

## ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЙ ОГNETУШАЩИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ, ПОДАВАЕМЫЙ МЕТОДОМ РАСПЫЛЕНИЯ

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д.

*Цель.* Разработка универсального пленкообразующего огнетушащего химического состава для установок пожаротушения водой и пеной на основе фторированных поверхностно-активных веществ для тушения пожаров класса А и В (горение твердых и жидких горючих веществ), подаваемого на тушение методом распыления.

*Методы.* Эмпирические методы исследования (измерение поверхностного и межфазного натяжения растворов), метод рандомизации и полного факторного эксперимента для получения регрессионных моделей, а также модуль «Профили желательности» программного пакета STATISTICA. Определение коэффициентов поверхностного и межфазного натяжений растворов поверхностно-активных веществ в водных системах проводили методом отрыва кольца Дю Нуи на автоматическом тензиометре KRÜSS-K20.

*Результаты.* Обоснован выбор компонентов пленкообразующего огнетушащего химического состава: фторированных поверхностно-активных веществ (ФПАВ), углеводородных поверхностно-активных веществ (УПАВ) и сорастворителя. Представлены результаты полного факторного эксперимента, на основании которого получены регрессионные модели, описывающие изменение значения коэффициента растекания водной пленки по поверхности горючей жидкости, коэффициента межфазного натяжения, времени смачивания образца из хлопковой ткани, времени существования водной пленки на поверхности горючей жидкости, толщины водной пленки на поверхности горючей жидкости и времени тушения модельного очага пожара класса В в зависимости от соотношения компонентов пленкообразующих огнетушащих химических составов.

Из установленных зависимостей времени тушения модельных очагов пожаров от массовой доли компонентов пленкообразующего огнетушащего химического состава определены диапазоны коэффициента межфазного натяжения  $1,7\text{--}1,9\text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$  и коэффициента растекания  $3,0\text{--}3,2\text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ , при которых огнетушащая эффективность пленкообразующего огнетушащего химического состава максимальна и составляет 55 с, что на 35 % больше огнетушащей эффективности серийно выпускаемых пленкообразующих пенообразователей.

На основании установленных зависимостей времени тушения модельных очагов от коэффициента межфазного натяжения водных растворов ФПАВ, УПАВ с сорастворителем разработана рецептура пленкообразующего огнетушащего состава, состоящего из  $2,9\pm 0,1$  мас. % амфотерного ФПАВ,  $1,5\pm 0,1$  мас. % неионогенного УПАВ,  $3,0\pm 0,1$  мас. % анионного УПАВ,  $10,0\pm 0,1$  мас. % органического растворителя и  $82,9\pm 0,1$  мас. % воды, отличающегося от исследуемых составов и существующих аналогов наибольшей огнетушащей эффективностью при подаче путем распыления.

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

*Ключевые слова:* поверхностно-активные вещества, коэффициент поверхностного натяжения, коэффициент межфазного натяжения, полный факторный эксперимент, математическая модель, пенообразователь.

(Поступила в редакцию 10 апреля 2025 г.)

### Введение

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения огнетушащей эффективности установок пожаротушения при пожарах в производственных, складских и сельскохозяйственных зданиях и сооружениях, а также в установках промышленного назначения, оборудованных данными установками. Как показывает статистика, более чем

в 50% случаев сработка установок пожаротушения при пожарах на объектах защиты ликвидацию загорания не обеспечила [1].

Порядок разработки пленкообразующего огнетушащего химического состава для автоматических установок пожаротушения водой и пеной, подаваемого методом распыления, представлен в виде схемы на рисунке 1.



Рисунок 1. – Порядок разработки пленкообразующего огнетушащего химического состава для автоматических установок пожаротушения водой и пеной, подаваемого методом распыления

**Литературный обзор по теме исследований.** В результате проведенного анализа литературных источников [2–6] установлено, что одним из способов повышения огнетушащей эффективности существующих водяных и пенных установок пожаротушения является применение пленкообразующего огнетушащего химического состава и его подача на тушение в виде мелкодисперсных капель, что способствует одновременному образованию двух механизмов тушения: по поверхности и по объему [7].

Поскольку традиционные газовые и аэрозольные составы преимущественно обеспечивают объемное тушение пожара [7], эффективность их применения напрямую зависит от герметичности защищаемого помещения. На открытых площадях объемное тушение становится неэффективно<sup>1</sup>. Для подавления горения необходимо создать достаточную концентрацию огнетушащего вещества, что и ограничивает область применения установок объемного тушения.

Для открытых пространств с обращением горючих жидкостей чаще применяют водные пенообразующие растворы, создающие воздушно-механическую пену. Однако у этого метода есть существенный недостаток: воздушно-механическая пена обладает относительно коротким временем эффективной работы. Уже через 5–7 мин пена начинает терять свои огнетушащие свойства из-за синерезиса – процесса самопроизвольного уменьшения объема пены за счет стекания воды. Это приводит к быстрому снижению эффективности тушения и необходимости оперативной подпитки пенного слоя [8].

Наиболее полно объемно-поверхностный способ тушения наблюдается при распылении пленкообразующего фторсодержащего огнетушащего химического состава таким образом, чтобы диаметр образующихся капель был менее 150 мкм [6]. За счет уменьшения размера частиц повышается площадь контакта огнетушащего состава с фронтом пламени и обеспечивается высокий охлаждающий эффект, а за счет пленкообразующего огнетушащего химического состава повышается смачивающая способность твердых горючих материалов и создаются условия для образования устойчивой паронепроницаемой водной пленки

<sup>1</sup> Пожарная автоматика зданий и сооружений: СН 2.02.03-2019. – Введ. впервые (с отменой на территории Респ. Беларусь: ТКП 45-4.02-317-2019). – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2019. – 81 с.

при попадании капель на поверхность горючей жидкости. Это особенно актуально для промышленных предприятий, где хранятся и обрабатываются разнообразные горючие вещества и материалы.

Для обеспечения высокой огнетушащей эффективности состава при тушении пожаров класса В образуемая на поверхности горючей жидкости паронепроницаемая водная пленка должна иметь положительный коэффициент растекания для самопроизвольного распространения по поверхности горючей жидкости, быть термостойкой для исключения разрушения от воздействия теплового потока пламени или нагретых предметов и сохраняться длительное время на поверхности горючей жидкости.

Образование водной пленки с необходимыми свойствами достигается путем применения в составе огнетушащей композиции фторированных поверхностно-активных веществ. Поскольку фторсодержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ) эффективно снижают поверхностное натяжение раствора, но недостаточно сильно коэффициент межфазного натяжения, то понижение коэффициента межфазного натяжения достигается путем добавления к фторсодержащим ПАВ углеводородных ПАВ. В итоге смесь ПАВ работает эффективнее, чем каждый компонент по отдельности.

Применение смеси из фторированного и углеводородного ПАВ позволяет создать необходимые условия для образования изолирующей водной пленки на поверхности горючей жидкости, когда сумма коэффициента поверхностного натяжения водного раствора фторированного ПАВ и коэффициента его межфазного натяжения с горючей жидкостью меньше коэффициента поверхностного натяжения горючей жидкости:

$$\sigma_w + \sigma_{wo} < \sigma_o, \quad (1)$$

где  $\sigma_w$  – коэффициент поверхностного натяжения раствора пенообразователя, Н·м<sup>-1</sup>;

$\sigma_{wo}$  – коэффициент межфазного натяжения между раствором пенообразователя и горючей жидкостью, Н·м<sup>-1</sup>;

$\sigma_o$  – коэффициент поверхностного натяжения горючей жидкости, Н·м<sup>-1</sup>.

Таким образом, для образования изолирующей водной пленки на поверхности н-гептана, имеющего коэффициент поверхностного натяжения примерно 20,5 мН/м, сумма коэффициентов поверхностного натяжения водного раствора фторированного ПАВ и его межфазного натяжения с н-гептаном должна быть не более 20,5 мН/м. Вместе с тем, для того чтобы исключить смешение огнетушащего состава и горючей жидкости, коэффициент межфазного натяжения должен быть не менее 1 мН/м.

Исходя из условий эксплуатации пленкообразующего огнетушащего химического состава были сформулированы требования к его рабочим характеристикам и способу подачи (табл. 1).

**Таблица 1. – Разработанные требования к пленкообразующему огнетушащему химическому составу**

Условия применения		Достигается	Способ реализации
Универсальность	Тушение пожаров класса А	Наличием смачивающего эффекта	Применение УПАВ
	Тушение пожаров класса В	Наличием изолирующего эффекта	
Эффективность	Высокая изолирующая способность		Формированием капель размером менее 150 мкм, равномерностью распределения капель в объеме факела распыла
	Высокая охлаждающая способность		
	Разбавление реагирующих веществ		

## Основная часть

**1. Разработка методов исследования и лабораторного оборудования.** При анализе способов исследования свойств водяных огнетушащих составов, подаваемых на тушение путем распыления [9], было установлено, что большинство подходов являются материалоемкими. С целью установления количественного влияния компонентов пленкообразующего огнетушащего химического состава на его эксплуатационные, огнетушащие и физико-химические свойства с применением минимального количества расходного материала были разработаны лабораторные установки и методики выполнения измерений с использованием этих установок.

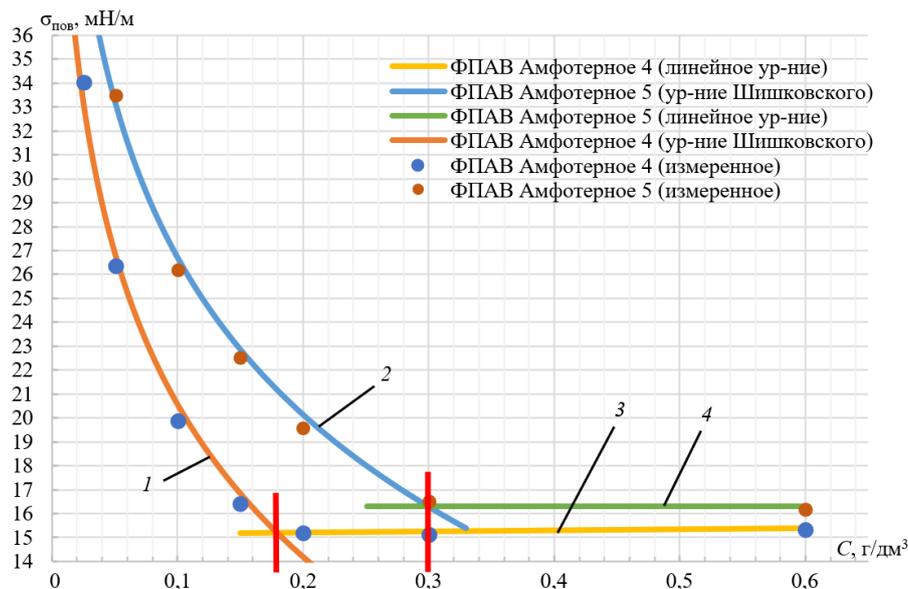
Поскольку основным механизмом тушения пленкообразующих огнетушащих химических составов является изоляция поверхности горючей жидкости для исключения выделения ее паров в зону горения, время устойчивости паронепроницаемой водной пленки на поверхности горючей жидкости является ключевым показателем, определяющим огнетушащую способность состава. Анализ существующих методов исследования скорости образования, толщины и времени существования водной пленки из пленкообразующих огнетушащих химических составов на поверхности горючей жидкости позволил прийти к выводу, что между собой подходы очень схожи и направлены на воспроизведение условий подачи огнетушащего состава на тушение. Для обеспечения достоверности и повторяемости получаемых результатов измерений была разработана методика оценки устойчивости паронепроницаемой водной пленки на поверхности горючей жидкости, которая позволяет имитировать поведение взаимодействия капли пленкообразующего огнетушащего химического состава при распылении через ороситель водяной установки пожаротушения с поверхностью горючей жидкости.

Для определения области и способов применения огнетушащего состава исследуется его огнетушащая эффективность. Для оценки огнетушащей эффективности применяются различные методы исследования, основная задача которых сводится к определению времени тушения модельного очага пожара при установленной интенсивности подачи огнетушащего состава. Для проведения сравнительных испытаний огнетушащей эффективности различных огнетушащих составов при подаче их путем распыления была разработана установка для исследования физических параметров и огнетушащей эффективности водных распыленных химических составов и методика проведения данных испытаний. Разработанная методика испытаний позволила создать постоянные и легко воспроизводимые условия проведения лабораторных исследований на огнетушащую эффективность с минимальным применением горючих и огнетушащих веществ и материалов.

**2. Обоснование выбора компонентов пленкообразующего огнетушащего химического состава.** В качестве фторированных ПАВ использовались поставляемые в Беларусь 14 наименований ПАВ различной химической природы: 2 ПАВ анионного типа, 5 ПАВ неионогенного типа, 5 ПАВ амфотерного типа и 2 состава, представляющих собой смесь фторированных и углеводородных ПАВ. В качестве углеводородных ПАВ использовались 8 наименований ПАВ: 4 ПАВ анионного типа и 4 ПАВ неионогенного типа. С целью защиты сведений о составе смесей наименование всех исследованных ПАВ представлено в виде условного названия «тип» и «номер ПАВ»: Амфотерное 1, Амфотерное 2, ..., Амфотерное 5.

**2.1. Выбор ФПАВ.** Разработка огнетушащей композиции включала обоснование выбора его компонентов: ФПАВ, соразтворителя и УПАВ. Выбор ФПАВ проводился по величине коэффициента поверхностного натяжения при критической концентрации мицеллообразования (ККМ). При ККМ коэффициент поверхностного натяжения раствора имеет значение, которое в дальнейшем слабо изменяется при увеличении концентрации ПАВ. Таким образом, ККМ является условной точкой с минимальным коэффициентом поверхностного натяжения раствора при минимальной концентрации ПАВ.

Для нахождения ККМ была построена зависимость коэффициента поверхностного натяжения растворов ФПАВ от его концентрации. Для нахождения ККМ область зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации ПАВ ниже ККМ аппроксимируется уравнением Шишковского, а выше ККМ – линейным уравнением. Значение ККМ определяется по точке пересечения двух экстраполированных кривых, которые отображают зависимость ниже и выше критической концентрации. В результате проведенных ранее исследований [10] было установлено, что наибольшее снижение поверхностного натяжения достигается при использовании ФПАВ Амфотерное 4, у которого значение ККМ в водном растворе равно  $0,182 \text{ г/дм}^3$ , и коэффициент поверхностного натяжения при ККМ равен  $15,1 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ . Пример определения ККМ ФПАВ Амфотерное 4 и Амфотерное 5, как наиболее перспективных, приведен на рисунке 2.



- 1 – расчетная зависимость  $\sigma = \sigma_0 - A \ln(KC + 1)$ , где  $\sigma_0 = 72,4 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $A = 9,243 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $K = 270,954 \text{ дм}^3/\text{г}$ ;  
 2 – расчетная зависимость  $\sigma = \sigma_0 - A \ln(KC)$ , где  $\sigma_0 = 72,4 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $A = 9,554 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $K = 122,107 \text{ дм}^3/\text{г}$ ;  
 3 – расчетная зависимость  $\sigma = aC + b$ , где  $\sigma = aC + b$ ,  $a = 0,0425 [\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}] \cdot [\text{дм}^3/\text{г}]$ ;  $b = 15,125 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  
 4 – расчетная зависимость  $\sigma = b - aC$ , где  $a = 0,049 [\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}] \cdot [\text{дм}^3/\text{г}]$ ;  $b = 16,29 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$

Рисунок 2. – Экспериментальные зависимости коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_{\text{пов}}$  от концентрации  $C$  ФПАВ Амфотерное 4 и Амфотерное 5

Поскольку при добавлении фторированных ПАВ в воду образуются нерастворимые сгустки, для полного их растворения в рецептурах пленкообразующих огнетушащих составов применяются различные соразтворители, такие как бутилгликоль, бутилдигликоль, 2-бутоксизтанол, моноэтиленгликоль и изопропиловый спирт. С целью установления влияния соразтворителей на коэффициент поверхностного натяжения огнетушащих композиций были исследованы растворы, содержащие: 1) ФПАВ Амфотерное 4 в концентрации  $0,025$  до  $0,6 \text{ г/дм}^3$  и соразтворитель; 2) ФПАВ Амфотерное 5 в той же концентрации и соразтворитель. В качестве соразтворителя использовали изопропиловый спирт, 2-бутоксизтанол и этиленгликоль. Концентрация соразтворителя была выше концентрации ФПАВ в 10 раз во всех измерениях. Результаты измерений зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации ФПАВ Амфотерное 4 и 5 в растворах с соразтворителем и без него приведены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что использование 2-бутоксизтанола совместно с ФПАВ Амфотерное 4 приводит к максимальному снижению коэффициента поверхностного натяжения в сравнении с другими композициями при минимальной концентрации, что и обусловило выбор данного ФПАВ и соразтворителя для дальнейших исследований.

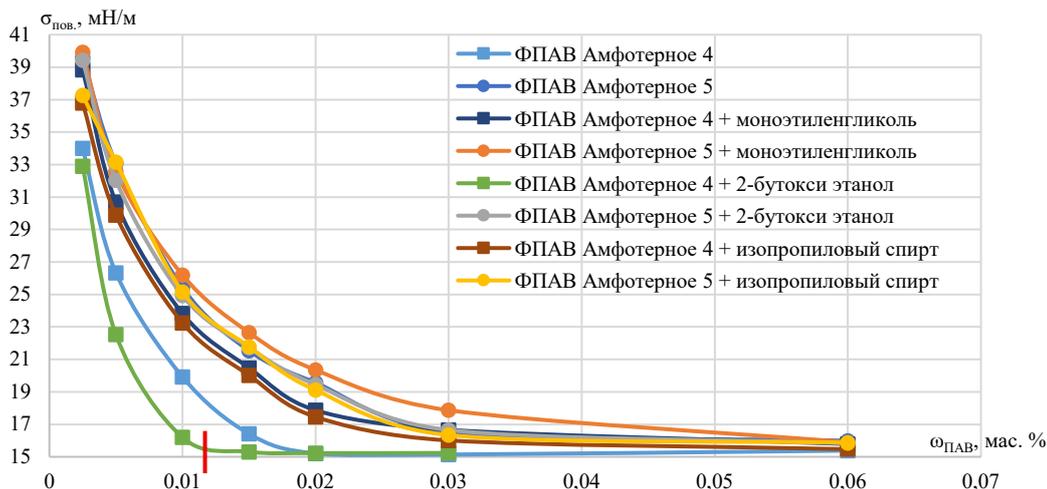


Рисунок 3. – Экспериментальные зависимости коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_{пов}$  от массовой доли  $\omega_{ПАВ}$  ФПАВ Амфотерное 4 и Амфотерное 5, композиций ФПАВ Амфотерное 4 и соразстворителя, а также ФПАВ Амфотерное 5 и соразстворителя

**2.1. Выбор УПАВ.** Далее проводился выбор УПАВ, которые в композиции выполняют следующие функции: повышение смачивающей способности твердых веществ и материалов и снижение коэффициента межфазного натяжения на границе огнетушащий раствор / горючая жидкость. Для выбора наиболее подходящего углеводородного ПАВ сперва была исследована зависимость времени смачивания образца хлопчатобумажной ткани от концентрации ПАВ. Для проведения исследования использовались следующие вещества: УПАВ Анионное 1–4 и УПАВ Неионогенное 1–4.

Исследования смачивающей способности растворов углеводородных ПАВ проводили в соответствии с методом, изложенным в п. 5.9 СТБ 2459-2016<sup>2</sup>. Для проведения исследований использовались растворы ПАВ с массовой долей действующего вещества равного 1 мас.%. Зависимости времени смачивания хлопчатобумажной ткани от концентрации представлены на рисунке 4.

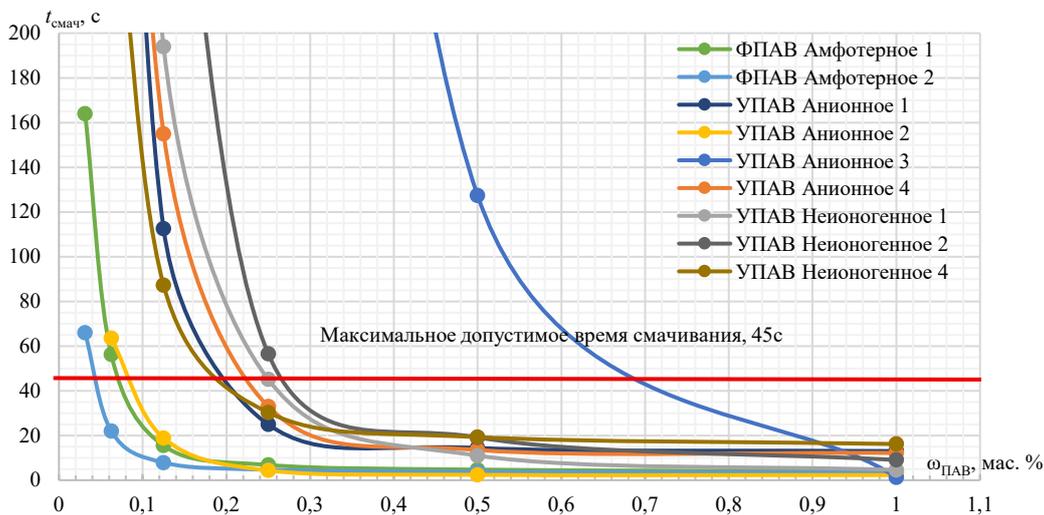


Рисунок 4. – Зависимость времени смачивания  $t_{смач}$  хлопчатобумажной ткани от массовой доли  $\omega_{ПАВ}$  исследуемых ПАВ

Согласно п. 5.9 СТБ 2459-2016 время смачивания образца хлопчатобумажной ткани круглой формы диаметром  $30 \pm 1$  мм должно быть не более 45 с (на рис. 4 отмечено красной

<sup>2</sup> Система стандартов пожарной безопасности. Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Введ. 12.08.2016. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2016. – 47 с.

линией). Показатель смачивающей способности ПАВ позволяет определить рабочую объемную концентрацию ПАВ в растворе, при которой время смачивания составляет 45 с. Как видно из рисунка 4, среди исследованных растворов ПАВ у композиций с ФПАВ Амфотерное 4, 5 и УПАВ Анионное 2 нормативное время смачивания достигается при наименьшей массовой доле – от 0,04 до 0,08 мас. %. ФПАВ являются хорошими смачивателями, но поскольку их стоимость в 30–40 раз выше, чем УПАВ, для целей смачивания применять их в композиции невыгодно и в исследованиях они приводятся для информативности.

У УПАВ Анионное 1, 4 и Неионогенное 1–3 нормативное время смачивания 45 с достигается при примерно равных массовых долях – от 0,18 до 0,26 мас. %. Массовая доля УПАВ Анионное 3 для достижения времени смачивания 45 с составляет 0,68 мас. %.

Так как УПАВ в огнетушащем составе используется не только для снижения времени смачивания, но и для снижения коэффициента межфазного натяжения пленкообразующего раствора до требуемых нам значений, то для обоснованного выбора ПАВ нами также были проведены исследования коэффициента межфазного натяжения данных ПАВ.

После установления влияния концентрации УПАВ на время смачивания образца хлопчатобумажной ткани были проведены сравнительные исследования влияния УПАВ на коэффициент межфазного натяжения огнетушащих составов. Составы исследуемых композиций представляли собой водные растворы и содержали 1 мас. % ФПАВ Амфотерное 4, 10 мас. % соразстворителя 2-бутокси этанола и от 0,6 до 10,0 мас. % УПАВ (Неионогенное 1–4, Анионное 2, 3). Зависимости коэффициентов межфазного натяжения растворов от концентрации УПАВ представлены на рисунке 5.

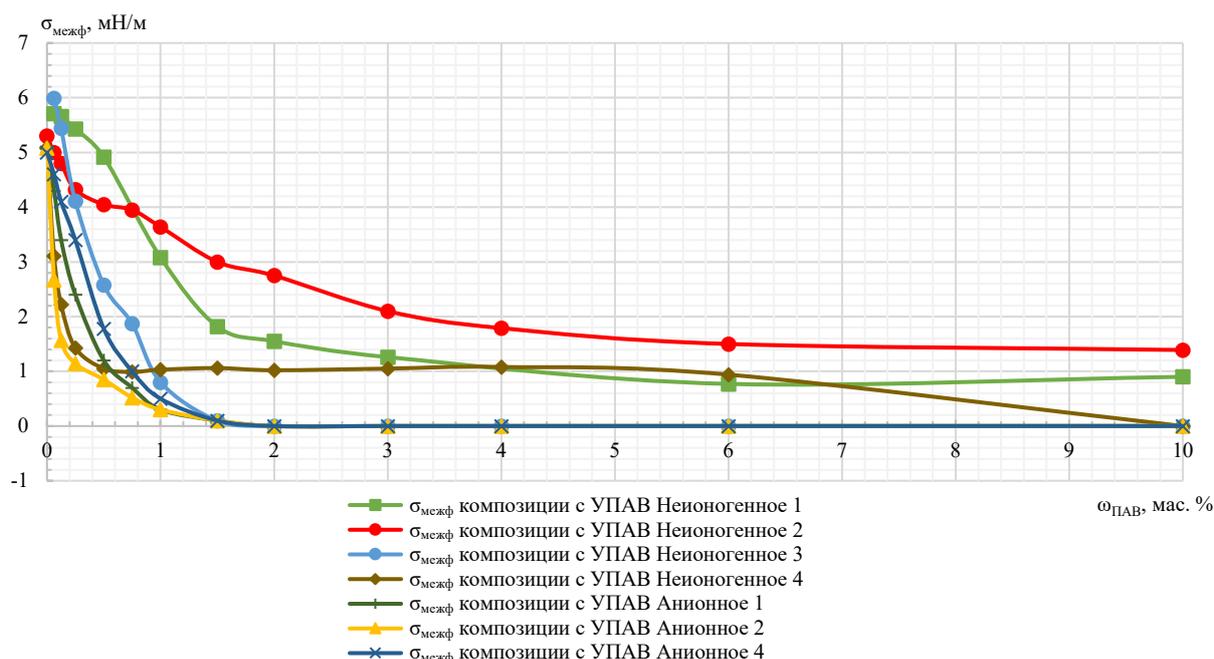


Рисунок 5. – Зависимости коэффициентов межфазного натяжения  $\sigma_{\text{межф}}$  от массовой доли  $\phi_{\text{ПАВ}}$  УПАВ

Как видно из рисунка 5, применение УПАВ Анионное 1, 2 и 4, Неионогенное 3 и 4 снижают коэффициент межфазного натяжения до значений, близких к нулю, что приводит к разрушению водной пленки на поверхности горячей жидкости.

Композиция с УПАВ Неионогенное 1 и 2 ведут себя схожим образом, обеспечивая снижение коэффициента межфазного натяжения от 1 до 3 мН/м в диапазоне массовой доли от 1 до 10 мас.% для УПАВ Неионогенное 1 и от 1,5 до 10 мас. % для УПАВ Неионогенное 2 и могут быть использованы в дальнейших исследованиях. Поскольку УПАВ Неионогенное 1 дешевле УПАВ Неионогенное 2, дальнейшие исследования проводились с применением

данного первого. Таким образом, был произведен выбор основных компонентов пленкообразующего огнетушащего состава.

### 3. Проведение ПФЭ и построение регрессионной модели для прогнозирования.

В продолжение исследования [11] с целью установления влияния количества каждого компонента в растворе на его физико-химические свойства применен метод полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ), который проводился на вышеуказанных лабораторных установках.

В качестве независимых переменных уравнения регрессии были выбраны три главных фактора: массовые доли ФПАВ ( $X_1$ ), неионогенного ( $X_2$ ) и анионного ( $X_3$ ) УПАВ со значениями  $X_1 = 1; 2$  и  $3$  мас. %,  $X_2 = 0,5; 1$  и  $1,5$  мас. %,  $X_3 = 0; 1,5$  и  $3$  мас. % соответственно. В качестве зависимой переменной уравнения регрессии было принято шесть откликов – коэффициент растекания  $K_{\text{раст}}$ , коэффициент межфазного натяжения  $\sigma_{\text{межф}}$ , время существования водной пленки на поверхности горючей жидкости  $t_{\text{с.в.пл}}$ , толщина водной пленки на поверхности горючей жидкости  $\delta$ , время смачивания образца из хлопчатобумажной ткани  $\theta$  и время тушения модельного очага пожара класса В  $t_{\text{туш}}$ . ПФЭ проводился на трех уровнях для каждого из трех факторов, что составило 27 серий опытов. В каждой серии проводилось пять опытов. План ПФЭ и его результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. – План ПФЭ и его результаты

№	Значение фактора			Значение отклика					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$K_{\text{раст}}$ , МН·м <sup>-1</sup>	$\sigma_{\text{межф}}$ , МН·м <sup>-1</sup>	$t_{\text{с.в.пл}}$ , с	$\delta$ , мкм	$\theta$ , с	$t_{\text{туш}}$ , с
1	1,0	0,5	0,0	2,14	2,62	827	13,5	74,40	442
2	1,0	0,5	1,5	2,6	2,63	680	4,95	65,00	405
3	1,0	0,5	3,0	2,79	2,35	171	36,74	55,60	362
4	1,0	1,0	0,0	2,67	1,84	875	24,7	62,40	370
5	1,0	1,0	1,5	3,29	1,49	844	24,5	52,34	275
6	1,0	1,0	3,0	3,07	1,01	553	44,79	42,14	240,5
7	1,0	1,5	0,0	3,12	1,16	839	41,77	42,00	278
8	1,0	1,5	1,5	3,25	1,34	716	23,66	40,50	232
9	1,0	1,5	3,0	3,24	1,35	490	30,44	37,03	198
10	2,0	0,5	0,0	1,78	2,83	705	38,35	29,00	303
11	2,0	0,5	1,5	2,28	2,91	1156	44	25,25	185
12	2,0	0,5	3,0	2,44	2,76	721	133,19	25,20	181,5
13	2,0	1,0	0,0	2,84	2,04	1334	69,98	24,64	235
14	2,0	1,0	1,5	2,98	2,1	1292	47,11	23,48	187
15	2,0	1,0	3,0	2,74	2,2	962	93,08	21,33	144
16	2,0	1,5	0,0	3,04	1,48	1228	44,53	23,00	208,5
17	2,0	1,5	1,5	3,08	1,71	1147	57,25	21,24	125
18	2,0	1,5	3,0	3,16	1,65	837	93,5	21,20	110,3
19	3,0	0,5	0,0	1,56	3,08	865	38,65	16,66	224
20	3,0	0,5	1,5	1,82	2,97	1566	62,41	14,55	125,7
21	3,0	0,5	3,0	2,71	2,98	1082	207,75	13,20	165,5
22	3,0	1,0	0,0	2,69	2,35	1208	102,91	13,77	216,5
23	3,0	1,0	1,5	2,44	2,12	1576	66,26	12,45	118,5
24	3,0	1,0	3,0	2,67	2,39	1732	146,19	13,34	132
25	3,0	1,5	0,0	2,03	2,46	1335	89,38	10,87	170,3
26	3,0	1,5	1,5	2,99	1,79	1423	70,65	8,93	70
27	3,0	1,5	3,0	3,01	1,77	1224	141,33	9,60	19

Конечный вид разработанных моделей в натуральном масштабе переменных для прогнозирования переменных представлен в уравнениях (2)–(7):

$$K_{\text{раст}} = 1,486667 - 0,236111 \cdot X_1 + 2,417778 \cdot X_2 + 0,146667 \cdot X_3 - 0,831111 \cdot X_2^2; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{межф}} = 3,48444 + 0,34000 \cdot X_1 - 3,27333 \cdot X_2 + 1,05778 X_2^2; \quad (2)$$

$$t_{\text{св.пл}} = 171,139 \cdot X_1 + 1825,111 \cdot X_2 - 831,111 \cdot X_2^2 - 94,123 \cdot X_3^2 + 108,722 \cdot X_1 X_3; \quad (3)$$

$$\delta = 18,4436 \cdot X_1 - 52,3019 \cdot X_3 + 14,5481 \cdot X_3^2 + 12,9072 \cdot X_1 X_3; \quad (4)$$

$$\theta = 139,7561 - 67,8958 \cdot X_1 - 31,7633 \cdot X_2 - 6,4707 \cdot X_3 + 8,6722 \cdot X_2^2 + 10,0767 \cdot X_1 X_2 + 2,1594 \cdot X_1 X_3; \quad (5)$$

$$t_{\text{туш}} = 763,275 - 279,991 \cdot X_1 - 190,898 \cdot X_2 - 74,114 \cdot X_3 + 38,102 \cdot X_1^2 + 13,656 \cdot X_3^2 + 40,861 \cdot X_1 X_2; \quad (6)$$

Адекватность моделей была оценена с использованием коэффициента детерминации  $R^2$ . Близкие к единице значения коэффициентов детерминации ( $R^2(K_{\text{раст}}) = 0,78$ ;  $R^2(\sigma_{\text{межф}}) = 0,89$ ;  $R^2(t_{\text{св.пл}}) = 0,85$ ;  $R^2(\delta) = 0,84$ ;  $R^2(\theta) = 0,98$ ;  $R^2(t_{\text{туш}}) = 0,95$ ) свидетельствуют о достаточно высокой точности моделей.

**4. Оптимизация состава.** Для анализа влияния факторов на значение отклика и поиска процентного соотношения компонентов состава, при которых значения откликов будут оптимальными, применялся инструмент «Профили желательности» (Desirability Profiles). Для каждой из зависимой переменной по принципу построения профиля желательности для  $K_{\text{раст}}$  (рис. 6) были построены оптимальные профили желательности.

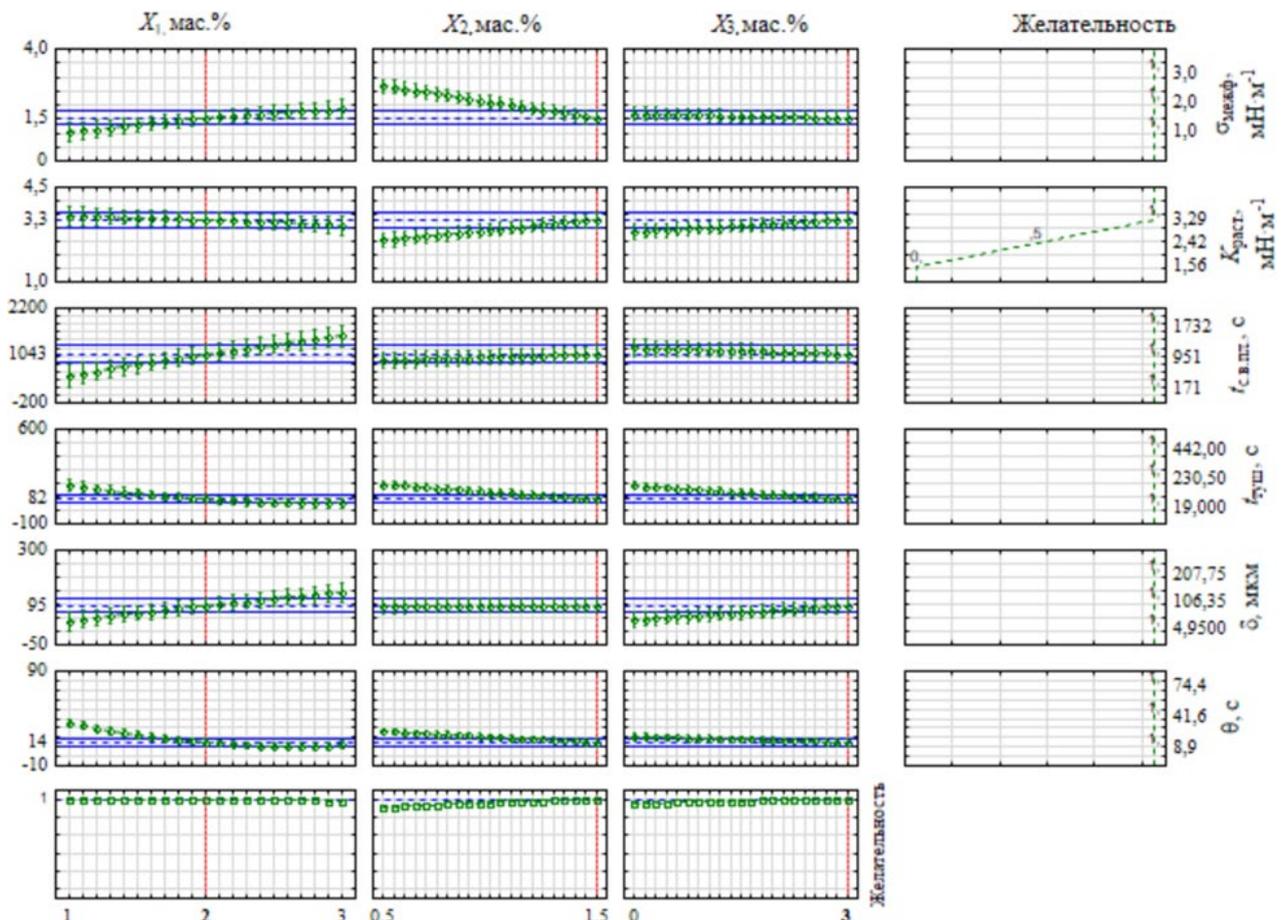


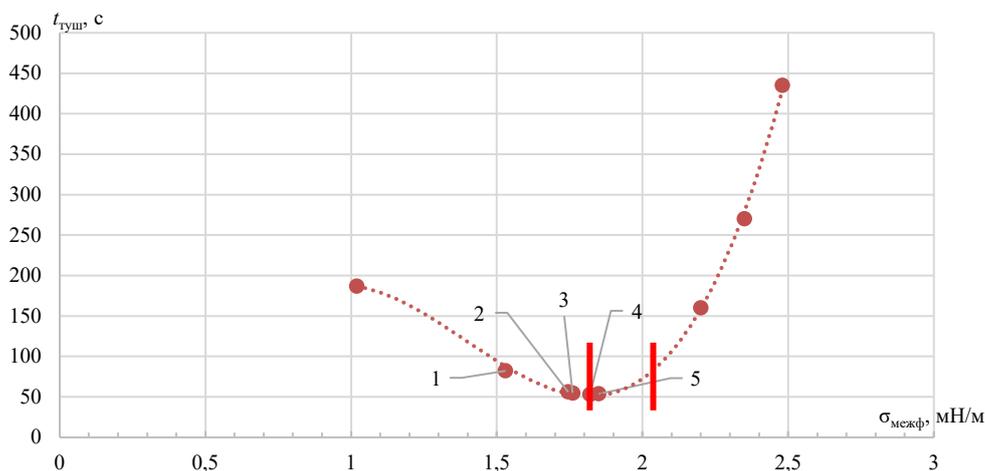
Рисунок 6. – Оптимальный профиль желательности для  $K_{\text{раст}}$

Прогнозируемые значения зависимых переменных при различном соотношении компонентов состава сведены в таблицу 3.

**Таблица 3. – Оценка коэффициентов уравнения регрессии для прогнозируемых значений переменных**

Примечание	№ состава	отклик	мас. %	Прогнозируемое значение переменной					
				$K_{\text{раст}}$ , МН/М	$\sigma_{\text{межф}}$ , МН/М	$t_{\text{с.в.пл}}$ , с	$\delta$ , мкм	$\theta$ , с	$t_{\text{туш}}$ , с
Минимальное время тушения	1	$X_1$	2,9	3,12	1,82	1464	140	11,3	53,1
		$X_2$	1,5						
		$X_3$	3						
Максимальное время существования пленки	2	$X_1$	3	3,10	1,85	1507	144	11,8	53,7
		$X_2$	1,5						
		$X_3$	3						
Максимальная толщина водной пленки	3	$X_1$	2,65	3,18	1,76	1354	151	13,4	55,0
		$X_2$	1,5						
		$X_3$	3						
Минимальное время смачивания	4	$X_1$	2,6	3,18	1,75	1332	130	10,9	56,0
		$X_2$	1,5						
		$X_3$	3						
Максимальный коэффициент растекания	5	$X_1$	2	3,30	1,53	1043	95	14,7	82,2
		$X_2$	1,5						
		$X_3$	3						
Минимальный коэффициент межфазного натяжения	6	$X_1$	1	3,44	1,02	495	38	35,0	187,0
		$X_2$	1,5						
		$X_3$	3						
Максимальное время тушения	7	$X_1$	1	2,37	2,48	836	16	69,0	435,0
		$X_2$	0,5						
		$X_3$	0						

Для наглядного представления полученных данных был построен ряд зависимостей. На рисунке 7 по значениям оптимизации регрессионной модели (табл. 3) представлена прогнозируемая зависимость времени тушения  $t_{\text{туш}}$  модельного очага пожара класса В от коэффициента межфазного натяжения  $\sigma_{\text{межф}}$  пленкообразующего раствора.



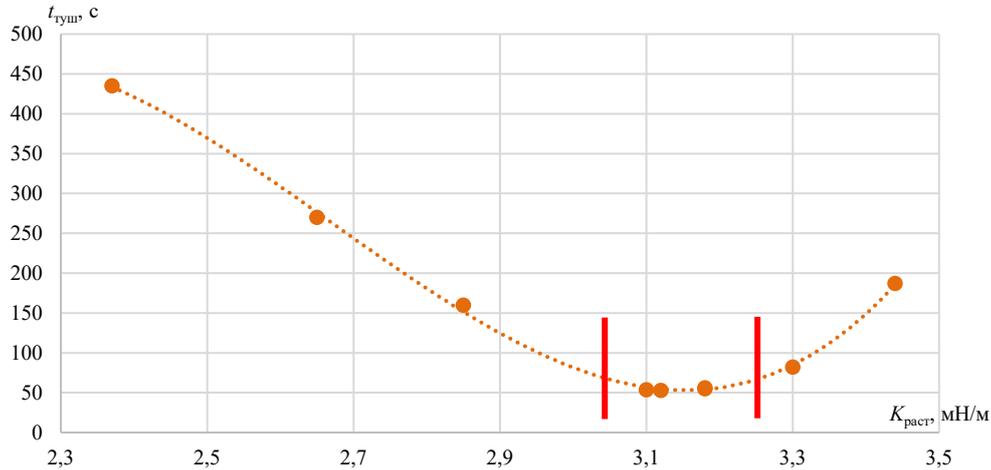
1 – точка, соответствующая максимальному значению коэффициента растекания; 2 – точка, соответствующая минимальному значению времени смачивания; 3 – точка, соответствующая максимальному значению толщины водной пленки на поверхности горючей жидкости; 4 – точка, соответствующая минимальному значению времени тушения; 5 – точка, соответствующая максимальному значению времени существования водной пленки на поверхности горючей жидкости

**Рисунок 7. – Прогнозируемые данные зависимости времени тушения  $t_{\text{туш}}$  от коэффициента межфазного натяжения  $\sigma_{\text{межф}}$  пленкообразующего раствора**

Как видно из рисунка 7, увеличение межфазного натяжения пленкообразующего раствора приводит сначала к уменьшению времени тушения горючей жидкости. При значениях

коэффициента межфазного натяжения пленкообразующего раствора от  $1,7 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$  до  $1,9 \text{ мН}\cdot\text{м}^{-1}$  наблюдается минимальное время тушения горючей жидкости и составляет 53 с. При дальнейшем увеличении коэффициента межфазного натяжения время тушения увеличивается.

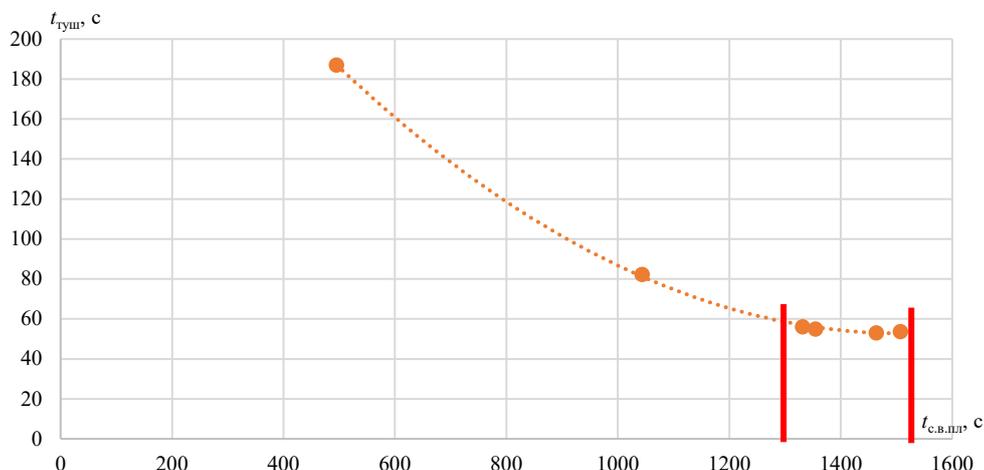
На рисунке 8 по значениям оптимизации регрессионной модели (табл. 3) представлена прогнозируемая зависимость времени тушения  $t_{\text{туш}}$  модельного очага пожара класса В от коэффициента растекания  $K_{\text{раст}}$  пленкообразующего раствора по поверхности горючей жидкости.



**Рисунок 8.** – Прогнозируемые данные зависимости времени тушения  $t_{\text{туш}}$  от коэффициента растекания  $K_{\text{раст}}$  пленкообразующего раствора

Как видно из рисунка 8, увеличение коэффициента растекания пленкообразующего раствора по поверхности горючей жидкости приводит к уменьшению времени тушения только до определенного момента. При значениях коэффициента растекания от 3,1 до 3,2  $\text{мН}\cdot\text{м}^{-1}$  время тушения горючей жидкости является минимальным и составляет 53 с. Дальнейшее увеличение коэффициента растекания сопровождается увеличением времени тушения горючей жидкости. Данное поведение объясняется связью коэффициента растекания и межфазного натяжения, поскольку при увеличении коэффициента растекания коэффициент межфазного натяжения пленкообразующего раствора уменьшается (рис. 7).

На рисунке 9 по значениям оптимизации регрессионной модели (табл. 4) представлена прогнозируемая зависимость времени тушения  $t_{\text{туш}}$  модельного очага пожара класса В от времени существования водной пленки  $t_{\text{с.в.пл}}$  пленкообразующего раствора на поверхности горючей жидкости.



**Рисунок 9.** – Прогнозируемые данные зависимости времени тушения  $t_{\text{туш}}$  от времени существования водной пленки  $t_{\text{с.в.пл}}$  пленкообразующего раствора на поверхности горючей жидкости

Из рисунка 9 видно, что увеличение времени существования водной пленки на поверхности горючей жидкости уменьшает время тушения горючей жидкости. При времени существования водной пленки на поверхности горючей жидкости от 1300 до 1500 с время тушения снижается до 60–50 с.

**5. Проведение сравнительных огневых испытаний разработанного состава с аналогами.** Исходя из профиля желательности по ранее разработанной регрессионной модели прогнозирования времени тушения модельного очага пожара класса В, для дальнейших сравнительных испытаний выбраны 3 огнетушащих состава с наиболее оптимальными параметрами. Прогнозные значения контролируемых параметров в зависимости от массовой доли компонентов, входящих в выбранные огнетушащие составы, приведены в таблице 4.

**Таблица 4. – Прогнозные значения контролируемых параметров в зависимости от массовой доли компонентов огнетушащего состава**

Наименование огнетушащего состава	Массовая доля, мас. %			Прогнозное значение		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$K_{раст}$ , МН/м	$t_{туш}$ , с	Уровень желательности
Огнетушащая композиция V1	2,3	1,4	3	3,17	75,3	0,97
Огнетушащая композиция V2	2,5	1,4	3	3,13	67,3	0,97
Огнетушащая композиция V3	2,9	1,5	3	3,12	53,1	0,98

В качестве сравниваемых огнетушащих составов были выбраны промышленно выпускаемые пленкообразующие пенообразователи целевого назначения «Барьер-пленкообразующий» ЗНС и БНС (ООО «Сплендор») и «Техникс-пленкообразующий» ЗНС (ООО «Материалы для пожаротушения»). Физико-химические параметры сравнительных образцов и результаты серии экспериментов по определению значений времени тушения огнетушащих составов приведены в таблице 5.

**Таблица 5. – Результаты сравнительных огневых испытаний**

Огнетушащий состав	Интенсивность подачи огнетушащего вещества, $дм^3/с \cdot м^2$	№ опыта	Время тушения $t_{туш}$ модельного очага пожара, с	Среднее значение $t_{туш}$
Огнетушащая композиция V1	0,058	1	78	87
		2	118	
		3	66	
Огнетушащая композиция V2	0,059	1	80	79
		2	76	
		3	83	
Огнетушащая композиция V3	0,059	1	58	55
		2	52	
		3	56	
Барьер пленкообразующий ЗНС	0,06	1	134	113
		2	96	
		3	109	
Техникс пленкообразующий ЗНС	0,059	1	116	89
		2	76	
		3	77	
ПО-6РЗ	0,06	1	–	не потушил
		2	–	
		3	–	

Из таблицы 5 видно, что время тушения модельного очага пожара класса В рабочими растворами с применением всех разработанных композиций V1–V3 и серийно выпускаемого пленкообразующего пенообразователя целевого назначения «Техникс пленкообразующий»

ЗНС при установленной интенсивности подачи рабочего раствора  $0,059 \pm 0,002 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$  составило не более 90 с. При испытании рабочих растворов с пенообразователем общего назначения ПО-6РЗ тушение модельного очага пожара класса В достигнуто не было.

В ходе проведенных исследований установлено, что сравнение прогнозируемых моделью значений времени тушения модельного очага пожара огнетушащими композициями V1–V3 с экспериментальными данными показало незначительное расхождение, не превышающее 5,2 %, что подтверждает высокую прогнозируемую способность модели в заданном диапазоне концентраций компонентов состава.

### Заключение

В результате проведенного анализа литературных источников установлено, что одним из способов повышения огнетушащей эффективности существующих водяных и пенных установок пожаротушения является применение пленкообразующего огнетушащего химического состава и его подача на тушение в виде мелкодисперсных капель.

С целью установления количественного влияния компонентов пленкообразующего огнетушащего химического состава на его огнетушащие и физико-химические свойства с применением минимального количества расходного материала были разработаны лабораторные установки и методики выполнения измерений с использованием этих установок.

На основании проведенных исследований физико-химических свойств ФПАВ, УПАВ и соразтворителей был обоснован выбор применения ФПАВ Амфотерное 4, УПАВ Неионогенное 1 и соразтворителя типа 2-бутоксиэтанол.

В ходе экспериментального исследования, проведенного методом ПФЭ, были разработаны регрессионные модели, описывающие зависимость коэффициента растекания, коэффициента межфазного натяжения, времени существования водной пленки на поверхности горючей жидкости, времени тушения модельного очага пожара класса В, толщины водной пленки на поверхности горючей жидкости и времени смачивания образца из хлопчатобумажной ткани от мас. % трех ключевых компонентов: ФПАВ, неионогенного УПАВ и анионного УПАВ с низкой пенообразующей способностью. Адекватность моделей была оценена с использованием коэффициента детерминации  $R^2$ . Близкие к единице значения коэффициентов детерминации ( $R^2(K_{\text{раст}}) = 0,78$ ;  $R^2(\sigma_{\text{межф}}) = 0,89$ ;  $R^2(t_{\text{с.в.пл}}) = 0,85$ ;  $R^2(\delta) = 0,84$ ;  $R^2(\theta) = 0,98$ ;  $R^2(t_{\text{туш}}) = 0,95$ ) свидетельствуют о достаточно высокой точности моделей.

Из установленных зависимостей времени тушения модельных очагов пожаров от массовой доли компонентов пленкообразующего огнетушащего химического состава определены диапазоны коэффициента межфазного натяжения  $1,7\text{--}1,9 \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$  и коэффициента растекания  $3,0\text{--}3,2 \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$ , при которых огнетушащая эффективность пленкообразующего огнетушащего химического состава максимальна и составляет 55 с, что на 35 % больше огнетушащей эффективности серийно выпускаемых пленкообразующих пенообразователей.

На основании установленных зависимостей времени тушения модельных очагов от коэффициента межфазного натяжения водных растворов фторированных, углеводородных ПАВ и соразтворителей разработана рецептура пленкообразующего огнетушащего состава, состоящего из  $2,9 \pm 0,1$  мас. % амфотерного ФПАВ,  $1,5 \pm 0,1$  мас. % неионогенного УПАВ,  $3,0 \pm 0,1$  мас. % анионного УПАВ,  $10,0 \pm 0,1$  мас. % органического растворителя и  $82,9 \pm 0,1$  мас. % воды, отличающегося от исследуемых составов и существующих аналогов наибольшей огнетушащей эффективностью при подаче путем распыления.

Проведение полного факторного эксперимента и получение зависимостей времени тушения модельных очагов от коэффициента межфазного натяжения водных растворов ПАВ выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т23М-061 «Пленкообразующий огнетушащий состав для автоматических установок пожаротушения водой и пеной на основе фторированных поверхностно-активных веществ»).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаренко, В.С. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информационно-аналитический сборник / В.С. Гончаренко, Т.А. Чечетина, В.И. Сибирко [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. – 110 с. – EDN: BSONFO.
2. Cong, B.H. Extinguishment of liquid fuel fires by water mist with additives / B.H. Cong, G.X. Liao, Z. Huang // Proceedings of the Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology (AOFST 7). – 2007. – Article 95. – 11 p. – URL: <https://publications.iafss.org/publications/aofst/7/95> (date of access: 03.03.2025).
3. Wu, B. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive / B. Wu, G. Liao // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 62. – P. 317–323. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070.
4. Kim, A.K. The effect of foam additives on the fire suppression efficiency of water mist / A.K. Kim, B.Z. Dlugogorski, J.R. Mawhinney; National Fire Laboratory of Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 1994. – 12 p. – URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire\\_research/R9402226.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R9402226.pdf) (date of access: 03.03.2025).
5. Сперанский, А.А. Определение огнетушащей эффективности опытного образца судовой системы пожаротушения с использованием тонкораспыленной воды для защиты машинных и машинно-котельных отделений / А.А. Сперанский, С.В. Мамагин, Д.И. Павлов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2018. – № 2 (27). – С. 40–44. – EDN: XWXQAX.
6. Tatem, P.A. A review of water mist technology for fire suppression / P.A. Tatem, C.L. Beyler, P.J. DiNenno, E.K. Budnick [et al.]; Naval Research Laboratory, Washington, 1994. – 93 p. – No. NAL/MR/6180-94-7624. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/235097941\\_A\\_Review\\_of\\_Water\\_Mist\\_Technology\\_for\\_Fire\\_Suppression](https://www.researchgate.net/publication/235097941_A_Review_of_Water_Mist_Technology_for_Fire_Suppression) (date of access: 03.03.2025).
7. Бобков, С.А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
8. 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.
9. 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.
10. Иванов, И.Ю. Исследование фторированных поверхностно-активных веществ для разработки пленкообразующего огнетушащего состава / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий, Я.А. Кондакова [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: DGPRXST.
11. Иванов, И.Ю. Регрессионная модель прогнозирования коэффициента растекания пленкообразующих огнетушащих составов по поверхности горючей жидкости от соотношения их компонентов / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий, А.О. Лихоманов, М.М. Журов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 437–450. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.437. – EDN: VCBAUY.

**Пленкообразующий огнетушащий химический состав для автоматических установок пожаротушения, подаваемый методом распыления**

**Film-forming fire extinguishing chemical composition for automatic fire extinguishing systems, supplied by spraying**

***Иванов Игорь Юрьевич***

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: 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,  
Associate Professor

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

## FILM-FORMING FIRE EXTINGUISHING CHEMICAL COMPOSITION FOR AUTOMATIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS, SUPPLIED BY SPRAYING

Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D.

*Purpose.* Development of a universal film-forming fire extinguishing chemical composition for fire extinguishing systems and water foam based on fluorinated surfactants for extinguishing class A and B fires (combustion of solid and liquid flammable substances), supplied for extinguishing by spraying.

*Methods.* Empirical research methods (measurement of surface and interfacial tension of solutions), the method of randomization and full factorial experiment to obtain regression models, as well as the «Desirability Profiles» module of the STATISTICA software package. The determination of the coefficients of surface and interfacial tension of solutions of surfactants in aqueous systems was carried out by the method of tearing off the Du Nouy ring on an automatic tensiometer KRÜSS-K20.

*Findings.* The choice of components of the film-forming fire extinguishing chemical composition is substantiated: fluorinated surfactants (FS), hydrocarbon surfactants (HS) and a co-solvent. The results of a full factorial experiment are presented, on the basis of which regression models were obtained that describe the change in the value of the coefficient of spreading of the water film on the surface of the flammable liquid, interfacial tension coefficient, wetting time of a cotton fabric sample, the time of existence of the water film on the surface of the flammable liquid, the thickness of the water film on the surface of the flammable liquid and the extinguishing time of a model Class B fire depending on the ratio of the components of the film-forming fire extinguishing chemical compositions.

From the established dependences of the extinguishing time of model fires on the mass fraction of the components of the film-forming fire extinguishing composition, the range of interfacial tension of  $1.7\text{--}1.9\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  and the spreading coefficient of  $3.0\text{--}3.2\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  were determined, at which the fire extinguishing efficiency of the film-forming fire extinguishing composition is maximum and makes 55 s, which is 35 % higher than the fire extinguishing efficiency of commercially available film-forming foaming agents.

Based on the established dependencies of the extinguishing time of model fires on the coefficient of interfacial tension of aqueous solutions of FS, HS with a co-solvent, a formulation of a film-forming fire extinguishing composition has been developed, consisting of  $2.9\pm 0.1\text{ wt.}\%$  amphoteric FS,  $1.5\pm 0.1\text{ wt.}\%$  nonionic HS,  $3.0\pm 0.1\text{ wt.}\%$  anionic HS,  $10.0\pm 0.1\text{ wt.}\%$  organic solvent and  $82.9\pm 0.1\text{ wt.}\%$  water, which differs from the investigated compositions and existing analogues by the greatest fire extinguishing efficiency when applied by spraying.

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

*Keywords:* surfactants, surface tension coefficient, interfacial tension coefficient, full factorial experiment, mathematical model, foaming agent.

(The date of submitting: April 10, 2025)

### REFERENCES

1. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I. [et al.]. *Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2023 godu* [Fires and fire safety in 2023]: information and analytical compendium. Balashiha: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2024. 110 p. (rus). EDN: BSONFO.
2. Cong B.H., Liao G.X., Huang Z. Extinguishment of liquid fuel fires by water mist with additives. *Proc. of the Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology (AOFST 7)*, 2007. Article 95. 11 p. Available at: <https://publications.iafss.org/publications/aofst/7/95> (accessed: March 3, 2025).
3. Wu B., Liao G. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive. *Procedia Engineering*, 2013. Vol. 62. Pp. 317–323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070.
4. Kim A.K., Dlugogorski B.Z., Mawhinney J.R. *The effect of foam additives on the fire suppression efficiency of water mist*. National Fire Laboratory, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 1994. 12 p. Available at: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire\\_research/R9402226.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R9402226.pdf) (accessed: March 3, 2025).
5. Speranskiy A.A., Mamagin S.V., Pavlov D.I. Opredeleniye ogetushashchey effektivnosti opytnogo obraztsa sudovoy sistemy pozharotusheniya s ispol'zovaniyem tonkoraspylennoy vody dlya zashchity

- mashinnykh i mashinno-kotel'nykh otdeleniy [Determination of fire extinguishing efficiency of the experimental sample of ship system of fire-fighting with use of thin open water for protection machine and machine-boiler departments]. *Modern Problems of Civil Protection*, 2018. No. 2 (27). Pp. 40–44. (rus). EDN: XWXQAX.
6. Tatem P.A., Beyler C.L., DiNunno P.J., Budnick E.K., Back G.G., Younis S.E. *A review of water mist technology for fire suppression*. Naval Research Laboratory, Washington, 1994. 93 p. Registration No. NAL/MR/6180-94-7624. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/235097941\\_A\\_Review\\_of\\_Water\\_Mist\\_Technology\\_for\\_Fire\\_Suppression](https://www.researchgate.net/publication/235097941_A_Review_of_Water_Mist_Technology_for_Fire_Suppression) (accessed: March 3, 2025).
  7. Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physico-chemical bases of fire development and suppression]: tutorial. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2014. 210 p. (rus)
  8. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. *Penoobrazovately i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primeneniye* [Foaming agents and foams for fire extinguishing. Composition, properties, application]. Moscow: Pozhnauka, 2005. 335 p. (rus). EDN: UWCCSP.
  9. Ivanov I.Yu., Kondakova Ya.A., Navrotsky O.D. *Obzor osnovnykh kharakteristik plenkoobrazuyushchikh penoobrazovately i sposoby ikh kontrolya* [Overview of the main characteristics of film-forming blowing agents and how to control them]. Proc. of V Intern. scientific-practical conf. «Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii», 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.
  10. Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Kondakova Ya.A., Krasavin V.E., Busel M.O. *Issledovanie fluorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv dlya razrabotki plenkoobrazuyushchego ognetyushashchego 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: DGPXST.
  11. Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Likhomanov A.O., Zhurov M.M. *Regressionnaya model' prognozirovaniya koeffitsienta rastekaniya plenkoobrazuyushchikh ogne-tushashchikh sostavov po poverkhnosti goryuchey zhidkosti ot sootnosheniya ikh komponentov* [Regression model for predicting the effectiveness of flow of film-forming fire extinguishing compositions over the surface of combustible liquid from the ratio of their components]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 4. Pp. 437–450. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.437. EDN: VCBAUY.

Copyright © 2025 Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.