
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Научная статья

УДК 614.842.61; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-3-6-14

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРОШКОВЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИВШЕГОСЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

✉Проценко Татьяна Валерьевна;

Остапова Мария Викторовна;

Калимуллина Ирина Фирузовна;

Сагиров Эдуард Анасович.

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

✉89236213028@mail.ru

Аннотация. Проведенные лабораторные исследования подтвердили высокую эффективность разработанного метода снижения интенсивности испарения сжиженных природных газов. Применение жидкого азота в качестве безопасного модельного вещества обеспечило получение достоверных количественных оценок динамики испарения без риска для исследователей. В ходе экспериментов установлено, что использование базальтовой ткани с нанесёнными порошковыми покрытиями способствует значительному снижению теплового потока к поверхности испаряющейся жидкости, формируя дополнительный теплоизоляционный барьер. Это, в свою очередь, уменьшает образование горючих паровоздушных смесей и снижает вероятность их воспламенения в аварийных ситуациях.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация состава порошковых материалов для повышения их теплоизоляционных свойств и устойчивости к различным условиям эксплуатации. Развитие предложенной технологии откроет возможности для создания более эффективных и доступных способов ликвидации аварийных разливов сжиженных природных газов, что будет способствовать существенному повышению уровня промышленной безопасности при транспортировке и хранении сжиженных газов.

Ключевые слова: жидкий азот, базальтовая ткань, порошковые материалы, теплоизоляционный барьер, ликвидация аварий, интенсивность испарения

Для цитирования: Оценка эффективности порошковых составов для создания изолирующих покрытий на поверхности разлившегося сжиженного природного газа / Т.В. Проценко [и др.] // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2025. № 3 (55). С. 6–14. DOI: 10.61260/2304-0130-2025-3-6-14.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF POWDER COMPOSITIONS FOR CREATING INSULATING LAYERS ON THE SURFACE OF SPILLED LIQUEFIED NATURAL GAS

✉Protsenko Tatyana V.;

Ostapova Mariya V.;

Kalimullina Irina F.;

Sagirov Eduard A.

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

✉89236213028@mail.ru

Abstract. The conducted laboratory studies confirmed the high efficiency of the developed method for reducing the evaporation rate of liquefied natural gases. The use of liquid nitrogen as a safe model substance provided reliable quantitative assessments of evaporation dynamics without risk to the researchers. The experiments established that the application of basalt fabric with deposited powder coatings significantly reduces the heat flux to the surface of the evaporating liquid, creating an additional thermal insulation barrier. This, in turn, reduces the formation of flammable vapor-air mixtures and lowers the probability of their ignition in emergency situations.

A promising direction for further research is the optimization of the powder material composition to enhance their thermal insulation properties and resistance to various operating conditions. The development of the proposed technology will open up opportunities for creating more effective and affordable methods for emergency liquefied natural gases spill response, which will contribute to a significant increase in the level of industrial safety during the transportation and storage of liquefied gases.

Keywords: liquid nitrogen, basalt fabric, powder materials, thermal insulation barrier, emergency response, evaporation rate

For citation: Evaluation of the effectiveness of powder compositions for creating insulating coatings on the surface of spilled liquefied natural gas / T.V. Protsenko [et al.] // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)* = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2025. № 3 (55). P. 6–14. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-3-6-14.

Введение

Бурное развитие мировой энергетики и переориентация логистических потоков в XXI в. привели к значительному росту производства и транспортировки сжиженного природного газа (СПГ). Россия, как один из ключевых игроков на мировом энергетическом рынке, активно наращивает мощности в этой области, что является стратегически важным для укрепления экономики и обеспечения энергобезопасности. Однако интенсификация этих процессов неизбежно сопровождается увеличением рисков возникновения аварийных ситуаций на всех этапах – от производства до хранения и перевозки. Наиболее вероятными и опасными из них являются разливы и утечки криогенной жидкости.

Главную опасность при аварийном разливе СПГ представляет его интенсивное испарение, обусловленное значительной разностью температур между жидкостью (около – 162 °С) и окружающей средой. Высокая скорость фазового перехода приводит к быстрому формированию обширных облаков горючих паров, которые, смешиваясь с воздухом, образуют легковоспламеняющиеся и взрывоопасные смеси. Данные облака могут распространяться на значительные расстояния от места разлива, создавая прямую угрозу для жизни персонала, целостности промышленных объектов, инфраструктуры и населения прилегающих территорий. Воспламенение такого облака от любого источника воспламенения, искры, открытого огня, нагретой поверхности – способно привести

к масштабному пожару или мощному взрыву с катастрофическими последствиями. Таким образом, проблема оперативного подавления испарения СПГ переходит из сугубо технической в категорию задач первостепенной важности, направленных на обеспечение промышленной и экологической безопасности [1].

В связи с этим, актуальной научно-практической задачей является разработка и совершенствование эффективных методов и средств, направленных на активное подавление испарения СПГ в аварийных ситуациях. Снижение интенсивности фазового перехода позволяет решить несколько критически важных задач: существенно уменьшить объем образующихся горючих паров, снизить вероятность достижения ими нижнего концентрационного предела воспламенения, выиграть необходимое время для проведения эффективных аварийно-спасательных работ и, в конечном счете, минимизировать совокупные риски.

Современная научная практика предлагает ряд подходов для решения этой проблемы. К ним относится применение пассивных теплоизоляционных материалов, создающих барьер на пути теплового потока из окружающей среды. Другим направлением является использование порошковых сорбентов, которые формируют физический экран, адсорбируют жидкость и за счет гидрофобных свойств препятствуют теплообмену. Также исследуются методы активного воздействия, такие как создание механических барьеров (модульных панелей, надувных ограждений) для локализации парового облака и применение инертных пен. Однако многие из этих методов имеют существенные ограничения, связанные с высокой ресурсоемкостью, сложностью оперативного применения в полевых условиях, особенно в суровом климате, или низкой эффективностью при больших объемах разлива.

Учитывая эти ограничения, особый интерес представляют комплексные пассивные методы, сочетающие в себе простоту применения, мобильность и высокую эффективность. Одним из таких перспективных подходов является использование композитных материалов на основе текстильного теплоизоляционного материала и функционального порошкового покрытия. В качестве идеального полотна зарекомендовала себя базальтовая ткань, обладающая выдающейся термостойкостью, низкой теплопроводностью, химической инертностью и механической прочностью. Нанесенный на нее порошковый состав призван создать дополнительный теплоизолирующий и барьерный слой для снижения интенсивности испарения.

Для безопасного моделирования и изучения процессов испарения криогенных жидкостей в лабораторных условиях широко используется жидкий азот. Его физико-химические свойства (температура кипения $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, интенсивность испарения) аналогичны таковым у СПГ, что делает его идеальной и безопасной модельной средой для проведения натуральных экспериментов.

Целью данного исследования является экспериментальная оценка эффективности применения композитных материалов на основе базальтовой ткани с нанесенными порошковыми составами для снижения интенсивности испарения сжиженного природного газа. Для достижения этой цели в работе использовался жидкий азот в качестве модельного криогенного агента.

Задачи исследования включали:

- подготовку экспериментальных образцов композитных покрытий на основе базальтовой ткани с различными соотношениями порошковых компонентов (кварцевый песок SiO_2 и связующая добавка – силикат натрия Na_2SiO_3);
- проведение серии лабораторных экспериментов и сравнительный анализ полученных данных по интенсивности испарения для различных составов и контрольного опыта (свободное испарение);
- обобщение результатов и оценку перспективности предложенного метода для практического применения в системах обеспечения пожарной безопасности на объектах хранения и транспортировки СПГ.

Проведенная работа направлена на разработку доступного, технологичного и эффективного средства оперативного реагирования, призванного повысить уровень защищенности критически важных объектов нефтегазового комплекса.

Материалы и методы исследования

В качестве основного объекта исследования выступил процесс испарения сжиженного природного газа, однако в целях безопасности лабораторных экспериментов в качестве его модельного аналога использовался жидкий азот. Выбор был обусловлен схожестью их ключевых физико-химических характеристик, в первую очередь, температуры кипения и высокой скорости фазового перехода, что позволяет экстраполировать полученные данные на поведение СПГ при аварийном разливе [2].

Материалами для создания исследуемых композитных покрытий послужили базальтовая ткань и порошковые составы. Базальтовая ткань была выбрана как термостойкий, химически инертный и механически прочный материал с низким коэффициентом теплопроводности, выполняющий функцию основного теплоизолирующего барьера. В качестве активных порошковых компонентов применялись кварцевый песок (SiO_2), обладающий гидрофобными свойствами, и водный раствор силиката натрия (Na_2SiO_3), выступающий в роли связующей добавки [3, 4].

Было приготовлено три экспериментальных образца композитных покрытий (табл.). Составы варьировались по массовому соотношению порошковых компонентов к связующему веществу: образец А (65 %), образец В (50 %) и образец С (35 %).

Таблица

Порошковые составы, используемые в исследовании

№ п/п	Наименование порошкового сорбционного состава	Соотношение концентраций порошковых составов к связующим добавкам, %
1	А	65
2	В	50
3	С	35

Процесс приготовления заключался в тщательном смешивании сухого кварцевого песка с раствором силиката натрия при комнатной температуре до получения однородной массы, которая затем равномерным слоем наносилась на поверхность базальтовой ткани. Представлено на рис. 1, 2.



Рис. 1. Подготовленные экспериментальные образцы порошковых составов

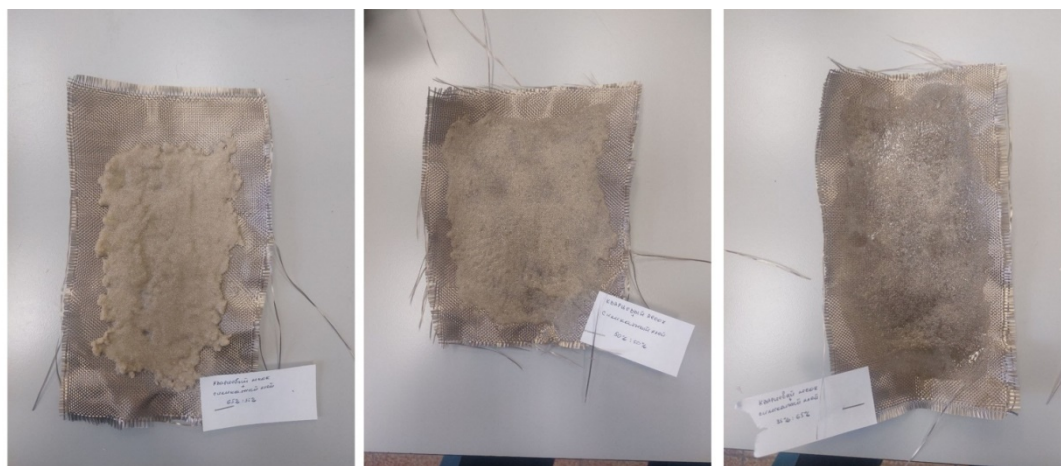


Рис. 2. Образцы порошковых составов на базальтовой ткани (слева направо: А, В, С)

Методика эксперимента по оценке интенсивности испарения заключалась в следующем. Металлический контейнер с жидким азотом помещался в термостатируемый короб (лабораторную ячейку) для минимизации влияния внешних тепловых возмущений и конвективных потоков воздуха. Подготовленный образец композитного материала плотно накрывал собой открытую поверхность контейнера, создавая барьер между криогенной жидкостью и окружающей средой. Для каждого из трех составов, а также для контрольного опыта (свободное испарение без покрытия) проводилась серия измерений. Ссылка на статью по методике исследования.

Расчет интенсивности испарения производился на основе измерения массы испарившейся жидкости за фиксированный промежуток времени, отнесенной к единице площади поверхности. Это позволило получить количественные сравнительные данные в размерности $\text{г/м}^2\cdot\text{с}$, характеризующие эффективность каждого из образцов покрытий по подавлению процесса фазового перехода [5].

Результаты исследований

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали выраженное влияние разработанных композитных покрытий на интенсивность испарения криогенной жидкости. Контрольный эксперимент по свободному испарению жидкого азота без применения покрытия показал максимальное значение интенсивности, составившее $0,13 \text{ г/м}^2\cdot\text{с}$. При использовании базальтовой ткани с нанесенными порошковыми составами было зафиксировано существенное снижение этого параметра.

Наименее эффективным составом оказался образец А с массовой долей порошковых компонентов 65 %, где интенсивность испарения составила $0,08 \text{ г/м}^2\cdot\text{с}$. Составы В (50 %) и С (35 %) показали одинаковую и наибольшую эффективность, снизив скорость испарения до $0,07 \text{ г/м}^2\cdot\text{с}$. Таким образом, применение композитных материалов позволило снизить интенсивность испарения на 38,5 % для состава А и на 46,2 % для составов В и С по сравнению с интенсивностью свободного испарения жидкого азота.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что эффективность композитного покрытия определяется не только наличием порошкового слоя, но и его структурными характеристиками, которые зависят от соотношения компонентов. Неожиданно наихудшие результаты показал состав А с максимальным содержанием порошковой фазы. Этот факт может быть объяснен формированием чрезмерно плотного и тяжелого слоя, склонного к растрескиванию и нарушению целостности барьера в процессе нагрева и охлаждения.

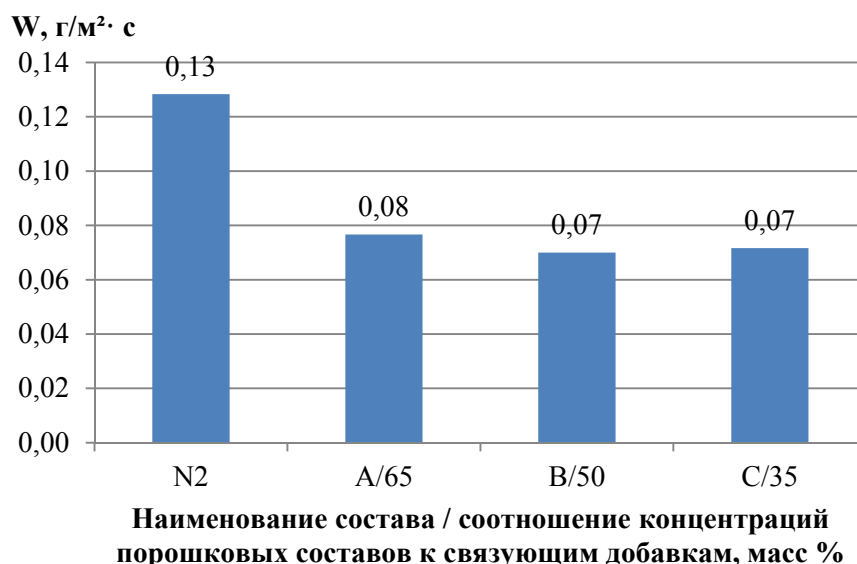


Рис. 3. Гистограмма зависимости интенсивности испарения жидкого азота от применяемых порошковых составов

Обсуждение результатов

Составы с более высоким содержанием связующего вещества (образцы В и С) продемонстрировали оптимальные характеристики. Они сформировали более стабильный, пористый и однородный слой на поверхности базальтовой ткани. Такая структура эффективно удерживает воздушную прослойку, обладающую крайне низкой теплопроводностью, что и обеспечивает наилучшее минимизирует приток тепла от окружающей среды и последующее испарение.

Наблюдаемый эффект является следствием синергетического действия двух материалов. Базальтовая ткань выступает в роли прочного и гибкого основания, обеспечивающего механическую стабильность и первичный уровень теплоизоляции. Порошковый состав, в свою очередь, создает дополнительный распределенный барьер, значительно увеличивая общее термическое сопротивление системы и минимизируя конвективный теплообмен.

Практическая значимость результатов заключается в доказательстве возможности создания простого и мобильного средства для оперативного реагирования. Оптимальные составы покрытий позволяют почти вдвое сократить объем образующихся горючих паров, что критически важно для снижения риска воспламенения и создания взрывоопасной концентрации газов в зоне аварийного разлива СПГ.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность предложенного композитного материала на основе базальтовой ткани и порошкового покрытия для решения ключевой задачи – существенного снижения интенсивности испарения сжиженных газов при аварийных разливах. Эксперименты с использованием жидкого азота в качестве модельной среды наглядно продемонстрировали, что нанесение разработанных составов позволяет почти вдвое уменьшить скорость фазового перехода по сравнению со свободным испарением. Наибольшую эффективность показал состав с концентрацией 35 %, что свидетельствует о важности оптимизации соотношения компонентов для достижения оптимальных барьерных свойств, а не просто максимального количества наполнителя.

Механизм эффективности метода носит комплексный характер и обусловлен синергией двух основных факторов. Базальтовая ткань, выступая в роли термостойкого и механически прочного основания, обеспечивает первичный уровень теплоизоляции, значительно сокращая теплоприток от окружающей среды к поверхности криогенной жидкости. Нанесенный поверх ткани порошковый слой, в свою очередь, формирует дополнительную преграду. Он не только снижает теплопередачу за счет своей низкой теплопроводности, но и создает пористую структуру, способствующую образованию стабилизированной воздушной прослойки, которая выступает в роли буфера, что дополнительно снижает процесс испарения.

Важнейшим практическим преимуществом данного подхода является его пассивность, технологическая простота и мобильность. Предложенное решение не требует сложного оборудования, источников энергии или специальной подготовки персонала для его применения, что критически важно для использования в условиях чрезвычайной ситуации, когда необходимо действовать быстро и решительно. Это позволяет рекомендовать его в качестве эффективного средства первоочередного реагирования для локализации паровой зоны и снижения риска воспламенения до прибытия основных аварийных бригад и развертывания более сложных систем.

Перспективы дальнейшего развития работы видятся в направлении оптимизации рецептур порошковых покрытий. Исследование влияния размера частиц, их формы, степени гидрофобности и использования альтернативных связующих добавок может позволить дополнительно повысить эффективность подавления испарения. Кроме того, необходимы натурные испытания на реальном СПГ для валидации, полученных лабораторных данных и окончательного подтверждения практической применимости технологии для повышения уровня безопасности на объектах нефтегазового комплекса.

Список источников

1. Самигуллин Г.Х., Евлоев З.Б., Шарапов С.В. Сравнительный анализ чрезвычайных ситуаций на объектах по производству, хранению, отгрузке сжиженного природного газа и сжиженного углеводородного газа // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 81–92.
2. Перспективы научных исследований свойств воздушно-механической пены для локализации и ликвидации горения разливов сжиженного природного газа / М.В. Алешков [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.. 2022. № 1. С. 12–20.
3. Сравнение способов повышения адгезии между бутадиеновым эластомером и базальтовой тканью / Копырин М.М. [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4-2. С. 109–117.
4. Эффективный способ получения нанокремнезема из кварцевого песка / Д.В.К. Нгуен [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 103–111.
5. Проценко Т.В. Исследование процессов подавления испарения сжиженного азота применением модифицированных воздушно-механических пен и порошковых составов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. № 1. 2025. С. 96–106.
6. A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants / K. Bellur [et al.] // Cryogenics. 2016. T. 74. p. 131–137.
7. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG / X. Guo [et al.] // Safety Science. 2021. Vol. 137. P. 137.
8. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур / Д.В. Феоктистов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 4. С. 72–88.
9. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation using exfoliated zirconium phosphate nanoplates / P. Krishnan [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2019. P. 48–58.

10. Пелех М.Т., Симонова М.А. Особенности локализации и ликвидации пожаров на складах СУГ и СПГ в районах Крайнего Севера // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 2(54). С. 216–221.

References

1. Samigullin G.H., Evloev Z.B., SHarapov S.V. Sravnitel'nyj analiz chrezvychajnyh situacij na ob"ektah po proizvodstvu, hraneniju, otgruzke szhizhennogo prirodnogo gaza i szhizhennogo uglevodorodnogo gaza // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 4 (72). S. 81–92.
2. Perspektivy nauchnyh issledovanij svojstv vozdušno-mekhanicheskoj peny dlya lokalizacii i likvidacii gorenija razlivov szhizhennogo prirodnogo gaza / M.V. Aleshkov [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya.. 2022. № 1. S. 12–20.
3. Sravnenie sposobov povysheniya adgezii mezhdru butadienovým elastomerom i bazal'tovoj tkan'ju / Kopyrin M.M. [i dr.] // Polzunovskij vestnik. 2022. № 4-2. S. 109–117.
4. Effektivnyj sposob polucheniya nanokremnezema iz kvarcevogo peska / D.V.K. Nguen [i dr.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2021. № 2 (746). S. 103–111.
5. Procenko T.V. Issledovanie processov podavleniya isparenija szhizhennogo azota primeneniem modifitsirovannyh vozdušno-mekhanicheskih pen i poroshkovyh sostavov // Sibirskij pozharo-spasatel'nyj vestnik. № 1. 2025. S. 96–106.
6. A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants / K. Bellur [et al.] // Cryogenics. 2016. T. 74. p. 131–137.
7. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG / X. Guo [et al.] // Safety Science. 2021. Vol. 137. P. 137.
8. Povyshenie energoeffektivnosti sistem ohlazhdeniya energonasyshchennogo oborudovaniya putem smeshcheniya krizisa teploobmena vtorogo roda v oblast' bolee vysokih temperatur / D.V. Feoktistov [i dr.] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2023. T. 334. № 4. S. 72–88.
9. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation using exfoliated zirconium phosphate nanoplates / P. Krishnan [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2019. P. 48–58.
10. Pelekh M.T., Simonova M.A. Osobennosti lokalizacii i likvidacii pozharov na skladah SUG i SPG v rajonah Krajnego Severa // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2021. T. 10, № 2(54). S. 216–221.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.08.2025; одобрена после рецензирования: 15.09.2025;
принята к публикации: 18.09.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 18.08.2025; approved after review: 15.09.2025;
accepted for publication: 18.09.2025

Сведения об авторах:

Проценко Татьяна Валерьевна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: 89236213028@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5923-5764>, SPIN-код: 7433-1522

Остапова Мария Викторовна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), <https://orcid.org/0009-0000-5391-7996>, SPIN-код: 6385-2337

Калимуллина Ирина Фирузовна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), <https://orcid.org/0009-0002-2875-7366>, SPIN: 7582-6020

Сагиров Эдуард Анасович, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), <https://orcid.org/0009-0004-8395-0948>, SPIN: 4210-9770

Information about the authors:

Protsenko Tatyana V., adjunct of Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: 89236213028@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5923-5764>, SPIN: 7433-1522

Ostapova Mariya V., adjunct of Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), <https://orcid.org/0009-0000-5391-7996>, SPIN: 6385-2337

Kalimullina Irina F., adjunct of Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), <https://orcid.org/0009-0002-2875-7366>, SPIN: 7582-6020

Sagirov Eduard A., adjunct of Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), <https://orcid.org/0009-0004-8395-0948>, SPIN: 4210-9770