

УДК 614.841.45

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В СОСТАВЕ ПЕНООБРАЗУЮЩИХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Сафаргалин Айдар Расихович, Хафизов Ильдар Фанилевич, Попова Елена Викторовна
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является экспериментальное определение оптимального количества поверхностно-активных веществ (ПАВ) в пенообразующих составах для повышения качества пожаротушения. Актуальность исследования обусловлена потребностью в обоснованном подходе к усовершенствованию огнетушащих составов, сочетающих оптимальные свойства. Для достижения поставленной цели в работе применен метод сталагмометрии, позволивший оценить поверхностное натяжение растворов ПАВ в диапазоне концентраций от 0,01 до 5 %. В ходе эксперимента были выявлены основные реологические характеристики, определена критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) и проведен анализ с использованием уравнения адсорбции Гиббса для определения поверхностной избыточной концентрации ПАВ. Основная задача заключалась в установлении концентраций, обеспечивающих баланс между низким поверхностным натяжением и высокой пенообразующей способностью. Результаты исследования показали, что зависимость поверхностного натяжения от концентрации имеет двухэтапный характер с четко выраженным минимумом, что свидетельствует о достижении насыщения адсорбционного слоя при ККМ. Экспериментально установлено, что применение раствора ПАВ в концентрации 0,2–0,3 % обеспечивает формирование пены с улучшенными эксплуатационными характеристиками: повышенной смачиваемостью, равномерностью покрытия и устойчивостью пенного слоя при тушении. Определенный оптимальный диапазон концентраций позволяет разрабатывать высокоэффективные огнетушащие составы на основе ПАВ.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, критическая концентрация мицеллообразования, поверхностное натяжение, теория Гиббса, изотерма адсорбции, пожаротушение, пенообразователи, водные растворы, сталагмометрия, оптимизация

Для цитирования: Сафаргалин А. Р., Хафизов И. Ф., Попова Е. В. Оптимизация концентрации пенообразующих составов для систем пожаротушения // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 57–62.

OPTIMIZATION OF THE CONCENTRATION OF SURFACTANTS IN THE COMPOSITION OF FOAMING EXTINGUISHING AGENTS

Aidar R. Safargalin, Ildar F. Khafizov, Elena V. Popova
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to experimentally determine the optimal amount of surfactants in foaming formulations to improve the quality of fire extinguishing. The relevance of the study is due to the need for a sound approach to improving fire extinguishing compounds that combine optimal properties. To achieve this goal, the stalagmometry method was used, which made it possible to estimate the surface tension of surfactant solutions in the concentration range from 0.01 to 5 %. During the experiment, the main rheological characteristics were identified, the critical concentration of micelle formation (KKM) was determined, and an analysis was performed using the Gibbs adsorption equation to determine the surface excess concentration of surfactants. The main task was to establish concentrations that ensure a balance between low surface tension and high foaming capacity. The results of the study showed that the dependence of surface tension on concentration has a two-stage character with a clearly defined minimum, which indicates that saturation of the adsorption layer has been achieved at KKM. It has been experimentally established that the use of a surfactant solution in a concentration of 0.2–0.3 % ensures the formation of foam with improved performance characteristics: increased wettability, uniformity of coating and stability of the foam layer during extinguishing. A certain optimal concentration range allows the development of highly effective extinguishing agents based on surfactants.

Keywords: surfactants, critical concentration of micelle formation, surface tension, Gibbs theory, adsorption isotherm, firefighting, foaming agents, aqueous solutions, stalagmometry, optimization

For citation: Safargalin A. R., Khafizov I. F., Popova E. V. Optimization of the concentration of foaming compounds for fire extinguishing systems // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 57–62.

Введение

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) представляют собой группу соединений, которые адсорбируются на границах фаз и заметно уменьшают поверхностное натяжение. Это вызвано особенностью дифильной структуры с гидрофильными и гидрофобными частями. Эффективность ПАВ зависит от поверхностной активности, показывающей насколько сильно вещество снижает натяжение при низких концентрациях, и насыщения адсорбционного слоя, определяющего минимальное натяжение при полном заполнении слоя. Критическая концентра-

ция мицеллообразования (KKM) — ключевой показатель поведения ПАВ в растворах. Количество KKM молекулы позволяет определить остаются ли молекулы изолированными или происходит формирование мицеллы, что влияет на такое свойство раствора, как поверхностное натяжение. Теория Гиббса лежит в основе описания адсорбции, связывая ее с изменениями натяжения через основное уравнение. Использование основного уравнения теории Гиббса дает возможность предсказывать свойства растворов по концентрации ПАВ. Для улучшения свойств огнетушащих составов изучили зависимости натяжения от концентрации [1, 2]:

определение оптимальных значений помогает контролировать стабильность пены, ее дисперсность и текучесть [2, 3].

Материалы и методы

Для оптимизации концентраций пенообразующих смесей на базе ПАВ применили набор экспериментальных и теоретических подходов, направленных на рост эффективности тушения [1, 4, 5]. Исследуемый диапазон концентраций ПАВ составил от 0,01 до 5 %.

Основной параметр, т. е. поверхностное натяжение на границе вода — воздух измеряли сталагмометрией, методом отрыва капли от капилляра [3, 5]. Измерения выполнялись на лабораторной установке, включающей сталагмометр с капилляром радиусом $r = 0,0003$ м.

Сила отрыва капли F определялась как среднее значение из 10 последовательных измерений для каждой концентрации ПАВ. Поверхностное натяжение σ рассчитывалось по формуле, выведенной из условия равновесия сил в момент отрыва капли:

$$\sigma = \frac{F}{2\pi r}, \quad (1)$$

Для применения термодинамического аппарата поверхностных явлений массовые концентрации ПАВ $C_{\%}$ были переведены в молярные единицы C , моль/л, по формуле [3, 5]:

$$C = \frac{C_{\%} \cdot \rho}{M} \cdot 10, \quad (2)$$

где:

$\rho = 1$ г/мл — плотность водного раствора;

$M = 264$ г/моль — молекулярная масса ПАВ.

Анализ велся по $\ln C$. ККМ находили по излому на графике σ от концентрации. Для интерпретации использовали изотерму Гиббса:

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \left(-\frac{d\sigma}{d\ln C} \right), \quad (3)$$

где:

Γ — поверхностная избыточная концентрация (адсорбция) ПАВ, моль/м²;

d — символ дифференциала (производной);

R — универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль · К));

T — абсолютная температура, К.

Результаты и их обсуждение

Исследование показало зависимость поверхностного натяжения от концентрации ПАВ в водных растворах [6, 7]. Данные

в таблице иллюстрируют двухэтапный характер с четким переходом.

На начальной стадии (0,01–0,1 %) натяжение падает с 25,8 до 20,6 мН/м из-за адсорбции молекул ПАВ на поверхности [3]. В зоне

0,2–0,3 % достигается ККМ с минимумом 16,4 мН/м (рис.). Здесь слой насыщен, формируется устойчивая пена. Выше 0,3 % натяжение стабилизируется (16,1–17,1 мН/м), подтверж-

дая мицеллообразование [3, 6]. Оптимальная концентрация 0,2–0,3 % дает низкое натяжение, улучшая смачивание, растекание и устойчивость пены [1, 2, 8].

Таблица
Экспериментальные данные зависимости поверхностного натяжения от концентрации ПАВ

Table
Experimental data of the dependence of surface tension on surfactant concentration

Концентрация ПАВ, % Surfactant concentration, %	Концентрация ПАВ, моль/л Surfactant concentration, mol/L	lnC	Поверхностное натяжение σ , мН/м Surface tension σ , mN/m
0,01	0,0003788	-7,88	25,8
0,03	0,0011364	-6,78	23,9
0,05	0,0018939	-6,27	22,4
0,08	0,0030303	-5,80	21,5
0,1	0,0037878	-5,58	20,6
0,2	0,0075758	-4,88	17,8
0,3	0,0113636	-4,47	16,4
0,5	0,0189394	-3,97	17,1
1	0,0378788	-3,28	16,97
2	0,0757576	-2,58	16,92
5	0,1893939	-1,66	16,1

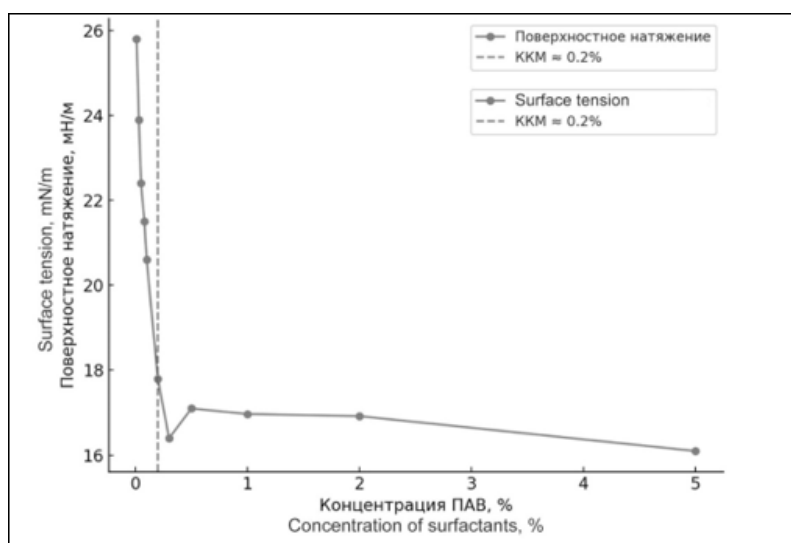


Рис. Зависимость поверхностного натяжения водного раствора от концентрации ПАВ

Fig. Dependence of the surface tension of an aqueous solution on the concentration of surfactants

Заключение

В работе методом сталагмометрии экспериментально определено оптимальное содержание ПАВ в пенообразующем составе для повышения эффективности пожаротушения. Установлено, что зависимость поверхностного натяжения от концентрации носит двухстадийный характер: на первом этапе до 0,1 % наблюдается резкое снижение σ за счет адсорбции молекул, а в интервале 0,2–

0,3 % достигается критическая концентрация мицеллообразования, что соответствует минимуму поверхностного натяжения 16,4 мН/м. При дальнейшем увеличении концентрации свыше 0,3 % значения σ стабилизируются, что делает рост содержания ПАВ нецелесообразным. Таким образом, оптимальный диапазон 0,2–0,3 % обеспечивает баланс между низким натяжением и устойчивым пенообразованием, что подтверждает практическую значимость полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шароварников А. Ф., Шароварников С. А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М. : Пожнаука, 2005. 335 с. EDN: UWCCSP.
2. Иванов И. Ю., Навроцкий О. Д., Доукешева Е. А. Огнетушащая и пленкообразующая способность огнетушащих составов на основе фторированных поверхностно-активных веществ // Journal of Civil Protection. 2024. Т. 8, № 1. С. 21–31. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-1.21.
3. Русанов А. И., Щёкин А. К. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. 3-е изд., стер. СПб. : Лань, 2022. 612 с. EDN: CBDHDR.
4. ГОСТ Р 50588-2012. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2012. 38 с.
5. Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пены и пенные пленки. М. : Химия, 1990. 432 с.
6. Исследование фторированных поверхностно-активных веществ для разработки пленкообразующего огнетушащего состава / И. Ю. Иванов [и др.] // Journal of Civil Protection. 2022. Т. 6, № 4. С. 415–428. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGPXST.
7. Experimental and simulation study of fluorine-free firefighting foam reinforced with aerogel particles and polymers / Yan B. [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2025. Vol. 708. Art. 136011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136011>.
8. Rodhia R., Sahdeo S. K., Kumar B. Optimizing foaming agent concentration and recycled fine aggregate content to enhance mechanical and durable properties of foam concrete mixes // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. Art. 110801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110801>.

REFERENCES

1. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov S. A. Foaming agents and foams for extinguishing fires. Composition, properties, application. Moscow : Pozhnauka, 2005. 335 p. EDN: UWCCSP.
2. Ivanov I. Yu., Navrotskii O. D., Dokesheva E. A. Fire extinguishing and film-forming ability of fire extinguishing compositions based on fluorinated surfactants // Journal of Civil Protection. 2024, Vol. 8, No. 1. P. 21–31. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-1.21.

3. Rusanov A. I., Shchekin A. K. Micellization in Surfactant Solutions. 3rd ed. Saint Petersburg : Lan, 2022. 612 p. EDN: CBDBDR.
4. GOST R 50588-2012. Foaming agents for extinguishing fires. General technical requirements and test methods. Moscow : Standartinform, 2012. 38 p.
5. Kruglyakov P. M., Ekserova D. R. Foams and foam films. Moscow : Khimiya, 1990. 432 p.
6. Research of fluorinated surfactants for the development of a film-forming fire extinguishing composition / I. Yu. Ivanov [et al.] // Journal of Civil Protection, 2022. Vol. 6, No. 4. P. 415–428. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGPXST.
7. Experimental and simulation study of fluorine-free firefighting foam reinforced with aerogel particles and polymers / Yan B. [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2025. Vol. 708. Art. 136011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136011>.
8. Rodhia R., Sahdeo S. K., Kumar B. Optimizing foaming agent concentration and recycled fine aggregate content to enhance mechanical and durable properties of foam concrete mixes // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. Art. 110801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110801>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафаргалин Айдар Расихович, аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета (450044, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Матвея Пинского, д. 4); Author ID: 1313761; e-mail: playtostory@gmail.com

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450044, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Матвея Пинского, д. 4); Author ID: 592403; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Попова Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450062, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1); Author ID: 633418; e-mail: evpopova10@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aidar R. Safargalin, graduate student, Ufa State Petroleum Technological University (4 Matvey Pinsky St., Ufa, 450044, Russian Federation); Author ID: 1313761; e-mail: playtostory@gmail.com

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (4 Matvey Pinsky St., Ufa, 450044, Russian Federation); Author ID: 592403; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Elena V. Popova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technological University (1 Kosmonavtov St., Ufa, 450062, Russian Federation); Author ID: 633418; e-mail: evpopova10@yandex.ru