Научная статья
УДК 614.841.2; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-3-24-30

ВЛИЯНИЕ ГИДРОФИЛЬНЫХ МИНЕРАЛИЗАТОРОВ НА СВОЙСТВА ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ

✉**Ивахнюк Алексей Григорьевич;**
Арзаев Никита Анатольевич;
Сорокин Игорь Александрович.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
✉***crips200611@gmail.com***

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния гидрофильного минерализатора маршалита (тонкодисперсного SiO_2) на пожарно-технические характеристики воздушно-механической пены (ВМП), получаемой на основе пенообразователя ПО-6 (6%). В рамках работы произведена оценка кратности и устойчивости пены при концентрации маршалита от 0 до 3% масс. Установлено, что введение SiO_2 оказывает положительное влияние на все исследованные параметры: кратность возрастает с 3,2 до 4,7, устойчивость – с 470 до 723 с. Определена оптимальная концентрация маршалита 2% масс., при которой устойчивость пены возрастает на 29% по сравнению с контрольным образцом за счет формирования армированного каркаса из частиц SiO_2 на межфазной границе.

Ключевые слова: воздушно-механическая пена, гидрофильный минерализатор, маршалит SiO_2, кратность пены, устойчивость, ПО-6, пожаротушение, дисперсная среда

Для цитирования: Ивахнюк А.Г., Арзаев Н.А., Сорокин И.А. Влияние гидрофильных минерализаторов на свойства воздушно-механической пены // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 3 (59). С. 24–30. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-3-24-30

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Scientific article

THE EFFECT OF HYDROPHILIC MINERALIZERS ON THE PROPERTIES OF AIR-MECHANICAL FOAM

✉**Ivakhnyuk Alexey G.;**
Arzaev Nikita A.;
Sorokin Igor A.
Saint-Petersburg university of state fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
✉***crips200611@gmail.com***

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the effect of the hydrophilic mineralizer marshalite (finely dispersed SiO_2) on the fire-fighting characteristics of air-mechanical foam (VMP) produced on the basis of the foaming agent PO-6 (6%). As part of the work, the multiplicity and stability of the foam were estimated at a concentration of marshalite from 0 to 3% by weight. It was found that the introduction of SiO_2 has a positive effect on all the parameters studied: the multiplicity increases from 3.2 to 4.7, and the lifetime increases from 470 to 723 s. The optimal concentration of marshallite is 2% by weight, at which the foam stability increases by 29% compared to the control sample due to the formation of a reinforced skeleton of SiO_2 particles at the interface.

Keywords: air-mechanical foam, hydrophilic mineralizer, SiO_2 marshalite, foam multiplicity, lifetime, PO-6, firefighting, dispersed medium

For citation: Ivakhnyuk A.G., Arzaev N.A., Sorokin I.A. The effect of hydrophilic mineralizers on the properties of air-mechanical foam // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 3 (59). P. 24–30. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-3-24-30

Введение

В условиях усложнения технологических процессов на производственных объектах и ограниченной обеспеченности подразделений пожарной охраны современными пенообразователями повышение эффективности воздушно-механической пены (ВМП) остается одной из ключевых задач пожарной безопасности.

Одним из перспективных направлений является модификация раствора ВМП путем введения минерализаторов [1]. В качестве типичного гидрофильного минерализатора рассмотрен маршалит – тонкодисперсный диоксид кремния (SiO_2), отвечающий требованиям ГОСТ 9077-82 «Кварц молотый пылевидный. Общие технические условия» [11]. Применение SiO_2 позволяет управлять поверхностными явлениями в системе «раствор пенообразователя – воздух», усиливая межфазные взаимодействия и формируя более прочный каркас пленок пены.

Методы исследования

Объект исследования – минерализованные воздушно-механические пены, получаемые на основе водного раствора пенообразователя ПО-6 [2-4].

Предмет исследования – закономерности влияния гидрофильного минерализатора маршалита (SiO_2) на кратность и устойчивость ВМП [5-7].

Оценивались следующие показатели:

1. Кратность пены – отношение объема полученной пены к объему исходного раствора.

2. Устойчивость пены – время, за которое объем пены уменьшается в заданной степени вследствие дренажа и разрушения пленок.

Согласно экспериментальной схеме, в водный раствор пенообразователя ПО-6 (6%) вводились различные количества маршалита SiO_2. Контрольный образец водный раствор пенообразователя ПО-6 (6%) не содержал минерализатора [8-10].

Исследовались следующие рецептуры:

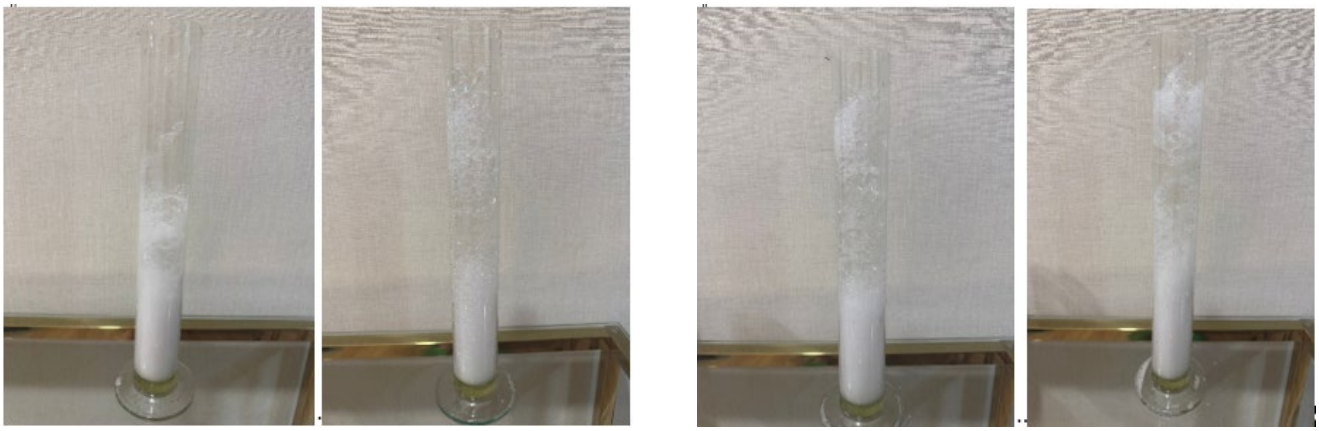
1) шестипроцентный водный раствор пенообразователя с добавлением 0,5 % минерализатора (H_2O + ПО-6, 6% + SiO_2 (0,5% масс.));

2) шестипроцентный водный раствор пенообразователя с добавлением 1,0 % минерализатора (H_2O + ПО-6, 6% + SiO_2 (1,0% масс.));

3) шестипроцентный водный раствор пенообразователя с добавлением 2,0 % минерализатора (H_2O + ПО-6, 6% + SiO_2 (2,0% масс.));

4) шестипроцентный водный раствор пенообразователя с добавлением 3,0 % минерализатора (H_2O + ПО-6, 6% + SiO_2 (3,0% масс.)).

Образцы пены, полученной с добавлением минерализатора в различной концентрации, представлены на рис. 1.



SiO_2 0,5% SiO_2 1,0% SiO_2 2,0% SiO_2 3,0%

Рис.1. **Образцы пены с различной концентрацией минерализатора**

Результаты исследования и их обсуждение

Сводные результаты исследования влияния маршалита SiO_2 на кратность и устойчивость ВМП приведены в табл. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с использованием стандартных методов математической статистики. Для каждого измеряемого параметра определялось среднее арифметическое значение по пяти параллельным измерениям. Относительная погрешность измерений не превышала 5%.

Таблица

Влияние концентрации SiO_2 на характеристики ВМП

№ п/п	Концентрация минерализатора SiO_2, % масс.	Кратность пены	Устойчивость, с
1	0	3,2	470
2	0,5	3,6	496
3	1,0	3,9	564
4	2,0	4,8	610
5	3,0	4,7	723

Введение минерализатора маршалита SiO_2 оказывает положительное влияние на все исследованные параметры воздушно-механической пены. Устойчивость увеличивается до

723 с (3,0%), что на 54% выше контрольного образца, за счет формирования армированного каркаса из частиц SiO_2 на межфазной границе. Зависимость влияния концентрации минерализатора на устойчивость ВМП представлена на рис. 2.

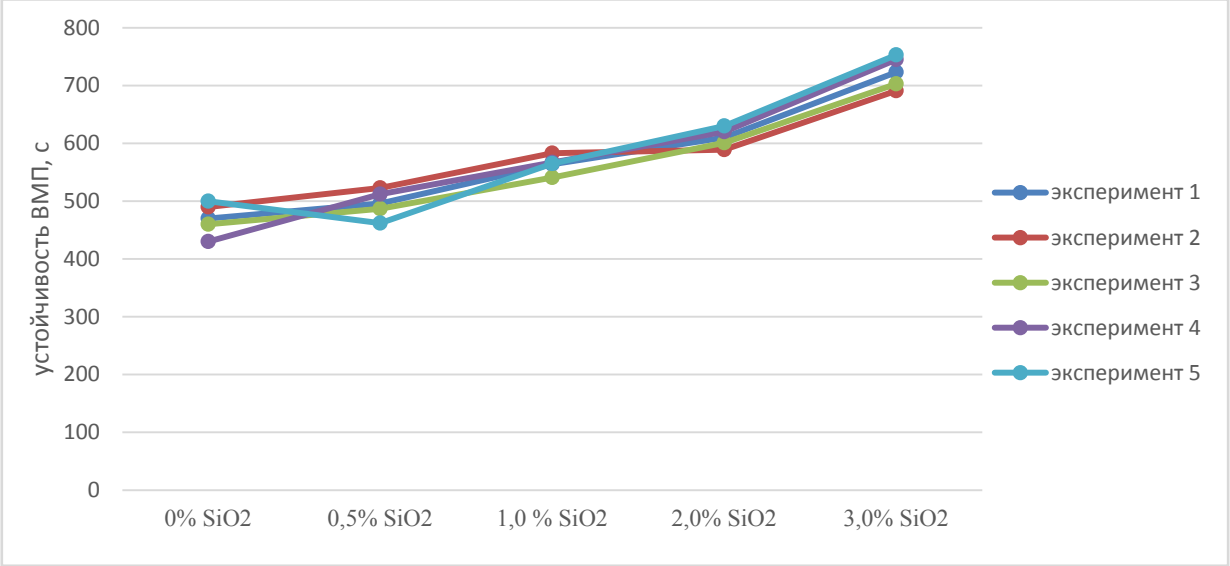


Рис. 2. **Зависимость устойчивости ВМП от концентрации SiO_2**

При сравнительном анализе показателей пены с концентрацией маршалита SiO_2 (3,0%) и маршалита SiO_2 (2,0%), наблюдается незначительное снижение кратности пены, однако ее устойчивость продолжает расти. В связи с этим воздушно-механическая пена с концентрацией маршалита SiO_2 (3,0%) признана наиболее эффективной. Визуализация зависимости кратности ВМП от концентрации SiO_2 представлена на рис. 3.

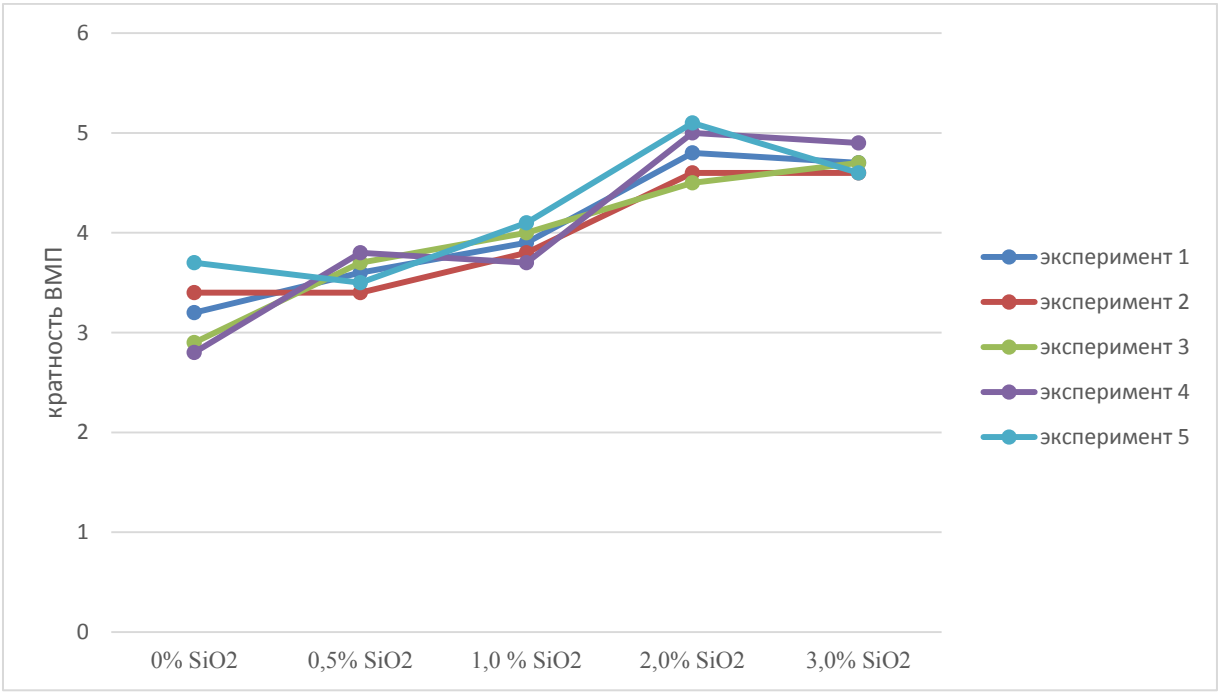


Рис. 3. **Изменение кратности ВМП от концентрации SiO_2**

Увеличение устойчивости и кратности ВМП при введении маршалита объясняется формированием армированного каркаса в структуре пены: гидрофильные частицы SiO_2

включаются в межфазные пленки пузырьков, повышая их механическую прочность и сопротивление дренажу.

Гидрофильная поверхность SiO_2 способствует:

1) эффективной адсорбции ПАВ на границе «жидкость–газ»;

2) уменьшению поверхностного натяжения воды;

3) более равномерному распределению жидкости в пленках пены;

4) улучшению адгезии пены к защищаемой поверхности.

Заключение

Выводы по результатам исследования:

1) В рамках работы определены критерии эффективности влияния минерализаторов на свойства ВМП: кратность и устойчивость пены

2) Установлено, что введение маршалита SiO_2 в концентрации (0,5-3,0) % масс. оказывает положительное влияние на свойства ВМП – по сравнению с контрольным образцом без минерализатора наблюдается рост и кратности, и времени жизни пены. При концентрации SiO_2 3,0% устойчивость пены достигает 723 с, что примерно на 54% выше значения контрольного образца (470 с); кратность при этом составляет около 4,7.

3) Оптимальной концентрацией маршалита, обеспечивающей наилучшее сочетание кратности и устойчивости пены без ухудшения ее технологических свойств, является 3,0% масс.

Положительное влияние маршалита объясняется усилением межфазных взаимодействий, снижением поверхностного натяжения и формированием армированного каркаса из частиц SiO_2 в структуре ВМП. Полученные результаты подтверждают перспективность применения гидрофильных наноминерализаторов для повышения эффективности пенного пожаротушения и могут быть использованы при разработке новых рецептур растворов ВМП и методик испытаний в расширенных диапазонах условий эксплуатации.

Список источников

1. Арзаев Н.А. Методики реагентной и безреагентной модификации дисперсной среды, обеспечивающие повышенную огнетушащую способность и стабильность газонаполненных компрессионных пен // Сибирский пожарно–спасательный вестник. 2026. № 1(40). С. 194–203. DOI:10.34987/2500-4026-2026-1-194-203.

2. 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.

3. Абдурагимов И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 2. С. 59–63.

4. Корольченко Д.А. Анализ процесса тушения пламени горючих жидкостей дисперсными огнетушащими веществами и пеной низкой кратности // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 2. С. 51–58.

5. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Анализ двойственного механизма тушения пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 12. С. 59-68.

6. Fire–extinguishing performance and gas–phase pollution characteristics of different foam agents in extinguishing transformer oil pool fire / J.Q. Zhang [et al.] // J. Fire Sci. 2022. № 40. P. 463–478.

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

8. Xuhui Z.Y., Yueyong W. Application research of new foam fire extinguishing device

based on hot oil fire of full size transformer // Beijing China. 2021. P. 5–15.

9. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell. The properties of gases and liquids. 5th edition. McGraw–Hill Book Company. New York, 2001, 768 p.

10. Lou M., Jia H., Lin Z. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // Results in Engineering. 2023. № 17. P. 67–72.

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

References

1. Arzaev N.A. Metodiki reagentnoj i bezreagentnoj modifikacii dispersnoj sredy, obespechivayushchie povyshennuyu ognetushashchuyu sposobnost' i stabil'nost' gazonapolnennyh kompressionnyh pen // Sibirskij pozharno–spasatel'nyj vestnik. 2026. № 1(40). S. 194–203. DOI:10.34987/2500-4026-2026-1-194-203.

2. Arzaev N.A., Ivahnyuk G.K. Vliyanie reagentnoj i bezreagentnoj modifikacii dispersnoj sredy i himicheskih svojstv poverhnosti mineralizatorov na pozharno–tekhnicheskie harakteristiki vozdushno–mekhanicheskih pen // Nauchno–analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt–Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii». 2025. № 4. S. 14–22. DOI:10.61260/2218-130X-2025-4-14-22.

3. Abduragimov I.M. O mekhanizmah ognetushashchego dejstviya sredstv pozharotusheniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 2012. T. 21. № 2. S. 59–63.

4. Korol'chenko D.A. Analiz processa tusheniya plameni goryuchih zhidkostej dispersnymi ognetushashchimi veshchestvami i penoj nizkoj kratnosti // Pozharovzryvobezopasnost'. 2016. T. 25. № 2. S. 51–58.

5. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. Analiz dvojstvennogo mekhanizma tusheniya plameni // Pozharovzryvobezopasnost'. 2014. T. 23. № 12. S. 59-68.

6. Fire–extinguishing performance and gas–phase pollution characteristics of different foam agents in extinguishing transformer oil pool fire / J.Q. Zhang [et al.] // J. Fire Sci. 2022. № 40. R. 463–478.

7. GOST R 50588-2012. Penoobrazovateli dlya tusheniya pozharov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytanij. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».

8. Xuhui Z.Y., Yueyong W. Application research of new foam fire extinguishing device based on hot oil fire of full size transformer // Beijing China. 2021. R. 5–15.

9. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O\'Connell. The properties of gases and liquids. 5th edition. McGraw–Hill Book Company. New York, 2001, 768 p.

10. Lou M., Jia H., Lin Z. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // Results in Engineering. 2023. № 17. R. 67–72.

11. GOST 9077-82. Kvarc molotyj pylevidnyj. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 15.05.2026; одобрена после рецензирования: 10.06.2026; принята к публикации: 20.06.2026
Information about the article:
The article was submitted to the editorial office: 15.05.2026; approved after review: 10.06.2026; accepted for publication: 20.06.2026

Информация об авторах:
Ивахнюк Алексей Григорьевич, обучающийся Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149), e-mail: crips200611@gmail.com
Арзаев Никита Анатольевич, адъюнкт, преподаватель кафедры ПБТПиП, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149), e-mail: n.arzaef@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-9179-5087, SPIN: 5765-9936
Сорокин Игорь Александрович, начальник кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149), e-mail: igor_40in@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0183-9601, SPIN: 8002-4750
Information about the authors:
Ivakhnyuk Alexey G., student of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (Moskovsky ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russia), e-mail: crips200611@gmail.com
Arzaev Nikita A., adjunct, lecturer of the PBTPiP department of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (Moskovsky ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russia), e-mail: n.arzaef@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-9179-5087, SPIN: 5765-9936
Sorokin Igor A., head of the department fire safety of technological processes and production facilities of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (Moskovsky ave., 149, Saint-Petersburg, 196105, Russia), e-mail: igor_40in@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0183-9601, SPIN: 8002-4750