

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Аналитическая статья

УДК 614.841.343:620.3; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-2-33-37

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

✉ Демидов Николай Дмитриевич;

Сорокин Игорь Александрович;

Емельянова Анна Николаевна.

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

✉ demidov.nd@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования термической стабильности и огнезащитной эффективности эпоксидных вспучивающихся огнезащитных составов, модифицированных углеродными наноструктурами (астраленами) в концентрации 0,2 % об., до и после криогенного воздействия. Термогравиметрическим анализом установлено увеличение выхода коксового остатка при 800 °С на 90 % для модифицированного состава по сравнению с немодифицированным. Огневые испытания в условиях факельного углеводородного горения показали повышение времени прогрева стальной пластины до 500 °С на 11,1 % для модифицированного состава и на 28,6 % после криогенного воздействия. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения наномодифицированных покрытий для повышения безопасности технологических процессов на объектах нефтегазового комплекса, подверженных риску аварийных проливов криогенных жидкостей с последующим пожаром.

Ключевые слова: огнезащитные вспучивающиеся составы, эпоксидные смолы, углеродные наноструктуры, астралены, криогенное воздействие, термогравиметрический анализ, остаточная масса коксового слоя, огнезащитная эффективность, нефтегазовый комплекс.

Для цитирования: Демидов Н.Д., Сорокин И.А., Емельянова А.Н. Повышение безопасности технологических процессов нефтегазового комплекса в условиях криогенного воздействия // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2026. № 2. С. 33–37. DOI: 10.61260/2304-0130-2026-2-33-37

Введение

Развитие нефтегазового комплекса Российской Федерации, включая реализацию крупных проектов по добыче, сжижению и транспортировке углеводородов в Арктической зоне (например, «Ямал СПГ», «Арктик СПГ-2»), сопряжено с эксплуатацией объектов криогенной инфраструктуры. Несущие стальные конструкции таких объектов (резервуары, трубопроводы, опорные платформы) подвергаются двойному экстремальному воздействию: криогенным температурам (до –162 °С при хранении сжиженного природного газа и возможных аварийных проливах) и высокотемпературному нагреву при пожаре (свыше +1100 °С в углеводородном режиме) [1, 2].

Традиционные вспучивающиеся огнезащитные составы (ОВС) на основе эпоксидных смол эффективны в стандартных условиях, однако под воздействием криогенного «удара» проявляют снижение термической стабильности: образование микротрещин, уменьшение выхода коксового остатка и ускоренную деструкцию пенококсового слоя при последующем пожаре [3, 4]. Это приводит к преждевременному прогреву металла до критических температур (+500 °С), потере несущей способности конструкций и росту риска техногенных катастроф.

Перспективным направлением решения проблемы является наноструктурное модифицирование полимерной матрицы углеродными наноструктурами – астраленами [5], обладающими высокой удельной поверхностью, теплопроводностью и способностью к формированию упрочненной структуры композита [6]. Введение астраленов позволяет повысить термическую стабильность и барьерные свойства вспученного слоя.

Цель работы – экспериментальная оценка влияния модификации астраленами на термическую стабильность и огнезащитную эффективность эпоксидного ОВС до и после криогенного воздействия в контексте повышения безопасности технологических процессов нефтегазового комплекса.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на базе серийного эпоксидного вспучивающегося огнезащитного состава «ТЕРМОБАРЬЕР-2». Астралены вводились в отвердитель в концентрации 0,2 %об. с использованием ультразвуковой диспергации. Образцы наносили на стальные пластины Ст3. Часть образцов подвергалась криогенному воздействию – полному погружению в жидкий азот на 10 минут.

Термическая стабильность оценивалась методом термогравиметрического анализа (ТГА) в воздушной среде в диапазоне 50–800 °С. Огнезащитная эффективность определялась по времени прогрева обратной стороны пластины до 500 °С в условиях моделирования факельного углеводородного горения по ГОСТ Р 53295-2009 [7].

Результаты исследования

Результаты термогравиметрического анализа ключевых образцов приведены в табл. 1 и на рис. 1–3.

Таблица 1

Параметры термического разложения исследуемых образцов

Образец	Температура начала 1-го эффекта, °С	Температура начала 2-го эффекта, °С	Температура начала 3-го эффекта, °С	Остаточная масса при 800 °С, %
ТБ 2 (немодифицированный)	157	292	581	31
ТБ 2 + 0,2 % астраленов	126	248	587	59
ТБ 2 + 0,2 % астраленов после криогена	159	292	582	26

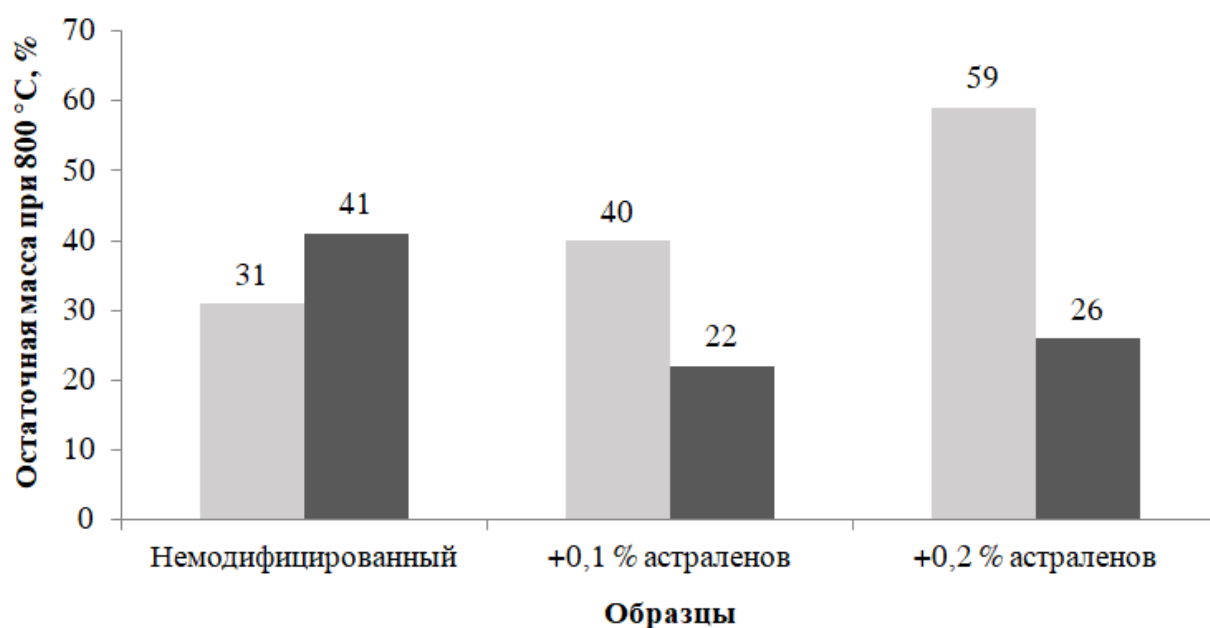


Рис. 1. Гистограмма остаточной массы коксового остатка при 800 °C

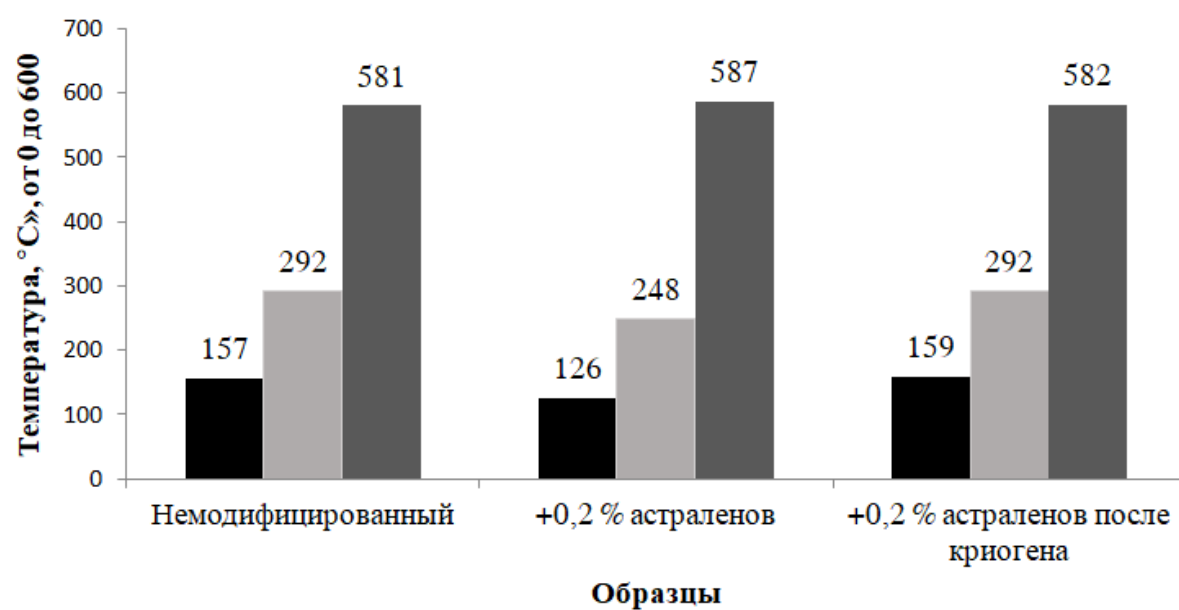


Рис. 2. Гистограмма температур начала основных термических эффектов

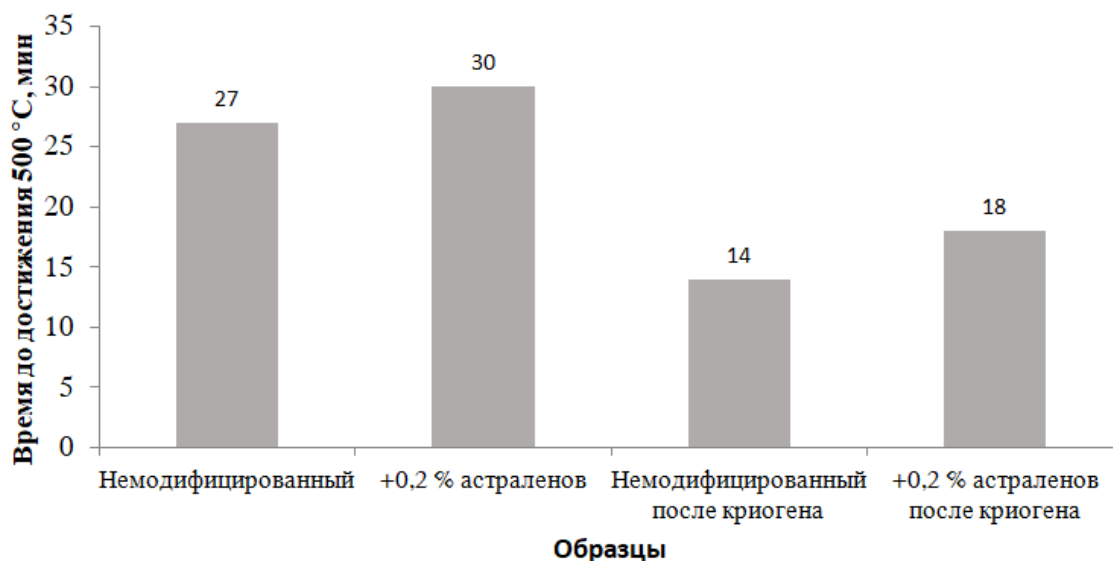


Рис. 3. Гистограмма огнезащитной эффективности (время до достижения 500 °C на обратной стороне стальной пластины в условиях факельного горения)

Обсуждение результатов

Анализ термогравиметрических данных свидетельствует о комплексном влиянии астраленов на процесс термического разложения эпоксидной матрицы. Наибольший выход коксового остатка (59 %) зафиксирован для состава с 0,2 % об. астраленов, что на 90 % превышает значение немодифицированного аналога (31 %). Это обусловлено каталитическим действием наночастиц, интенсифицирующим процессы карбонизации и формирования термостабильного пенококсового слоя [8].

В ходе эксперимента отмечено смещение температур начала термических эффектов у модифицированных образцов, что напрямую связано с высокой теплопроводностью астраленов и ускорением начальной дегидратации [9]. После криогенного воздействия выход коксового остатка снижается во всех составах, но у модифицированных этот спад выражен значительно слабее — наноармирование повышает трещиностойкость матрицы и сохраняет структуру пенококкса.

Огневые испытания полностью подтверждают данные ТГА: время огнезащиты растёт на 11,1 % в обычных условиях и на 28,6 % после криогенного шока. Улучшенные барьерные свойства вспученного слоя заметно замедляют прогрев стальной конструкции, что критически важно при аварийных сценариях на объектах нефтегазового комплекса [10].

Заключение

Модификация эпоксидного вспучивающегося огнезащитного состава астраленами в концентрации 0,2 % об. существенно повышает термическую стабильность и огнезащитную эффективность. Экспериментально подтверждено увеличение выхода коксового остатка на 90 % при 800 °C, а также рост времени прогрева стальной пластины до 500 °C на 11,1 % в стандартных условиях и на 28,6 % после криогенного воздействия.

Полученные результаты показывают, что наномодифицированные покрытия особенно эффективны в условиях двойного экстремального воздействия (криоген + пожар), характерного для объектов Арктики и СПГ-проектов. Применение таких составов позволит снизить риск преждевременного разрушения несущих конструкций и повысить общую безопасность технологических процессов нефтегазового комплекса. Полученные данные обосновывают необходимость проведения дальнейших опытно-промышленных испытаний для широкого внедрения технологии.

Список источников:

1. Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года. С прогнозом до 2036 г.: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 28 дек. 2024 г. № 4146-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Копылов П.С., Головина Е.В., Калач А.В. Оценка поведения огнезащитных покрытий в поле температур от –162 до +1300 °С // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 98. № 1. С. 54–61.
3. Гравит М.В., Недвига Е.С., Фридрих О.А. Воздействие криогенных сред и струйного горения на эпоксидные интумесцентные композиции // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 6. С. 44–52.
4. Зыбина О.А., Гравит М.В. Вспучивающиеся покрытия для огнезащиты строительных конструкций и материалов. // Springer International Publishing. 2020. Т. 11. С. 210.
5. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A.I. Shames [et al.] // Diamond and Related Materials. 2009. Vol. 8. No. 2–3. P. 505–510.
6. Углеродные наночастицы, структурные модификаторы и упрочнители полимеров и полимерных композитов / Г.М. Гуляев [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 2. С. 36–54.
7. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащитные для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Сорокин И.А., Демидов Н.Д. Обеспечение эксплуатационных характеристик огнезащитных вспучивающихся составов для металлоконструкций на объектах транспортировки жидкого водорода // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2025. № 4 (56). С. 70–75.
9. Лоран Н.М., Циркина О.Г., Пустовалов И.А. Исследование эксплуатационных характеристик вспучивающегося огнезащитного покрытия, модифицированного углеродными наноструктурами // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (37). С. 104–110.
10. Гравит М.В., Клеменьев Б.А., Шабунина Д.Е. Огнестойкость стальных конструкций с эпоксидной огнезащитой при криогенном воздействии // Портал про пожарную безопасность. 2022. URL: <https://propb.ru/articles/blog-gravit-m-v/ognestoykost-stalnykh-konstruktsiy-s-epoksidnoy-ognezashchitoy-pri-kriogenom-vozdeystvii/> (дата обращения: 17.03.2026)

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 21.04.2026; принята к публикации: 28.04.2026

Информация об авторах:

Демидов Николай Дмитриевич, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: demidov.nd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4091-2722>, SPIN-код: 2014-5353, AuthorID: 1327717.

Сорокин Игорь Александрович, кандидат технических наук, начальник кафедры «Пожарная безопасность технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: igor_40in@mail.ru, SPIN-код: 8002-4750, AuthorID: 860800

Емельянова Анна Николаевна, старший преподаватель кафедры «Пожарная безопасность технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: anna.nik.00@yandex.ru, SPIN-код: 4286-6170, AuthorID: 791924