

Научная статья

УДК 614.841.343; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-4-70-75

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕЗАЩИТНЫХ ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ СОСТАВОВ ДЛЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

✉ Сорокин Игорь Александрович;

Демидов Николай Дмитриевич.

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

✉ [igor\\_40in@mail.ru](mailto:igor_40in@mail.ru)

**Аннотация.** Рассматриваются проблемы обеспечения эксплуатационных характеристик огнезащитных вспучивающихся составов для металлоконструкций в условиях транспортировки жидкого водорода. Показано влияние длительного низкотемпературного воздействия (до -253 °C) и риска высокотемпературного пожара. Представлены результаты экспериментальных исследований модификации эпоксидного огнезащитного вспучивающегося состава «Термобарьер-2» углеродными наночастицами (астраленами) в концентрациях 0,1–1,0 % от общего объема. Установлено, что введение астраленов в количестве 0,2 % от общего объема обеспечивает максимальное увеличение адгезионной прочности на 19,6 %, а концентрация 1,0 % от общего объема повышает огнезащитную эффективность на 44,4 % по сравнению с базовым составом. Применение наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся составов рассматривается для комплексной защиты объектов водородной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** огнезащитные вспучивающиеся составы, металлоконструкции, жидкий водород, криогенные температуры, углеродные наночастицы, астралены, термическая стабильность, адгезионная прочность

**Для цитирования:** 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. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-4-70-75.

Scientific article

## ENSURING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF INTUMESCENT FIRE-RETARDANT COMPOSITIONS FOR METAL STRUCTURES AT LIQUID HYDROGEN TRANSPORTATION FACILITIES

✉ Sorokin Igor A.;

Demidov Nikolay D.

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

✉ [igor\\_40in@mail.ru](mailto:igor_40in@mail.ru)

**Abstract.** The problems of ensuring the performance characteristics of intumescent fire-retardant compositions for metal structures in the conditions of liquid hydrogen transportation are considered. The influence of long-term low-temperature exposure (down to -253 °C) and the risk of high-temperature fire is shown. The results of experimental studies on the modification of epoxy IFC «Termobarrier-2» with carbon nanoparticles (astralenes) at concentrations of 0,1–1,0 % vol. are presented.

It was found that the introduction of 0,2 % vol. astralenes provides a maximum increase in adhesive strength by 19,6 %, and a concentration of 1,0 % vol. increases the fire retardant efficiency by 44,4 % compared to the base composition. The use of nanomodified IFC is considered for the comprehensive protection of hydrogen infrastructure facilities.

Keywords: intumescence fire-retardant compositions, metal structures, liquid hydrogen, cryogenic temperatures, carbon nanoparticles, astralenes, thermal stability, adhesive strength

**For citation:** Sorokin I.A., Demidov N.D. Ensuring the performance characteristics of intumescence fire-retardant compositions for metal structures at liquid hydrogen transportation facilities // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2025. № 4 (56). P. 70–75. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-4-70-75.

## Введение

Развитие водородной энергетики является направлением технологического развития Российской Федерации, что отражено в Концепции развития водородной энергетики [1]. Создание инфраструктуры для транспортировки и хранения жидкого водорода (LH<sub>2</sub>) связано с задачами в области пожарной безопасности. Металлоконструкции таких объектов, к которым относятся резервуары, криогенные трубопроводы и несущие элементы, в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию двух факторов. С одной стороны, это длительное низкотемпературное воздействие при температурах до -253 °C, обусловленное нормальными условиями эксплуатации и возможными аварийными проливами LH<sub>2</sub>. Воздействие данного фактора приводит к термическим напряжениям в материалах, их хрупкому разрушению и потере адгезии, что характерно для традиционных огнезащитных покрытий [2, 3]. С другой стороны, существует риск возникновения пожаров с высокотемпературным режимом горения водорода, при этом скорости распространения пламени превышают аналогичные показатели для углеводородов [4]. В связи с этим, огнезащитные составы, применяемые на объектах данного типа, должны сохранять целостность и функциональность после длительного пребывания в криогенных условиях и при последующем тепловом ударе. Традиционные огнезащитные вспучивающиеся составы (OBC) на основе эпоксидных смол, демонстрируя хорошую адгезию и антакоррозионные свойства в стандартных условиях, не всегда отвечают указанным требованиям [5]. Направлением решения данной проблемы является модификация OBC углеродными наноструктурами, которые могут улучшить физико-механические и теплофизические свойства материалов за счет эффекта наноармирования [6, 7]. Целью настоящего исследования является оценка влияния углеродных наночастиц на эксплуатационные характеристики ОВС в условиях, моделирующих аварийные ситуации на объектах транспортировки жидкого водорода.

## Методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран промышленный огнезащитный вспучивающий состав «ТЕРМОБАРЬЕР-2» (ООО НПК «ОгнеХимЗащита»), разработанный на основе эпоксидных смол с применением отвердителя холодного отверждения. Модификация состава осуществлялась путем введения углеродных наноструктур – астраленов в компонент отвердителя, при этом концентрация варьировалась в диапазоне от 0,1 до 1 % от общего объема. В качестве образцов использовались стандартные стальные пластины марки Ст3 с размерами 100 × 50 × 6 мм. На подготовительном этапе отдельные образцы подвергались длительному низкотемпературному воздействию, для чего выполнялось их полное погружение в жидкий азот на 10 мин, что позволило смоделировать условия аварийного пролива криогенной жидкости.

Огнезащитная эффективность: испытания проводились на лабораторной установке, моделирующей условия факельного углеводородного горения [8]. Критерием предельного

состояния, в соответствии с ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования», считалось достижение защищаемой стальной пластиной температуры 500 °С.

Адгезионная прочность: оценка адгезионной прочности покрытий выполнялась методом отрыва в соответствии с требованиями ГОСТ 32299-2013 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва» и международного стандарта ISO 4624:2002 «Paints and varnishes – Pull-off test for adhesion». Для каждого образца проводилось пять измерений на трех идентичных образцах с последующим расчетом среднеарифметического значения.

## Результаты исследований

Проведенные исследования показали, что наибольшие значения адгезионной прочности имеют огнезащитные покрытия, модифицированные астраленами в концентрации 0,2 % от общего объема (рис.). Для оптимальной концентрации 0,2 % от общего объема увеличение адгезионной прочности составило 19,6 % по сравнению с базовым составом. При этом криогенное воздействие приводит к значительному снижению адгезии для всех модифицированных образцов (табл. 1).

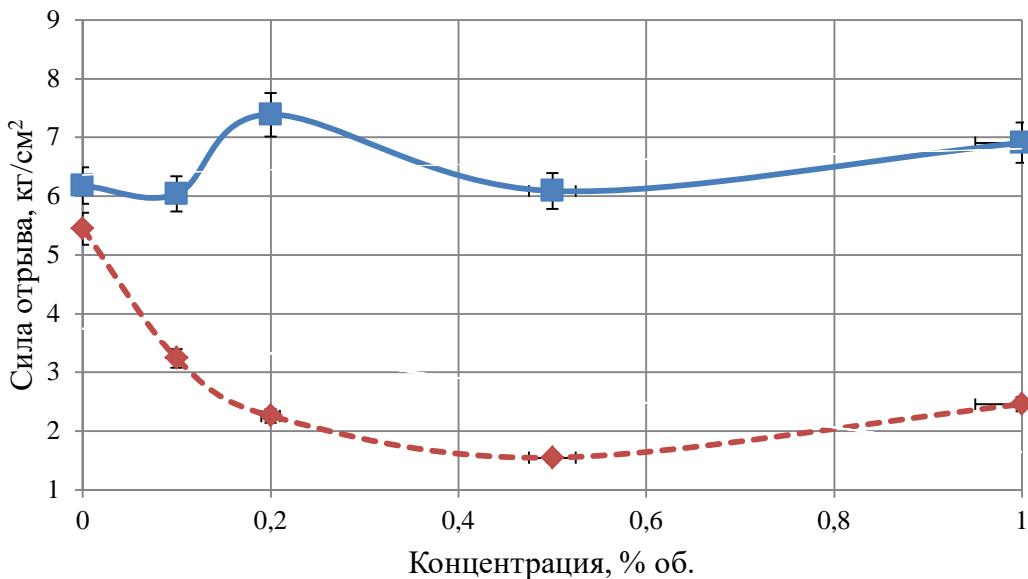


Рис. Зависимость адгезионной прочности от концентрации астраленов

Таблица 1  
Результаты исследования адгезионной прочности

Образец	Концентрация Astr, % об.	Криогенное воздействие	Адгезионная прочность, МПа	Изменение к базовому образцу, %
1	0	Нет	$6,18 \pm 0,3$	0
2	0	Да	$5,45 \pm 0,2$	-11,8
3	0,1	Нет	$6,04 \pm 0,3$	-2,3
4	0,1	Да	$3,24 \pm 0,3$	-47,6
5	0,2	Нет	$7,39 \pm 0,2$	+19,6
6	0,2	Да	$2,26 \pm 0,3$	-63,4
7	0,5	Нет	$6,09 \pm 0,3$	-1,5
8	0,5	Да	$1,55 \pm 0,2$	-74,9
9	1,0	Нет	$6,91 \pm 0,3$	+11,8
10	1,0	Да	$2,46 \pm 0,2$	-60,2

Зависимость адгезионной прочности от концентрации астраленов описывается полиномиальной функцией второго порядка с максимумом в области 0,2 % от общего объема. Для образцов без криогенного воздействия:

$$P(c) = -1,25c^2 + 2,95c + 6,18, \quad (1)$$

где  $P$  – адгезионная прочность (МПа);  $c$  – концентрация астраленов (% об.)

Результаты исследования огнезащитной эффективности показали, что включение астраленов в состав системы ОВС повышает её эффективность. Наибольший эффект наблюдался при содержании астраленов в отвердителе 1,0 % от общего объема, где время до достижения предельного состояния увеличилось на 44,4 % по сравнению с базовым составом. После криогенного воздействия образец с концентрацией 1,0 % от общего объема, также показывает наилучший результат – 32 мин (+18,5 %). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты испытаний огнезащитной эффективности

Образец	Концентрация Astr, % об.	Криогенное воздействие	Время до 500 °C, мин	Изменение к базовому образцу, %
1	0	Нет	27	0
2	0	Да	14	-48,1
3	0,1	Нет	29	+7,4
4	0,1	Да	17	-37,0
5	0,2	Нет	27	0
6	0,2	Да	18	-33,3
7	0,5	Нет	36	+33,3
8	0,5	Да	28	+3,7
9	1,0	Нет	39	+44,4
10	1,0	Да	32	+18,5

Зависимость времени до достижения критической температуры от концентрации астраленов также имеет экстремальный характер с максимумом при 0,2 % от общего объема:

$$T(c) = 7,5c^2 - 3,5c + 27, \quad (2)$$

где  $T$  – время до 500°C (мин);  $c$  – концентрация астраленов (% об.).

### Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные показывают, что модификация эпоксидного ОВС астраленами повышает его эксплуатационные характеристики для применения на объектах транспортировки жидкого водорода. Наилучшие показатели адгезионной прочности демонстрирует состав с концентрацией астраленов 0,2 % от общего объема, в то время как максимальная огнезащитная эффективность достигается при концентрации 1,0 % от общего объема. Улучшение адгезии после длительного низкотемпературного воздействия объясняется эффектомnanoармирования [7], в результате чего углеродные частицы создают дополнительный каркас в полимерной матрице, препятствующий развитию трещин и компенсирующий напряжение, возникающее из-за разницы коэффициентов термического расширения. Однако криогенное воздействие приводит к значительному снижению адгезии для всех модифицированных образцов, что требует дополнительных исследований для оптимизации состава. Повышение огнезащитной эффективности связано с улучшением структуры вспученного слоя и его устойчивости к эрозии. Астралены, выступая центрами карбонизации, способствуют формированию более прочного и сплошного теплоизолирующего слоя [9]. Увеличение срока службы покрытия и его стойкости

к экстремальным воздействиям позволяет сократить частоту ремонтных циклов и повторного нанесения ОВС, что минимизирует риски загрязнения окружающей среды в чувствительных регионах, таких как Арктика, где часто располагается инфраструктура для производства и отгрузки водорода. Таким образом, наномодифицированный состав демонстрирует стойкость к длительному низкотемпературному и высокотемпературному поражающему фактору, что соответствует требованиям водородной безопасности [4].

## Выводы

Модификация огнезащитного вспучивающего состава «ТЕРМОБАРЬЕР-2» углеродными наночастицами (астраленами) в концентрации 0,2 % от общего объема повышает его адгезионную прочность к стальной подложке на 19,6 % по сравнению с базовым составом. Однако после криогенного воздействия наблюдается значительное снижение адгезии для всех модифицированных образцов. Наибольшее увеличение огнезащитной эффективности на 44,4 % достигнуто для состава с 1,0 % от общего объема астраленов. Состав сохраняет высокие показатели и после криогенного воздействия, где прирост стойкости достигает 18,5 %. Применение разработанного наномодифицированного состава с оптимальной концентрацией 0,2 % от общего объема рассматривается для защиты металлоконструкций объектов инфраструктуры жидкого водорода, работающих в условиях риска длительного низкотемпературного и высокотемпературного пожарного воздействия.

## Список источников

1. Об утверждении Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 12 окт. 2020 г. № 2634-р. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
2. 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.
3. Оценка поведения огнезащитных покрытий в поле температур от -162 до +1300 °C / П.С. Копылов [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 98. № 1. С. 54–61.
4. Molkov V. Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering. Parts I and II. 2012.
5. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68.
6. Пчельников А.В., Пичугин А.П. Наномодификация защитных покрытий металлических конструкций и оборудования для обеспечения эксплуатационной стойкости // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 116–120.
7. Carbon nanoparticles, structural modifiers and hardeners of polymers and polymer composites / S.I. Ilchenko [et al.] // Aviation Materials and Technologies. 2004. № 2. Р. 36–54.
8. Цой А.А. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 134 с.
9. Bourbigot S., Le Bras M., Delobel R. Carbonization mechanisms resulting from intumescence association with the ammonium polyphosphate-pentaerythritol fire retardant system // Carbon. 1993. Т. 31. № 8. Р. 1219–1230.

## References

1. Ob utverzhdenii Koncepcii razvitiya vodorodnoj energetiki v Rossiijskoj Federacii: rasporyazhenie Praviteľstva Ros. Federacii ot 12 okt. 2020 g. № 2634-р. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
2. Gravit M.V., Nedviga E.S., Fridrih O.A. Vozdejstvie kriogennyh sred i strujnogo gorenija na epoksidnye intumescentnye kompozicii // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. 2024. № 6.

3. Ocenna povedeniya ognezashchitnyh pokrytij v pole temperatur ot -162 do +1300 °C / P.S. Kopylov [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 2020. T. 98. № 1. S. 54–61.
4. Molkov V. Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering. Parts I and II. 2012.
5. Issledovanie ekspluatacionnyh harakteristik ognezashchitnyh pokrytij na osnove epoksidnyh smol, modificirovannyh astralenami / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68.
6. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P. Nanomodifikaciya zashchitnyh pokrytij metallicheskikh konstrukcij i oborudovaniya dlya obespecheniya ekspluatacionnoj stojkosti // Ekspert: teoriya i praktika. 2023. № 1 (20). S. 116–120.
7. Carbon nanoparticles, structural modifiers and hardeners of polymers and polymer composites / S.I. Ilchenko [et al.] // Aviation Materials and Technologies. 2004. № 2. P. 36–54.
8. Coj A.A. Metodika opredeleniya effektivnosti ognezashchitnyh pokrytij dlya stal'nyh konstrukcij v usloviyah fakel'nogo uglevodorodnogo goreniya: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2017. 134 s.
9. Bourbigot S., Le Bras M., Delobel R. Carbonization mechanisms resulting from intumescence association with the ammonium polyphosphate-pentaerythritol fire retardant system // Carbon. 1993. T. 31. № 8. P. 1219–1230.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 21.09.2025; одобрена после рецензирования: 10.11.2025; принята к публикации: 19.11.2025

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 21.09.2025; approved after review: 10.11.2025; accepted for publication: 19.11.2025

**Информация об авторах:**

**Сорокин Игорь Александрович**, начальник кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, доцент кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: igor\_40in@mail.ru, SPIN-код: 8002-4750

**Демидов Николай Дмитриевич**, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: demidov.nd@mail.ru

*Information about the authors:*

**Sorokin Igor A.**, head of the department of fire safety of technological processes and production, associate professor of the physical and chemical foundations of combustion and extinguishing processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: igor\_40in@mail.ru, SPIN: 8002-4750

**Demidov Nikolai D.**, adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: demidov.nd@mail.ru