

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФТОРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕГО ОГНЕТУШАЩЕГО СОСТАВА

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Кондакова Я.А., Красавин В.Е., Бусел М.О.

*Цель.* Провести исследование зависимости поверхностного натяжения фторированных ПАВ различной химической природы от их концентрации и определить фторированное ПАВ, наиболее подходящее для использования в пленкообразующих пенообразователях.

*Методы.* Измерение поверхностного натяжения растворов осуществляли с помощью автоматического тензиометра KRÜSS K20, используя метод отрыва кольца Дю Нуи, изложенный в ISO 304:1985. Определение критической концентрации мицеллообразования растворов поверхностно-активных веществ в водных системах проводили согласно ГОСТ 29232-1991.

*Результаты.* Приведены результаты исследования поверхностного натяжения водных растворов анионоактивных, неионогенных и амфотерных фторированных поверхностно-активных веществ (ПАВ) различных производителей. Установлены наиболее перспективные фторированные ПАВ и соразтворители для применения в составе пленкообразующего пенообразователя целевого назначения для тушения пожаров. Обоснован выбор фторированного ПАВ для создания пенообразователя целевого назначения, позволяющего получать водную пленку на поверхности н-гептана.

*Область применения исследований.* Полученные результаты могут быть использованы при разработке рецептуры пенообразователя целевого назначения для тушения пожаров.

*Ключевые слова:* пенообразователь целевого назначения для тушения пожаров, фторированное поверхностно-активное вещество, поверхностное натяжение, межфазное натяжение.

(Поступила в редакцию 4 октября 2022 г.)

### Введение

Для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов часто применяются пенообразователи, наиболее эффективными из которых являются пленкообразующие пенообразователи, образующие водную пленку на поверхности горючей жидкости (Aqueous Film Forming Foams, AFFF). Образование водной пленки увеличивает скорость растекания пены по поверхности горючей жидкости, а также увеличивает изолирующую способность пены и повышает устойчивость к повторному воспламенению горючей жидкости. Основные характеристики пленкообразующих пенообразователей и способы их контроля рассмотрены в публикациях [1–8].

Основными компонентами пленкообразующих пенообразователей являются вода, фторированные и углеводородные ПАВ, соразтворители. Основное назначение углеводородных ПАВ в составе пенообразователя – образование пены, а фторированных ПАВ (ФПАВ) – снижение поверхностного натяжения до значений, когда возможно образование водной пленки на поверхности горючей жидкости. Способность снижать поверхностное натяжение ФПАВ имеет решающее значение в процессе образования водной пленки и определяет, будет ли пенообразователь обладать пленкообразующей способностью. Поэтому исследование свойств ФПАВ имеет важное значение при разработке пленкообразующего пенообразователя.

Также в составе пенообразователей могут применяться антифризы для снижения температуры кристаллизации, ингибиторы коррозии для уменьшения воздействия пенообразователя на материалы емкостей для его хранения, трубопроводной и запорной арматуры, консерванты для предотвращения биологической деструкции.

В спиртостойких пенообразователях также могут использоваться водорастворимые полимерные вещества. Как правило, каждый компонент пенообразователя имеет различную поверхностную активность, что может приводить к изменению значений поверхностного и межфазного натяжений растворов пенообразователей. По сравнению с растворами индивидуальных ПАВ, их смеси демонстрируют большую разнообразность возможного поведения. В частности, при смешении ПАВ могут наблюдаться синергетические эффекты, выражающиеся в том, что в растворе обнаруживаются эффекты, которые отсутствуют или выражены значительно слабее для растворов индивидуальных ПАВ (например, снижение критической концентрации мицеллообразования)<sup>1</sup> [9].

### Основная часть

Наиболее важной характеристикой фторированного ПАВ (ФПАВ) является его способность снижать поверхностное натяжение на границе раствор ПАВ – воздух. Еще одна важная характеристика ПАВ – величина критической концентрации мицеллообразования. Это связано с тем, что ПАВ после достижения предела растворимости образует в растворителе конгломераты, которые называют мицеллами. Концентрация, при которой образуются такие мицеллы, называют критической концентрацией мицеллообразования (ККМ). При увеличении концентрации ПАВ выше ККМ истинный раствор ПАВ переходит в коллоидное состояние, при этом увеличивается число мицелл в растворе, а концентрация свободных молекул ПАВ в растворе остается практически постоянной и поэтому поверхностное натяжение также почти не изменяется. Процесс мицеллообразования обратим: разбавление раствора до концентрации менее ККМ переводит раствор из коллоидного в истинный [6].

С целью определения наиболее эффективно снижающих поверхностное натяжение фторированных ПАВ проведено исследование зависимости поверхностного натяжения фторированных ПАВ различной химической природы от их концентрации.

Поверхностное натяжение растворов определяли с помощью автоматического тензиометра KRÜSS K20 методом кольца Дью Нуи по ISO 304:1985<sup>2</sup> и ГОСТ 29232-1991<sup>3</sup>. Коррекция измеренных значений проводилась автоматически методом Харкинса. Измерение поверхностного натяжения одного образца проводилось автоматически до того момента, пока среднеквадратичное отклонение не превышало 0,05 мН/м и могло достигать от 10 до 50 повторений. Для точного воспроизведения и поддержания температуры исследуемых растворов измерительная кювета помещалась в термостатируемую ячейку, которая подключалась к жидкостному циркуляционному криотермостату серии LOIP FT-316-40. Все измерения проводились при температуре 25±0,1 °С. Для предотвращения испарения сосуда с исследуемым раствором накрывался часовым стеклом. Перед проведением испытаний все кюветы и используемая посуда заливались хромовой смесью и выдерживались в течение 12 ч, после чего тщательно промывались дистиллированной водой.

В предварительно взвешенных стаканах готовили растворы различных концентраций ПАВ таким образом, чтобы в числе этих растворов оказался раствор ожидаемой критической концентрации мицеллообразования. Растворы получали разбавлением исходного раствора ПАВ массовой концентрации 10 г/дм<sup>3</sup> до нужной концентрации в соответствии с ГОСТ 29232-1991.

<sup>1</sup> Теоретические и экспериментальные исследования эффектов синергизма в растворах смешанных ПАВ [Электронный ресурс] / Кафедра физической химии Института химии Санкт-Петербургского государственного университета. – Режим доступа: <http://phys.chem.spbu.ru/node/31>. – Дата доступа: 15.09.2022.

<sup>2</sup> Вещества поверхностно-активные. Определение поверхностного натяжения путем вытягивания жидких пленок: ISO 304:1985. – Взамен ISO 304:1978. – Введ. 15.12.85. – International Organization for Standardization, 1985. – 14 с.

<sup>3</sup> Анионные и неионногенные поверхностно-активные вещества. Определение критической концентрации мицеллообразования. Метод определения поверхностного натяжения с помощью пластины, скобы или кольца: ГОСТ 29232-1991. – Введ. 01.01.93. – Минск, Госстандарт, 1992. – 8 с.

Особенностью измерений при низкой концентрации ПАВ является то, что значения поверхностного натяжения могут изменяться в зависимости от времени выдержки раствора после приготовления, что может быть связано с установкой равновесия процесса коллоидообразования в объеме и на поверхности раствора. В связи с изложенным измерения проводились через 90 мин после приготовления растворов по 3 раза с интервалами 15 мин для каждой концентрации без прополаскивания кольца между измерениями. Если наблюдалось систематическое изменение (снижение или повышение) поверхностного натяжения, то интервал перед началом измерений увеличивали до 180 мин. При изменении концентрации кольцо промывалось в этаноле и затем в дистиллированной воде в соответствии с ГОСТ 29232-1991.

В качестве фторированных ПАВ использовались поставляемые в Беларусь ПАВ различной химической природы (анионоактивные, неионогенные и амфотерные), перечень которых приведен в таблице 1.

**Таблица 1. – Перечень фторированных ПАВ, использованных для проведения исследований**

Тип ПАВ	Основное действующее вещество
Амфотерное 1	перфторалкилсульфобетаин
Амфотерное 2	перфтороктилсульфонамид
Амфотерное 3	перфторалкилбетаин
Амфотерное 4	перфторалкиламинооксид
Амфотерное 5	перфторалкилбетаин
Анионоактивное 1	перфторакилсульфосукцинат
Анионоактивное 2	перфторалкилсульфонат аммония
Неионогенное 1	перфторалкилполиэтоксиполипроксилат
Неионогенное 2	перфторалкилэтанолполиэтоксилат
Неионогенное 3	перфторалкилэтанолполиэтоксилат
Неионогенное 4	перфторалкилэтанолполиэтоксилат
Неионогенное 5	перфторалкилэтанолполиэтоксилат
Композиция 1	композиция фторированных и углеводородных ПАВ
Композиция 2	композиция фторированных и углеводородных ПАВ

Анализ кривых, иллюстрирующих зависимость поверхностного натяжения от концентрации ФПАВ, позволит установить наиболее эффективные и перспективные ПАВ, которые целесообразно использовать для создания пленкообразующего пенообразователя [10]. На рисунке 1 представлены зависимости поверхностного натяжения  $\sigma$  ( $\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ) от концентрации амфотерных фторированных ПАВ  $c$  ( $\text{г}/\text{дм}^3$ ).

Как видно из рисунка 1, введение ФПАВ Амфотерное 4 в количестве  $0,20 \text{ г}/\text{дм}^3$  позволяет снизить поверхностное натяжение до  $15,2 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , а дальнейшее увеличение его концентрации уменьшает поверхностное натяжение незначительно. Аналогичные зависимости имеют и другие амфотерные ФПАВ. Так, при добавлении  $0,30 \text{ г}/\text{дм}^3$  амфотерного ФПАВ Амфотерное 5 поверхностное натяжение снижается до  $16,5 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ . Меньшую поверхностную активность проявляют Амфотерные 1–3. Так, при концентрации  $0,20 \text{ г}/\text{дм}^3$  с помощью фторированного ПАВ Амфотерное 1 можно снизить поверхностное натяжение до  $23,0 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , с помощью Амфотерное 2 до  $21,4 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , а Амфотерное 3 – до  $19,0 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ . Наилучшие результаты по снижению поверхностного натяжения достигаются с помощью ФПАВ типа Амфотерное 4 и Амфотерное 5.

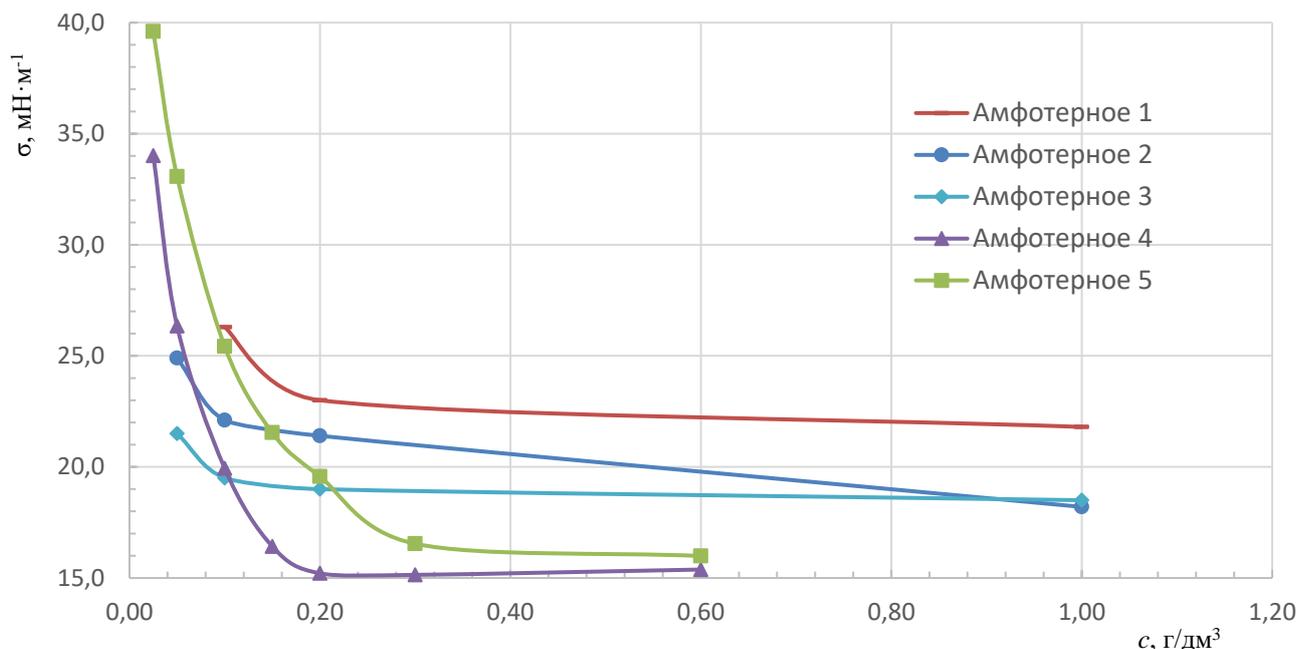


Рисунок 1. – Экспериментальные зависимости поверхностного натяжения от концентрации амфотерных фторированных ПАВ

На рисунке 2 представлены зависимости поверхностного натяжения от концентрации неионогенных фторированных ПАВ.

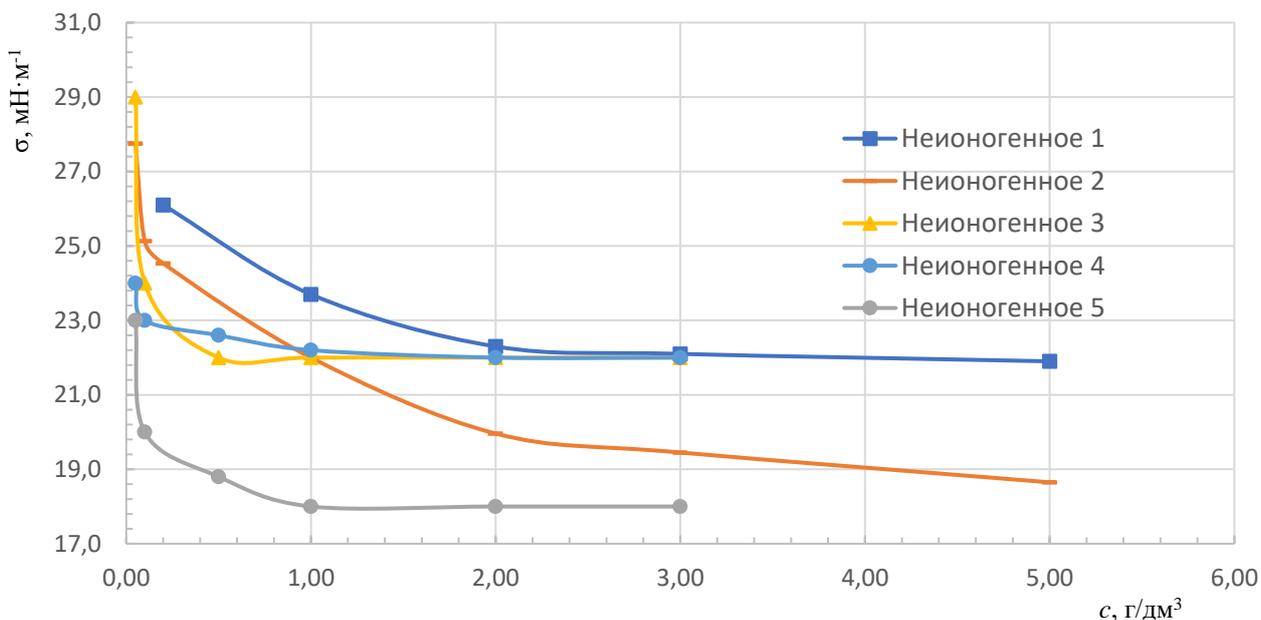


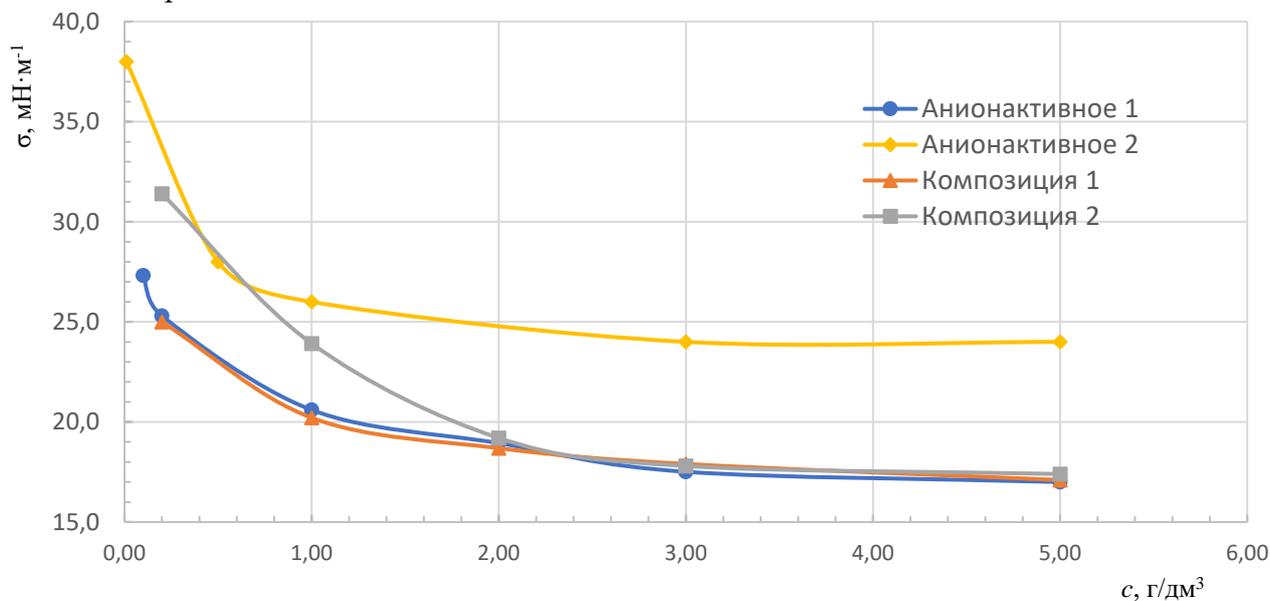
Рисунок 2. – Экспериментальные зависимости поверхностного натяжения от концентрации неионогенных фторированных ПАВ

Как видно из рисунка 2, наибольшее снижение поверхностного натяжения достигается с помощью ФПАВ типа Неионогенное 5. Введение 1,00 г/дм³ ФПАВ типа Неионогенное 5 снижает поверхностное натяжение до 18,0 мН·м⁻¹. Меньшую активность имеет ФПАВ типа Неионогенное 2, которое снижает поверхностное натяжение до 19,5 мН·м⁻¹ при введении 3,00 г/дм³. Сравнительно одинаковое поверхностное натяжение наблюдается у растворов Неионогенного 1 и Неионогенных 3–4. При введении 2,00 г/дм³ ФПАВ типа Неионогенное 1 поверхностное натяжение снижается до 22,3 мН·м⁻¹. При введении 0,50 г/дм³ ФПАВ типа Неионогенное 3 поверхностное натяжение составляет 22,0 мН·м⁻¹.

При введении  $1,00 \text{ г/дм}^3$  ФПАВ типа Неионогенное 4 поверхностное натяжение достигает  $22,0 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ .

На рисунке 3 представлены зависимости поверхностного натяжения от концентрации анионных ФПАВ и концентрации композиций фторированных и углеводородных ПАВ.

Как видно из рисунка 3, введение  $3,00 \text{ г/дм}^3$  ФПАВ типа Анионоактивное 1 снижает поверхностное натяжение до  $17,5 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , Композиция 2 снижает поверхностное натяжение до  $17,8 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , Композиция 1 снижает поверхностное натяжение до  $17,8 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , Анионоактивное 2 снижает поверхностное натяжение до  $24,0 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ . Наилучшие результаты по снижению поверхностного натяжения достигаются с помощью ФПАВ типа Анионоактивное 1.

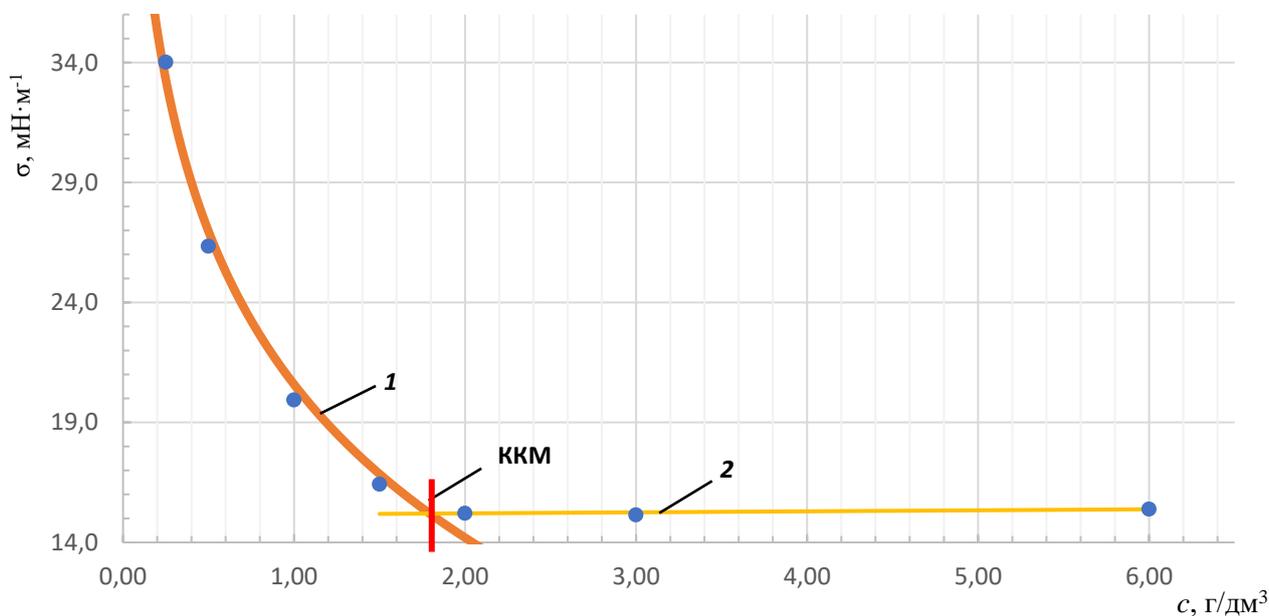


**Рисунок 3. – Экспериментальные зависимости поверхностного натяжения от концентрации анионных ФПАВ и концентрации композиций фторированных и углеводородных ПАВ**

Проанализировав графики зависимостей поверхностного натяжения от концентрации амфотерных, неионогенных и анионоактивных ФПАВ можно сделать вывод, что наиболее перспективными ФПАВ в качестве компонентов, активно понижающих поверхностное натяжение раствора, выступают амфотерные ФПАВ типа Амфотерные 4–5: введение ФПАВ Амфотерное 4 в количестве  $0,20 \text{ г/дм}^3$  снижает поверхностное натяжение до  $15,2 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , при добавлении  $0,30 \text{ г/дм}^3$  ФПАВ Амфотерное 5 поверхностное натяжение падает до  $16,5 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ . Менее перспективным является неионогенное и анионоактивное ФПАВ: введение  $1,00 \text{ г/дм}^3$  ФПАВ типа Неионогенное 5 снижает поверхностное натяжение до  $18,0 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , а  $3,00 \text{ г/дм}^3$  ФПАВ типа Анионоактивное 1 снижает поверхностное натяжение до  $17,5 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ . Несмотря на то что данные ФПАВ выполняют условия образования пленки (поверхностное натяжение водного раствора должно быть менее  $18,0 \text{ мН/м}$ , а межфазное натяжение составлять менее  $2,5 \text{ мН/м}$  [2]), в сравнении с амфотерными ФПАВ по количественному наличию в смеси их необходимо значительно больше ( $1,00$  и  $3,00 \text{ г/дм}^3$  против  $0,20$  и  $0,30 \text{ г/дм}^3$ ), что в итоге будет способствовать удорожанию готового состава в целом.

Как было указано выше, ККМ является важнейшей характеристикой ПАВ и их смесей. Для впервые исследуемого ПАВ ККМ неизвестна. Поэтому не ясно, какие экспериментальные значения относятся к области ниже, а какие выше ККМ. Область зависимости поверхностного натяжения от концентрации ПАВ ниже ККМ может быть аппроксимирована уравнением Шишковского (кривая 1, рис. 4), а выше ККМ – линейным уравнением (линия 2, рис. 4). Достижение ККМ определяют по точке пересечения двух экстраполированных кривых, которые отображают зависимость ниже и выше критической концентрации [2].

Для отнесения экспериментальных данных по поверхностному натяжению к области ниже или выше ККМ, а также для определения ККМ была использована методика, приведенная в ГОСТ 29232-1991. Методы определения ККМ основаны на резком изменении физико-химических свойств растворов ПАВ (в нашем случае – поверхностного натяжения  $\sigma$ ) при повышении концентрации ФПАВ и переходе от молекулярного раствора к мицеллярному (рис. 4).



1 – расчетная зависимость  $\sigma = \sigma_0 - A \cdot \ln(K \cdot c + 1)$ , где  $\sigma_0 = 72,4$  мН·м<sup>-1</sup>;  $A = 9,2$  мН·м<sup>-1</sup>;  $K = 270,95$  дм<sup>3</sup>/г;

2 – расчетная зависимость  $\sigma = a \cdot c + b$ , где  $a = 0,04$  мН·м<sup>-1</sup>·дм<sup>3</sup>/г;  $b = 15,1$  мН·м<sup>-1</sup>

**Рисунок 4. – Экспериментальные зависимости поверхностного натяжения от концентрации ФПАВ типа Амфотерное 4**

На основании полученных результатов строился график зависимости поверхностного натяжения от концентрации ПАВ. На оси ординат откладывались значения поверхностного натяжения  $\sigma$  (мН·м<sup>-1</sup>), а на оси абсцисс – концентрация  $c$  (г/дм<sup>3</sup>). Для построения графиков использовались средние значения поверхностного натяжения, определенные для каждой концентрации.

Результаты обработки экспериментальных зависимостей поверхностного натяжения от концентрации исследованных ФПАВ (рис. 1–3) по методике, изложенной в ГОСТ 29232-1991, приведены в таблице 2.

**Таблица 2. – Критическая концентрация мицеллообразования  $c_{\text{ККМ}}$  и поверхностное натяжение  $\sigma$  при ней для исследованных ФПАВ**

Тип ПАВ	$c_{\text{ККМ}}$ (г/дм <sup>3</sup> )	$\sigma$ (мН·м <sup>-1</sup> ) при $c_{\text{ККМ}}$	$c_{\text{ККМ}}$ (г/дм <sup>3</sup> ), при которой $\sigma = 18$ мН·м <sup>-1</sup>
Амфотерное 1	–	–	2,59
Амфотерное 2	0,28	17,2	0,11
Амфотерное 3	0,17	18,1	0,24
Амфотерное 4	0,21	15,2	0,15
Амфотерное 5	0,31	16,1	0,27
Аниоактивное 1	0,34	17,4	0,29
Аниоактивное 2	0,10	24,0	12,10
Неионогенное 1	0,23	22,2	3,54
Неионогенное 2	0,31	19,4	1,68
Неионогенное 3	0,05	22,0	–
Неионогенное 4	0,15	22,2	3,06
Неионогенное 5	0,10	18,0	0,10
Композиция 1	0,27	18,0	0,27
Композиция 2	0,28	17,8	0,27

Как видно из таблицы 2, наибольшее снижение поверхностного натяжения наблюдается у двух ФПАВ: Амфотерные 4–5, значения ККМ которых составляют 0,18 и 0,31 г/дм<sup>3</sup> соответственно. Наименьшая же концентрация, при которой поверхностное натяжение равно 18,0 мН·м<sup>-1</sup>, наблюдается у ФПАВ типа Амфотерное 2, Амфотерное 4 и Неионогенное 5. Применение данных ФПАВ позволяет уменьшить содержание концентрации ПАВ более чем в два раза в сравнении с другими исследованными ПАВ, представленными в таблице 1.

Необходимость присутствия в составе пенообразователя тех или иных компонентов определяется необходимостью наличия положительного коэффициента растекания в системе фторированного и углеводородного ПАВ и эксплуатационными свойствами. Для повышения растворимости фторированных ПАВ могут использоваться соразтворители, например изопропиловый спирт, 2-бутокси этанол и моноэтиленгликоль. Данные компоненты также снижают температуру кристаллизации пенообразователей и кинематическую вязкость. Также указанные компоненты снижают поверхностное натяжение растворов. Так, при добавлении 5,0 % 2-бутокси этанола в воду поверхностное натяжение раствора снижается до 57,0 мН/м.

С целью установления влияния соразтворителей на поверхностное натяжение нами исследованы растворы, содержащие ФПАВ типа Амфотерное 5 в концентрации от 0,0025 до 0,0600 г/дм<sup>3</sup> и соразтворитель. В качестве соразтворителя использовали изопропиловый спирт, 2-бутокси этанол и этиленгликоль. Концентрация соразтворителя была выше концентрации ФПАВ в 10 раз во всех измерениях. Результаты измерений зависимости поверхностного натяжения от концентрации ФПАВ типа Амфотерное 5 в растворе с соразтворителем приведены на рисунке 5. Также на рисунке приведена зависимость поверхностного натяжения от концентрации для растворов ФПАВ без соразтворителя.

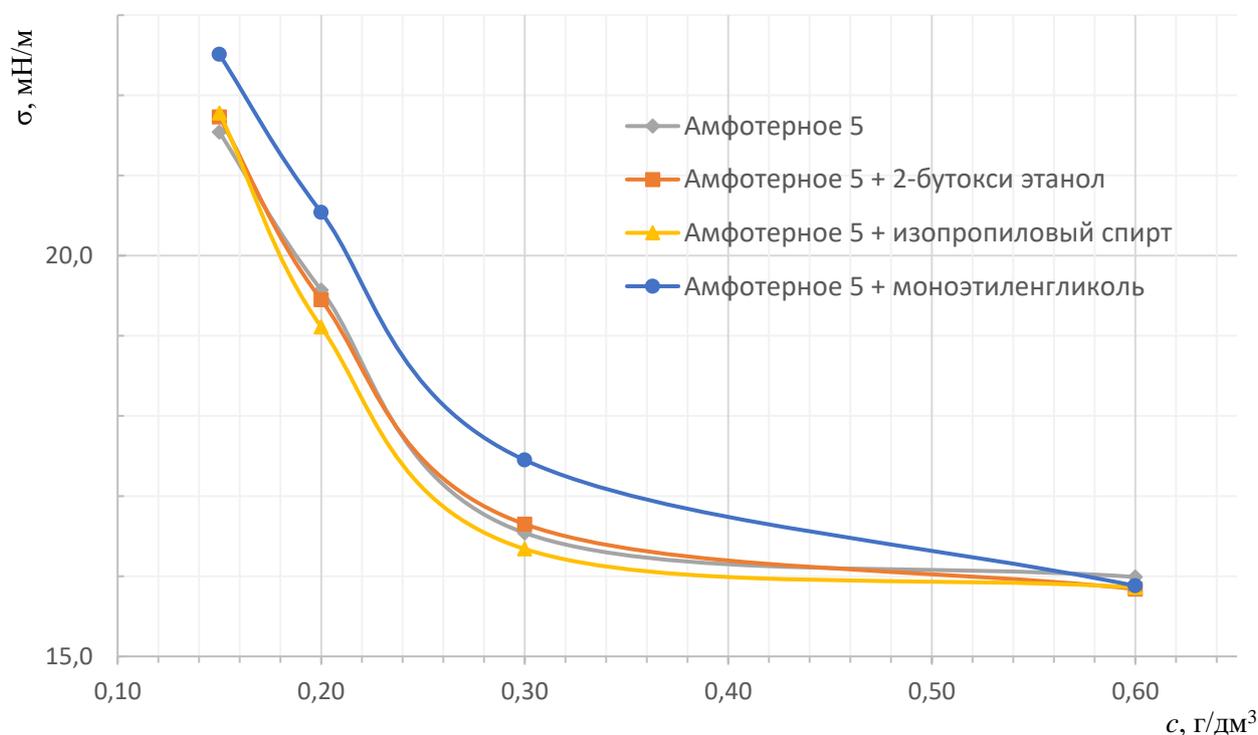


Рисунок 5. – Зависимость поверхностного натяжения от концентрации композиции ФПАВ типа Амфотерное 5 и соразворителя

Из рисунка 5 видно, что использование изопропилового спирта совместно с ФПАВ приводит к снижению поверхностного натяжения на 0,3 мН·м<sup>-1</sup> по сравнению с раствором чистого ПАВ, а использование этиленгликоля – к увеличению поверхностного натяжения

на  $0,7 \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$  при концентрации  $0,30 \text{ г/дм}^3$ . Введение 2-бутокси этанола практически не влияет на поверхностное натяжение растворов ФПАВ Амфотерное 5. Исходя из того что в составе пенообразователя содержание соразстворителя достигает 10 %, применение изопропилового спирта ввиду его взрывоопасных свойств будет небезопасно. Этиленгликоль, в свою очередь, сильно повышает поверхностное натяжение. Таким образом, в дальнейших исследованиях в качестве соразстворителя принимается 2-бутокси этанол.

На рисунке 6 приведены зависимости поверхностного натяжения от концентрации чистого ФПАВ типа Амфотерное 4 и смеси Амфотерного 4 и 2-бутокси этанола. Концентрация 2-бутокси этанола была выше концентрации ФПАВ в 10 раз во всех измерениях.

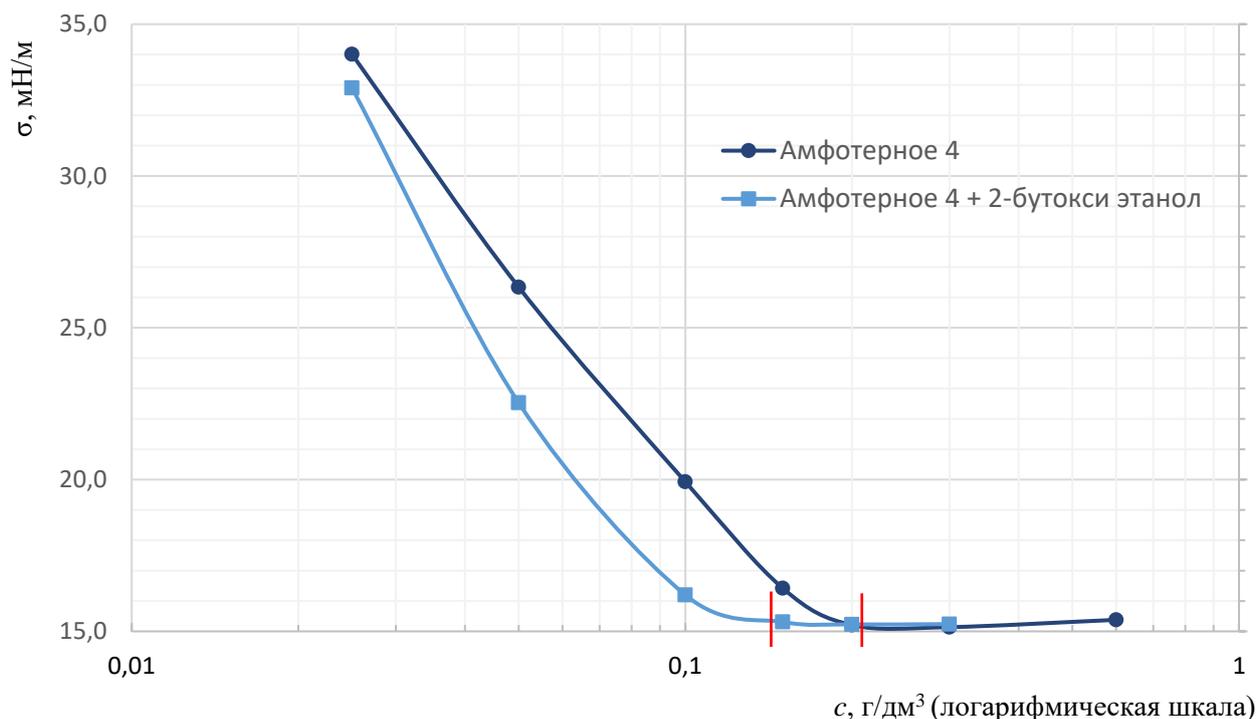


Рисунок 6. – Зависимость поверхностного натяжения от концентрации ФПАВ типа Амфотерное 4 с соразстворителем

Из рисунка 6 видно, что введение 2-бутокси этанола в раствор ФПАВ типа Амфотерное 4 приводит к снижению ККМ до  $0,15 \text{ г/дм}^3$ , в то время как ККМ чистого ФПАВ типа Амфотерное 4 составляет  $0,21 \text{ г/дм}^3$ . Как видно из графика, величина поверхностного натяжения для двух растворов в точках ККМ практически совпадает.

Также интерес представляет снижение поверхностного натяжения при одновременном использовании двух амфотерных ФПАВ. На рисунке 7 представлены зависимости поверхностного натяжения от концентрации смеси ФПАВ типа Амфотерное 4 и Амфотерное 5, и смеси из двух ФПАВ и соразстворителя 2-бутокси этанола в концентрациях ФПАВ от  $0,0025$  до  $0,0600 \text{ г/дм}^3$ . Концентрация соразстворителя была выше концентрации ФПАВ в 10 раз во всех случаях.

Анализ данных, представленных на рисунке 7, позволил установить, что ККМ фторированного ПАВ типа Амфотерное 5 и Амфотерное 4 составляет  $0,31$  и  $0,21 \text{ г/дм}^3$  соответственно. ККМ смеси вышеуказанных ФПАВ составляет  $0,38 \text{ г/дм}^3$ , а смеси ФПАВ и соразстворителя  $0,21 \text{ г/дм}^3$  (табл. 2). Также из рисунка видно, что кривая зависимости поверхностного натяжения от концентрации смеси ФПАВ типа Амфотерное 4 и Амфотерное 5 располагается между кривыми зависимостей индивидуальных ФПАВ, что свидетельствует об отсутствии синергетического эффекта от смешения.

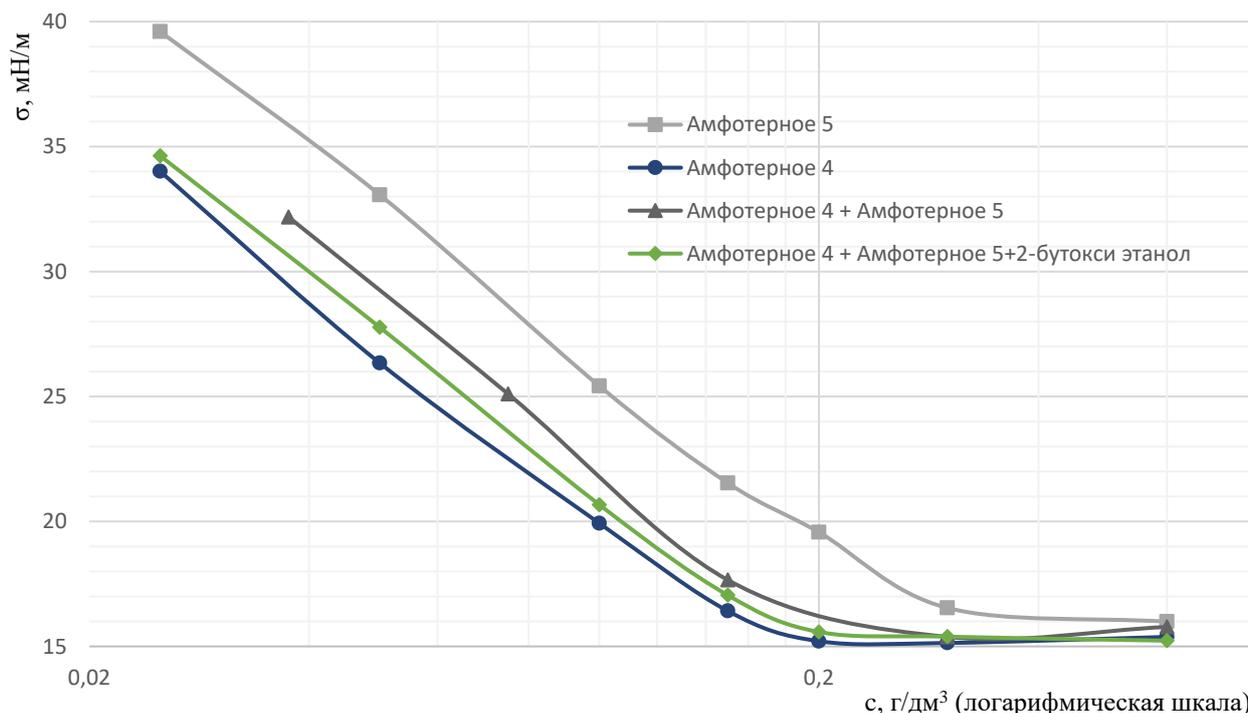


Рисунок 7. – Зависимость поверхностного натяжения от концентрации ФПАВ Амфотерное 4 и Амфотерное 5 с соразтворителем

В таблице 3 для исследованных ФПАВ приведены критическая концентрация мицеллообразования  $c_{ккм}$ , поверхностное натяжение при этой концентрации и концентрация фторированных ПАВ, при которой поверхностное натяжение равно  $18,0 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ .

Таблица 3. – Критическая концентрация мицеллообразования  $c_{ккм}$  и поверхностное натяжение  $\sigma$  при ней для исследованных смесей ФПАВ Амфотерное 4 и Амфотерное 5

Тип ФПАВ (смеси)	$c_{ккм}$ (г/дм³)	$\sigma$ (мН·м <sup>-1</sup> ) при $c_{ккм}$	$c_{ккм}$ (г/дм³), при которой $\sigma = 18 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$
Амфотерное 5	0,31	16,1	0,27
Амфотерное 4	0,21	15,2	0,15
смесь Амфотерного 4 и Амфотерного 5	0,38	15,5	0,25
смесь Амфотерного 4, Амфотерного 5 и 2-бутокси этанола	0,22	15,5	0,16
смесь Амфотерного 4 и 2-бутокси этанола	0,29	16,7	0,23
смесь Амфотерного 5 и 2-бутокси этанола	0,15	15,3	0,11
смесь Амфотерного 4 и изопропилового спирта	0,28	16,6	0,24
смесь Амфотерного 4 и моноэтиленгликоля	0,26	18,1	0,27

### Заключение

Как было указано выше, для образования изолирующей пленки на н-гептане, имеющем поверхностное натяжение примерно  $20,5 \text{ мН/м}$ , сумма поверхностного натяжения водного раствора фторированного ПАВ и его межфазного натяжения с н-гептаном должна быть менее  $20,5 \text{ мН/м}$ . Следовательно, если межфазное натяжение на границе с гептаном будет  $2,5 \text{ мН/м}$ , то поверхностное натяжение водных растворов ПАВ должно быть не более  $18,0 \text{ мН/м}$ . Данному условию отвечает большинство исследованных ПАВ, за исключением ФПАВ типа Амфотерное 3, Анионактивное 2 и Неионогенное 1–4. Наиболее перспективными фторированным ПАВ для применения в составе пенообразователей являются ФПАВ типа Амфотерное 2, Амфотерное 4 и Неионогенное 5. Применение данных ФПАВ позволяет использовать концентрации ПАВ значительно меньше в сравнении с другими исследованными ПАВ. Для повышения растворимости ФПАВ в растворе целесообразно использовать 2-бутокси этанол.

Предварительные исследования межфазного натяжения на границе н-гептан – раствор фторированного ПАВ (Амфотерное 4 и 5) показали, что значения межфазного натяжения находятся в интервале от 4,0 до 6,0 мН/м. Следовательно, для снижения межфазного натяжения до значений ниже 2,5 мН/м необходимо использовать добавки других ПАВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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, 14 окт. 2021 г. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 41–47. – EDN: PATKDW.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Кремнийсодержащие производные органических кислот в качестве не загрязняющих окружающую среду огнегасящих пленкообразующих пен на водной основе: пат. RU 2017107082 / Д. Блунк [и др.]. – Оpubл. 29.11.2019. – EDN: RIKSZS.
6. Холмберг, К. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг [и др.]; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2013. – 528 с. – EDN: QKBQZV.
7. Волков, В.А. Поверхностно-активные вещества. Синтез и свойства. Часть 1. Синтез и свойства поверхностно-активных веществ. Электронная книга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/254282/grant>. – Дата доступа: 15.09.2022.
8. 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.
9. Саутина, Н.В. Высвобождение ацетил гексапептида-3 с применением жидкокристаллической системы на основе лецитина / Н.В. Саутина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 24–30. – DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5772. – EDN: JAEIV.
10. Лахвич, В.В. Исследование свойств пленкообразующих пенообразователей для тушения горючих жидкостей / В.В. Лахвич, Г.А. Вариков // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 1 (19). – С. 73–81. – EDN: RBEJFG.

**Исследование фторированных поверхностно-активных веществ  
для разработки пленкообразующего огнетушащего состава**

**Research of fluorinated surfactants for the development  
of a film-forming fire extinguishing composition**

***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  
ORCID: 0000-0002-1072-2432

***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  
ORCID: 0000-0002-4137-2519

***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

***Кондакова Яна Александровна***

Учреждение «Научно-исследовательский  
институт пожарной безопасности  
и проблем чрезвычайных ситуаций»  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь, отдел инженерного  
обеспечения пожарной безопасности,  
старший научный сотрудник

Адрес: ул. Солтыса, 183а,  
220046, г. Минск, Беларусь  
Email: janakondakowa777@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-2825-6687

***Yana A. Kondakova***

Institution «Scientific and Research Institute  
of Fire Safety and Emergency Situations»  
of the Ministry for Emergency Situations  
of the Republic of Belarus,  
Fire Safety Engineering Department,  
Senior Researcher

Address: Soltysa str., 183a,  
220046, Minsk, Belarus  
Email: janakondakowa777@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-2825-6687

***Красавин Василий Ефимович***

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», факультет  
предупреждения и ликвидации  
чрезвычайных ситуаций, курсант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
Email: vasya.vi@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-9860-0167

***Vasiliy E. Krasavin***

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Faculty of Emergency Prevention  
and Elimination, cadet

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: vasya.vi@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-9860-0167

**Бусел Михаил Олегович**

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра химической,  
биологической, радиационной и ядерной  
защиты, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Mischabox@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9467-218X

**Mikhail A. Busel**

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Chemical, Biological, Radiation  
and Nuclear Protection, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: Mischabox@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9467-218X

## RESEARCH OF FLUORINATED SURFACTANTS FOR THE DEVELOPMENT OF A FILM-FORMING FIRE EXTINGUISHING COMPOSITION

Ivanov I.U., Navrotsky O.D., Kondakova Ya.A., Krasavin V.E., Busel M.O.

*Purpose.* To study of the dependence of the surface tension of fluorinated surfactants of various chemical nature on their concentration and determine the most suitable fluorinated surfactant for use in film-forming foam concentrates.

*Methods.* The surface tension of the solutions was measured using a KRÜSS K20 automatic tensiometer using the Du Noüy ring method described in ISO 304. The determination of the critical micelle concentration of surfactant solutions in aqueous systems was carried out according to the State Standard 29232-1991.

*Findings.* The results of research of the surface tension of aqueous solutions of anionic, nonionic and amphoteric fluorinated surfactants from various manufacturers are presented. The most promising fluorinated surfactants and co-solvents being used as a part of film-forming foam concentrate for fire extinguishing have been established. The choice of a fluorinated surfactant for the creation of a targeted foaming agent, which makes it possible to obtain an aqueous film on the surface of n-heptane, is substantiated.

*Application field of research.* The results obtained can be used in the development of a formulation of a targeted foaming agent for extinguishing fires.

*Keywords:* targeted foaming agent for extinguishing fires, fluorinated surfactant, surface tension, interfacial tension.

(The date of submitting: October 4, 2022)

### REFERENCES

- Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Kondakova Ya.A. Obzor osnovnykh kharakteristik plenkoobrazuyushchikh penoobrazovately i sposoby ikh kontrolya [Overview of the main characteristics of film-forming foaming agents and methods of their control]. *Proc. V Intern. scientific-practical conf. «Modern fire-proof materials and technologies»*, Ivanovo, October 14, 2021. Ivanovo: Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2021. Pp. 41–47. (rus). EDN: PATKDW.
- 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 fluorinated surfactants solutions]. *Fire and explosion safety*, 2011. Vol. 20, No. 5. Pp. 25–35. (rus). EDN: NWHDL.
- Korolchenko D.A., Volkov A.A. Tushenie goryuchikh zhidkostey penoy iz plenkoobrazuyushchikh penoobrazovately [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.
- 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.
- Blunk D., Ie S., Hetzer R.H., et al. *Kremniysoderzhashchie proizvodnye organicheskikh kislot v kachestve ne zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu 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 29.11.2019. (rus). EDN: RIKSZS.
- 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). EDN: QKBQZV.
- Volkov V.A. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva. Sintez i svoystva. Chast' 1. Sintez i svoystva poverkhnostno-aktivnykh veshchestv* [Surfactants. Synthesis and properties. Part 1. Synthesis and properties of surfactants]: electronic book, available at: <https://www.twirpx.com/file/254282/grant> (accessed: September 15, 2022). (rus)
- Nigmatzyanov A.R., Kildiyarov 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.
9. Sautina N.V., Miftakhova E.M., Silakhina K.V., Galyametdinov Yu.G. Vysvobozhdenie atsetil geksapeptida-3 s primeneniem zhidkokristallicheskoj sistemy na osnove letsitina [Releasing of acetyl hexapeptide-3 using a lecithin based liquid crystal system]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya (ChemChemTech)*, 2019. Vol. 62, No. 5. Pp. 24–30. (rus). DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5772. EDN: JIAEIB.
  10. Lakhvich V.V., Varikov G.A. Issledovanie svoystv plenkoobrazuyushchikh penoobrazovatelye dlya tusheniya goryuchikh zhidkostey [Study of the properties of film-forming foam concentrates for extinguishing combustible liquids]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 1 (19). Pp. 73–81. (rus). EDN: RBEJFG.