

ОГNETУШАЩАЯ И ПЛЕНКООБРАЗУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОГNETУШАЩИХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ФТОРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Дожкешева Е.А.

Цель. Разработать и апробировать методики определения пленкообразующей способности и огнетушащей эффективности составов на основе фторированных и углеводородных поверхностно-активных веществ (ПАВ) при подаче в виде мелкодисперсной воды.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических методов исследования (анализ, синтез, сравнение). Время устойчивости на поверхности горючей жидкости паронепроницаемой водной пленки и эффективность тушения пленкообразующими водными химическими огнетушащими составами оценивались экспериментальным путем. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с использованием метода оценивания и выражения неопределенности измерений.

Результаты. Разработана и апробирована лабораторная методика по определению времени устойчивости паронепроницаемой водной пленки из растворов на основе фторированных и углеводородных ПАВ на поверхности горючей жидкости. Разработана и апробирована лабораторная методика определения огнетушащей эффективности мелкодисперсной воды с добавками ПАВ при тушении модельного очага пожара класса В. Разработанные методики позволяют с небольшими затратами проводить исследования по разработке новых рецептур огнетушащих веществ, применяемых в виде мелкодисперсной воды.

Экспериментально установлено, что изменение концентрации углеводородных ПАВ от 0 до 4 % приводит к снижению межфазного натяжения от 5,86 до 1,26 мН·м⁻¹, увеличению коэффициента растекания водного раствора по поверхности горючей жидкости от -1,06 до 2,58 мН·м⁻¹ и повышению огнетушащей эффективности E_v в 25 раз при тушении модельного очага. Увеличение коэффициента растекания водной пленки приводит к увеличению огнетушащей эффективности огнетушащих составов на основе фторированных и углеводородных ПАВ.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рецептуры пленкообразующих огнетушащих составов для тушения пожаров.

Ключевые слова: фторированное поверхностно-активное вещество, углеводородное поверхностно-активное вещество, поверхностное натяжение, межфазное натяжение, огнетушащая эффективность, время тушения, интенсивность подачи огнетушащего вещества.

(Поступила в редакцию 10 января 2024 г.)

Введение

Огнетушащая эффективность – основной показатель качества огнетушащего вещества, определяющий область и способ его применения. На огнетушащую эффективность пленкообразующих огнетушащих составов могут влиять ряд параметров, такие как коэффициент растекания пленкообразующего раствора по поверхности горючей жидкости, время жизни водной пленки на поверхности горючей жидкости, кратность и устойчивость образующей пены и т.д. [1–7].

Известно, что ключевым условием для обеспечения растекания водного раствора по поверхности горючей жидкости является сумма значений поверхностного натяжения водного раствора на границе с воздухом и межфазного поверхностного натяжения, которая

должна быть меньше поверхностного натяжения углеводорода. Для снижения поверхностного натяжения до необходимых величин в составе пленкообразующего раствора применяют фторированные ПАВ (далее – ФПАВ) [8].

За пленкообразующую эффективность водного раствора ПАВ принимается способность образования на поверхности горючей жидкости водной пленки и время защитного действия пленки до разрыва [9]. Данные характеристики водных растворов ПАВ в ходе исследования принимаются как основные параметры, определяющие огнетушащую эффективность водных пленкообразующих растворов.

Насколько экологически чистым будет пленкообразующий состав, зависит в первую очередь от количества ФПАВ в растворе, как наиболее стойкого органического загрязнителя. Научная идея при разработке данных составов заключается в уменьшении содержания ФПАВ в пленкообразующих водных огнетушащих составах при сохранении огнетушащей эффективности. Для определения возможности снижения содержания ФПАВ следует провести исследование с целью установления взаимного влияния углеводородных ПАВ (далее – УПАВ) и ФПАВ на огнетушащую эффективность и выявить физико-химические свойства растворов ПАВ, при которых создаются наилучшие условия для тушения горючей жидкости.

Основная часть

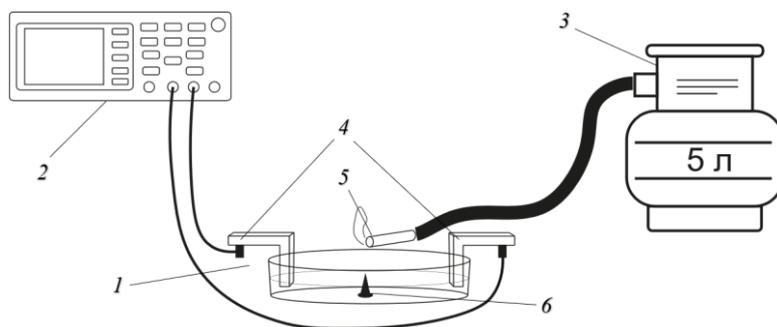
Используя комбинации из разного процентного соотношения УПАВ и ФПАВ, установили процентные соотношения данных ПАВ с наибольшей огнетушащей эффективностью водного раствора.

Для испытаний применялись 4 образца с процентным содержанием УПАВ 0, 1, 2 и 4 % соответственно. Описание составов образцов огнетушащих веществ (далее – ОТВ), которые использовались в исследованиях, приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Описание исследуемых образцов ОТВ

Образец	Состав ОТВ, мас. д., %			
	УПАВ	ФПАВ	составитель	вода
Образец 1	0	2	20	78
Образец 2	1	2	20	77
Образец 3	2	2	20	76
Образец 4	4	2	20	74

Лабораторная методика оценки пленкообразующей эффективности. Известно, что при применении в качестве огнетушащего вещества пленкообразующих пенообразователей их огнетушащая эффективность зависит от свойств формируемой паронепроницаемой водной пленки на поверхности горючей жидкости [8]. Для проведения лабораторных исследований по установлению скорости образования, толщины и времени устойчивости паронепроницаемой водной пленки на поверхности горючей жидкости используется методика, представленная в работе [10], схема лабораторной установки изображена на рисунке 1.



1 – чашка Петри; 2 – цифровой мультиметр; 3 – газовый баллон;
4 – посеребренные пластины; 5 – горелка; 6 – шуруп

Рисунок 1. – Схема лабораторной установки для оценки пленкообразующей способности

В таблицах 2 и 3 приведены применяемые для проведения испытаний оборудование и средства измерений.

Таблица 2. – Экспериментальное оборудование для оценки пленкообразующей эффективности

Наименование оборудования	Характеристика
Чашка Петри	Диаметр – $100 \pm 0,1$ мм; высота – $20 \pm 0,1$ мм; материал – стекло
Штатив лабораторный Бунзена	–
Баллон газовый бытовой (пропан, бутан и их смеси)	Емкость – 5 л
Посеребренные пластины	Ширина – 8 мм; толщина – 3,5 мм
н-гептан эталонный	Согласно ГОСТ 25828-83
Карта видеозахвата	Макс. поддерживаемое разрешение: 3840×2160 4K UHD; интерфейсы – HDMI, USB 3.0

Таблица 3. – Средства измерений для оценки пленкообразующей эффективности

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Погрешность
Секундомер Electronika RI-01	0 ч 00 мин 00 с – 9 ч 59 мин 59,99 с	0,01 с	$\pm(9,6 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{изм.}} + 0,01 \text{ с})$
Цифровой мультиметр	от 0,01 до 500 Ом	0,01 Ом	$\pm 0,15 \% \text{ от } R_{\text{изм.}} + 10^*$
	от 500 до 5000 Ом	0,1 Ом	$\pm 0,15 \% \text{ от } R_{\text{изм.}} + 5^*$
	от 5 до 50 кОм	0,001 кОм	$\pm 0,15 \% \text{ от } R_{\text{изм.}} + 5^*$
	от 50 до 500 кОм	0,01 кОм	$\pm 0,15 \% \text{ от } R_{\text{изм.}} + 5^*$
	от 500 до 5000 кОм	0,1 кОм	$\pm 0,3 \% \text{ от } R_{\text{изм.}} + 5^*$
	от 5 до 50 МОм	0,001 МОм	$\pm 1 \% \text{ от } R_{\text{изм.}} + 10^*$

Примечание. $T_{\text{изм.}}$ – значение измеренного интервала времени; $R_{\text{изм.}}$ – значение измеренного сопротивления.
* – LSB-ошибка (least-significant-bit).

В центр металлического противня диаметром 250–300 мм, высотой борта 35–40 мм, служащего для предотвращения случайного разлива жидкости, помещается лабораторный штатив Бунзена, на который устанавливается чашка Петри диаметром 100 мм и измерительное устройство с датчиками электропроводности, которые подключаются к цифровому мультиметру.

Исследования проводятся при следующих параметрах окружающей среды:

- температура 18–25 °С;
- влажность 65,0–74,0 %;
- атмосферное давление 84,0–106,7 кПа.

В центр чашки Петри вертикально на плоскую шляпку устанавливается шуруп длиной 12–16 мм и диаметром 2–3 мм с резьбой по всей длине, без следов деформации и механической коррозии. В чашку Петри аккуратно заливается 30 мл н-гептана, не нарушая положения шурупа, причем шляпка шурупа и часть резьбы должны находиться под слоем горючего. Пипет-дозатор устанавливается на объем 0,75 мл и наполняется исследуемым раствором. Включается секундомер и на острие шурупа с помощью пипет-дозатора по одной капле выливается исследуемый раствор в течение 45 ± 3 с. Начало образования водной пленки контролируется по значениям цифрового мультиметра, а время устойчивости паронепроницаемой водной пленки путем подноса горячей горелки на расстоянии 15 мм от поверхности зеркала жидкости каждые 15 с после нанесения исследуемого раствора на поверхность н-гептана. Отсутствие воспламенений гептана и кратковременных вспышек от источника зажигания свидетельствует о наличии пленки. При загорании горючей жидкости фиксируется прошедшее время.

При проведении испытаний для повышения точности фиксируемых значений применяется программное обеспечение с поддержкой SCPI-команд¹ для управления цифровым мультиметром и выводом измеряемых значений в рабочее окно персонального компьютера.

¹ Standard Commands for Programmable Instruments (стандартные команды для программируемых приборов) – язык команд для приборов, предназначенный для работы с диагностическими и измерительными устройствами.

Для фиксации событий в ходе проведения испытаний применяется видеочамера с выводом изображения в рабочее окно персонального компьютера. После проведения испытаний видеофайлы анализируются покадрово (рис. 2).



Рисунок 2. – Схема лабораторной установки для оценки пленкообразующей способности

Лабораторная методика определения огнетушащей эффективности. Разработанная методика позволяет при постоянных условиях (камера сгорания, модельный очаг пожара, количество горючего вещества, кратность воздухообмена, расположение и расход форсунки, давление подачи ОТВ) установить огнетушащую эффективность исследуемых составов для установок тушения мелкодисперсной водой на основе пленкообразующего пенообразователя [11].

В таблицах 4 и 5 приведены применяемые для проведения испытаний оборудование и средства измерений.

Таблица 4. – Экспериментальное оборудование для определения огнетушащей эффективности

Наименование оборудования	Характеристика
Бокс для испытаний	Диаметр – 580 ± 1 мм; высота – 820 ± 1 мм
Емкость для ОТВ	Рабочее давление – 0,8 МПа; объем – 10 л
Противень для создания модельного очага пожара класса В	Диаметр – 170,0 ± 0,1 мм; высота – 70,0 ± 0,1 мм
Воздушный безмасляный компрессор	Ресивер – 50 л; производительность на входе – 280 л/мин; максимальное давление – 0,8 МПа
н-гептан эталонный	Согласно ГОСТ 25828-83
Форсунка MR 1.5 Marolex Z12/15	Расход жидкости – 0,6 л/мин; тип – с регулируемым углом струи
Шланг армированный маслостойкий для сжатого воздуха	Диаметр шланга – 6 мм (внутренний), 12 мм (внешний); толщина стенки – 3 мм; длина шланга – 5 м
Клапан электромагнитный	Время открытия/закрытия – 15–35 мс
Карта видеозахвата	Макс. поддерживаемое разрешение: 3840×2160 4K UHD; интерфейсы – HDMI, USB 3.0
USB-реле	Количество каналов – 2; максимальный коммутируемый ток – 10 А
Цифровой фотоаппарат	Максимальное разрешение видео: 3840×2160 скорость съемки – 20 кадр/с

Таблица 5. – Средства измерений для определения огнетушащей эффективности

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Погрешность
Секундомер Elektronika RI-01	0 ч 00 мин 00 с – 9 ч 59 мин 59,99 с	0,01 с	$\pm(9,6 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{изм. нач.}} + 0,01 \text{ с})$
Манометр МВПЗ-УМ-1,5-М20×1,5	0–1000 кПа	5 кПа	$\pm 1,5 \% (\pm 15 \text{ кПа})$
Весы электронные серии Radwag WL2/C/A2	от 0,5 г до 2 кг	0,01 г	$\pm 0,03 \text{ г}$

Испытания проводятся при таких же параметрах окружающей среды, как и при проведении лабораторных исследований по установлению скорости образования, толщины и времени устойчивости на поверхности горючей жидкости паронепроницаемой водной пленки на поверхности горючей жидкости.

Перед началом испытаний проводится калибровка установки по интенсивности подачи ОТВ. Для этого противень модельного очага помещается в установку, включается подача ОТВ и определяется объем ОТВ, попавший в противень за определенный промежуток времени.

Интенсивность подачи ОТВ определяется по формуле:

$$I_{\text{по}} = \frac{V}{t \cdot S}, \quad (1)$$

где V – объем раствора ОТВ, л, t – время подачи ОТВ, с; S – площадь противня модельного очага пожара, м^2 ($S = 0,0026 \text{ м}^2$).

Огнетушащая эффективность пленкообразующего огнетушащего состава определяется на модельном очаге пожара класса В с использованием установки, которая представлена на рисунке 3. Исследуемый раствор пленкообразующего огнетушащего состава готовится непосредственно перед проведением испытаний и заливается в емкость 6, которая с помощью воздушного шланга подключается к компрессору 7. При испытаниях на компрессоре по показанию манометра устанавливается рабочее давление 4 МПа. Из емкости с ОТВ к трубопроводу, на котором установлен распылитель, подводится воздушный шланг.



1 – бокс для испытаний (камера сгорания); 2 – питающий трубопровод с электромагнитным клапаном для подачи огнетушащего вещества с установленным на конце регулируемым распылителем; 3 – поддон; 4 – вентиляционные отверстия с воздуховодами; 5 – дверца со смотровым окном для установки внутри бокса модельного очага пожара; 6 – емкость для ОТВ; 7 – компрессор с манометром; 8 – видеочкамера

Рисунок 3. – Лабораторная установка для определения огнетушащей эффективности

Для минимизации погрешностей при проведении испытаний процесс управления установкой автоматизирован за счет применения быстродействующего электромагнитного клапана, который управляется USB-реле посредством ПЭВМ.

Проведение испытаний начинается с подготовки модельного очага пожара класса В [12]. В противень с помощью мерной емкости заливается $200,0 \pm 0,1$ мл воды и сверху $300,0 \pm 0,1$ мл горючей жидкости. После наполнения противня горючей жидкостью и установления его в испытательный бокс выдерживается время 60 ± 2 с, после чего горючая жидкость поджигается. Время свободного горения горючей жидкости составляет 30 ± 1 с.

После истечения времени свободного горения горючей жидкости открывается электромагнитный клапан и через распылитель происходит подача ОТВ на тушение модельного очага пожара. С помощью секундомера фиксируется время от начала подачи пленкообразующего состава до полного прекращения горения горючей жидкости. После окончания горения раствор пленкообразующего огнетушащего состава подается еще 10 ± 1 с.

Продолжительность тушения ограничивается временем $t_{\max} = 300$ с, по истечении которого возможно самопроизвольное затухание модельного очага пожара. Если тушение модельного очага пожара не наступало за данный промежуток времени, то испытание прекращалось.

После прекращения подачи ОТВ определяется наличие водной пленки на поверхности горючей жидкости. Для этого на расстоянии 15 мм от поверхности проводят зажженной зажигалкой с выносной трубкой с периодичностью 15 ± 1 с. Отсутствие воспламенения горючей жидкости от источника зажигания свидетельствует о наличии пленки. Фиксируется время, прошедшее с момента прекращения подачи ОТВ до момента воспламенения горючей жидкости. Для каждого образца огнетушащего состава проводится не менее пяти измерений времени тушения. За итоговый результат испытаний принимается среднее арифметическое результатов измерений времени тушения. Процесс тушения модельного очага пожара фиксируется с помощью видеокамеры 8. После испытаний видеофайлы анализируются кадровой.

Для установления количественной оценки огнетушащей эффективности разрабатываемых составов рассчитывается показатель эффективности тушения E_t [12]. Он объединяет два главных параметра тушения: удельный расход раствора пенообразователя $V_{\text{по}}$ (л/м²) и время тушения $t_{\text{туш}}$ (с). Показатель E_t позволяет оценить, какую площадь можно потушить 1 л раствора пенообразователя за единицу времени.

Чем выше абсолютное значение показателя E_t , тем выше огнетушащий эффект. Показатель E_t (м²/(л·с)) рассчитывается по следующей формуле:

$$E_t = (V_{\text{по}} \cdot t_{\text{туш}})^{-1}. \quad (2)$$

Так как $V_{\text{по}} = I_{\text{по}} \cdot t_{\text{туш}}$, то показатель эффективности тушения можно записать в виде:

$$E_t = (I_{\text{по}} \cdot t_{\text{туш}}^2)^{-1}. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение. Для оценки влияния концентрации УПАВ на пленкообразующую способность водных растворов ОТВ были проведены исследования образцов 1–4 (табл. 1) с использованием описанной выше лабораторной установки. Результаты исследований приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Результаты определения физико-химических показателей исследуемых образцов

Образец	Поверхностное натяжение, мН·м ⁻¹	Межфазное натяжение, мН·м ⁻¹	Коэффициент растекания, мН·м ⁻¹	Время с момента нанесения состава до воспламенения н-гептана, с
Образец 1 (0 % УПАВ)	$15,70 \pm 0,05$	$5,86 \pm 0,05$	-1,06	0
Образец 2 (1 % УПАВ)	$16,04 \pm 0,05$	$3,08 \pm 0,05$	1,38	$881 \pm 0,1$
Образец 3 (2 % УПАВ)	$15,87 \pm 0,05$	$1,82 \pm 0,05$	2,81	$586 \pm 0,1$
Образец 4 (4 % УПАВ)	$16,66 \pm 0,05$	$1,26 \pm 0,05$	2,58	$463 \pm 0,1$

Как видно из таблицы, увеличение концентрации УПАВ приводит к значительному снижению межфазного натяжения с $5,86 \pm 0,05$ до $1,26 \pm 0,05$ мН·м⁻¹ и незначительному повышению поверхностного натяжения с $15,70 \pm 0,05$ до $16,66 \pm 0,05$ мН·м⁻¹. Вследствие этого повышение концентрации УПАВ приводит к увеличению коэффициента растекания. Исходя из полученных результатов можно предположить, что повышение коэффициента растекания должно приводить к образованию более устойчивой пленки на поверхности горючей жидкости, однако экспериментальные данные по времени устойчивости пленки (время с момента нанесения состава до воспламенения), приведенные в таблице 6, противоречат данному предположению. Исходя из изложенного можно сделать вывод, что есть оптимальный интервал значений коэффициента растекания, в котором время устойчивости пленки на поверхности горючей жидкости максимально.

С использованием лабораторной установки для проведения испытания огнетушащих водных составов проведены испытания по определению огнетушащей эффективности исследуемых образцов (табл. 7). Интенсивность подачи огнетушащего вещества при проведении испытаний составляла $0,032 \pm 0,003$ л/с·м². Указанное значение было выбрано аналогичным интенсивности подачи раствора пенообразователя при испытании огнетушащей эффективности пенообразователей².

Таблица 7. – Результаты исследования огнетушащей эффективности пленкообразующих образцов ОТВ

Образец	Время тушения $t_{туш}$ модельного очага пожара, с	Наличие пленки	Показатель E_t при тушении модельного очага пожара, м ² /(л·с)·10 ²
Образец 1 (0 % УПАВ)	$17,9 \pm 3,3$	нет	0,10
Образец 2 (1 % УПАВ)	$8,2 \pm 2,8$	да	0,54
Образец 3 (2 % УПАВ)	$6,3 \pm 2,0$	да	1,33
Образец 4 (4 % УПАВ)	$4,0 \pm 1,7$	да	2,50

Как видно из таблиц 6 и 7, при увеличении коэффициента растекания пленкообразующего состава время тушения им модельного очага уменьшается.

Несмотря на то что образец 1 не образует пленку на поверхности горючей жидкости, результат тушения был положительный, что свидетельствует о наличии у мелкодисперсной воды с добавками нескольких механизмов тушения. В то же время, если сравнивать испытанные составы по показателю E_t , образец 4 в 25 раз лучше по огнетушащей эффективности, чем образец 1. Также следует отметить отсутствие прямой зависимости показателя E_t от коэффициента растекания, что также свидетельствует о том, что мелкодисперсная вода с добавками может иметь несколько механизмов тушения.

Заключение

Разработана и апробирована лабораторная методика по определению времени устойчивости паронепроницаемой водной пленки из растворов на основе ФПАВ и УПАВ на поверхности горючей жидкости, а также лабораторная методика определения огнетушащей эффективности мелкодисперсной воды с добавками ПАВ при тушении модельного очага пожара класса В. Данные методики позволяют с небольшими затратами проводить исследования по разработке новых рецептур огнетушащих веществ, применяемых в виде мелкодисперсной воды.

Экспериментально установлено, что изменение концентрации УПАВ от 0 до 4 % приводит к снижению межфазного натяжения от 5,86 до 1,26 мН·м⁻¹, увеличению коэффициента растекания водного раствора по поверхности горючей жидкости от -1,06 до 2,58 мН·м⁻¹ и по-

² Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Взамен СТБ ГОСТ Р 50588-99. – Введ. 12.08.16. – Минск, Госстандарт, 2016. – 42 с.

вышению огнетушащей эффективности E_t в 25 раз при тушении модельного очага. Увеличение коэффициента растекания водной пленки приводит к увеличению огнетушащей эффективности огнетушащих составов на основе ФПАВ и УПАВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T23M-061 «Пленкообразующий огнетушащий состав для автоматических установок пожаротушения водой и пеной на основе фторированных поверхностно-активных веществ»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шароварников, А.Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение / А.Ф. Шароварников, С.А. Шароварников. – М.: Пожнаука, 2005. – 335 с. – EDN: UWCCSP.
2. Корольченко, Д.А. Тушение горючих жидкостей пеной из пленкообразующих пенообразователей / Д.А. Корольченко, А.А. Волков // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 8. – С. 45–55. – DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.45-55. – EDN: ZTUOXN.
3. Кремнийсодержащие производные органических кислот в качестве не загрязняющих окружающую среду огнегасящих пленкообразующих пен на водной основе: пат. RU 2017107082 / Д. Блунк, С. Из, Р.Х. Хетцер [и др.]. – Опубл. 29.11.2019. – EDN: RIKSZS.
4. Холмберг, К. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йёнссон, Б. Кронберг, Б. Линдман; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2013. – 528 с. – ISBN 978-5-94774-363-0. – EDN: QKBQZV.
5. Нигметзянов, А.Р. Разработка композиции фторсодержащего пленкообразующего пенообразователя с применением отечественных компонентов / А.Р. Нигметзянов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 14. – С. 93–96. – EDN: STIAIV.
6. Емельянов, В.К. Влияние коллоидно-химических свойств белорусских неионогенных поверхностно-активных веществ на огнетушащую эффективность / В.К. Емельянов, С.Г. Котов, Т.А. Савицкая // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2 (32). – С. 18–27. – EDN: WCNRZF.
7. Котов, С.Г. Исследование пленкообразующей и изолирующей способности растворов фторированных поверхностно-активных веществ / С.Г. Котов, О.Д. Навроцкий, Д.С. Котов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20. – № 5. – С. 25–35. – EDN: NWHDL D.
8. Иванов, И.Ю. Обзор основных характеристик пленкообразующих пенообразователей и способы их контроля / И.Ю. Иванов, Я.А. Кондакова, О.Д. Навроцкий // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 41–47. – EDN PATKDW.
9. Иванов, И.Ю. Исследование фторированных поверхностно-активных веществ для разработки пленкообразующего огнетушащего состава / И.Ю. Иванов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 415–428. – DOI 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. – EDN: DGPXST.
10. Иванов, И.Ю. Методика контроля образования водной пленки пленкообразующих огнетушащих составов на поверхности горючей жидкости / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий, Е.А. Доукешева // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов X Междунар. заочной науч.-практ. конф., Минск, 22 дек. 2023 г. – Минск: УГЗ, 2024. – С. 146–151.
11. Иванов, И.Ю. Лабораторная методика оценки огнетушащей эффективности составов для установок тушения мелкодисперсной водой / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий, Е.А. Доукешева // Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: сб. материалов X Междунар. заочной науч.-практ. конф., Минск, 22 дек. 2023 г. – Минск: УГЗ, 2024. – С. 151–155.
12. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2023. – 244 с.

**Огнетушащая и пленкообразующая способность огнетушащих составов
на основе фторированных поверхностно-активных веществ**
**Fire extinguishing and film-forming ability of fire extinguishing compositions
based on fluorinated surfactants**

Иванов Игорь Юрьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: igor.ivanovwork8@gmail.com
SPIN-код: 3880-5485

Igor Yu. Ivanov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: igor.ivanovwork8@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1072-2432

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com
SPIN-код: 4031-1141

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4137-2519

Дукешева Елена Анатольевна

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра организации
надзорной и профилактической деятельности,
преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: doukesheva@mail.ru

Elena A. Doukesheva

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Supervisory and Preventive Activities,
Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: doukesheva@mail.ru
ORCID: 0009-0001-3192-4228

FIRE EXTINGUISHING AND FILM-FORMING ABILITY OF FIRE EXTINGUISHING COMPOSITIONS BASED ON FLUORINATED SURFACTANTS

Ivanov I.U., Navrotsky O.D., Doukesheva E.A.

Purpose. To develop and test methods for determining the film-forming ability and fire extinguishing efficiency of compositions based on fluorinated and hydrocarbon surfactants when supplied in the form of water mist.

Methods. The general methodology of the work included the use of theoretical research methods (analysis, synthesis, comparison). The stability time of a vapor-proof aqueous film on the surface of a flammable liquid and the evaluation of the extinguishing efficiency of film-forming aqueous chemical fire extinguishing compounds were carried out experimentally. The obtained experimental data were processed using the estimation method and expression of measurement uncertainty.

Findings. A laboratory technique has been developed and tested for determining the stability time of a vapor-proof aqueous film from the solutions based on fluorinated and hydrocarbon surfactants on the surface of a flammable liquid. A laboratory method for determining the fire extinguishing effectiveness of finely dispersed water with surfactant additives when extinguishing a model class B fire has been developed and tested. The developed methods allow, at low cost, to conduct research on the development of new formulations of fire extinguishing agents used in the form of water mist.

It has been experimentally established that a change in the concentration of hydrocarbon surfactants from 0 to 4 % leads to a decrease in interfacial tension from 5.86 to 1.26 mN·m⁻¹, an increase in the spreading coefficient of an aqueous solution over the surface of a flammable liquid from -1.06 up to 2.58 mN·m⁻¹ and increasing the fire extinguishing efficiency E_i by 25 times when extinguishing a model fire. An increase in the spreading coefficient of the water film leads to an increase in the fire extinguishing efficiency of fire extinguishing compositions based on fluorinated and hydrocarbon surfactants.

Application field of research. The results obtained can be used in developing the formulation of film-forming fire extinguishing compositions for extinguishing fires.

Keywords: fluorinated surfactant; hydrocarbon surfactant; surface tension, interfacial tension, fire extinguishing efficiency, extinguishing time, intensity of fire extinguishing agent supply.

(The date of submitting: January 10, 2024)

REFERENCES

1. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primeneniye* [Foam concentrates and fire extinguishing foam, Structure, properties, application]. Moscow: Pozhnauka, 2005. 335 p. (rus). EDN: UWCCSP.
2. Korol'chenko D.A., Volkov A.A. Tushenie goryuchikh zhidkostey penoy iz plenkoobrazuyushchikh penoobrazovateley [Extinguishing of flammable liquids by film forming foaming agents]. *Fire and Explosion Safety*, 2017, Vol. 26, No. 8. Pp. 45–55. (rus). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.45-55. EDN: ZTUOXN.
3. Blunk D., Ie S., Hetzer R.H. [et al.] *Kremniysoderzhashchie proizvodnye organicheskikh kislot v kachestve ne zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredyu ognegasyashchikh plenkoobrazuyushchikh pen na vodnoy osnove* [Silicon-containing derivatives of organic acids as non-polluting extinguishing film-forming water-based foams]: patent RU 2017107082. Published November 29, 2019. (rus). EDN: RIKSZS.
4. Holmberg K., Jönsson B., Kronberg B., Lindman B. *Surfactants and polymers in aqueous solutions*: translation from English. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. 528 p. (rus). ISBN 978-5-94774-363-0. EDN: QKBQZV.
5. Nigmatzyanov A.R., Kil'diyarov A.R., Bazunova M.V., Valiev D.R., Zaikov G.E. Razrabotka kompozitsii ftorsoderzhashchego plenkoobrazuyushchego penoobrazovatelya s primeneniem otechestvennykh komponentov [Development of a composition of a fluorine-containing film-forming foaming agent using domestic components]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014. Vol. 17, No. 14. Pp. 93–96. (rus). EDN: STIAIV.
6. Emel'yanov V.K., Kotov S.G., Savitskaya T. A. Vliyanie kolloidno-khimicheskikh svoystv belorusskikh neionogennykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na ognetyashchuyu effektivnost' [Influence of

- colloid-chemical properties of Belarusian non-ionogenic surfactants on fire extinguishing efficiency]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2012. No. 2 (32). Pp. 18–27. (rus). EDN: WCNRZF.
7. Kotov S.G., Navrotsky O.D., Kotov D.S. Issledovanie plenkoobrazuyushchey i izoliruyushchey sposobnosti rastvorov ftorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Investigation of the film-forming and insulating ability of solutions of fluorinated surfactants]. *Fire and explosion safety*, 2011. Vol. 20, No. 5. Pp. 25–35. (rus). EDN: NWHDL.
 8. Ivanov I.Yu., Kondakova Ya.A., Navrotsky O.D. Obzor osnovnykh kharakteristik plenkoobrazuyushchikh penoobrazovatelye i sposoby ikh kontrolya [Review of the main characteristics of film-forming foaming agents and methods of their control]. *Proc. V Intern. scientific-practical conf. «Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii»*. Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2021. Pp. 41–47. (rus). EDN: PATKDW.
 9. Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Kondakova Ya.A., Krasavin V.E., Busel M.O. Issledovanie ftorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv dlya razrabotki plenkoobrazuyushchego ognetchashchego sostava [Research of fluorinated surfactants for the development of a film-forming fire extinguishing composition]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 415–428. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGXST.
 10. Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Doukeshcheva E.A. Metodika kontrolya obrazovaniya vodnoy plenki plenkoobrazuyushchikh ognetchashchikh sostavov na poverkhnosti goryuchey zhidkosti [Methodology for controlling the formation of aqueous film of film-forming extinguishing compositions on the surface of a combustible liquid]. *Proc. X Intern. extramural scientific-practical conf. «Problemy obespecheniya bezopasnosti lyudey pri pozhare i vzryve»*, Minsk, December 22, 2023. Minsk: University of Civil Protection, 2024. Pp. 146–151. (rus)
 11. Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Doukeshcheva E.A. Laboratornaya metodika otsenki ognetchashchey effektivnosti sostavov dlya ustanovok tusheniya melkodispersnoy vodoy [Laboratory methodology for evaluating the extinguishing effectiveness of formulations for water mist extinguishing plants]. *Proc. X Intern. extramural scientific-practical conf. «Problemy obespecheniya bezopasnosti lyudey pri pozhare i vzryve»*, Minsk, December 22, 2023. Minsk: University of Civil Protection, 2024. Pp. 151–155. (rus)
 12. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennyne orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing installations]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus)