

Научная статья

УДК 614.841.343; DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-161-170

ВЛИЯНИЕ АСТРАЛЕНОВ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОЖАРА

✉ **Пылаева Елизавета Андреевна.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ elizavetapylaeva2001@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния углеродных наноструктур (астраленов) на прочностные и термостойкие характеристики бетона в условиях воздействия углеводородного пожара. Актуальность исследования обусловлена высокой аварийной опасностью объектов нефтегазового комплекса, где основным фактором разрушения строительных конструкций является быстрая потеря несущей способности бетона при интенсивном тепловом воздействии.

Целью работы являлась экспериментальная оценка эффективности наномодифицирования цементной матрицы астраленами для повышения остаточной прочности бетона при нагреве. В качестве объектов исследования использовались контрольные и наномодифицированные бетонные образцы. Модифицирование проводилось путем добавления астраленов в водную фазу с последующей ультразвуковой обработкой для обеспечения равномерного распределения частиц. Прочность на сжатие определялась после нагрева по углеводородной кривой в муфельной печи. Распределение астраленов подтверждено методом атомно-силовой микроскопии.

Установлено, что введение астраленов в концентрации 0,2 об. % обеспечивает увеличение остаточной прочности бетона по сравнению с контрольными образцами. Полученный эффект объясняется уплотнением микроструктуры цементной матрицы, снижением пористости и повышением трещиностойкости при термическом воздействии.

Ключевые слова: бетон, астралены, огнестойкость, углеводородный пожар, остаточная прочность

Для цитирования: Пылаева Е.А. Влияние астраленов на огнестойкость и прочностные характеристики бетона в условиях углеводородного пожара // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 2. С. 161–170. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-161-170

Scientific article

THE EFFECT OF ASTRALENES ON THE FIRE RESISTANCE AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF CONCRETE IN A HYDROCARBON FIRE

✉ **Pylaeva Elizaveta A.**

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ elizavetapylaeva2001@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the effect of carbon nanostructures (astralenes) on the strength and heat-resistant characteristics of concrete under the influence of a hydrocarbon fire. The relevance of the study is due to the high emergency risk of oil and gas facilities, where the main factor in the destruction of building structures is the rapid loss of bearing capacity of concrete under intense heat exposure.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

The aim of the work was to experimentally evaluate the effectiveness of nanomodification of the cement matrix with astralenes to increase the residual strength of concrete during heating. Control and nanomodified concrete samples were used as research objects. The modification was carried out by adding astralenes to the aqueous phase, followed by ultrasonic treatment to ensure uniform particle distribution. Compressive strength was determined after heating using a hydrocarbon curve in a muffle furnace. The distribution of astralenes was confirmed by atomic force microscopy.

It was found that the introduction of astralenes at a concentration of 0.2 vol. % provides an increase in the residual strength of concrete compared with control samples. The effect obtained is explained by the compaction of the microstructure of the cement matrix, a decrease in porosity and an increase in crack resistance under thermal influence.

Keywords: concrete, astralenes, fire resistance, hydrocarbon fire, residual strength

For citation: Pylaeva E.A. The effect of astralenes on the fire resistance and strength characteristics of concrete in a hydrocarbon fire // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 2. P. 161–170. DOI: 10.61260/2218-130X-2026-2-161-170

Введение

Объекты нефтегазового комплекса характеризуются повышенной пожарной опасностью вследствие хранения и транспортировки значительных объемов горючих жидкостей и газов под давлением. Углеводородные пожары отличаются экстремально быстрым ростом температуры до 1100–1200 °С в первые 5–10 мин., воздействием пламени высокой интенсивностью теплового излучения и значительным массовым расходом горючего на стадии факельного горения [1]. Эти факторы приводят к стремительной потере несущей способности строительных конструкций, в первую очередь железобетонных, что многократно увеличивает масштабы аварий, экологический ущерб и риск для персонала [2].

Для объектов нефтегазового комплекса более актуальным является режим углеводородного пожара, характеризующийся более жестким тепловым ударом [3].

В последние годы активно развивается направление наномодифицирования цементной матрицы и полимерных матриц углеродными нанотрубками, фуллеренами, астраленами [4]. Введение таких структур позволяет снижать пористость цементного камня, повышать адгезию на границе фаз, увеличивать трещиностойкость и остаточную прочность после высокотемпературного воздействия [5].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых наномодифицированным бетонам, ряд аспектов применения астраленов для повышения огнестойкости остается недостаточно изученным. Отсутствуют систематизированные данные об оптимальных концентрациях модификатора и результатах сравнительных огневых испытаний в углеводородном пожаре [6, 7].

Цель исследования – разработка и экспериментальное обоснование технологии модифицирования цементной матрицы астраленами для повышения огнестойкости строительных конструкций в условиях углеводородного пожара.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- анализ особенностей воздействия углеводородного пожара на железобетонные конструкции и обзор существующих способов повышения их огнестойкости;
- экспериментальное определение влияния модифицирования астраленами (в концентрации 0,2 об. %) на прочностные характеристики бетона при нагреве до 500 °С.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили две серии образцов:

- контрольные кубические образцы бетона размеров 70×70×70 мм, изготовленные по стандартной рецептуре тяжелого бетона класса В25 (без модифицирования);
- наномодифицированные кубические образцы того же состава с введением астраленов в водную фазу затворения.

Астралены представляют собой многослойные фуллероидные углеродные наноструктуры размером 80–150 нм, полученные методом каталитического пиролиза углеводородов [8]. Модифицирование дистиллированной воды проводилось путем депонирования углеродных наноконпонентов с последующей ультразвуковой обработкой на установке с частотой 60 кГц в течении 30 мин. Такой подход позволяет равномерно распределить нано структуры в объеме жидкости и предотвратить их агломерацию [9].

Для изготовления экспериментальных образцов применялся бетон класса В25. Контрольная (немодифицированная) смесь включала портландцемент, крупный заполнитель (габбро-диабаз) и воду. При приготовлении наномодифицированных образцов в состав бетонной смеси дополнительно вводились активный аморфный микрокремнезем, базальтовая микрофибра, а также комплексный модификатор на основе суперпластификаторов [10] и углеродных наноструктур (астраленов).

Введение астраленов осуществлялось через водную фазу после ультразвукового диспергирования. Образцы твердели 28 суток в нормальных условиях (температура 20 ± 2 °С, влажность 95–100 %). Бетонные смеси готовили согласно ГОСТ 25192–2012 и ГОСТ 10180–2012 [11].

Для оценки распределения астраленов в водной фазе использовался метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). Исследование проводилось на установке «NTEGRA Spectra» в полуконтактном режиме. Образцы модифицированной дистиллированной воды (с концентрацией астраленов 0,2 об. %) наносились на слюдяную подложку, после испарения воды проводился анализ твердого остатка.

Прочность при сжатии определяли на гидравлическом прессе с маслостанцией согласно ГОСТ 10180–2012. Скорость нагружения $0,6 \pm 0,2$ МПа/с. Испытывали серии по 3–6 образцов для каждой группы (контрольные, модифицированные).

Оценку поведения в условиях углеводородного пожара проводили путем нагрева образцов в муфельной печи с программным ПИД-регулятором «ОВЕН ТРМ251». Температурный режим соответствовал кривой углеводородного пожара по ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы: быстрый подъем до $1\ 100$ °С в первые 5–10 мин с последующим выдерживанием [10]. Образцы испытывали при температурах 300 °С, 400 °С и 500 °С с временем выдержки, имитирующим 10–30 мин пожара. После охлаждения определялась остаточную прочность при сжатии. Плотность образцов измерялась гидростатическим методом по ГОСТ 12730.1–78. Бетоны. Методы определения плотности.

Результаты обрабатывали методами математической статистики (рассчитывалось среднее арифметическое, стандартное отклонение, доверительный интервал при $p = 0,95$). Различия считали значимыми при $p < 0,05$ (по t-критерию Стьюдента).

Результаты исследования и их обсуждение

На АСМ-скане слюдяной подложки изображен твердый остаток после испарения дистиллированной воды с астраленами (рисунок).

Топология (а) характеризуется упорядоченной структурой с анизотропным периодическим рельефом. Средний латеральный размер структурных элементов составляет $1,8 \pm 0,2$ мкм при среднем расстоянии между ними $2,5 \pm 0,3$ мкм. Диапазон размеров элементов варьируется от 1,5 до 2,1 мкм. Среднеквадратичная шероховатость поверхности $R_q = 35 \pm 5$ нм, максимальный перепад высоты достигает 120 нм.

Топология (б) характеризуется статистически неоднородным островковым рельефом с изотропным распределением зёрен. Средний размер зёрен составляет $0,90 \pm 0,15$ мкм с модальным значением 0,8 мкм, размеры отдельных зерен находятся в пределах от 0,4 до 1,5 мкм. Среднее расстояние между центрами зёрен – $1,2 \pm 0,2$ мкм, поверхностная плотность – 8,5 шт./мкм². Среднеквадратичная шероховатость поверхности $R_q = 78 \pm 10$ нм, максимальный перепад высоты достигает 210 нм.

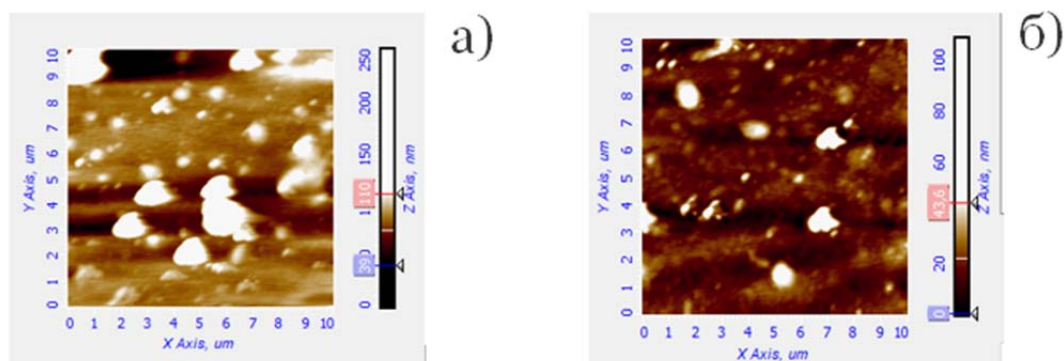


Рис. АСМ-сканы твердого остатка на слюдяной подложке (контрольный образец (а), модифицированный образец (б))

Для образца (а) с упорядоченной кристаллической структурой измеренные значения твёрдости и модуля Юнга составляют $4,8 \pm 0,3$ ГПа и 125 ± 7 ГПа соответственно. Для образца (б), имеющего островковую морфологию, определены твёрдость $2,9 \pm 0,4$ ГПа и модуль Юнга 94 ± 9 ГПа.

Упорядоченная микроструктура образца (а) приводит к значительному повышению твердости на 65 % и модуля Юнга на 33 % по сравнению с островковой структурой (б). Регулярное распределение структурных элементов способствует равномерному распределению нагрузки, в то время как наличие границ между зернами и микроконцентраторами напряжений в островковой структуре (б) снижает прочностные характеристики материала.

Анализ данных показывает, что наноструктуры размером 80–150 нм распределены по подложке равномерно, без значительной агломерации (рисунок). Это подтверждает эффективность ультразвуковой обработки для получения стабильной суспензии астраленов.

Сводные данные оценки поведения образцов в условиях углеводородного пожара приведены в таблице.

Таблица

Абсолютные и относительные изменения прочности бетона при нагреве по углеводородной и температурной кривой

Температура нагрева, °С	Вид бетона	Прочность без нагрева σ_0 , МПа	Остаточная прочность σ_r , МПа	Абсолютное изменение по сравнению с контролем $\Delta\sigma$, МПа	Относительное изменение, %	Потеря прочности относительно σ_0 , %
Без нагрева	Контрольный	41,1	41,1	-	-	0
	Наномодифицированный	60,2	60,2	+19,1	+46	0
300	Контрольный	41,1	36,3	-	-	11,7
	Наномодифицированный	60,2	55,7	+19,4	+37	7,5
400	Контрольный	41,1	31,4	-	-	23,6
	Наномодифицированный	60,2	50,8	+19,4	+38	15,6
500	Контрольный	41,1	28,9	-	-	29,7
	Наномодифицированный	60,2	48,8	+19,9	+40	18,9

Применённые методы частично основаны на стандартных процедурах (ГОСТ 10180–2012, ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014) с модифицированием: введение астраленов через ультразвуковое диспергирование и нагрев по углеводородной кривой вместо стандартной целлюлозной.

Полученные экспериментальные данные подтверждают положительное влияние модифицированных астраленов на структуру и эксплуатационные характеристики бетона в условиях высокотемпературного воздействия, имитирующего углеводородный пожар [12].

Плотность модифицированных образцов снизилась на 4–6 % по сравнению с контрольными. Прочность модифицированных образцов на сжатие без нагрева возросла на 36 % по сравнению с контрольными. Это говорит о заметном улучшении механических свойств материала благодаря введению астралена [13].

Когда образцы нагревались в муфельной печи по режиму, соответствующему углеводородному пожару (ГОСТ Р ЕН 1363–2–2014), различия стали еще более выраженными. Уже при 300 °С остаточная прочность модифицированных образцов оказалась на 19,4 % выше контрольных. Таким образом, модифицированный бетон значительно лучше сохраняет несущую способность при высоких температурах [14].

Контрольные образцы уже при 500 °С теряли до 25–30 % исходной прочности [15]. В температурном диапазоне 400–600 °С происходит активная дегидратацией С-S-H геля и начинается интенсивное растрескивание цементного камня [16].

Введение астраленов заметно изменило поведение материала. Потеря прочности у модифицированных образцов заметно медленнее. Астралены создают барьерный эффект, который препятствуя миграции влаги и газов, что снижает вероятность термического растрескивания. Кроме того, на микроуровне повышается трещиностойкость и, вероятно, формируются более термостабильные гидросиликатные фазы [17]. В результате модифицированные образцы проявляются значительно лучшую устойчивость к высоким температурам [18].

Полученные данные хорошо согласуются с работами по модифицированию бетона углеродными нанотрубками (УНТ). Исследования прочности после нагрева до 600–800 °С показывают прирост остаточной на 20–50 % при введении УНТ в концентрациях 0,01–0,5 масс. %. В данной работе астралены (0,2 об. % в воде) дают сопоставимый или даже лучший эффект при более низкой концентрации, что может быть связано с их многослойной фуллероидной структурой и лучшей термостабильностью по сравнению с одностенными УНТ [19].

Степень сохранения прочности возрастает с увеличением температуры воздействия, а максимальный прирост наблюдается при 500 °С (40 %). Это указывает на то, что наноармирование наиболее эффективно именно в зоне интенсивной деградации цементного камня (400–600 °С). Достоверность результатов подтверждается: сериями по 3–6 образцов на точку, статистической обработкой ($p < 0,05$) и воспроизводимостью в параллельных сериях (± 5 –7 %).

Снижение плотности модифицированных образцов, вероятно, связано с оптимизацией поровой структуры цементного камня за счёт наноармирования. Увеличение прочности на 36 % объясняется заполнением микропор и микротрещин наноструктурами, повышением адгезии на границе «цементная матрица – наполнитель» и эффектом мостикового армирования [20].

Полученные в работе экспериментальные данные демонстрируют чёткую корреляцию между морфологией цементной матрицы, модифицированной астраленами, и её прочностными характеристиками как в нормальных условиях, так и после высокотемпературного воздействия. Сопоставление результатов атомно-силовой микроскопии (рисунок) и механических испытаний (таблица) позволяет выявить физико-химические механизмы, обуславливающие повышение огнестойкости наномодифицированного бетона.

АСМ-исследование твёрдого остатка модифицированной водной фазы (рисунок б) подтвердило, что ультразвуковая обработка обеспечивает эффективное диспергирование

астраленов: наноструктуры размером 80–150 нм равномерно распределены по подложке, агломераты отсутствуют. Формируется статистически неоднородный островковый рельеф. Средний размер зёрен составляет $0,90 \pm 0,15$ мкм при поверхностной плотности 8,5 шт./мкм².

Именно такая равномерность распределения наночастиц и стала главным фактором, который обеспечил прирост прочности на сжатие в нормальных условиях на 36 % (с 41,1 МПа у контрольных образцов до 60,2 МПа у модифицированных). Астралены, равномерно распределяясь по всему объёму цементной матрицы, одновременно работают и как центры кристаллизации гидратных фаз, и как армирующие элементы на наноуровне [21]. Они проникают в поры и микротрещины, заметно улучшая сцепление на границах фаз и создают структуры, которые эффективно препятствуют появлению и развитию дефектов под нагрузкой.

В отличие от них, контрольный образец (рисунок) показывает более упорядоченную, но менее плотную структуру с элементами размером $1,8 \pm 0,2$ мкм, что снижает его прочность.

Наиболее заметные различия проявляются при испытаниях на устойчивость к высокотемпературным воздействиям, имитирующим углеводородный пожар (таблица). Модифицированные образцы демонстрируют значительно большую устойчивость к нагреву: при 300 °С их прочность на 37 % выше, при 400 °С на 38 %, а при 500 °С на 40 % по сравнению с контрольными.

Эта особенность связана с уникальной модифицированной структурой, выявленной с помощью атомно-силовой микроскопии. Шероховатостная поверхность с развитой текстурой ($R_q = 78 \pm 10$ нм) и плотностью наночастиц обеспечивает термозащитные свойства.

Равномерное распределение наночастиц, обладающих высокой термостойкостью, создает пространственную сетку, которая препятствует диффузии водяных паров и продуктов термического разложения цементного камня при повышении температуры. Это снижает внутреннее паровое давление и предотвращает интенсивное растрескивание материала. Контрольный образец с упорядоченной структурой (рисунок а) не имеет такого барьера, что приводит к более быстрой потере влаги и образованию магистральных трещин.

Основная потеря прочности бетона в диапазоне 400–600 °С связана с разложением основных носителей прочности – гидросиликатов кальция (C-S-H геля). Наличие равномерно распределённых наноструктур способствует формированию более плотной и термически стабильной упаковки гидратных фаз уже на стадии твердения. Это замедляет кинетику их дегидратации при нагреве.

Астралены, фиксируемые АСМ как отдельные островки, в объёме материала работают как микроарматура, соединяющая стенки пор и трещин. При термическом напряжении эта арматура удерживает структуру от разрушения, что подтверждается меньшей потерей прочности модифицированных образцов (18,9 % против 29,7 % при 500 °С).

Таким образом, устанавливается прямая корреляционная связь, высокая однородность распределения и развитая удельная поверхность (островковый рельеф по данным АСМ) приводит к повышению прочности в нормальных условиях на 36 % (за счёт уплотнения структуры и наноармирования). Высокая плотность упаковки наноструктур и барьерный эффект приводит к повышению остаточной прочности после нагрева до 500 °С на 40 % (за счёт снижения парового давления и замедления термодеструкции).

Снижение плотности модифицированных образцов на 4–6 % при одновременном росте прочности также объясняется оптимизацией поровой структуры: наночастицы, заполняя дефекты, не утяжеляют материал, а делают его более организованным и устойчивым к внешним воздействиям [22].

Полученные данные позволяют рекомендовать технологию модифицирования астраленами для повышения огнестойкости железобетонных конструкций на объектах повышенной пожарной опасности.

Заключение

Проведённое исследование показало, что астралены перспективны в качестве наномодификатора, позволяющего одновременного повысить огнестойкость цементной матрицы и композитной арматуры в условиях углеводородного пожара – самого опасного сценария для объектов нефтегазового комплекса [23].

Анализ особенностей воздействия углеводородного пожара подтвердил, что традиционные методы повышения огнестойкости железобетонных конструкций в условиях экстремально быстрого нагрева (до 1100–1200 °С уже в первые минуты) работают недостаточно эффективно [24, 25]. Это и определяет актуальность поиска новых решений, в частности, наномодифицирования цементной матрицы углеродными структурами.

Экспериментально установлено, что введение астраленов в концентрации 0,2 об. % обеспечивает равномерное распределение наноструктур размером 80–150 нм по всему объёму бетона. При этом прочность на сжатии в нормальных условиях возрастает на 36 % (до 60,2 МПа), а плотность материала снижается на 4–6 %. При нагреве до 500 °С по режиму углеводородного пожара остаточная прочность модифицированных образцов на 37–40 % выше, чем у контрольных: потеря прочности составляет 18,9 % против 29,7 %. Полученные данные подтверждают эффективность применения астраленов для повышения огнестойкости бетона.

Список источников

1. Дашко Л.В. Методы исследования бетонных конструкций после взрыва и последующего пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 1 (65). С. 193–203.
2. Лукьянов Д.Е. Пожарная безопасность в процессе переработки нефтегазовых продуктов: современные вызовы и решения // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 4 (85). С. 908–914.
3. Аблаева У.Ш., Досалиев К.С., Абдужалилов Х.Б. Прочность и огнестойкость железобетонных конструкций // Экономика и социум. 2025. № 4-2 (131). С. 112–117.
4. Многослойные углеродные нанотрубки и их применение / М.М. Томишко [и др.] // Российский химический журнал. 2008. № 5. С. 3–11.
5. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 25–33.
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Прочность наномодифицированных высокопрочных легких бетонов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2013. Т. 5. № 1. С. 24–38.
7. Ясинская Е.В., Никулин Н.М., Кривцов Е.Е. Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2 (20). С. 29–32.
8. Астралены – углеродные наномодификаторы фуллероидного типа / А.И. Пономарев [и др.] // Труды междунар. конф. ТПКММ. Москва, 2003 г. С. 147–152.
9. Исследование динамической прочности и жесткости изделий из мелкозернистого бетона, модифицированного наноструктурным шунгитовым наполнителем / Г.Э. Шаблинский [и др.] // Вестник МГСУ. 2010. № 2. С. 231–236.
10. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций / О.Л. Ташлыков [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 2 (15). С. 49–55.
11. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. 5-е изд. М.: Издательство АСВ, 2011. 528 с.
12. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

13. Кирсанова А.А. Нанотехнологии в строительстве. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. 47 с.
14. Плотников Д.А., Башева Т.С. Огнестойкость железобетонных конструкций из вторичного сырья // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2017. № 3 (54). С. 57–65.
15. Матвеева Е.Г. Повышение эффективности бетона добавкой нанодисперсного кремнезема: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2011. 196 с.
16. Исследование возможности модификации карбоксилатных пластификаторов в составе модифицированных мелкозернистых бетонных смесей / С.С. Киски [и др.] // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 42–46.
17. Huseien G.F. A Review on Concrete Composites Modified with Nanoparticles // Journal of Composites Science. 2023. № 2. Article 67. DOI: 10.3390/jcs7020067
18. Мелкозернистые модифицированные фибробетоны на основе комплексных модифицирующих добавок / Т.А. Низина [и др.] // VII Ежегод. конф. Нанотехнологического общества России. Москва, 2016. С. 130–133.
19. High performance lightweight concretes for 3D printing / A. Rassokhin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2022. №7.
20. Полимерное связующее, композиционный материал на его основе и способ его изготовления: пат. 2223988 Рос. Федерация: МПК C08L 63/00, B32B 17/10, C08K 3/04/ Е.Н. Каблов [и др.]; заявитель и патентообладатель Всеросс. науч.-исслед. институт авиационных материалов. – № 2001130965/04; заявл. 19.11.2001; опубл. 20.02.2004.
21. Achievements in the field of studying the mechanism and application of nanoparticles to modify their concrete / C. Li [et al.] // Inorganics. 2025. Vol. 13. № 9.
22. Войтович В.А. Нанонаука. Нанотехнология. Наностройматериалы // Приволжский научный журнал. 2008. № 1. С. 14–20.
23. Nanotechnology in fire protection – application and requirements / A. Rabajczyk [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. № 24. P. 7849. DOI: 10.3390/ma14247849
24. A Study on the Properties of Geopolymer Concrete Modified with Nano Graphene Oxide / A.M. Maglad [et al.] // Buildings. 2022. Vol. 12. № 8. Article 1066. DOI: 10.3390/buildings12081066
25. Влияние нанокompозитов SiO₂ и ZnO на механические и химические свойства модифицированного бетона / К.Б. Наяк [и др.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. T. 46. С. 1237–1247.

References

1. Dashko L.V. Metody issledovaniya betonnyh konstrukcij posle vzryva i posleduyushchego pozhara // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 1 (65). S. 193–203.
2. Luk'yanov D.E. Pozharnaya bezopasnost' v processe pererabotki neftegazovyh produktov: sovremennye vyzovy i resheniya // Vestnik nauki. 2025. T. 4. № 4 (85). S. 908–914.
3. Ablaeva U.Sh., Dosaliev K.S., Abduzhalilov H.B. Prochnost' i ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij // Ekonomika i socium. 2025. № 4-2 (131). S. 112–117.
4. Mnogoslojnye uglerodnye nanotrubki i ih primenenie / M.M. Tomishko [i dr.] // Rossijskij himicheskij zhurnal. 2008. № 5. S. 3–11.
5. Ponomarev A.N. Vysokokachestvennye betony. Analiz vozmozhnostej i praktika ispol'zovaniya metodov nanotekhnologii // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2009. № 6. S. 25–33.
6. Inozemcev A.S., Korolev E.V. Prochnost' nanomodifitsirovannyh vysokoprochnyh legkih betonov // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyj internet-zhurnal. 2013. T. 5. № 1. S. 24–38.
7. Yasinskaya E.V., Nikulin N.M., Krivcov E.E. Issledovanie harakteristik nanomodifitsirovannyh suhih stroitel'nyh smesej // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2011. № 2 (20). S. 29–32.
8. Astraleny – uglerodnye nanomodifikatory fulleroidnogo tipa / A.I. Ponomarev [i dr.] // Trudy mezhdunar. konf. TPKMM. Moskva, 2003 g. S. 147–152.

9. Issledovanie dinamicheskoy prochnosti i zhestkosti izdelij iz melkozernistogo betona, modificirovannogo nanostrukturnym shungitovym napolnitelem / G.E. Shablinskij [i dr.] // Vestnik MGSU. 2010. № 2. S. 231–236.
10. Eksperimental'noe issledovanie zashchit ot gamma-izlucheniya organo-metallicheskih kompozicij / O.L. Tashlykov [i dr.] // Global'naya yadernaya bezopasnost'. 2015. № 2 (15). S. 49–55.
11. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona: ucheb. 5-e izd. M.: Izdatel'stvo ASV, 2011. 528 s.
12. Issledovanie ekspluatatsionnyh harakteristik ognезashchitnyh pokrytij na osnove epoksidnyh smol, modificirovannyh astralenami / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvbezopasnost'. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68
13. Kirsanova A.A. Nanotekhnologii v stroitel'stve. Chelyabinsk: Izdatel'skij centr YuUrGU, 2019. 47 s.
14. Plotnikov D.A., Bashevaya T.S. Ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij iz vtorichnogo syr'ya // Nauchnyj vestnik NIIGD Respirator. 2017. № 3 (54). S. 57–65.
15. Matveeva E.G. Povyshenie effektivnosti betona dobavkoj nanodispersnogo kremnezema: dis. ... kand. tekhn. nauk. Belgorod, 2011. 196 s.
16. Issledovanie vozmozhnosti modifikacii karboksilatnyh plastifikatorov v sostave modificirovannyh melkozernistykh betonnyh smesey / S.S. Kiski [i dr.] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2012. № 8 (34). S. 42–46.
17. Huseien G.F. A Review on Concrete Composites Modified with Nanoparticles // Journal of Composites Science. 2023. № 2. Article 67. DOI: 10.3390/jcs7020067
18. Melkozernistye modificirovannye fibrobetony na osnove kompleksnyh modificiruyushchih dobavok / T.A. Nizina [i dr.] // VII Ezhegod. konf. Nanotekhnologicheskogo obshchestva Rossii. Moskva, 2016. S. 130–133.
19. High performance lightweight concretes for 3D printing / A. Rassokhin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2022. №7.
20. Polimernoe svyazuyushchee, kompozicionnyj material na ego osnove i sposob ego izgotovleniya: pat. 2223988 Ros. Federaciya: MPK C08L 63/00, B32B 17/10, C08K 3/04/ E.N. Kablov [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' Vseross. nauch.-issled. institut aviacionnyh materialov. – № 2001130965/04; zayavl. 19.11.2001; opubl. 20.02.2004.
21. Achievements in the field of studying the mechanism and application of nanoparticles to modify their concrete / C. Li [et al.] // Inorganics. 2025. Vol. 13. № 9.
22. Vojtovich V.A. Nanonauka. Nanotekhnologiya. Nanostrojmaterialy // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2008. № 1. S. 14–20.
23. Nanotechnology in fire protection – application and requirements / A. Rabajczyk [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. № 24. P. 7849. DOI: 10.3390/ma14247849
24. A Study on the Properties of Geopolymer Concrete Modified with Nano Graphene Oxide / A.M. Maglad [et al.] // Buildings. 2022. Vol. 12. № 8. Article 1066. DOI: 10.3390/buildings12081066
25. Vliyanie nanokompozitov SiO₂ i ZnO na mekhanicheskie i himicheskie svojstva modificirovannogo betona / K.B. Nayak [i dr.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. T. 46. S. 1237–1247.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 09.04.2026; одобрена после рецензирования: 24.05.2026;
принята к публикации: 26.05.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 09.04.2026; approved after review: 24.05.2026;
accepted for publication: 26.06.2026

Информация об авторах:

Пылаева Елизавета Андреевна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: elizavetapylaeva2001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6753-0908>, SPIN-код: 1479-0786

Information about authors:

Pylaeva Elizaveta A., adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: elizavetapylaeva2001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6753-0908>, SPIN: 1479-0786
