. Roli A., Joel O., John A. Effect of Silica Flour and Potasium Chloride as Additives in the Rhelogical Properties of High Temperature High Pressure Gas Well Cement Slurry. *Journal of Engineering Research and Reports.* 2023. Vol. 25. Pp. 66-78. DOI: 10.9734/jerr/2023/v25i4903

4. Chen W., Wang C., Yao X., Song W., Zou Y. Effect of a 2-Acrylamido-2-methylpropanesulfonic Acid-Based Fluid Loss Additive on the Hydration of Oil Well Cement. *ACS Omega.* 2024. Vol. 9 (8). Pp. 9090-9097. DOI: 10.1021/acsomega.3c07890

5. Tang L., Fořt J., Černý R., He Z. Sustainable Utilization of Modified Electrolytic Manganese Residue as a Cement Retarder: Workability, Mechanical Properties, Hydration Mechanisms, Leaching Toxicity, and Environmental Benefits. *Buildings.* 2025. Vol. 15 (10). Article No. 1586. DOI: 10.3390/buildings15101586

6. Cai J., Wang M., Zhou S., Cheng X. Mechanical Properties of Graphite-Oil Well Cement Composites under High Temperature. *ACS Omega.* 2022. Vol. 7 (16). Pp. 14148-14159. DOI: 10.1021/acsomega.2c00717

7. Li M., Meng F., Guo X. Y. Mechanical Properties and Mechanism of Graphite Oxide Reinforced Oil Well Cement. *Materials Science Forum.* 2016. Vol. 847. Pp. 445-450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.445

8. Qian Z., Luan C., Yu, C., Huang Y., Zhou Z. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives. *Construction and Building Materials.* 2022. Vol. 346. Article No. 128455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455

9. Sammer T., Nasiri A., Kostoglou N., Ravi K., Raith J. Insight into Carbon Black and Silica Fume as Cement Additives for Geoenergy Wells: Linking Mineralogy to Mechanical and Physical Properties. *C.* 2024. Vol. 10 (3). Article No. 71. DOI: 10.3390/c10030071

10. Yunusov F., Larionova T. V., Tolochko O., Breki A. D. Tribological Properties of Al-Based Composites Reinforced with Fullerene Soot. *Materials.* 2021. Vol. 14 (21). Article No. 6438. DOI: 10.3390/ma14216438

11. Zeynalov E. B., Allen N. S., Magerramova M. Ya., Huseynov A. B. Evaluation of the antioxidative efficacy of fullerene soot doped by C_{60}/C_{70} (85/15) for low-density/high pressure polyethylene nanocomposites. *Azerbaijan Chemical Journal.* 2024. Vol. 4. Pp. 18-26. DOI: 10.32737/0005-2531-2024-4-18-26

12. Shpilevsky E. Fullereny – novye molekuly dlya novyh materialov [Fullerenes are new molecules for new materials] Nauka i innovacii [Science and Innovation]. 2006. Vol. 5 (39). Pp. 32-38. (rus).

13. Daniel G. B., Nachimuthu K., Nallasivam J. L. Functionalization of [C_{60}] – Fullerene: A Recent Update. *Cemistry - An Asian Journal.* 2025. Vol. 20 (9). Article No. e202401800. DOI: 10.1002/asia.202401800

14. Urkhanova L. A., Lkhasaranov S. A., Buyantuev S. L. Modification of cement and concrete with carbon nanomaterials, obtained by plasma method. *International Journal of Civil Engineering and Technology.* 2018. Vol. 9 (1). Pp. 652-656.

15. Urkhanova L. A., Lkhasaranov S. A., Buyantuev S. L., Kuznetsova A. Yu. O vliyanii uglerodnyh nanomaterialov na svojstva cementa i betona [About the influence of carbon nanomaterials on the properties of cement and concrete]. *Nanotehnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in Construction]*. 2016. Vol. 8. No. 5. Pp. 16-41. (rus). DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-5-16-41

16. Pukharenko Yu. V., Aubakirova I. U., Nikitin V. A., Letenko D. G., Staroverov V. D. Modifitsirovanie tsementnykh kompozitov smeshannym nanouglerodnym materialom fulleroidnogo tipa [Modifying of cement composites the mixed nano-carbon material of fulleroid type]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies].* 2013. Vol. 12 (89). Pp. 13-15. (rus).

17. Pukharenko Yu. V., Staroverov V. D., Ryzhov D. I. Fulleroidnye uglerodnye nanochasticy dlya modifikacii betonov [Fulleroid carbon nano particles for concrete]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies].* 2015. Vol. 3-4 (104-105). Pp. 40-43. (rus).

18. Ryzhov D. I. Osobennosti izmeneniya fazovogo sostava cementa, modificirovannogo uglerodnymi nanochasticami, v processe gidratacii [Features of changing the phase composition of cement modifiedwith carbon nano-particles in the course of hydration]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers].* 2016. Vol. 6 (59). Pp. 141-146. (rus).

19. Pukharenko Yu. V., Ryzhov D. I., Staroverov V. D. Osobennosti strukturoobrazovaniya tsemetnykh kompozitov v prisutstvii uglerodnykh nanochastits fulleroidnogo tipa [Peculiar Properties of Structural Formation of Cement Composites in the Presence of Fueleroid Type Carbon Nanoparticles]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017. Vol. 12. No. 7 (106). Pp. 718-723. (rus). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.718-723

20. Pukharenko Yu. V., Staroverov V. D., Ryzhov D. I. Nanomodifitsirovannye dobavki v betony dlya transportnogo stroitel'stva [Nano-modified additives in concrete for transport construction]. *Transport Rossivskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation].* 2014. Vol. 5(54). Pp. 26-30. (rus).

21. Abou-Nouh F., Afraitane H., Farah M., Jaafri R. The Effects of Particle Radius, Porosity, and Void Distribution on the Compressive Strength of Cellular Concrete. *Construction Materials.* 2025. Vol. 5 (1). Article No. 15. DOI: 10.3390/constrmater5010015

22. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore Characteristics and Their Effects on the Material Properties of Foamed Concrete Evaluated Using Micro-CT Images and Numerical Approaches. *Applied Sciences.* 2017. Vol. 7 (6). Article No. 550. DOI: 10.3390/app7060550

23. Mia M. S., Medepalli S., Takahashi Y., Tsuchiya K., Ishida T. Effect of microstructure differences on the thermal and mechanical behaviors of porous cementitious composites using phase change materials. *Journal of Intelligent Construction.* 2025. Vol. 3 (1). Article No. 9180076. DOI: 10.26599/JIC.2025.9180076

24. Werner H., Herein D., Blöcker J., Henschke B., Tegtmeyer, U., Schedel-Niedrig Th., Keil M., Bradshaw A. M., Schlögl R. Spectroscopic and chemical characterisation of "fullerene black". *Chemical Physics Letters.* 1992. Vol. 194. Pp. 62-66. DOI: 10.1016/0009-2614(92)85743-T

25. Alekseyev N. I., Dyuzhev G. A. Fullerene formation in an arc discharge. *Carbon.* 2003. Vol. 41 (7). Pp. 1343-1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00058-7

26. Kushch S. D., Kuyunko N. S. Fullerene black: Structure, properties and possible applications. *Russian Journal of General Chemistry.* 2011. Vol. 81. Pp. 345-353. DOI: 10.1134/S1070363211020113

Информация об авторе

Ковальчук Влада Станиславовна
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, соискатель.
E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

Information about authors

Kovalchuk Vlada S.
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia,
PhD Student
E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.08.2025
Одобрена после рецензирования 23.11.2025
Принята к публикации 01.02.2026

The article was submitted 22.08.2025
Approved after reviewing 23.11.2025
Accepted for publication 01.02.2026