

Научная статья

УДК 614.844; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-2-146-155

СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ В ПОЖАРОТУШЕНИИ

✉ Сизонова Наталья Александровна.

Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Россия

✉ Nat-sizonova@yandex.ru

Аннотация. Предметом статьи являются современные технологии тушения пожаров, основанные на компрессионной пене. Цель исследования – изучение средств получения и перспектив применения компрессионной пены в пожаротушении. Методы: анализ и синтез, моделирование. Полученные результаты свидетельствуют о том, что компрессионная пена обладает рядом преимуществ по сравнению с водой и обычной воздушно-аспираторной пеной, поэтому она может использоваться для тушения пожаров во многих отраслях и сферах.

Представлена схема изготовления компрессионной пены (пенный концентрат выступает в качестве пенообразователя) и схема автономной установки изготовления компрессионной пены. Отмечено, что одним из существенных преимуществ CAFS является возможность создания готового продукта, соответствующего конкретному типу горючего или конкретной ситуации. Определены характеристики продукта SmartCAFS.

Представлена типология использования компрессионной пены в зависимости от типа инцидента. Приведены результаты испытания на огнестойкость различных пен. Сделан вывод о том, что системы пожаротушения с использованием компрессионной пены имеют значительные преимущества, в частности минимизацию распространения пожара, объема воды, необходимого для покрытия больших площадей, расходов и размещения, а также интеграцию CAFS с цифровыми технологиями.

Ключевые слова: пена, пожар, компрессия, покрытие, расход, вода, топливо, воздух

Для цитирования: Сизонова Н.А. Средства получения и перспективы применения компрессионной пены в пожаротушении // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 2. С. 146–155. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-2-146-155.

Scientific article

MEANS OF PRODUCTION AND PERSPECTIVES OF COMPRESSION FOAM APPLICATION IN FIRE FIGHTING

✉ Sizonova Natalia A.

All-Russian order «Badge of Honor» research institute of fire defense of EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia

✉ Nat-sizonova@yandex.ru

Abstract. The subject of the article is modern fire extinguishing technologies based on compression foam. The purpose of the study is to study the means of obtaining and the prospects for using compression foam in fire fighting. Methods: analysis and synthesis, modeling. The results obtained indicate that compression foam has a number of advantages compared to water and conventional air-aspirated foam, so it can be used to extinguish fires in many industries and areas.

A diagram of the production of compression foam is presented (the foam concentrate acts as a foaming agent) and a diagram of an autonomous installation for the production of compression foam. It is noted that one of the significant advantages of CAFS is the ability to create a finished

product that matches a specific type of fuel or a specific situation. The characteristics of the SmartCAFS product have been defined.

A typology of the use of compression foam depending on the type of incident is presented. The results of fire resistance tests of various foams are presented. It is concluded that fire suppression systems using compression foam have significant advantages, such as minimizing the spread of fire, the volume of water required to cover large areas, costs and placement, and the integration of CAFS with digital technologies.

Keywords: foam, fire, compression, coating, flow, water, fuel, air

For citation: Sizonova N.A. Means of production and perspectives of compression foam application in fire fighting // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 2. P. 146–155. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-2-146-155.

Введение

Частые случаи возникновения пожаров всех типов в повседневной жизни приводят к огромным экономическим потерям и загрязнению окружающей среды. Пожары классов А и В среди других классов наносят наиболее значительный материальный и экологический ущерб. Самым распространенным веществом для тушения пожаров класса А является вода, поскольку она имеет высокие показатели теплоемкости, теплоты парообразования и низкую теплопроводность [1]. Основным механизмом огнетушащего действия воды – охлаждение зоны горения. При попадании в очаг пожара вода охлаждает горючее вещество ниже температуры воспламенения. Также при поглощении водой тепла образуется пар, который уменьшает концентрацию кислорода и продуктов горения [2]. Теоретически охлаждающая способность воды составляет 2,6 МВт на литр в секунду. Но в реальной ситуации такой огромной мощности охлаждения можно добиться только с помощью сотен литров воды, поскольку почти 80 % уходит из зоны пожара, не испаряясь. Таким образом, огромная противопожарная сила воды может быть оптимально использована только при полном испарении в условиях пожара [3]. Чтобы добиться этого, вода должна быть разбита на мелкие частицы, площадь поверхности которых во много раз превышает площадь поверхности воды. Эти капли (размером около 150 микрон) затем необходимо доставить к огню с помощью кинетической силы, достаточно сильной, чтобы преодолеть собственные конвекционные потоки огня [4].

Методы исследования

Материалом исследования послужили научные источники по проблеме исследования. В качестве методов выступили анализ, обобщение, систематизация информации по вопросам средств получения и перспективы применения компрессионной пены в пожаротушении и моделирование.

Результаты исследования и их обсуждение

Определенная сложность выполнения всех обозначенных условий эффективного использования воды в процессе тушения пожара предопределила тот факт, что во многих странах мира сегодня все большую популярность приобретает применение пены, в том числе компрессионной. Принцип действия системы для получения компрессионной пены следующий – принудительное введение воздуха в раствор пенообразователя с помощью компрессора [5]. Такие системы в англоязычных странах называются CAFS (Compressed air foam system). В последнее время они получили широкое распространение в самых разных областях. В компрессионной пене хорошая изолирующая способность горючих паров от зоны реакции. Особую эффективность она демонстрирует во время борьбы с легковоспламеняющимися жидкостями и углеводородами [6].

Универсальность компрессионной пены доказана в ходе многочисленных полевых

испытаний [7–9]. Было установлено, что она подходит для морских нефтегазовых объектов, автомобилей быстрого реагирования, мест хранения топлива, горнодобывающей промышленности, морских судов, насосного оборудования под давлением и оборудования для гидроразрыва пласта, резервуаров для хранения углеводородов, аэропортов, лесного хозяйства и общего аварийного реагирования на пожары.

При использовании в качестве средства пожаротушения огненная струя CAFS обладает очень высоким качеством поглощения тепла, что позволяет подавить пожар в кратчайшие сроки по сравнению с традиционной тактикой использования обычной воды [10]. В результате повышения эффективности снижается риск для пожарных во время спасательных операций, расширяется окно возможностей для спасения людей, уменьшается материальный ущерб, и снижаются общие эксплуатационные расходы.

Таким образом, изучение свойств пен, доступных для применения в системах CAFS, которые подходят для конкретных случаев пожаротушения, а также особенностей их изготовления и применения, составляет важную научно-практическую задачу, необходимость решения которой и предопределила выбор темы данной статьи.

Вопросы, связанные с гидродинамикой компрессионной пены при тушении пожаров, а также моделированием диффузии пены, нашли свое отражение в работах авторов [11–13].

Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, ряд вопросов в данной предметной области остается нерешенным. Так, отдельного внимания заслуживает сравнение различных видов пены для тушения пожаров, определение свойств их повторного возгорания, а также токсичность веществ, которые образуются пенами после тушения пожара. Кроме того, в уточнении нуждаются характеристики существующих нагнетателей пены, в том числе в случае их портативного применения.

Таким образом, цель статьи заключается в определении средств получения и перспектив применения компрессионной пены в пожаротушении.

Компрессионная пена – это высокоэнергетическая пена с низким коэффициентом расширения. Она состоит из воды, пенообразователя и сжатого воздуха [14]. От других противопожарных пен ее отличает способ получения. Вместо того чтобы подавать воздух в пенный раствор через специальный пенный патрубок или трубку для аэрации пены, подсоединенную к насадке, сжатый воздух добавляется в пенный раствор перед насадкой, обычно на выходе из насоса. Затем раствор пены и сжатый воздух тщательно перемешиваются перед выпуском через прямое отверстие сопла (рис. 1). Этот процесс создает высокоэнергетическую пену, обладающую превосходной дальностью подачи и более эффективно использующую пенообразователь и воду. Изменяя объем воды и воздуха в растворе, можно получить более широкий диапазон консистенций пены, что в более полной мере может отвечать потребностям при тушении пожаров и защите от огня.

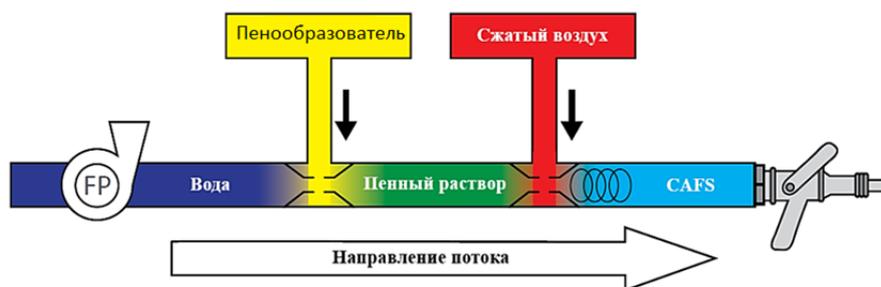


Рис. 1. Схема изготовления компрессионной пены (пенный концентрат выступает в качестве пенообразователя)

Очевидно, что сегодня для промышленного применения компрессионной пены получили широкое распространение автономные установки, которые устраняют необходимость использовать сопло для подачи воздуха в пенный раствор для создания готового пенного покрытия.

Пенная система со сжатым воздухом состоит из традиционного центробежного водяного насоса и системы подачи воды, системы подачи пены (бак или бочка для пены) и насоса/дозатора пены для подачи пеноконцентрата класса А или класса В в необходимом процентном соотношении. Компрессор подает воздух, который добавляется в пенный раствор под давлением, немного превышающим давление воды [15]. Смешивание и перемешивание пенного раствора и воздуха происходит в подающем шланге (или в смесительной камере для устройств, устанавливаемых в аппаратах) для создания равномерной и однородной структуры пенных пузырьков (рис. 2).

Одним из существенных преимуществ CAFS является возможность создания готового продукта, соответствующего конкретному типу горючего или конкретной ситуации. Получение равномерной пузырьковой структуры с увеличенным временем стекания и высокой прочностью на сдвиг обеспечивает большую устойчивость, чем пена с естественной аспирацией или вода при тушении пожара.

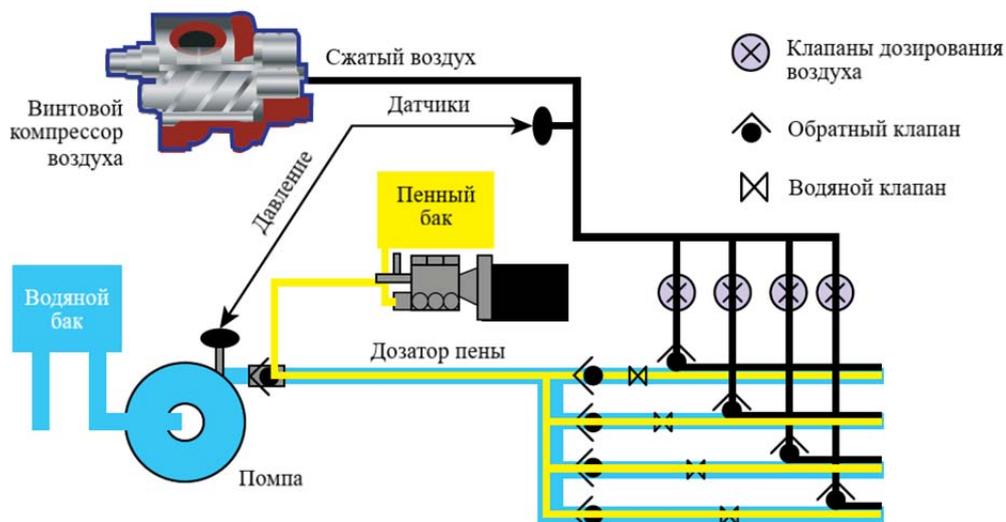


Рис. 2. Схема автономной установки изготовления компрессионной пены

Изменяя соотношение раствора пены и воздуха, можно получить компрессионную пену различной консистенции. В настоящее время для использования в системах CAFS существует целый ряд пеноматериалов, которые подходят для конкретных случаев применения. К ним относятся:

1. Пена низкой кратности расширения имеет коэффициент расширения менее 20 раз. Она маловязкая, подвижная и может быстро покрывать большие площади, что делает ее идеальной для больших открытых пространств или крупных складов.

2. Пена средней кратности обладает коэффициентом расширения от 20 до 100 раз и является подходящим решением для большинства промышленных предприятий.

3. Пена высокой кратности характеризуется высоким коэффициентом расширения от 200 до 1000, что делает ее подходящей для закрытых помещений, где быстрое покрытие и ликвидация пожара являются главным приоритетом. Обычно этот тип пены применяется в ангарах.

4. Спиртостойкие пены содержат полимер, который создает защитное покрытие между огнем и пеной, предотвращая разрушение пены под воздействием спиртов, содержащихся в огне. Естественно, они обычно используются в помещениях, где регулярно применяется метиловый спирт и другие оксигенаты.

На следующем этапе исследования представляется целесообразным рассмотреть практические аспекты применения компрессионной пены в конкретных ситуациях пожаротушения.

Математическая модель процесса получения компрессионной пены

Для формализации математической модели будем рассматривать блок пеногенератора и систему связи между блоками.

Входными данными блока пеногенератора, в котором реализована математическая модель прохождения газожидкостной смеси через пеногенератор, являются:

- p_2 – давление на входе в пенообразующую вставку, Па;
- p_1 – давление на выходе из пенообразующей вставки, Па;
- ε – пористость (отношение объема пустот к общему объему пористого вещества)

пористого тела;

- D – диаметр пенообразующей вставки, м;
- L – длина пенообразующей вставки, м;
- h_s – толщина пенообразующих элементов, м;
- b_s – ширина пенообразующих элементов, м.

Выходные данные включают в себя:

- Q_w – расход жидкой фазы газожидкостного потока (объемный расход) в предкамеру, $\text{м}^3/\text{с}$;
- Q_a – расход газовой фазы газожидкостного потока Q_a (объемный расход) в предкамеру, $\text{м}^3/\text{с}$.

$$Y = \psi \cdot \lambda(p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\omega'^2}{d_{\text{equ}}} \left(1 + \left(1 - \frac{\rho_{\text{air}}(p)}{\rho_w} \right) \cdot \frac{\omega''}{\omega'} \right), \text{Па/м},$$

где Y – величина перепада давления по длине канала пенообразующей вставки для газожидкостной смеси, ψ – приведенный коэффициент сопротивления для принятых режимов газосодержания, который уточняется экспериментально; $\lambda(p)$ – коэффициент гидродинамического сопротивления однофазного потока, в данном случае жидкой фазы, движущейся с поверхностной скоростью жидкой фазы; ρ_w – плотность жидкой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$; d_{equ} – эквивалентный диаметр канала пенообразующей вставки, м; $\rho_{\text{air}}(p)$ – плотность газовой фазы под давлением p , $\text{кг}/\text{м}^3$; ω' – поверхностная скорость жидкой фазы, $\text{м}/\text{с}$; ω'' – поверхностная скорость газовой фазы, $\text{м}/\text{с}$.

Исходя из определения коэффициента вспенивания, можно рассчитать объемный расход газовой фазы:

$$Q_{a_{NC}} = (k_m - 1) \cdot Q_w, \text{м}^3/\text{с},$$

где $Q_{a_{NC}}$ – объемный расход газовой фазы (для нормальных условий), $\text{м}^3/\text{с}$; Q_w – объемный расход жидкой фазы (смесь воды с пенообразователем), $\text{м}^3/\text{с}$; k_m – коэффициент массопередачи.

При определении $Q_a(p)$ – объемного расхода воздуха, находящегося под давлением p , важно учитывать, что при прохождении потока через этот блок происходит очень активное перемешивание и контакты обеих фаз, образующих газожидкостную смесь. Ввиду более значительного массового расхода воды (при нормальных значениях кратности), теплообмен между отдельными фазами успевает произойти, поэтому данный процесс считается изотермическим термодинамическим процессом, для которого, согласно закону Бойля-Мариотта, объемный расход рассчитывается по формуле:

$$Q_a(p) = Q_{a_{NC}} \cdot \frac{p_{NC}}{p}, \text{м}^3/\text{с},$$

p_{NC} – нормальное атмосферное давление, Па; p – давление, под которым находится пена в текущий момент времени, Па.

Объемный расход газожидкостной смеси под давлением p определяется по формуле:

$$Q_f(p) = Q_a + Q_w, \text{м}^3/\text{с}.$$

Чтобы рассчитать массовый расход газа (G_a) целесообразно воспользоваться формулой:

$$G_a = Q_{a_NC} \cdot \rho_{a_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \rho_{a_NC}, \text{ кг/с.}$$

Формула для плотности газовой фазы, которая находится под давлением, выглядит следующим образом:

$$\rho_{air}(p) = \frac{G_a}{Q_a(0)} = \frac{(k_m - 1) Q_w \rho_w \frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w}}{(k_m - 1) Q_w \frac{\rho_{NC}}{p}} = \frac{\rho_{a_NC}}{\rho_{NC}} p, \text{ кг/м}^3.$$

Для проведения расчетов с использованием математической модели с учетом переходных процессов и контроля ошибок необходимо задать входные параметры. Они задаются произвольно и для получения требуемых выходных параметров установки подбираются методом итераций.

С технической точки зрения компрессионная пена воздействует на все стороны тетраэдра пожара, накрывая огонь «пенным полотном», тем самым препятствуя соединению кислорода с топливом. Оно уменьшает нагрев за счет изоляции с помощью воздуха, находящегося в пузырьках, а пузырьки отражают лучистое тепло, тем самым предупреждая избыток тепла в огне. Это предотвращает реакцию дополнительного топлива с огнем, создавая барьер. Наконец, было доказано, что CAFS нарушает химическую реакцию, необходимую для продолжения пожара. CAFS в 15–30 раз эффективнее, чем просто вода [16].

В табл. 1 представлены возможные типы инцидентов возгорания и рекомендуемый тип пены для тушения пожара.

Таблица 1

Типология использования компрессионной пены в зависимости от типа инцидента

Тип инцидента	Цель использования пены	Тип пены	% пены
Шланг 38 мм			
Возгорание на объектах с зазорами: поддоны / шины	Удалить тепло	Влажный	0,2 %–0,3 %
Возгорание растительности	Удалить тепло	Влажный	0,2 %–0,3 %
Автомобильный пожар	Отвод тепла	Влажный	0,2 %–0,3 %
Внешнее возгорание зданий/производственных площадок	Удалить тепло	Влажный	0,3 %
Пожар на топливных объектах	Погасить топливо	Влажный / средний	0,3 %–0,5 %
Возгорание на объектах без зазоров, мульча / бумага / картон / уголь	Удаление кислорода и тепла	Влажный до среднего	0,35–0,5 %
Защита от влаги и воздействия (двухслойное нанесение)	Удалить топливо	Влажный, затем сухой	0,3 %, затем 0,5 %
Класс В, легковоспламеняющаяся жидкость	Удалить кислород и тепло	Средняя	1,0 %
Шланг 70 мм			
Аэраторы / мониторы	Удаление тепла / кислорода	Влажный до среднего	0,3 %–0,5 %
Общие параметры		Объемы воды (ручные линии)	
Влажная	Удаление тепла	0,1 %–0,3 %, 250–350 л/мин	
Средняя	Удаление кислорода	0,3 %–0,5 %, 120–180 л/мин	
Сухая	Удаление топлива	0,5 %–1,0 %, 80–100 л/мин	

В процессе экспериментов было установлено, что, по сравнению с воздушной аспирацией, режим пенообразования CAF обычно приводит к образованию очень равномерного распределения пузырьков по размерам [17]. Распределение пузырьков по размерам и задержка жидкости оказывают сильное влияние на стабильность и реологию пены. Обнаружена связь между распределением пузырьков по размерам и скоростью дренирования, где пены с более мелкими пузырьками демонстрировали повышенную стабильность, что связано с уменьшением скорости дренирования. Отмечено, что более равномерное распределение пузырьков по размерам и высокая начальная газовая фракция приводят к образованию более стабильных пен. В целом учеными установлено, что способность CAFS прилипать к вертикальным поверхностям при защите от воздействия, более высокий импульс и дальность пролета, а также меньшая потребность в воде делают компрессионные пены более подходящими для пожаротушения, чем воздушно-аспирационные пены. Данный вывод подтверждает результаты испытаний, проведенных ACAF Systems, Inc. Для эксперимента использовалась пена LASTFIRE, не содержащая фтор, которую испытывали на огнестойкость на расстоянии 50 м. Полученные результаты (табл. 2) свидетельствуют о том, что при использовании 1/3 продукта пламя полностью погасло менее чем за половину времени.

Таблица 2

Результаты испытания на огнестойкость различных пен

Характеристики	Компрессионная пена	Обычная воздушно-аспирированная пена	Сравнительные характеристики
Пожар на расстоянии 50 метров	2 мин 45 сек.	5 мин 36 сек.	Быстрее на 2 мин 51 сек.
Вертикальное тушение	3 мин 45 сек.	7 мин 24 сек.	Быстрее на 3 мин 39 сек.
Полное тушение	6 мин 5 сек.	12 мин 36 сек.	Быстрее на 6 мин 31 сек. (в два раза быстрее)
Скорость нанесения	765 л/мин	1230 л/мин	Снижение рентабельности активов на 40 %
Общее количество нанесенного раствора	4650 л	17780 л	На 13 130 л меньше
Всего использовано пенообразующего концентрата	140 л	465 л	Экономия 70 %

В настоящее время, в эпоху Четвертой промышленной революции, перспективы использования компрессионной пены заключаются в интеграции CAFS с цифровыми технологиями. На сегодняшний день есть опытный образец SmartCAFS, который оснащен заранее запрограммированным кнопочным управлением, позволяющим подавать пену нажатием одной кнопки. Этот продукт также имеет усовершенствованные защитные блокировки и доступен для пяти различных насосов, от самого продаваемого QMAX до самой маленькой в мире встроенной установки Prima.

Характеристики продукта Smart CAFS включают в себя:

1. SPS CAFS Control – упрощенное пользовательское управление, включая предварительно запрограммированное положение, дискретную регулировку производительности и включение/выключение компрессора.

2. Индикаторы предупреждений – краткая диагностика, включая три предупреждения, которые отслеживают превышение скорости компрессора, обороты в минуту и рабочую температуру.

3. Индикаторы работы – оперативная проверка правильности подачи воздуха в систему для максимальной эффективности.

4. Защитные блокировки – предотвращают возникновение опасных условий, связанных только с воздухом или воздухом и безводной пеной.

5. Система FoamLogix – пенная система с производительностью 19 л/мин для использования с пеной классов А и В.

Заключение

Таким образом, резюмируя вышеизложенное, можно отметить, что благодаря современным технологиям и достижениям, системы пожаротушения на основе компрессионной пены являются передовыми при тушении пожаров и эффективно используются как в городских условиях, так и на производственных площадках.

Системы пожаротушения, основанные на применении компрессионной пены, получают широкое распространение, поскольку такая технология не нуждается в большом количестве воды, позволяет быстро покрывать большие площади, сводя к минимуму любой причиненный ущерб и риск дальнейшего распространения пожара. Кроме того, системы пенообразования на сжатом воздухе можно разместить на гораздо меньшей площади, чем альтернативные решения, что значительно снижает требования к инфраструктуре и расходы. Перспективы развития систем CAFS заключаются в их интеграции с цифровыми технологиями.

Список источников

1. Шавалеев М.Р. Получение компрессионной пены от мотопомп для тушения лесных пожаров // Техносферная безопасность. 2020. № 4 (29). С. 102–105.
2. Применение компрессионной пены при тушении пожаров объектов нефтегазового комплекса при отрицательных температурах / М.В. Алешков [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 8–15.
3. Chenyu Wang, Hu Shi Carrageenan-vermiculite-dimethyl methyl phosphate ternary hybrid hydrogels for firefighting // Fire and Materials. 2022. № 47 (3). С. 12–19.
4. Experimental study on the fire combustion characteristics of small-scale transformer oil pool fire / L. Jian-fei [et al.] // Fire Sci. Technol. 2019. № 26. P. 6–12.
5. Навроцкий О.Д., Камлюк А.Н. Научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам установок генерирования компрессионной пены и методика их испытаний // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2021. № 5 (1). С. 81–92.
6. Fire accident characteristics and fire extinguishing countermeasures of oil-immersed / C.L. Yalong [et al.] // Transformer, Safety and Environmental Engineering. 2020. № 39. P. 1645–1648.
7. Федяев В.Д., Стругов А.О. Современные технологии тушения пожаров на объектах энергетики // Проблемы техносферной безопасности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов. 2022. № 11. С. 100–105.
8. Алешков М.В., Двоенко О.В. Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. 2022. № 31 (4). С. 65–75.
9. Yuanliang B.S. Discussion on fire risk and rescue countermeasures of oil-immersed transformers of nuclear power plants // Electric Safety Technology. 2022. № 24. P. 66–69.
10. Fire-extinguishing performance and gas-phase pollution characteristics of different foam agents in extinguishing transformer oil pool fire / J.Q. Zhang [et al.] // J. Fire Sci. 2022. № 40. P. 463–478.
11. Xuhui Z.Y., Yueyong W. Application research of new foam fire extinguishing device based on hot oil fire of full size transformer. Beijing China. 2021. P. 5–15.

12. Lou M., Jia H., Lin Z. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // *Results in Engineering*. 2023. № 17. P. 67–72.
13. Потеряев Ю.К., Мироньчев А.В., Ощепков А.М. Сравнение эффективности компрессионной пены и пены низкой кратности AFFF // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2023. № 3. С. 32–38.
14. Cheng H., Tao C., Xue-cheng F. Experimental study on extinguishing whole surface spill fire of transformers by compressed air foam // *Fire Sci. Technol.* 2020. № 39. P. 959–962.
15. Мобильная установка получения компрессионной пены для тушения пожаров / М.Р. Шавалеев [и др.] // *Безопасность жизнедеятельности*. 2019. № 2 (218). С. 49–52.
16. Dubocq F., Wang T., Yeung L.W. Characterization of the chemical contents of fluorinated and fluorine-free firefighting foams using a novel workflow combining nontargeted screening and total fluorine analysis // *Environ. Sci. Technol.* 2020. № 54. P. 245–254.
17. Hill C., Czajka A., Hazell G. Surface and bulk properties of surfactants used in fire-fighting // *Colloid Interface Sci.* 2018. № 530. P. 686–694.

References

1. Shavaleev M.R. Poluchenie kompressionnoj peny ot motopomp dlya tusheniya lesnyh pozharov // *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2020. № 4 (29). S. 102–105.
2. Primenenie kompressionnoj peny pri tushenii pozharov ob"ektov neftegazovogo kompleksa pri otricatel'nyh temperaturah / M.V. Aleshkov [i dr.] // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2020. № 1. S. 8–15.
3. Chenyu Wang, Hu Shi Carrageenan-vermiculite-dimethyl methyl phosphate ternary hybrid hydrogels for firefighting // *Fire and Materials*. 2022. № 47 (3). S. 12–19.
4. Experimental study on the fire combustion characteristics of small-scale transformer oil pool fire / L. Jian-fei [et al.] // *Fire Sci. Technol.* 2019. № 26. P. 6–12.
5. Navrockij O.D., Kamlyuk A.N. Nauchno-obosnovannye trebovaniya k ustrojstvu i tekhnicheskim harakteristikam ustanovok generirovaniya kompressionnoj peny i metodika ih ispytaniy // *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi*. 2021. № 5 (1). S. 81–92.
6. Fire accident characteristics and fire extinguishing countermeasures of oil-immersed / C.L. Yalong [et al.] // *Transformer, Safety and Environmental Engineering*. 2020. № 39. P. 1645–1648.
7. Fedyaev V.D., Strugov A.O. Sovremennye tekhnologii tusheniya pozharov na ob"ektah energetiki // *Problemy tekhnosfernoj bezopasnosti: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchyonyh i specialistov*. 2022. № 11. S. 100–105.
8. Aleshkov M.V., Dvoenko O.V. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya razlichnyh sredstv pozharotusheniya v vysotnyh zdaniyah // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2022. № 31 (4). S. 65–75.
9. Yuanliang B.S. Discussion on fire risk and rescue countermeasures of oil-immersed transformers of nuclear power plants // *Electric Safety Technology*. 2022. № 24. P. 66–69.
10. Fire-extinguishing performance and gas-phase pollution characteristics of different foam agents in extinguishing transformer oil pool fire / J.Q. Zhang [et al.] // *J. Fire Sci.* 2022. № 40. P. 463–478.
11. Xuhui Z.Y., Yueyong W. Application research of new foam fire extinguishing device based on hot oil fire of full size transformer. Beijing China. 2021. P. 5–15.
12. Lou M., Jia H., Lin Z. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // *Results in Engineering*. 2023. № 17. P. 67–72.
13. Poteryaev Yu.K., Miron'chev A.V., Oshchepkov A.M. Sravnenie effektivnosti kompressionnoj peny i peny nizkoj kratnosti AFFF // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2023. № 3. S. 32–38.
14. Cheng H., Tao C., Xue-cheng F. Experimental study on extinguishing whole surface spill fire of transformers by compressed air foam // *Fire Sci. Technol.* 2020. № 39. P. 959–962.

15. Mobil'naya ustanovka polucheniya kompressionnoj peny dlya tusheniya pozharov / M.R. SHavaleev [i dr.] // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2019. № 2 (218). S. 49–52.
16. Dubocq F., Wang T., Yeung L.W. Characterization of the chemical contents of fluorinated and fluorine-free firefighting foams using a novel workflow combining nontargeted screening and total fluorine analysis // Environ. Sci. Technol. 2020. № 54. P. 245–254.
17. Hill C., Czajka A., Hazell G. Surface and bulk properties of surfactants used in fire-fighting // Colloid Interface Sci. 2018. № 530. P. 686–694.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 03.05.2024; одобрена после рецензирования: 17.06.2024;
принята к публикации: 20.06.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 03.05.2024; approved after review: 17.06.2024;
accepted for publication: 20.06.2024

Информация об авторах:

Сизонова Наталия Александровна, научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак Почёта» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, г. Балашиха, мкр ВНИИПО, д. 12), e-mail: Nat-sizonova@yandex.ru, SPIN-код: 8468-3225

Information about authors:

Sizonova Natalia A., researcher of the All-Russian Order «Badge of Honor» of the research institute of fire defense of EMERCOM of Russia (143903, Balashikha, mkr. VNIPO, 12), e-mail: Nat-sizonova@yandex.ru, SPIN: 8468-3225