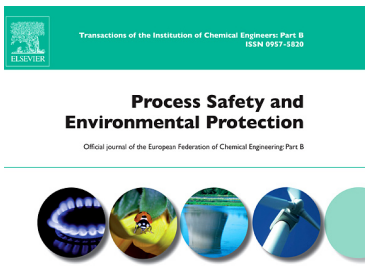
ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

EDN: https://elibrary.ru/wyjlop

РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЖУРНАЛА PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, № 165–167 (2022)



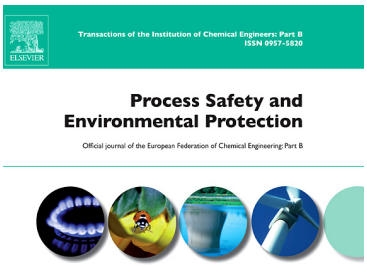
Vol. 165 (2022): 658-670

ЭФФЕКТ ПОДАВЛЕНИЯ ПЛАМЕНИ N_2 И CO_2 ПРИ СТРУЙНОМ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА

У Юэ, Юй Син, Ван Цзунчэн, Цзинь Хао, Чжао Яньцю, Ван Чанцзянь, Шэнь Чжихэ, Лю И, Ван Вэй (Китай)

Водород привлекает большое внимание государственных организаций и предприятий по всему миру из-за отсутствия загрязнения окружающей среды и возможности повторного использования. Однако широкий диапазон воспламеняемости и низкая энергия зажигания могут приводить к возникновению таких опасных явлений, как струйное горение водорода. В связи с этим остро необходима разработка методов предотвращения струйных пожаров водорода. Для исследования влияния газообразных огнетушащих веществ на струйное горение водорода был проведен ряд экспериментов по изучению характеристик пламени при воздействии струй азота и диоксида углерода. Огнетушащие вещества подавались через сопло диаметром 3 мм при давлении 11 атм. Проанализированы длина пламени, тепловой радиационный поток и суммарный тепловой поток. Результаты показывают, что коэффициент снижения вертикальной длины пламени возрастает с уменьшением высоты установки сопла огнетушащего вещества. Это свидетельствует о том, что при подаче огнетушащего вещества в основание струйного пламени водорода пожар может быть потушен. Вследствие уменьшения размеров пламени снижается тепловой радиационный поток, регистрируемый радиометром, что соответствует уменьшению доли излучения пламени. Общий тепловой поток, регистрируемый в нижней части отклоненного пламени, определяется совместным воздействием теплового излучения и конвекции. Конвективный теплообмен высокотемпературного газа может приводить к увеличению показаний тепломера на пути движения отклоненного пламени. Кроме того, проанализированы пределы тушения струйного пламени водорода при воздействии струй азота и диоксида углерода.

Ключевые слова: безопасность водорода; струйное пламя водорода; огнетушащее вещество; азот; диоксид углерода



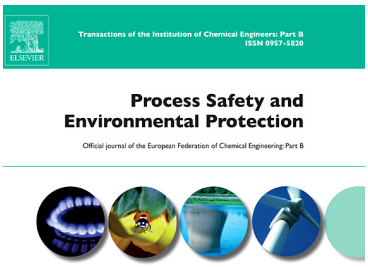
Vol. 165 (2022):
754-775

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА ОГНЕТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ И ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ ПУТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ПАРАМЕТРАМ ПОЖАРА

Кузнецов Г.В., Жданова А.О., Волков Р.С., Стрижак П.А. (Российская Федерация)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик физико-химических процессов в очаге пожара на различных стадиях его развития и тушения. Регистрировались температура и состав продуктов горения, а также интенсивность свечения пламени. Исследования проводились с использованием модели пожара класса А. Определены наиболее эффективные комбинации технических средств, необходимые и достаточные для раннего обнаружения пожара, своевременного начала тушения, завершения горения и тления. Установлены минимальные объемы огнетушащей жидкости (воды), необходимые и достаточные для подавления горения. Обоснованы преимущества применения систем обратной связи при тушении пожаров. Данные системы оптимизируют расход огнетушащих веществ и время тушения за счет мониторинга поведения пожара в режиме реального времени. Сформулированы рекомендации по проектированию автоматических систем внутреннего пожаротушения, оптимизирующих условия тушения и минимизирующих угрозу жизни и здоровью людей.

Ключевые слова: пожары в помещениях; тушение пожаров; непрерывный контроль поведения пожара; раннее обнаружение пожара; системы обратной связи; автоматические системы мониторинга и пожаротушения



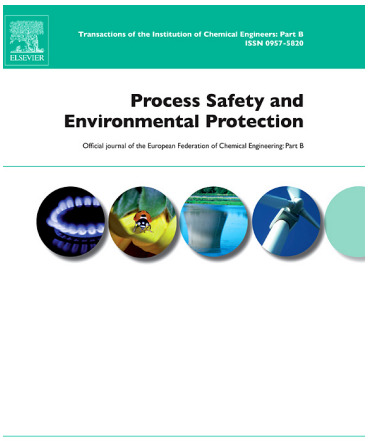
Vol. 166 (2022): 202-211

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ОСНОВА ИНТЕГРАЦИИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СИСТЕМ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА ВЗРЫВА

Чжоу Шэньнань, Ван Чжунци, Ли Цичжун (Китай)

Взрыв представляет собой серьезную угрозу безопасности химических процессов, часто возникает внезапно и имеет широкий диапазон воздействия, приводя к катастрофическим последствиям. Прогнозирование взрывоопасностей необходимо для региональной оценки безопасности и повышения устойчивости химических промышленных парков (ХПП) к чрезвычайным ситуациям. В связи с этим цель настоящей работы – разработать концепцию для систематического анализа развития взрыва и количественной оценки потенциальных опасностей путем объединения метода анализа безопасности сложных систем (STPA) с численным моделированием. Предлагаемая концепция состоит из 5 этапов: (I) построение иерархических структур безопасного управления важными зонами химической переработки в ХПП; (II) моделирование вычислительной гидродинамики (CFD) возможных вариантов развития взрыва в каждой зоне путем случайного изменения исследуемых параметров; (III) разработка модели прогнозирования на основе сверточной нейронной сети посредством постоянного самообучения на данных о поле давления, полученных методом CFD; (IV) комплексная оценка поражающего действия взрыва путем включения результатов вышеуказанных численных моделей в существующие методы оценки; (V) выявление опасных управляющих действий и их причин, а также ограничений безопасности для совершенствования структур безопасного управления. При наличии данных мониторинга разработанная аналитическая архитектура позволяет прогнозировать опасности процесса взрыва и в режиме реального времени рекомендовать соответствующие стратегии обеспечения безопасности. Это позволило бы удовлетворить многоуровневые требования к предотвращению взрывов и защите от них, способствуя принятию более обоснованных решений. В статье описываются концепции и процесс реализации метода в качестве первого шага.

Ключевые слова: анализ опасности взрыва; прогнозирование поля течения при взрыве; метода анализа безопасности сложных систем; моделирование вычислительной гидродинамики; сверточная нейронная сеть



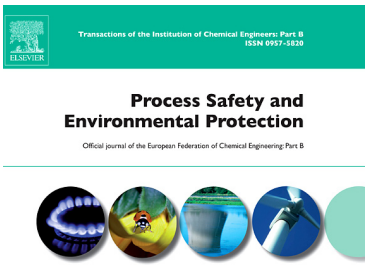
Vol. 166 (2022): 222-231

СРАВНЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ С КЛАССИЧЕСКИМИ ТЕОРИЯМИ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА ДЛЯ РАСЧЕТА МИНИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ

Чэнь Тэнфэй, Йо Ван Канегем, Ян Дегрэв,
Ян Бергманс, Филип Верплэтсен, Мартен Ваниршот (Бельгия)

Численная модель для расчета минимальной температуры воспламенения (МТВ) пылевых облаков сравнивается с классическими теориями теплового взрыва Семёнова и Франк-Каменецкого. Численная модель разработана на основе испытательного оборудования для определения МТВ – печи Годберта-Гринвальда. Теория Семёнова для системы с однородной температурой использована для расчета МТВ одиночной пылевой частицы (МТВЧ). Теория Франк-Каменецкого для однородной системы с градиентом температуры модифицирована для расчета МТВ пылевого облака (МТВО). При стехиометрической концентрации пыли с бесконечным временем пребывания пылевого облака обнаружены две горизонтальные асимптоты в характере изменения численной температуры воспламенения в зависимости от времени задержки воспламенения. Более высокая асимптотическая температура обнаружена только для металлических пылей. Эта температура почти совпадает со значением МТВЧ по теории Семёнова. С другой стороны, более низкая асимптотическая температура как для металлических, так и для органических пылей почти равна расчетному значению МТВО по теории Франк-Каменецкого. Таким образом, наблюдается хорошее соответствие между численной моделью и классическими теориями теплового взрыва. Данное исследование может служить основой для теоретического прогнозирования МТВ пылевых облаков.

Ключевые слова: минимальная температура воспламенения (МТВ); пылевые облака; численная модель



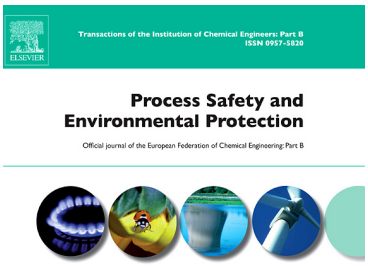
Vol. 166 (2022): 279-289

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПОЖАРОВ ПРОЛИВОВ Н-ГЕПТАНА ПРИ ПОНИЖЕННОМ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Чжао Цзиньлун (Китай), Чжан Цинъюань (Китай), Чжан Сян (Китай), Чжан Цзяньпин (Соединённое Королевство), Ян Жуй (Китай), Лу Юй (Китай)

Резервуарные парки обычно используются для хранения больших объемов жидкого топлива. Проектирование, строительство, эксплуатация и техническое обслуживание резервуарного парка должны соответствовать стандартам и нормам, установленным в конкретных странах. Действующие нормы проектирования резервуарных парков в значительной степени основаны на испытаниях, выполненных при стандартном атмосферном давлении и связанном с ними анализе термической опасности. Однако исследования, основанные на мелкомасштабных экспериментах, показали, что поведение горения жидкого топлива и связанное с ним радиационное воздействие могут существенно зависеть от пониженного давления на большой высоте. В настоящем исследовании были проведены крупномасштабные эксперименты с пожарами проливов н-гептана различного диаметра при пониженном атмосферном давлении с целью первоочередного изучения их характеристик горения. Впоследствии для оценки и сравнения их термической опасности были выбраны конкретные сценарии возникновения пожаров как в стандартных, так и в субатмосферных условиях. Экспериментальные результаты показали, что скорость выгорания при пониженном атмосферном давлении снижается, тогда как высота пламени увеличивается. Предложены корреляции для скорости выгорания и высоты пламени с учетом влияния давления, которые были проверены на соответствие экспериментальным данным настоящего и существующих исследований, полученным при различных условиях атмосферного давления. Установлено, что доля излучения пламени экспоненциально уменьшается с увеличением диаметра пролива. Анализ термической опасности показал, что, хотя термическая опасность при пониженном атмосферном давлении ниже, чем при стандартном атмосферном давлении, эта разница постепенно уменьшается с увеличением диаметра резервуара. Полученные результаты не только важны для понимания влияния давления на характеристики горения крупномасштабных пожаров проливов, но и помогают составить рекомендации относительно применимости и ограничений использования норм проектирования, разработанных для стандартного атмосферного давления, в условиях плато (высокогорья).

Ключевые слова: пожар пролива; пониженное атмосферное давление; характеристики горения; термическая опасность; нормы для резервуарных парков



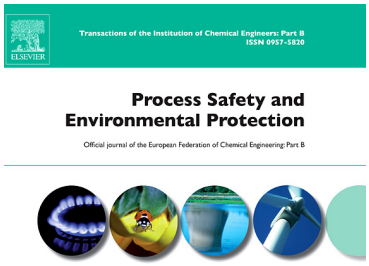
Vol. 166 (2022):
310-319

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОБЛАКА АЛЮМИНИЕВОЙ ПЫЛИ В УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ВЗРЫВООПАСНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЧАСТИЦ И ПОТОКА

Кристиан Швейцер, Чад В. Машуга, Варуна Д. Кулатилака (США)

Мониторинг процесса диспергирования пылевого облака внутри испытательного оборудования, такого как устройство для определения минимальной энергии воспламенения MIKE3, полезен для оценки характеристик воспламеняемости различных пылевых материалов. Однако комплексно зафиксировать соответствующие микроскопические свойства частиц и макроскопическое поведение потока при диспергировании пылевого облака с помощью одного метода измерения затруднительно. Поэтому цель настоящей работы – объединить две взаимодополняющие лазерные диагностические методики для получения количественных характеристик частиц и потока в пылевых облаках в стеклянной трубке MIKE3. Для этого эксперимента было проведено по тридцать повторных запусков для каждого метода с использованием образцов алюминиевого порошка массой 15 мг. В геометрию испытания не включены электроды зажигания для определения базовой конфигурации потока в стеклянной трубке, хотя измерения по-прежнему проводятся с характерной временной задержкой и в месте проведения испытаний на зажигание. Первая методика – цифровая линейная голография (DIH) – используется для трехмерной диагностики частиц в микромасштабе, позволяющей определить количество частиц ($n = 78 \pm 20$), их размер ($\bar{D} = 18{,}9 \pm 0{,}6$ мкм) и трехкомпонентную скорость ($\bar{v}x = 0{,}05 \pm 0{,}05$ м/с, $\bar{v}y = 0{,}60 \pm 0{,}09$ м/с, $\bar{v}z = -0{,}07 \pm 0{,}16$ м/с). Вторая лазерная диагностическая методика – анемометрия по изображениям частиц (PIV) – использовалась для макроскопической диагностики потока, давая измерения двумерной скорости потока и векторного поля завихренности. Установлено, что размеры частиц подчиняются логарифмически нормальному распределению ($\mu = 2{,}89$, $\sigma = 0{,}31$), а для частиц размером более ~55 мкм выявлено расхождение между результатами измерения in situ и ex situ. Двумерные скорости частиц соответствуют распределению Вейбулла ($\theta = 0{,}86$, $\beta = 2{,}12$), при этом получено разумное соответствие между измерениями скорости DIH и PIV.

Ключевые слова: размер частиц; скорость частиц; скорость потока; характеристика пылевого облака; взрыв пыли; лазерная диагностика



EFCE IChemE

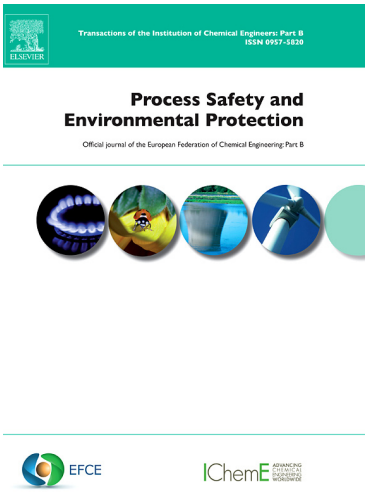
Vol. 166 (2022): 320-327

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ НИАЦИНА И АЛЮМИНИЯ В УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ВЗРЫВООПАСНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Кристиан Швейцер, Чад В. Машуга, Варуна Д. Кулатилака (США)

Экспериментальные исследования взрывов пыли в стандартном промышленном испытательном оборудовании, таком как устройство для определения минимальной энергии воспламенения MIKE3, являются перспективным способом получения фундаментальных представлений о воспламеняемости пылевых облаков. Однако для характеристики поведения пылевых облаков при воспламенении и горении различных типов пыли необходимо разрабатывать усовершенствованные экспериментальные методы. В настоящей работе реализованы высокоскоростные широкополосные и видоспецифичные диагностические методы хемилюминесцентной визуализации для изучения сходств и различий в развитии очага воспламенения органических и металлических порошков. Выбранный набор образцов порошка ниацина (ϕ = 2,9) и алюминия (ϕ = 1,6) массой 600 мг диспергировали в воздухе и воспламеняли с помощью высоковольтной искры внутри стандартного устройства MIKE3. Результирующее широкополосное излучение пламени было зарегистрировано с частотой 4 кГц с помощью высокоскоростной камеры в течение первых 10 мс после искры. Для образца ниацина также регистрировали видоспецифичные хемилюминесцентные излучения возбужденных гидроксильных (OH) и метилидиновых (CH) радикалов с частотой 4 кГц и 1 кГц соответственно. Очаг пламени в каждом кадре обнаруживали с помощью алгоритма пороговой обработки интенсивности и отслеживали на протяжении всей видеопоследовательности, получая количественные измерения размера, положения и скорости развивающегося очага пламени в течение первых 10 мс после искры зажигания. Для образца ниацина наблюдалась непрерывная и неоднородная зона реакции, состоящая из горящих кластеров частиц и возбужденных радикалов. Очаги пламени ниацина увеличивались с 5 мм до 17 мм с начальной скоростью 5 м/с. Напротив, в образце алюминия наблюдались интенсивно яркая зона реакции и дискретные горящие частицы вблизи границы очага пламени. Очаги пламени алюминия увеличивались с 7 мм до 10 мм с начальной скоростью 3 м/с. Очаги пламени ниацина и алюминия перемещались на 7–11 мм от центрального искрового промежутка и замедлялись до 1 м/с к концу 10-миллисекундного периода. Данное исследование с временным разрешением в сочетании с ранее опубликованными данными трехмерной диагностики частиц и поля потока до момента подачи искры зажигания создает основу для более глубокого многофизического понимания инициирования процессов воспламенения и взрыва пылевых облаков.

Ключевые слова: искровое зажигание; развитие очага пламени; высокоскоростная визуализация; горение пылевого облака; взрыв пыли



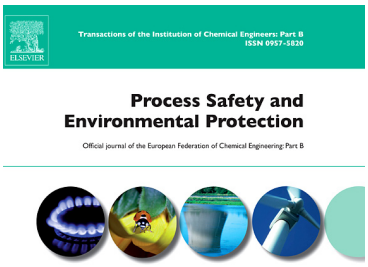
Vol. 167 (2022): 45-55

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНВЕРТИРОВАННОГО КРИТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ CO ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ШАХТ С УЧЕТОМ УТЕЧЕК ВОЗДУХА – ТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Чэн Цзяньвэй, Ма Юнчжэнь, Лу Вэйдун, Лю Гочжун, Цай Фэн (Китай)

По мере продвижения очистного забоя объем выработанного пространства в подземных угольных шахтах увеличивается. Воздушный поток может непрерывно поступать в выработанное пространство через каналы утечек воздуха, что может вызывать самовозгорание и горение угля в выработанном пространстве. Доступ в выработанное пространство для прямого измерения состава газа персоналом невозможен из-за обрушений пород и завалов. Таким образом, крайне затруднительно своевременно контролировать состояние самовозгорания в нем, что приводит к необоснованности разработки мероприятий по предотвращению самовозгорания. Поэтому важно своевременно понимать состояние самовозгорания остатков угля в выработанном пространстве. Для более точного прогнозирования в настоящей работе предлагается новая модель прогнозирования состояния горения угля в выработанном пространстве с использованием газа CO, образующегося при самовозгорании угля, с учетом воздействия утечек воздуха в выработанном пространстве. Тогда можно вывести критическое значение вносимой величины CO вентиляционном штреке на стороне исходящей струи воздуха у сопряжения с очистным забоем. В настоящей работе также приведен пример практического применения, демонстрирующий, что предложенный метод обеспечивает более достоверное отражение состояния самовозгорания в выработанном пространстве (gob). Полученное критическое значение может служить сигналом раннего предупреждения, позволяющим своевременно предотвратить самовозгорание угля в выработанном пространстве и тем самым снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, обусловленных самовозгоранием угольного массива.

Ключевые слова: самовозгорание угля; три зоны; термопрограммируемый эксперимент; угол очистного забоя лавы в зоне рециркуляции воздуха (подветренная зона); прогнозная модель



EFCE IChemE

Vol. 167 (2022): 299-307

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РАЗГОНА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ РАЗЛИЧНЫМИ ОГНЕТУШАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Сунь Хуаньли, Чжан Линь, Дуань Цянлин, Ван Шуян,
Сунь Шицзе, Сунь Цзиньхуа, Ван Цинсун (Китай)

Тепловой разгон, инициированный в отдельной ячейке аккумулятора, может передавать тепло соседним ячейкам и вызывать распространение теплового разгона. Таким образом, меры по смягчению последствий и предотвращению распространения теплового разгона с использованием огнетушащих веществ имеют существенное значение. В настоящей работе были проанализированы испытания на горение и тушение литий-ионных аккумуляторов емкостью 117 А · ч с электродами $Li(Ni_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1})O_2$ (NCM)/графит. В статье проведено сравнение эффективности подавления распространения теплового разгона в замкнутом пространстве с использованием различных огнетушащих веществ, включая HFC-227ea, $C_6F_{12}O$ и распыленную воду. Результаты показывают, что распространение теплового разгона может происходить в модуле литий-ионных аккумуляторов даже при наличии мер по терморегулированию. При активации сразу после теплового разгона первой ячейки каждый огнетушащий агент способен потушить возгорание в модуле литий-ионных аккумуляторов. Однако ключевым фактором подавления распространения теплового разгона является охлаждающая способность огнетушащего агента.

В ходе испытаний по тушению пожара теплоотвод для HFC-227ea, $C_6F_{12}O$ и водяной струи составил соответственно 24,8 кДж, 111 кДж и 459,8 кДж. Таким образом, HFC-227ea едва ли способен подавить распространение теплового разгона. Хотя $C_6F_{12}O$ не может предотвратить распространение теплового разгона, он способен снизить температуру батареи, замедлить скорость теплопередачи и увеличить время распространения процесса. Распыленная вода демонстрирует наилучший охлаждающий эффект – она способна предотвратить распространение теплового разгона.

Ключевые слова: безопасность литий-ионных аккумуляторов; распространение теплового разгона; огнетушащие вещества; эффективность подавления

Статью подготовили:

Ю.В. Мельникова, науч. сотр.;
Н.В. Сайгина, ст. науч. сотр.;
Е.Е. Архипова, ст. науч. сотр.
(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

Поступила в редакцию 07.09.2026 г.;
принята к публикации 10.10.2026 г.