

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)**

УДК 614.842.61

DOI 10.48612/ntp/f9ru-px1n-8631

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ МИНЕРАЛИЗАТОРОВ
НА ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ**

Н. А. АРЗАЕВ¹, Г. К. ИВАХНЮК²

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
E-mail: n.arzaef@yandex.ru, fireside@inbox.ru

В работе проведено экспериментальное исследование влияния пористой структуры минерализаторов на пожарно-технические характеристики воздушно-механической пены (ВМП) при тушении модельных очагов пожара класса В. Объектами исследования выступили четыре минерализатора с принципиально различными параметрами пористости: маршалит SiO_2 (удельная поверхность $\sim 0,15 \text{ м}^2/\text{г}$, непористый), силикагель марки КСМГ ($650\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$, мезопористый), активированный уголь марки ОУ-Б ($\geq 850 \text{ м}^2/\text{г}$, макро-мезопористый, гидрофильный) и активированный уголь марки ОУ-А ($>1200 \text{ м}^2/\text{г}$, макро-мезо-микропористый, гидрофобный). Минерализаторы вводились в 6%-й водный раствор пенообразователя ПО-6 в концентрациях 0,5–3,0% масс. при различном времени электрофизической обработки (ЭФО) дисперсной среды (воды). Оценивались кратность пены, время жизни, время тушения модельного очага, удельный расход огнетушащего вещества (ОТВ) и наличие повторного воспламенения.

Установлено, что пористость минерализатора является определяющим фактором, влияющим на пожарно-технические характеристики ВМП наряду с характером смачиваемости поверхности. Результаты позволяют сформулировать критерий выбора оптимального минерализатора для ВМП: сочетание умеренной мезопористости ($300\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$) с гидрофильным характером поверхности обеспечивает наилучшие пожарно-технические характеристики за счёт баланса между структурным армированием пенной плёнки и удержанием воды в порах по механизму капиллярной конденсации.

Ключевые слова: пористость минерализаторов, маршалит, силикагель, активированный уголь ОУ-А, активированный уголь ОУ-Б, удельная поверхность, воздушно-механическая пена, кратность пены, устойчивость пены, время жизни, огнетушащая способность, электрофизическая обработка воды

**EVALUATION OF THE EFFECT OF MINERALIZER POROSITY
ON FIRE-TECHNICAL CHARACTERISTICS OF AIR-MECHANICAL FOAM**

N. A. ARZAEV, G. K. IVAKHNYUK

Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Saint Petersburg

Saint Petersburg State Technological Institute,
Russian Federation, Saint Petersburg

E-mail: n.arzaef@yandex.ru, fireside@inbox.ru

This study presents the first systematic experimental investigation of the effect of the porous structure of mineralizers on the fire-technical characteristics of air-mechanical foam (AMF) during suppression of Class B model fire sources. Four mineralizers with fundamentally different porosity parameters were studied: marshallite SiO_2 (specific surface area $\sim 0.15 \text{ м}^2/\text{г}$, non-porous), silica gel grade KSMG ($650\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$, mesoporous), activated carbon grade OU-B ($\geq 850 \text{ м}^2/\text{г}$, macro-mesoporous, hydrophilic), and activated carbon grade

OU-A ($>1200 \text{ m}^2/\text{g}$, macro-meso-microporous, hydrophobic). The mineralizers were introduced into a 6 % aqueous solution of PO-6 foaming agent at concentrations of 0.5–3.0 wt.% with varying electrophysical treatment (EPT) durations (0–3600 s). Foam expansion ratio, foam lifetime, extinguishing time, specific fire-extinguishing agent consumption, and reignition occurrence were evaluated.

It was established that mineralizer porosity is a determining factor affecting AMF fire-technical characteristics alongside the surface wettability. The results allow formulating a criterion for selecting an optimal mineralizer for AMF: a combination of moderate mesoporosity (300–800 m^2/g) with a hydrophilic surface character provides the best fire-technical characteristics due to a balance between structural reinforcement of the foam film and water retention in pores via the capillary condensation mechanism.

Keywords: mineralizer porosity, marshalite, silica gel, activated carbon OU-A, activated carbon OU-B, specific surface area, air-mechanical foam, foam expansion ratio, foam stability, foam lifetime, fire extinguishing performance, electrophysical water treatment.

Введение

Актуальность вопроса обеспечения пожарной безопасности во многом определяется необходимостью совершенствования средств пожаротушения. В современных условиях усложнения технологических процессов, увеличения количества объектов с повышенной степенью пожаро-взрывоопасности, а также расширения зон промышленного освоения в экстремальных природно-климатических условиях особенно важным становится разработка более эффективных огнетушащих веществ. Это позволяет не только сократить время локализации и ликвидации пожаров, но и минимизировать экологические и экономические последствия от чрезвычайных ситуаций.

Воздушно-механическая пена (ВМП) является одним из наиболее распространённых средств тушения пожаров классов А и В на объектах хранения и переработки горючих жидкостей. В практике обеспечения пожарной безопасности такие композиции применяются благодаря способности одновременно экранировать поверхность горючего, охлаждать зону горения и подавлять массо- и теплообмен между фазами. Вместе с тем ряд недостатков ВМП – быстрая деградация пенного слоя, низкая адгезионная способность и ограниченная работоспособность при отрицательных температурах – обуславливает необходимость совершенствования пенных составов, в том числе путём введения тонкодисперсных твёрдых минеральных добавок (минерализаторов).

Анализ научной литературы показывает, что при выборе минерализаторов для ВМП исследователи традиционно акцентируют внимание на химической природе поверхности частиц – их гидрофильности или гидрофобности. Однако влияние пористости структуры минерализаторов – удельной поверхности, объёма пор, распределения пор по размерам – на пожарно-технические характеристики ВМП на данный момент ещё мало изучены.

Между тем пористость минерализатора

может оказывать принципиальное влияние на механизм его взаимодействия с компонентами пенного раствора. Высокоразвитая пористая структура (удельная поверхность $>500 \text{ m}^2/\text{g}$) способна адсорбировать значительное количество молекул поверхностно-активного вещества (ПАВ) на внутренней поверхности пор, тем самым обедняя межфазную границу «вода–воздух» и ускоряя процесс разрушения пены. С другой стороны, умеренная мезопористость (размер пор 2–50 нм) в сочетании с гидрофильной поверхностью может обеспечить удержание воды, используя механизм капиллярной конденсации, замедляя дренаж и повышая стабильность пенной плёнки.

Исходя из анализа литературных данных и результатов предшествующих исследований, в настоящей работе выдвигается следующая научная гипотеза: при равном гидрофильном характере поверхности пожарно-технические характеристики ВМП определяются пористой структурой минерализатора, причём оптимальные показатели (минимальное время тушения, максимальная устойчивость, отсутствие повторного воспламенения) достигаются при использовании минерализаторов с умеренной мезопористостью (удельная поверхность 300–800 m^2/g), а чрезмерно развитая пористость ($>1000 \text{ m}^2/\text{g}$) оказывает негативное влияние вследствие конкурентной адсорбции ПАВ [1, 2].

Для проверки данной гипотезы были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Провести сравнительное экспериментальное исследование четырёх минерализаторов с удельной поверхностью, различающейся на четыре порядка (от $\sim 0,15 \text{ m}^2/\text{g}$ до $>1200 \text{ m}^2/\text{g}$), в единых условиях эксперимента;
2. Установить количественные зависимости кратности пены, времени жизни, времени тушения и расхода ОТВ от концентрации минерализатора и времени ЭФО для каждого типа минерализатора;
3. Выявить механизм влияния порис-

тости на стабильность и огнетушащую способность ВМП;

4. Определить оптимальный диапазон пористости минерализатора для достижения наилучших пожарно-технических характеристик.

Методы исследования

В качестве минерализаторов были выбраны четыре вещества, обладающие принципиально различными параметрами пористой структуры и характером смачиваемости поверхности.

Маршалит (SiO_2) – пылевидный природный кварц (ГОСТ 9077-82 «Кварц молотый пылевидный. Общие технические условия»), содержание SiO_2 не менее 98 %. Удельная поверхность составляет 0,11–0,15 $\text{м}^2/\text{г}$, материал практически непористый. Размер частиц 20–50 нм. Поверхность гидрофильна за счёт силанольных групп ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$). Выбран как модельный непористый гидрофильный минерализатор.

Силикагель марки КСМГ – аморфный диоксид кремния $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 3956-76 Силикагель технический. Технические условия), фракция 20–50 нм. Удельная поверхность 650–800 $\text{м}^2/\text{г}$, объём пор 0,35–0,45 мл/г, средний диаметр пор 2,0–3,0 нм (мезопористая структура). Поверхность гидрофильна за счёт силанольных

групп. Выбран для оценки влияния умеренной мезопористости при той же химической природе поверхности (SiO_2), что и у маршалита. [3].

Активированный уголь марки ОУ-А – углеродный сорбент из древесины берёзы (ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия»), фракция 20–50 нм. Удельная поверхность более 1200 $\text{м}^2/\text{г}$, развита система макро-, мезо- и микропор. Поверхность преимущественно гидрофобна. Выбран как модельный объект с максимальной пористостью и гидрофобной поверхностью. [4].

Активированный уголь марки ОУ-Б – углеродный сорбент, изготавливаемый по аналогичной ОУ-А технологии, но с дополнительной стадией кислотного выщелачивания (рН среды обработки – кислый). Удельная поверхность ОУ-Б составляет не менее 850 $\text{м}^2/\text{г}$. Кислотная обработка приводит к функционализации поверхности кислородсодержащими группами (карбоксильными, гидроксильными, лактонными), что изменяет характер смачиваемости с гидрофобного на гидрофильный. Таким образом, ОУ-Б представляет собой высокопористый гидрофильный минерализатор, что позволяет разделить эффекты пористости и смачиваемости [2, 5, 6].

Сводная характеристика минерализаторов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики исследованных минерализаторов

№ п/п	параметр	маршалит (SiO_2)	силикагель КСМГ	ОУ-Б	ОУ-А
1.	химический состав	$\geq 98\% \text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	С (берёза, кисл. обраб.)	С (берёза)
2.	удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	~0,15	650–800	≥ 850	>1200
3.	объём пор, мл/г	~0 (не пористый)	0,35-0,45	0,4-0,8	0,6-1,2
4.	средний диаметр пор, нм	–	2,0-3,0	2-100	1-100
5.	тип пористости	непористый	мезопористый	макро-мезопористый	макро-мезо-микропористый
6.	характер поверхности	гидрофильный	гидрофильный	гидрофильный	гидрофобный

В качестве базового пенного раствора использовалась смесь дистиллированной воды с пенообразователем ПО-6 в концентрации 6 %. Минерализаторы вводились в раствор в четырёх концентрациях: 0,5, 1,0, 2,0 и 3,0 % масс. Диспергирование частиц осуществлялось при помощи ультразвукового диспергатора (частота 22 кГц, мощность 100 Вт, время обработки 10 мин) для обеспечения равномерного распределения минерализатора в объёме раствора [7].

Перед введением пенообразователя и минерализатора дистиллированная вода подвергалась электрофизической обработке переменным частотно-модулируемым сигналом (ПЧМС) при напряжении 18 кВ. Время обработки ЭФО варьировалось: 0 с (контроль), 900 с, 1800 с и 3600 с. ЭФО оказывает влияние на кластерную структуру водной среды, снижая поверхностное натяжение и улучшая смачивающие свойства.

Генерацию воздушно-механической пены осуществляли механическим способом с использованием ручного помпового пеногенератора, установленного на лабораторном испытательном стенде. Стенд представлял собой вертикальную конструкцию высотой 0,75 м с направляющим отверстием диаметром 35 мм в верхней части, обеспечивающим стабильную вертикальную подачу пены в зону эксперимента. Воспроизводимость условий пенообразования обеспечивалась постоянством геометрии установки, одинаковым способом подачи раствора, неизменной высотой подачи пены и единым порядком выполнения опытов. Кратность пены определялась в соответствии с ГОСТ Р 50558-2012, как отношение объема полученной пены к объему раствора пенообразователя, израсходованного на её получение.

Тушение проводилось на модельных очагах класса В (горение жидких горючих веществ). В качестве горючей жидкости использовался н-гептан (C_7H_{16}). В качестве модельного очага использовали цилиндрический стальной противень внутренним диаметром 280 мм и высотой 100 мм. В противень заливали н-гептан слоем высотой 20 ± 1 мм. Предварительный прогрев горючей жидкости до начала устойчивого горения составлял 60 с, после чего осуществлялась подача пены. Каждый опыт повторялся не менее трёх раз для обеспечения статистической достоверности результатов [8, 9].

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с использо-

ванием стандартных методов математической статистики. Для каждого измеряемого параметра определялось среднее арифметическое значение по трём параллельным измерениям. Доверительный интервал рассчитывался при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Относительная погрешность измерений не превышала 5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве контрольного эксперимента было проведено тушение модельного очага класса В воздушно-механической пеной на основе раствора ПО-6 (6 %) без введения минерализатора. Результаты представлены в табл. 2. Расход огнетушащего вещества принимался по раствору.

Из табл. 2 следует, что увеличение продолжительности ЭФО приводит к росту кратности пены (с 3,2 до 4,2), что объясняется снижением поверхностного натяжения воды и облегчением формирования пузырьков. Вместе с тем наблюдается снижение времени жизни (с 4700 до 3500 с), обусловленное увеличением дисперсности пузырьков и ускорением диффузионного переноса газа (остальдово созревание). Время тушения составляет 5,6–6,2 с, что является базовым показателем для последующего сравнения.

Результаты экспериментов с введением маршалита представлены в табл. 3.

Таблица 2. Пожарно-технические характеристики ВМП базового состава ($H_2O + PO-6 6\%$)

№ п/п	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0	3,2	4700	6,2	0,10	нет
2.	900	3,4	4130	5,6	0,12	нет
3.	1800	3,7	4130	5,7	0,14	нет
4.	3600	4,2	3500	5,9	0,15	нет

Таблица 3. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением маршалита (SiO_2)

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	3,6	4960	5,0	0,11	нет
2.	0,5	900	3,9	4530	5,0	0,12	нет
3.	0,5	1800	4,0	4580	5,0	0,14	нет
4.	0,5	3600	4,5	3780	5,4	0,17	нет
5.	1,0	0	3,9	5640	4,5	0,13	нет
6.	1,0	900	4,2	4920	4,4	0,14	нет
7.	1,0	1800	4,3	4860	4,0	0,16	нет
8.	1,0	3600	4,9	4390	4,2	0,19	нет
9.	2,0	0	4,8	6100	3,5	0,15	нет
10.	2,0	900	5,2	6220	3,4	0,17	нет

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
11.	2,0	1800	5,1	5500	3,1	0,18	нет
12.	2,0	3600	5,8	4920	3,6	0,22	нет
13.	3,0	0	5,1	7230	3,6	0,18	нет
14.	3,0	900	5,3	7170	4,0	0,19	нет
15.	3,0	1800	5,6	6680	4,0	0,24	нет
16.	3,0	3600	6,6	5510	3,9	0,27	нет

Введение маршалита оказывает положительное влияние на все исследованные параметры воздушно-механической пены. Время жизни увеличивается до 7230 с (3,0% без ЭФО), что на 54% выше контрольного образца, за счёт формирования армированного каркаса из частиц SiO₂ на межфазной границе. При концентрации 3,0 % наблюдается эффект насыщения – время тушения возрастает до 3,6 с по сравнению с 3,5 с при 2,0 %. Оптимальная концентрация маршалита составляет 2,0% масс. при ЭФО 1800 с (время тушения 3,1 с, время жизни 5500 с).

Результаты экспериментов с введением мезопористого гидрофильного силикагеля КСМГ представлены в табл. 4.

Силикагель КСМГ обеспечивает кратность выше, чем у маршалита, при всех исследованных концентрациях благодаря интенсивной нуклеации пузырьков на развитой мезопористой поверхности. Время жизни пены (5780 с при 2,0 % без ЭФО) ниже, чем у маршалита

(6100 с), но существенно превышает контрольный образец (4700 с). Снижение объясняется частичной адсорбцией молекул ПАВ в мезопорах, однако этот эффект умерен, поскольку размер пор (2–3 нм) недостаточен для полного поглощения мицелл ПАВ. Силикагель КСМГ при концентрации 2,0 % обеспечивает минимальное время тушения: 3,2 с без ЭФО и 2,9 с при ЭФО 1800 с. Превосходство обусловлено синергией структурного армирования пенной плёнки и резервуарного удержания воды в мезопорах по механизму капиллярной конденсации. При 3,0 % наблюдается насыщение (время тушения 3,4 с). Оптимальный режим – 2,0 % масс., ЭФО 1800 с (время тушения 2,9 с, время жизни 5280 с, расход ОТВ 0,24 л).

Результаты экспериментов с введением высокопористого гидрофильного активированного угля ОУ-Б представлены в табл. 5.

Таблица 4. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением силикагеля КСМГ

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	3,9	4780	4,8	0,12	нет
2.	0,5	900	4,0	4540	4,7	0,14	нет
3.	0,5	1800	4,3	4410	4,6	0,15	нет
4.	0,5	3600	4,8	3890	5,0	0,19	нет
5.	1,0	0	4,4	5310	4,2	0,16	нет
6.	1,0	900	4,7	5080	4,0	0,17	нет
7.	1,0	1800	4,9	4870	3,8	0,19	нет
8.	1,0	3600	5,5	4220	4,1	0,23	нет
9.	2,0	0	5,6	5780	3,2	0,19	нет
10.	2,0	900	6,0	5610	3,1	0,22	нет
11.	2,0	1800	6,1	5280	2,9	0,24	нет
12.	2,0	3600	6,9	4650	3,3	0,30	нет
13.	3,0	0	6,3	5440	3,4	0,23	нет
14.	3,0	900	6,7	5280	3,5	0,27	нет
15.	3,0	1800	7,1	4910	3,3	0,31	нет
16.	3,0	3600	7,9	4280	3,6	0,38	нет

Таблица 5. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением ОУ-Б

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	4,1	4290	5,6	0,15	нет
2.	0,5	900	4,2	4180	5,9	0,17	нет
3.	0,5	1800	4,5	4050	6,0	0,19	нет
4.	0,5	3600	5,2	3690	5,5	0,25	нет
5.	1,0	0	5,0	4560	5,1	0,20	нет
6.	1,0	900	5,1	4420	4,9	0,22	нет
7.	1,0	1800	5,4	4090	5,2	0,24	нет
8.	1,0	3600	6,2	3500	5,3	0,31	нет
9.	2,0	0	6,9	4450	4,2	0,28	нет
10.	2,0	900	7,1	4110	4,3	0,36	нет
11.	2,0	1800	7,4	4110	4,2	0,39	нет
12.	2,0	3600	8,4	3510	3,9	0,51	нет
13.	3,0	0	8,5	4100	4,1	0,39	нет
14.	3,0	900	8,9	4000	4,5	0,48	нет
15.	3,0	1800	9,4	3490	4,0	0,55	нет
16.	3,0	3600	10,3	3080	4,0	0,65	нет

Активированный уголь ОУ-Б обеспечивает наивысшую кратность пены – до 10,33 (3,0 %, ЭФО 3600 с), что обусловлено множественными центрами нуклеации на развитой системе макро- и мезопор при гидрофильной поверхности. Вместе с тем время жизни пены с ОУ-Б существенно уступает маршалиту и силикагелю: максимальное значение 4560 с (1,0 % без ЭФО), а при 3,0 % и ЭФО 3600 с снижается до 3080 с – ниже контроля. Время тушения 4,2 с

(2,0 % без ЭФО) хуже, чем у маршалита (3,5 с) и силикагеля (3,2 с), при существенно более высоком расходе ОТВ (0,28 л). Высокая пористость, даже при гидрофильной поверхности, приводит к значительной адсорбции ПАВ в порах и снижает удельную эффективность пены.

Результаты экспериментов с введением высокопористого гидрофобного активированного угля ОУ-А представлены в табл. 6.

Таблица 6. Пожарно-технические характеристики ВМП с добавлением ОУ-А

№ п/п	Конц., %	время ЭФО, с	кратность	время жизни, с	время тушения, с	расход ОТВ, л	повт. воспл.
1.	0,5	0	3,3	2730	10,2	0,26	нет
2.	0,5	900	3,4	2520	11,0	0,32	нет
3.	0,5	1800	3,7	2420	10,1	0,37	нет
4.	0,5	3600	4,1	2170	11,4	0,44	нет
5.	1,0	0	3,2	1890	13,9	0,43	нет
6.	1,0	900	3,3	1870	14,7	0,52	нет
7.	1,0	1800	3,7	1790	15,1	0,61	нет
8.	1,0	3600	3,9	1690	15,1	0,69	нет
9.	2,0	0	3,2	1190	24,5	0,84	да
10.	2,0	900	3,4	1170	25,8	0,93	да
11.	2,0	1800	3,6	1170	23,8	0,98	да
12.	2,0	3600	3,8	1140	26,2	1,34	да
13.	3,0	0	2,7	1180	35,8	1,22	да
14.	3,0	900	2,9	1170	39,3	1,42	да
15.	3,0	1800	3,2	1170	36,2	1,75	да
16.	3,0	3600	3,6	1140	37,7	1,97	да

Активированный уголь ОУ-А оказывает наиболее деструктивное воздействие на пенную структуру. Кратность при 3,0 % без ЭФО составляет 2,7 – ниже контрольного образца (3,2), поскольку гидрофобные частицы не способны стабилизировать межфазную границу. При концентрациях $\geq 2,0$ % время жизни пены снижается до 1140–1190 с, что обусловлено интенсивной адсорбцией ПАВ в развитой системе микро- и мезопор гидрофобного сорбента. При данных концентрациях во всех опытах зафиксировано повторное воспламенение вследствие отсутствия устойчивого изолирующего слоя пены на поверхности горючей жидкости.

На основании полученных экспериментальных данных можно сформулировать следующий механизм влияния пористости минерализаторов на пожарно-технические характеристики ВМП.

При введении минерализатора в пенный раствор происходят конкурирующие процессы:

1. Адсорбция частиц на межфазной границе «вода–воздух» – гидрофильные частицы закрепляются на поверхности пенных плёнок, формируя армированный каркас, повышающий механическую прочность пены и замедляющий дренаж (механизм Пикеринга).

2. Адсорбция молекул ПАВ на поверхности и в порах минерализатора – молекулы пенообразователя переносятся из раствора на поверхность и во внутренний объём пор минерализатора, что снижает концентрацию ПАВ на межфазной границе и ослабляет стабилизирующий эффект пенообразователя.

3. Удержание воды в порах – мезопористые минерализаторы способны удерживать воду по механизму капиллярной конденсации, что замедляет дренаж, но одновременно увеличивает расход ОТВ.

Соотношение этих процессов определяется удельной поверхностью и характером поверхности минерализатора:

- Непористый гидрофильный (маршалит): доминирует процесс (1), процесс (2) минимален из-за малой удельной поверхности. Результат – максимальная устойчивость пены.

- Мезопористый гидрофильный (силикагель КСМГ): процессы (1) и (3) выражены, процесс (2) умерен – мезопоры (2–3 нм) слишком малы для эффективной адсорбции мицелл ПАВ, но достаточны для капиллярного удержания воды. Результат – оптимальный баланс устойчивости и огнетушащей эффективности.

- Высокопористый гидрофильный (ОУ-Б): процессы (1) и (3) выражены, но процесс (2) усилен – широкий диапазон пор (от микро- до макро-) обеспечивает адсорбцию ПАВ

различного размера. Результат – высокая кратность, но сниженная устойчивость и повышенный расход ОТВ.

- Высокопористый гидрофобный (ОУ-А): процесс (1) отсутствует (частицы не закрепляются на межфазной границе), процесс (2) максимален (гидрофобная поверхность дополнительно усиливает адсорбцию ПАВ). Результат – катастрофическое разрушение пены, повторное воспламенение.

Полученные экспериментальные результаты полностью подтверждают выдвинутую научную гипотезу. Действительно, при равном гидрофильном характере поверхности (маршалит, силикагель, ОУ-Б) пожарно-технические характеристики ВМП определяются пористой структурой минерализатора. Оптимальные показатели достигаются при использовании силикагеля КСМГ с удельной поверхностью 650–800 м²/г (мезопористый минерализатор), а чрезмерно развитая пористость (ОУ-Б, ≥ 850 м²/г; ОУ-А, > 1200 м²/г) приводит к ухудшению пожарно-технических характеристик вследствие конкурентной адсорбции ПАВ.

Результаты позволяют обосновать критерий выбора оптимального минерализатора для ВМП: сочетание умеренной мезопористости (удельная поверхность 300–800 м²/г, средний диаметр пор 2–5 нм) с гидрофильным характером поверхности обеспечивает наилучшие пожарно-технические характеристики за счёт баланса между:

- структурным армированием пенной плёнки (высокая устойчивость);

- удержанием воды в мезопорах по механизму капиллярной конденсации (дополнительное охлаждение);

- умеренной адсорбцией ПАВ, не нарушающей стабильность межфазного слоя.

Выводы

1. В работе проведено систематическое сравнительное экспериментальное исследование влияния пористой структуры минерализаторов (маршалит SiO₂, силикагель КСМГ, активированный уголь ОУ-Б, активированный уголь ОУ-А) с удельной поверхностью от ~0,15 до > 1200 м²/г на пожарно-технические характеристики ВМП при тушении модельных очагов класса В в единых условиях эксперимента.

2. Непористый гидрофильный маршалит (SiO₂, ~0,15 м²/г) обеспечивает максимальное время жизни пены – 7230 с (3,0 % масс., рост на 54 %) за счёт формирования армированного каркаса без конкурентной адсорбции ПАВ.

3. Мезопористый гидрофильный силикагель КСМГ (650–800 м²/г) обеспечивает

оптимальный баланс характеристик: минимальное время тушения 2,9 с (2,0 % масс., ЭФО 1800 с, снижение на 53 %), время жизни 5280 с, расход ОТВ 0,24 л.

4. Высокопористый гидрофильный ОУ-Б (≥ 850 м²/г) даёт наивысшую кратность (10,33 при 3,0 %), но снижает время жизни и повышает расход ОТВ из-за избыточной адсорбции ПАВ.

5. Высокопористый гидрофобный ОУ-А (> 1200 м²/г) при $\geq 2,0$ % снижает время жизни до 1400–1900 с и приводит к повторному воспламенению вследствие интенсивной адсорбции ПАВ и разрушения пенной плёнки.

6. Выявлен механизм влияния пористости: при введении минерализатора в пенный раствор конкурируют процессы армирования межфазной границы (повышение устойчивости), адсорбции ПАВ в порах (снижение устойчивости) и капиллярного удержания воды (дополнительное охлаждение). Баланс этих процессов определяется удельной поверхностью и

характером смачиваемости минерализатора.

7. Сформулирован критерий выбора оптимального минерализатора для ВМП: сочетание умеренной мезопористости (удельная поверхность 300–800 м²/г, средний диаметр пор 2–5 нм) с гидрофильным характером поверхности обеспечивает наилучшие пожарно-технические характеристики за счёт синергетического эффекта структурного армирования и резервуарного удержания воды.

Результаты открывают перспективы для дальнейшего совершенствования технологий пенного пожаротушения и могут быть положены в основу разработки нормативных требований к составу минерализованных огнетушащих пен нового поколения, а также рекомендаций по выбору минерализаторов для применения в экстремальных условиях (арктический климат, пожары литий-ионных аккумуляторов, пожары в местах разлива нефтепродуктов и др.).

Список литературы

1. Макаров В. Г. Взрывы и пожары на танкерах в результате возникновения статического электричества // Записки горного института. 2008. Том 176. С. 95–101.

2. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средств их тушения: справочник. Под редакцией коллектива авторов, включая А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук. Том 1. М.: Химия, 1990, 496 с.

3. Техносферная безопасность. Организация пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ: учебное пособие / А. П. Решетов, В. В. Ключ, С. А. Турсенев [и др.]. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, 2023. 112 с. EDN: QVQSQZ.

4. 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: 10.61260/2218-13X-2025-4-14-22.

5. 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.

6. Алексеик Е. Б., Савенкова А. Е., Геммиш 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.

7. Любимов Е. В., Микушов А. В., Орлов Г. В. Опасности, возникающие при тушении судовых пожаров водой в Арктике // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2015. № 1. С. 47–52.

8. Патент на полезную модель № 194307 Российская Федерация МПК А 62 С 8/06 (2006.01), А 62 С 3/06 (2006.01), А 62 С 3/07 (2006.01). Огнегасительная базальтовая сетка / Г. К. Ивахнюк, С. А. Головин, Ю. Ю. Осмонов [и др.]; опубл. 05.12.2019, Бюл. № 34.

9. Патент на полезную модель № 217399 Российская Федерация МПК А 62 С 3/07 (2006.01), А 62 С 37/40 (2006.01), А 62 С 37/46 (2006.01). Средство тушения пожаров на автостоянках закрытого типа на основе базальтового полотна / Г. К. Ивахнюк, А. Б. Акимова, А. С. Константинова [и др.]; опубл. 30.03.2023, Бюл. № 10.

References

1. Makarov V. G. Vzryvy i pozhary na tankerakh vsledstvie sticheseskogo elektrichestva [Explosions and fires on tankers as a result of static electricity]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2008, vol. 176, pp. 95–101.

2. *Pozharovzryvoopasnist veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents: handbook] / Pod redaktsiyey kollektiva avtorov, vklyuchaya A. N. Baratov, A. Ya. Korol'chenko, G. N. Kravchuk [et al.]. Moscow: Khimiya, 1990, vol. 1, 496 p.

3. *Tekhnosfernaya bezopasnost. Organizatsiya tusheniya pozharov i provedeniya avariinospasatelnykh rabot: uchebnoye posobiye* [Technosphere safety. Organization of fire fighting and rescue operations: tutorial] / A. P. Reshetov, V. V. Klyuj, S. A. Tursenev [et al.]. SPb.: Sankt-Peterburgskiy universitet GPS MChS Rossii imeni Geroya Rossiyskoy Federatsii generala armii Ye. N. Zinicheva, 2023. 112 p.

4. Arzaev N. A., Ivakhnyuk G. K. Vliyanie reagentnoy i nereagentnoy modifikatsii dispersnoy sredy i khimicheskikh svoystv poverkhnosti mineralizatorov na pozharo-tekhnicheskie kharakteristiki vozdušno-mekhanicheskikh pen [The influence of reagent and non-reagent modification of a dispersed medium and chemical properties of the surface of mineralizers on the fire-technical characteristics of air-mechanical foams]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii»*, 2025, issue 4, pp. 14–22. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-4-14-22.

5. Volik A. S., Kvashnin A. V., Ivakhnyuk G. K. Vliyanie elektricheskogo polya na oagnetushashchie svoystva vozdušno-mekhanicheskoy peny [The influence of an electric field on the extinguishing properties of air-mechanical foam].

Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere, 2020, vol. 3 (55), pp. 103–107.

6. Alekseik E. B., Savenkova A. E., Gemish Z. Vliyanie peremennykh elektricheskikh poley na protsessy sozdaniya i stabilizatsii vozdušno-mekhanicheskikh pen [The influence of alternating electric fields on the processes of creating and stabilizing air-mechanical foams]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii»*, 2013, issue 4, pp. 44–48.

7. Lyubimov E. V., Mikushov A. V., Orlov G. V. Opasnosti, vznikayushchie pri tushenii korabelnykh pozharov vodoy v Arktike [Hazards arising from extinguishing ship fires with water in the Arctic]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii»*, 2015, issue 1, pp. 47–52.

8. G. K. Ivakhnyuk, S. A. Golovin, Yu. Yu. Osmonov [et al.]. Oagnetushashchaya bazaltovaya setka [Fire extinguishing basalt mesh]. Patent poleznoy modeli № 194307 Rossiyskaya Federatsiya IPC A 62 C 8/06 (2006.01), A 62 C 3/06 (2006.01), A 62 C 3/07 (2006.01)., opubl. 05.12.2019, Byul. № 34.

9. G. K. Ivakhnyuk, A. B. Akimova, A. S. Konstantinova [et al.]. Oagnetushashchee sredstvo v zakrytykh parkovkakh na osnove bazaltovoy tkani [A fire extinguishing agent in closed parking lots based on basalt fabric]. Patent poleznoy modeli № 217399 Rossiyskaya Federatsiya IPC A 62 C 3/07 (2006.01), A 62 C 37/40 (2006.01), A 62 C 37/46 (2006.01), opubl. 30.03.2023, Byul. № 10.

Арзаев Никита Анатольевич

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

адъюнкт, преподаватель кафедры ПБТПиП

E-mail: n.arzaef@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-9179-5087

SPIN: 5765-9936

Arzaev Nikita Anatolyevich

Saint Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Saint Petersburg

adjunct, lecturer

E-mail: n.arzaef@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-9179-5087

SPIN: 5765-9936

Ивахнюк Григорий Константинович

Санкт-Петербургский государственный технологический институт,

Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

Доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерной защиты окружающей среды»

E-mail: fireside@inbox.ru

SPIN: 1985-9518

Author ID: 521920

ORCID: 0000-0003-2556-303X

Ivakhnyuk Grigory Konstantinovich

Saint Petersburg State Technological Institute,

Russian Federation, Saint Petersburg

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Engineering

E-mail: fireside@inbox.ru

SPIN: 1985-9518

Author ID: 521920

ORCID: 0000-0003-2556-303X