

Научная статья

УДК 614.842.61; DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-14-22

ВЛИЯНИЕ РЕАГЕНТНОЙ И БЕЗРЕАГЕНТНОЙ МОДИФИКАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ МИНЕРАЛИЗАТОРОВ НА ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕН

✉ Арзаев Никита Анатольевич;

Ивахнюк Григорий Константинович.

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

✉ n.arzaef@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема повышения эффективности воздушно-механической пены в пожаротушении посредством модификации дисперсной среды. Предложены методики реагентного (нанохимического) и безреагентного (электрофизического) воздействия на структуру поверхности воздушно-механической пены с целью улучшения её пожарно-технических характеристик.

Исследовано влияние гидрофильности и гидрофобности наноминерализаторов, вводимых в состав воздушно-механической пены, а также электрофизической обработки дисперсной среды. Экспериментально подтверждено, что электрофизическая обработка способствует увеличению кратности пены, в то время как химическая природа поверхности минерализатора влияет на её устойчивость. Установлено, что гидрофильные минерализаторы улучшают адсорбцию поверхностно-активных веществ, снижая величину поверхностного натяжения воды.

Представлены результаты экспериментов, демонстрирующие влияние модификации как дисперсной среды, так и химических свойств поверхности на кинетику замерзания воздушно-механической пены и H_2O , что особенно важно для применения в условиях арктического региона. Показано, что гидрофильные наноминерализаторы повышают устойчивость пены к низким температурам. Термический анализ неорганического гидрофильного минерализатора маршалита тонкодисперсного (SiO_2) показал, что наличие эндозффектов (400–500 °C и 600–700 °C) способствует отводу избыточного тепла в процессах полиморфных переходов диоксида кремния.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования предложенных методов модификации для улучшения пожарно-технических свойств воздушно-механической пены, особенно в условиях низких температур.

Ключевые слова: воздушно-механическая пена, дисперсная среда, минерализаторы, наночастицы, электрофизическая обработка, пожаротушение, кратность пены, устойчивость пены, гидрофильные минерализаторы, гидрофобные минерализаторы, кинетика замерзания

Для цитирования: Арзаев Н.А., Ивахнюк Г.К. Влияние реагентной и безреагентной модификации дисперсной среды и химических свойств поверхности минерализаторов на пожарно-технические характеристики воздушно-механических пен // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 4. С. 14–22. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-14-22.

Scientific article

THE EFFECT OF REAGENT AND NON-REAGENT MODIFICATION OF THE DISPERSED MEDIUM AND THE CHEMICAL PROPERTIES OF THE SURFACE OF MINERALIZERS ON THE FIRE-FIGHTING SPECIFICATIONS OF AIR-MECHANICAL FOAMS

✉ Arzaev Nikita A.;

Ivakhnyuk Grigory K.

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

✉ n.arzaef@yandex.ru

Abstract. The article discusses the actual problem of increasing the efficiency of air-mechanical foam in firefighting by modifying the dispersed medium. Methods of reagent (nanochemical) and non-reagent (electrophysical) effects on the surface structure of the air-mechanical foam in order to improve its fire-fighting characteristics are proposed.

The effect of hydrophilicity and hydrophobicity of nanomineralizers introduced into the composition of the air-mechanical foam, as well as electrophysical treatment of a dispersed medium, is investigated. It has been experimentally confirmed that electrophysical treatment helps to increase the foam multiplicity, while the chemical nature of the mineralizer surface affects its stability. Hydrophilic mineralizers have been found to improve the adsorption of surfactants by reducing the amount of surface tension in water.

Experimental results are presented that demonstrate the effect of modification of both the dispersed medium and the chemical properties of the surface on the kinetics of freezing of air-mechanical foam and H₂O, which is especially important for use in the Arctic region. Hydrophilic nanomineralizers have been shown to increase the foam's resistance to low temperatures. Thermal analysis of the inorganic hydrophilic mineralizer marshalite, finely dispersed (SiO₂), showed that the presence of endoeffects (400–500 °C and 600–700 °C) promotes the removal of excess heat in the processes of polymorphic transitions of silicon dioxide.

The results obtained indicate the prospects of using the proposed modification methods to improve the fire-fighting properties of the air-mechanical foam, especially at low temperatures.

Keywords: air-mechanical foam, dispersed medium, mineralizers, nanoparticles, electrophysical treatment, fire extinguishing, foam expansion ratio, foam stability, hydrophilic mineralizers, hydrophobic mineralizers, freezing kinetics, nanocarbon, surface tension

For citation: Arzaev N.A., Ivakhnyuk G.K. The effect of reagent and non-reagent modification of the dispersed medium and the chemical properties of the surface of mineralizers on the fire-fighting specifications of air-mechanical foams // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 4. P. 14–22. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-14-22.

Введение

За последнее время интерес научного сообщества к исследованиям в области объектов и технологий с участием нанообъектов значительно вырос [1]. На сегодняшний день выделяется два направления изучения наночастиц:

1. Исследование наноструктурных материалов, состоящих из множества наночастиц, свойства которых проявляются опосредованно. При переходе отдельных компонентов материала в нанометровый диапазон происходит изменение их свойств, что приводит к проявлению новых эксплуатационных характеристик. Например, экспериментально подтверждено увеличение стойкости и живучести воздушно-механической пены, а также рост её стабильности;

2. Изучение отдельных нанообъектов, с целью анализа их физико-химических свойств и разработки новых методов синтеза, позволяющих управлять нанообъемами как самостоятельными объектами [2, 3].

В рамках проведения исследований взаимодействия с наночастицами были предложены методики реагентного (нанохимического) и безреагентного (электрофизического) влияния на дисперсную среду [4, 5].

В области пожарной безопасности уже много лет остаётся актуальным вопрос совершенствования и повышения эффективности воздушно-механической пены (ВМП), применяемой в пожарной охране с 1930-х гг., вероятными путями решения которого могут быть компрессионные и минерализованные пены.

Методология

ВМП по своим характеристикам должна быть отнесена к коллоидным системам. Учитывая, что коллоиды представляют собой дисперсные системы, содержащие нанообъекты размером 1–1 000 нм, можно предположить, что контроль над их структурой и свойствами позволит повысить эффективность огнетушащих составов. На этом основании можно предложить следующую научную гипотезу: современные нанотехнологии – как реагентные (с использованием нанообъектов), так и безреагентные (электрофизические поля) – позволяют управлять надмолекулярной структурой вещества (H_2O), могут улучшить огнетушащие характеристики и стабильность ВМП [6].

Реагентные методы модификации жидкостей основаны на введении нанообъектов с различной химической природой поверхности. Поскольку нанообъекты имеют кристаллическую структуру, возможна их фазовая инверсия: переход между наночастицами ($L \times d \times H \leq 100$ нм) и нанообъемами (микро- и мезопоры). Эти физико-химические предпосылки указывают на возможность разработки метода управления перестройкой надмолекулярной структуры вещества.

Современные экспериментальные данные подтверждают высокую «чувствительность» полярных веществ (обладающих дипольным моментом – H_2O , спирты и др.) к электрофизическим воздействиям [7–9]. Кроме того, они позволяют предположить существование нанообъектов не только в форме наночастиц (твердые вещества, коллоиды), но и в виде нанообъемов (вещества, адсорбированные в микропористых матрицах – нанокремнезем, нанокремнезем, наноалюмосиликаты и др.).

Объединяющим началом для этих гипотез выступает поверхностное натяжение вещества. Термодинамический базис подобного подхода был заложен еще Гиббсом Джозайя Уиллардом, по мнению которого изменение содержания данного компонента в поверхностном слое по сравнению с содержанием его во внутренних слоях называется адсорбцией [10–11].

Различают положительную адсорбцию, когда содержание растворенного вещества в поверхностном слое становится выше, чем во внутренних слоях раствора, и отрицательную – в обратных случаях. Вещества, значительно уменьшающие поверхностное натяжение растворителя, называются поверхностно-активными веществами, а противоположные по действию – поверхностно инактивными.

Суть электрофизического способа воздействия на вещество и возможность управления физико-химическими процессами на границе раздела фаз усматривается в успешной попытке теоретического обоснования принципа его действия и её экспериментальной апробации. Изменение структурных и характеристических свойств вещества и сценариев реализации типовых физико-химических процессов на границе раздела фаз основано на процессе гетеродирования несущей частоты (50 Гц) вспомогательного генератора собственными колебаниями объекта, близкими либо к частотам колебаний его межмолекулярных связей, либо к резонансным частотам колебательного контура, образованного индуктивностью устройства и электроемкостью объекта воздействия и реализуемых в виде или открытого колебательного контура в режиме резонанса

напряжений, или закрытого – в режиме резонанса токов. Условие реализации режима резонанса напряжений $\omega L = 1/\omega \cdot C_{\text{собст}}$ (для частного случая – медицинского предназначения $C_{\text{собств}} = C_{\text{человека}} = 40$ пФ) (рис. 1). Для управления процессами на границе раздела фаз используется закрытый колебательный контур, работающий в режиме резонанса тока, но при условии реализации режима резонанса напряжений $\omega L = 1/\omega \cdot C_{\text{собст}}$ (для частного случая – технологический процесс, сопровождающийся электризацией $C_{\text{собст}} = C_{\text{земли}} = 740$ мкФ) (рис. 2).

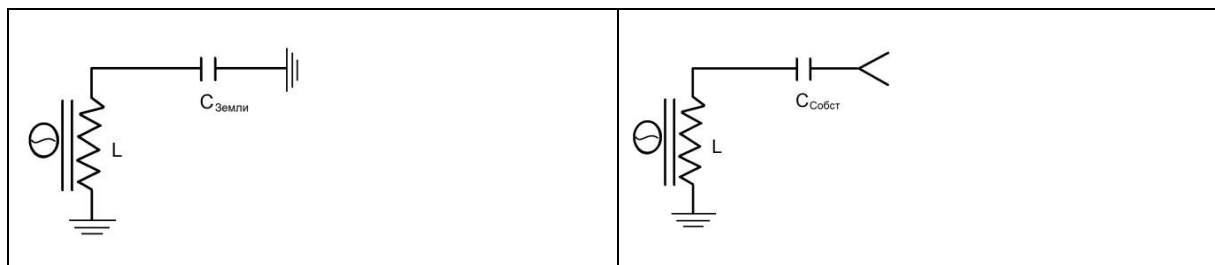


Рис. 1. Эквивалентная схема устройства для управления технологическими процессами

Рис. 2. Эквивалентная схема устройства, обеспечивающая управление физико-химическими свойствами вещества

Вырабатываемый этими устройствами сигнал является переменным частотно-модулируемым потенциалом.

Объектами исследования стали дистиллированная вода¹, водный раствор пенообразователя ПО-3², активированный уголь марки ОУ-А и ОУ-Б³, маршалит SiO₂⁴ [12–14].

Для количественной оценки поверхностных окислов применяли метод определения рН водной вытяжки (табл. 1). Определение рН водной вытяжки осуществлялось согласно ГОСТ 4453-74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия.

Таблица 1

Химические свойства поверхности модификаторов ВМП

Наименование образца	Поверхностные окислы	
	Основные, мг-экв/г	Кислые, мг-экв/г
ОУ-А	8,0	20,0
ОУ-Б	6,0	39,0
SiO ₂	2,0	12,0

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки влияния электрофизической обработки дисперсной среды (воды) и минерализации ВМП была проведена серия экспериментов, результаты которой представлены в табл. 2. В качестве пенообразователя использовался раствор пенообразователя ПО-3. Кратность и живучесть ВМП оценивалась в соответствии

¹ ГОСТ Р 58144-2018. Вода дистиллированная. Технические условия. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

² ГОСТ Р 50588-2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

³ ГОСТ 4453-74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

⁴ ГОСТ 9077-82. Кварц молотый пылевидный. Общие технические условия. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

с ГОСТ Р 50558-2012⁵ и ГОСТ Р 50588-93⁶. В качестве наноуглеродного минерализатора использовали как активированные угли марки ОУ-А и ОУ-Б, так и маршалит SiO_2 .

Таблица 2

Влияние электрофизической обработки и минерализации на свойства ВМП

№ п/п	Рецептура			
1	H ₂ O контрольная + (ПО-3)		H ₂ O (эфо) + (ПО-3)	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V (получ. пены)	0,000325 м ³	V (получ. пены)	0,0005 м ³
	Кратность пены	3,25	Кратность пены	5
	Время жизни	4 500 с	Время жизни	2 700 с
2	H ₂ O контрольная + (ПО-3) + SiO ₂		H ₂ O (эфо) + (ПО-3) + SiO ₂	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V(SiO ₂)	0,0015 кг	V(SiO ₂)	0,0015 кг
	V (получ. пены)	0,000400 м ³	V (получ. пены)	0,000450 м ³
	Кратность пены	4	Кратность пены	4,5
3	H ₂ O контрольная + (ПО-3) + ОУ-А		H ₂ O (эфо) + (ПО-3) + ОУ-А	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V (ОУ-А)	0,0015 кг	V (ОУ-А)	0,0015 кг
	V (получ. пены)	0,00032 м ³	V (получ. пены)	0,00035 м ³
	Кратность пены	3,2	Кратность пены	3,5
4	H ₂ O контрольная + (ПО-3) + ОУ-Б (окисленный)		H ₂ O (эфо) + (ПО-3) + ОУ-Б (окисленный)	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V (ОУ-Б)	0,0015 кг	V (ОУ-Б)	0,0015 кг
	V (получ. пены)	0,0005 м ³	V (получ. пены)	0,0006 м ³
	Кратность пены	5	Кратность пены	6
	Время жизни		Время жизни	
	4 500 с		3 600 с	

Серия экспериментов, представленная в табл. 2, выявила зависимость влияния электрофизической обработки [15] на дисперсную среду (H₂O) ВМП. Во всех четырех экспериментах (трёхкратной повторяемости) электрофизическая обработка оказала положительное влияние на увеличение кратности пены при незначительном сокращении времени её жизни.

В то же время были предприняты попытки улучшения пожарно-технических характеристик ВМП путём введения в неё минерализаторов с различной химической природой поверхности. Минерализаторы пены были выбраны двух типов: гидрофильные (в рассматриваемом опыте маршалит – SiO₂ и уголь марки ОУ-Б (кислый) в соответствии с рекомендациями) и гидрофобные (уголь марки ОУ-А). Гидрофильные минерализаторы [16] в составе пены способствуют адсорбции поверхностноактивных веществ на границе раздела фаз жидкость–газ, что снижает величину поверхностного натяжения воды. Вследствие

⁵ ГОСТ Р 50558-2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Методы определения кратности и устойчивости пены. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

⁶ ГОСТ Р 50588-93. Пенообразователи для тушения пожаров. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».

ослабления сил притяжения в междоузлиях ВМП возникает эффект Марангони – движение жидкости вдоль градиента поверхностного натяжения, способствующий перераспределению компонентов ВМП и стабилизации её структуры. Анализ термограммы разложения маршалита SiO_2 выявил наличие эндоэффектов (400–500 °C и 600–700 °C), вероятно способствующих отводу избыточного тепла при полиморфных переходах диоксида кремния (рис. 3).

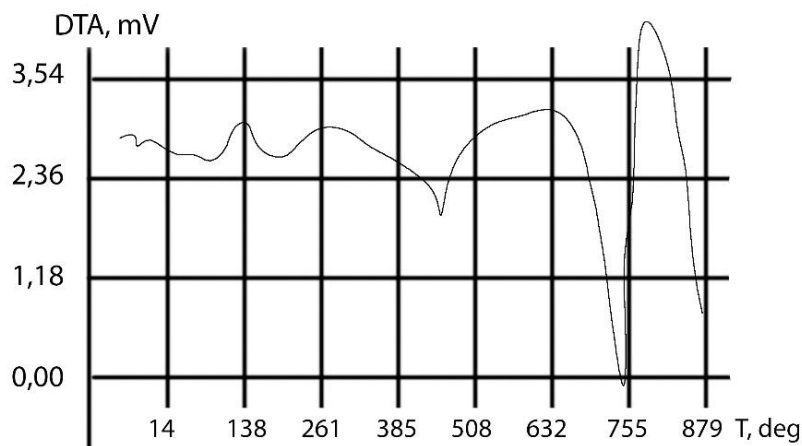


Рис. 3. Результаты термического анализа маршалита в диапазоне 0–900 °C

Таким образом, это будет способствовать не только увеличению кратности и живучести, но и отводу избыточного тепла в процессе полиморфных переходов SiO_2 (400–500 °C и 600–700 °C). Данный эндоэффект, наблюдаемый в диапазоне 632–755 °C сопровождается поглощением 250 Дж тепла на 10 л ВМП, что может оказать значительное влияние в процессе ликвидации пожара.

Гидрофобные минерализаторы плохо смачиваются водой и не способствуют снижению поверхностного натяжения. Это приводит к ухудшению стабильности пенной структуры, о чём наглядно демонстрирует эксперимент № 3 (табл. 2). Однако путём химической модификации, а именно, наличием кислородосодержащих функциональных групп, обеспечивается увеличение его смачиваемости водой. Как итог, были получены предварительные результаты, свидетельствующие о возможности улучшения пожарно-технических характеристик минерализованных ВМП (эксперимент № 4).

Для изучения влияния воздействия реагентной и безреагентной модификации дисперсной среды и химических свойств поверхности минерализаторов на пожарно-технические характеристики ВМП в условиях арктического региона были проведены эксперименты для оценки кинетики замерзания лабораторных образцов ВМП. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние электрофизической обработки и минерализации на кинетику замерзания ВМП

№ п/п	Рецептура			
1	H ₂ O контрольная + (ПО-3)		H ₂ O (эфо) + (ПО-3)	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V (получ. пены)	0,000325 м ³	V (получ. пены)	0,0005 м ³
	Время замерзания	1 800 с	Время замерзания	1 800 с

№ п/п	Рецептура			
2	H ₂ O контрольная + (ПО-3) + SiO ₂		H ₂ O (эфо) + (ПО-3) + SiO ₂	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V(SiO ₂)	0,0015 кг	V(SiO ₂)	0,0015 кг
	V (получ. пены)	0,000400 м ³	V (получ. пены)	0,000450 м ³
	Время замерзания	1 900 с	Время замерзания	1 900 с
3	H ₂ O контрольная + (ПО-3) + ОУ-А		H ₂ O (эфо) + (ПО-3) + ОУ-А	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V (ОУ-А)	1,5 гр	V (ОУ-А)	0,0015 кг
	V (получ. пены)	0,00032 м ³	V (получ. пены)	0,00035 м ³
	Время замерзания	1 200 с	Время замерзания	1 200 с
4	H ₂ O контрольная + (ПО-3) + ОУ-А (насыщенный)		H ₂ O (эфо) + (ПО-3) + ОУ-А (насыщенный)	
	V(H ₂ O)	0,0001 м ³	V(H ₂ O)	0,0001 м ³
	V(ПО-3)	0,000003 м ³	V(ПО-3)	0,000003 м ³
	V (ОУ-Б)	0,0015 кг	V (ОУ-Б)	0,0015 кг
	V (получ. пены)	0,0005 м ³	V (получ. пены)	0,0006 м ³
	Время замерзания	2 000 с	Время замерзания	2 000 с

Данные табл. 3 свидетельствуют, что гидрофильные наноминерализаторы повышают устойчивость ВМП к низким температурам на 5–10 %, обуславливая возможность их применения в условиях Арктического региона.

Выводы

Экспериментальным путём установлено влияние гидрофильных и гидрофобных наноминерализаторов в составе ВМП, а также определено положительное влияние электрофизической обработки на увеличение кратности пены.

Предложены методики реагентного (нанохимического) и безреагентного (электрофизического) модифицирования дисперсной среды ВМП.

Список источников

1. Нанотехнологии испытаний и диагностики материалов, конструкций и элементов инженерных систем зданий с огнезащитными покрытиями. Часть 1 / В.В. Белозеров [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2020. Т. 12. № 3. С. 174–184. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-3-174-184. EDN ARREJV.
2. Волик А.С., Квашнин А.В., Ивахнюк Г.К. Влияние электрического поля на огнетушащие свойства воздушно-механической пены // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 3 (55). С. 103–107. EDN BZSSAC.
3. Kumar A., Singh R., Sharma P. Role of hydrophilic and hydrophobic nanoparticles in foam-based fire suppression systems // Fire Technology. 2022. Vol. 58 (4). P. 1567–1584. DOI: 10.1007/s10694-022-01245-z.
4. Булатов Н.Н. Коллоидно-химические и пожарно-технические свойства СО₂-газонаполненных компрессионных пен // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13. № 3 (67). С. 194–198. EDN DDDGIC.
5. Миронов В.Л., Климов А.В. Электрофизические методы воздействия на водные растворы ПАВ // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84 (3). С. 312–320. DOI: 10.31857/S002329442203009X.
6. Исследование новых высокоэффективных реагентов для пенного дренажа газовых скважин (обзор) / Y.Q. Sun [et al.] // Нефтехимия. 2023. Т. 63. № 5. С. 745–759. DOI: 10.31857/S002824212305012X. EDN SAIXJO.

7. Электрофизические и нанохимические инновации в обеспечении энерго-ресурсосбережения, промышленной и экологической безопасности / Д.С. Азимов [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 46 (72). С. 120–122. EDN YTDYDR.
8. Алексеик Е.Б., Савенкова А.Е., Гемииш З. Влияние переменных электрических полей на процессы создания и стабилизации воздушно-механических пен // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2013. № 4. С. 44–48. EDN RSMACZ.
9. Цыбульский А. С., Черняев А.В. Электрофизические методы очистки воды // Экология промышленного производства. 2014. № 2 (86). С. 27–31. EDN ULWCZJ.
10. Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume / H.S. Abdelgader [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 5 (89). P. 26–38. DOI: 10.18720/MCE.89.3. EDN ATOSCY.
11. Волик А.С., Булатов Н.Н., Шешина Н.И. Влияние электрофизической обработки воды на пожарно-технические характеристики модифицированной воздушно-механической пены // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 4 (64). С. 288–293. EDN IITSGS.
12. Бибики Е.Е. Сборник задач по коллоидной химии: учеб. пособие. СПб.: СПбГТИ, 2019. 57с.
13. A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants / K. Bellur [et al.] // Cryogenics. 2016. №. 74. С. 131–137.
14. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG 2nd ed / X. Guo [et al.]. Elsevier Inc. 2021. 137p.
15. Lutz W. Zeolite Y: Synthesis, Modification, and Properties – A Case Revisited // Advances in Materials Science and Engineering. 2014. № 1. P. 1–20.
16. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation using exfoliated zirconium phosphate nanoplates / P. Krishnana [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2019. № 123. P. 48–58.

References

1. Nanotekhnologii ispytaniy i diagnostiki materialov, konstrukcij i elementov inzhenernyh sistem zdaniy s ogneshchitnymi pokrytiyami. Chast' 1 / V.V. Belozero [i dr.] // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyj internet-zhurnal. 2020. T. 12. № 3. S. 174–184. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-3-174-184. EDN ARREJV.
2. Volik A.S., Kvashnin A.V., Ivahnyuk G.K. Vliyanie elektricheskogo polya na ogneshchitnye svoystva vozdušno-mekhanicheskoy peny // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2020. № 3 (55). S. 103–107. EDN BZSSAC.
3. Kumar A., Singh R., Sharma P. Role of hydrophilic and hydrophobic nanoparticles in foam-based fire suppression systems // Fire Technology. 2022. Vol. 58 (4). P. 1567–1584. DOI: 10.1007/s10694-022-01245-z.
4. Bulatov N.N. Kolloidno-himicheskie i pozharно-tekhnicheskie svoystva CO₂-gazonapolnennykh kompressionnykh pen // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus. 2024. T. 13. № 3 (67). S. 194–198. EDN DDDGIC.
5. Mironov V.L., Klimov A.V. Elektrofizicheskie metody vozdeystviya na vodnye rastvory PAV // Kolloidnyj zhurnal. 2022. T. 84 (3). S. 312–320. DOI: 10.31857/S002329442203009X.
6. Issledovanie novykh vysokoeffektivnykh reagentov dlya pennogo drenazha gazovykh skvazhin (obzor) / Y.Q. Sun [et al.] // Neftekhimiya. 2023. T. 63. № 5. S. 745–759. DOI: 10.31857/S002824212305012X. EDN SAIXJO.
7. Elektrofizicheskie i nanohimicheskie innovacii v obespechenii energo-ressursosberezheniya, promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti / D.S. Azimov [i dr.] // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta). 2018. № 46 (72). S. 120–122. EDN YTDYDR.

8. Alekseik E.B., Savenkova A.E., Gemish Z. Vliyanie peremennykh elektricheskikh polej na processy sozdaniya i stabilizacii vozdushno-mekhanicheskikh pen // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2013. № 4. S. 44–48. EDN RSMACZ.
9. Cybul'skij A. S., Chernyaev A.V. Elektrofizicheskie metody ochistki vody // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2014. № 2 (86). S. 27–31. EDN ULWCZJ.
10. Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume / H.S. Abdelgader [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 5 (89). P. 26–38. DOI: 10.18720/MCE.89.3. EDN ATOSCY.
11. Volik A.S., Bulatov N.N., Sheshina N.I. Vliyanie elektrofizicheskoy obrabotki vody na pozharo-tehnicheskie harakteristiki modificirovannoj vozdushno-mekhanicheskoy peny // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2023. T. 12. № 4 (64). S. 288–293. EDN IITSGS.
12. Bibik E.E. Sbornik zadach po kolloidnoj himii: ucheb. posobie. SPb.: SPbGTI, 2019. 57s.
- 13 A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants / K. Bellur [et al.] // Cryogenics. 2016. №. 74. S. 131–137.
14. Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG 2nd ed / X. Guo [et al.]. Elsevier Inc. 2021. 137r.
15. Lutz W. Zeolite Y: Synthesis, Modification, and Properties – A Case Revisited // Advances in Materials Science and Engineering. 2014. № 1. P. 1–20.
16. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation using exfoliated zirconium phosphate nanoplates / P. Krishnana [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2019. № 123. P. 48–58.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.10.2025; одобрена после рецензирования: 22.11.2025; принята к публикации: 24.11.2025

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 20.10.2025; approved after review: 22.11.2025; accepted for publication: 24.11.2025

Информация об авторах:

Арзаев Никита Анатольевич, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: n.arzaef@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9179-5087>, SPIN-код: 5765-9936

Ивахнюк Григорий Константинович, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор химических наук, профессор, e-mail: fireside@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2556-303X>, SPIN-код: 1985-9518

Information about authors:

Arzaev Nikita A., adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: n.arzaef@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9179-5087>, SPIN: 5765-9936

Ivakhnyuk Grigory K., professor of the department of fire safety of technological processes and productions of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of chemical sciences, professor, e-mail: fireside@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2556-303X>, SPIN: 1985-9518