

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт инженерной и экологической безопасности

(наименование института полностью)

20.03.01 Техносферная безопасность

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Пожарная безопасность

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Противопожарная защита с применением системы автоматического
пожаротушения аккумуляторного помещения

Обучающийся

А.В. Ткаченко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А.Н. Жуков

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультанты

к.э.н., доцент, Т.Ю. Фрезе

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Аннотация

Тема: «Противопожарная защита с применением системы автоматического пожаротушения аккумуляторного помещения».

В разделе «Оперативно-тактическая характеристика объекта защиты» представлена общая характеристика объекта защиты.

В разделе «Система и средства противопожарной защиты в аккумуляторных помещениях» выполнен анализ наиболее вероятных мест возникновения пожара и защищенность аккумуляторных помещений существующими мерами защиты АПС и АУПТ.

В разделе «Содержания в исправном состоянии систем и средств противопожарной защиты в аккумуляторных помещениях» проводилась разработка мероприятий по устранению выявленных нарушений требований пожарной безопасности на основе усовершенствования системы противопожарной защиты.

В разделе «Охрана труда» произведена оценка производственных рисков на рабочих местах.

В разделе «Охрана окружающей среды и экологическая безопасность» определена антропогенная нагрузка организации на окружающую среду и оформлены результаты производственного контроля в области охраны окружающей среды.

В разделе «Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности» выполнен расчет эффективности предложенных мероприятий по обеспечению техносферной безопасности.

Количественная характеристика: объем ВКР составляет 55 страниц, 9 рисунков, 16 таблиц.

Содержание

Введение.....	4
Термины и определения	5
Перечень сокращений и обозначений.....	7
1 Оперативно-тактическая характеристика объекта защиты	8
2 Система и средства противопожарной защиты в аккумуляторных помещениях.....	15
3 Содержания в исправном состоянии систем и средств противопожарной защиты в аккумуляторных помещениях.....	20
4 Охрана труда.....	30
5 Охрана окружающей среды и экологическая безопасность.....	36
6 Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности.....	42
Заключение	50
Список используемых источников.....	53

Введение

В последние десятилетия спрос на высокоэнергетические вторичные аккумуляторы вырос в геометрической прогрессии, при этом их применение расширилось от портативной электроники до электромобилей и сетевых накопителей.

Литий-ионные аккумуляторы обладают многими преимуществами, связанными с энергопотреблением и удельной мощностью, но имеют недостатки, связанные с безопасностью, поскольку они стабильны только в ограниченном диапазоне условий эксплуатации, например, при определенных рабочих температурах и напряжениях. Условия, которые могут привести аккумулятор к саморазогреву, который может перерасти в так называемый тепловой разгон [2, 3], включают перезаряд, чрезмерный разряд, механические повреждения, нагрев и короткие замыкания. Также существует вероятность того, что внутреннее короткое замыкание, приводящее к утечке тепла, происходит из-за загрязнений или других дефектов в элементах батареи, возникающих в процессе производства, или из-за образования дендритов.

Цель исследования – устранение выявленных нарушений требований пожарной безопасности на основе усовершенствования системы противопожарной защиты.

Задачи работы:

- описать общую характеристику объекта защиты;
- провести анализ наиболее вероятных мест возникновения пожара в аккумуляторных помещениях объекта;
- провести анализ защищенности аккумуляторных помещений существующими мерами защиты АПС и АУПТ;
- выполнить расчет эффективности предложенных мероприятий по обеспечению техносферной безопасности.

Термины и определения

В настоящей работе применяют следующие термины с соответствующими определениями.

Класс функциональной пожарной опасности зданий, сооружений и пожарных отсеков – «классификационная характеристика зданий, сооружений и пожарных отсеков, определяемая назначением и особенностями эксплуатации указанных зданий, сооружений и пожарных отсеков, в том числе особенностями осуществления в указанных зданиях, сооружениях и пожарных отсеках технологических процессов производства» [14].

Опасные вещества – воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды.

Охрана труда – «вид деятельности, неотъемлемый элемент трудовой и производственной деятельности, направленный на сохранение трудоспособности наемного работника и иных приравненных к ним лиц; и представляющий из себя систему правовых, социально-экономических, организационно-технических, санитарно-гигиенических, лечебно-профилактических, реабилитационных и иных мероприятий» [15].

Пожарная безопасность объекта защиты – «состояние объекта защиты, характеризующее возможность предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара» [14].

Пожарная опасность веществ и материалов – «состояние веществ и материалов, характеризующее возможность возникновения горения или взрыва веществ и материалов» [14].

Пожарная сигнализация – «совокупность технических средств, предназначенных для обнаружения пожара, обработки, передачи в заданном виде извещения о пожаре, специальной информации и (или) выдачи команд» [14].

Пожарный извещатель – «техническое средство, предназначенное для обнаружения факторов пожара и/или формирования сигнала о пожаре» [14].

Правила пожарной безопасности – вид нормативного документа по пожарной безопасности, регламентирующего для группы однородных объектов защиты или видов деятельности требования пожарной безопасности, которые устанавливают правила (положения, описывающие действия, предназначенные для выполнения) поведения людей, порядок организации производства, выполнения работ (услуг) и содержания помещений, зданий (сооружений) и территории, обеспечивающие безопасность людей, предупреждение и тушение пожара [3].

Производственный процесс – «совокупность технологических и иных необходимых для производства процессов; рабочих (производственных) операций, включая трудовую деятельность и трудовые функции работающих» [15].

Риск – «мера опасности, характеризующая вероятность возникновения возможных аварий и тяжесть их последствий» [15].

Система «обеспечения пожарной безопасности – совокупность сил и средств, а также мер правового, организационного, экономического, социального и научно-технического характера, направленных на борьбу с пожарами» [14].

Экологическая безопасность – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий.

Перечень сокращений и обозначений

В настоящей работе применяют следующие сокращения и обозначения:

АПС – автоматическая пожарная сигнализация.

АУГП – автоматическая установка газового пожаротушения.

АУПТ – автоматическая установка пожаротушения.

ГОС – газовое огнетушащее средство.

ГОТВ – газовое огнетушащее вещество.

ЗВ – загрязняющее вещество.

ИК – инфракрасное излучение.

ИК – исправительная колония.

НПА – нормативно-правовой акт.

ОРО – объект размещения отходов.

ТРВ – тонкораспылённая вода.

ФККО – федеральный классификационный каталог отходов.

1 Оперативно-тактическая характеристика объекта защиты

Проектируемый аккумуляторный участок располагается в отдельном помещении, при этом работы по ремонту аккумуляторов производятся в одном цехе.

В помещениях аккумуляторного участка будут размещаться литий-железо-фосфатные аккумуляторы, необходимые для хранения электрической энергии для обеспечения бесперебойного электроснабжения режимного объекта.

Здание – одноэтажное с подвальным помещением с размерами в плане 25,5×13,15 м.

Здание 2 степени огнестойкости, класса функциональной пожарной опасности Ф5.2.

Класс конструктивной пожарной опасности – С0 (в соответствии с табл. 6.9, СП 2.13130.2012).

Класс функциональной пожарной опасности – Ф4.3 (в соответствии с статьёй 32 Федерального закона РФ №123-ФЗ).

Конструктивная схема здания – бескаркасная с несущими наружными и внутренними стенами – смешанный каркас с несущими каменными колоннами.

Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается «наружными и внутренними кирпичными стенами и дисками перекрытия, выполненными из сборных железобетонных пустотных плит» [1].

«Фундаменты:

- сборный ленточный из фундаментных плит;
- монолитный столбчатый под колонны» [1].

«Стены – железобетонные панели, перекрытия – железобетонные плиты, перегородки – кирпичные, кровля – железобетонная с рубероидным покрытием» [1].

Пожароопасность, которую представляют литий-железо-фосфатные

аккумуляторы, в настоящее время широко обсуждается многими специалистами. Существует множество мнений, но согласованных или готовых к использованию концепций защиты пока нет, что в конечном итоге привело к данным исследованиям.

Поскольку доступные в настоящее время системы хранения энергии с литий-железо-фосфатными аккумуляторами сильно различаются по цене, плотности хранения и другим техническим характеристикам, в дополнение к степени искробезопасности, никакая единая концепция противопожарной защиты не может быть подходящей для всех применений литий-железо-фосфатных аккумуляторов.

Для разработки соответствующего решения под конкретные условия применения литий-железо-фосфатных аккумуляторных систем было необходимо провести серию экспериментов и тестов.

Исследования показали, что системы хранения энергии при помощи литий-железо-фосфатных аккумуляторов требуют систем противопожарной защиты (рисунок 1).



Рисунок 1 – Система хранения энергии с системой противопожарной защиты

Определено, что ключом к выполнению требований противопожарной защиты является сочетание раннего возможного обнаружения, например, с использованием датчиков отбора проб воздуха при помощи аспирационных систем, вместе с системой пожаротушения.

Очень ранний выброс огнетушащего вещества предотвращает образование большого количества взрывоопасных смесей электролита и кислорода и предотвращает первоначальный выброс тепла. Распространение таких утечек прекращается, предотвращаются вторичные возгорания, а длительная инертизация предотвращает любое повторное возгорание.

При наличии подходящих систем обнаружения и тушения стационарные системы хранения энергии на литий-железо-фосфатных аккумуляторах могут стать пожаробезопасными.

В данном разделе рассматривается исключительно проблема противопожарной защиты стационарных систем хранения энергии на литий-железо-фосфатных аккумуляторах.

Ожидается, что используемые сегодня и рассматриваемые здесь аккумуляторы 3-го поколения (например, литий-железо-фосфатные, литий-никель-марганцево-кобальтово-оксидные) будут широко использоваться до середины следующего десятилетия.

Наиболее важным электронным компонентом системы хранения является система управления аккумуляторами (BMS), которая, помимо контроля состояния заряда на уровне элемента и системы, также выполняет регулирование температуры во время зарядки и разрядки.

Эффективные системы управления аккумуляторами обеспечивают поддержание элементов в заданном безопасном рабочем диапазоне, что позволяет избежать чрезмерной зарядки и разрядки. Утечку тепла можно ожидать только при экстремальных внешних воздействиях, таких как высокие температуры (из-за пожара) или механическая деформация с последующим дефектом сепаратора, или после внутреннего короткого замыкания (например, в результате образования дендрида из-за незаметного старения).

Опасность пожара в системах хранения энергии литий-железо-фосфатных аккумуляторов – анализ и оценка рисков возникновения пожароопасных ситуаций.

Анализ рисков и их оценка составляют основу для разработки

жизнеспособных концепций противопожарной защиты:

- риски возникновения пожара;
- вероятность их возникновения;
- ожидаемое воздействие.

Статистика показывает, что примерно в 25% всех случаев пожары на электрооборудовании являются причиной крупных убытков и основной причиной пожаров на промышленных предприятиях. Сами по себе эти риски требуют как надежного обнаружения, так и автоматических систем пожаротушения для безопасной эксплуатации аккумуляторных помещений и участков.

Возгорания от электрического оборудования считаются управляемым пожарным риском и не будут рассматриваться далее в исследовании.

Остается риск возникновения пожара, связанный с самими литий-железо-фосфатными аккумуляторами. Только при понимании этого риска можно определить цели защиты и разработать концепции для достижения этих целей.

Чтобы понимать пожароопасность, присущую литиевым аккумуляторам и связанным с ними системам хранения, мы должны понимать технологию использования аккумуляторов.

В основе аккумуляторной системы лежат электрохимические элементы питания. Каждый литий-железо-фосфатный элемент состоит из двух электродов: отрицательного электрода (анода) и положительного электрода (катода).

Электроды состоят из коллектора и нанесенного на него активного материала. Между электродами находится ионопроводящий, обычно легковоспламеняющийся электролит, который действует как посредник процессов в элементе, и сепаратор, обеспечивающий электрическое разделение электродов.

Поскольку в аккумуляторах используются материалы с высокой энергией и легковоспламеняющиеся электролиты, любое повреждение

сепаратора (вызванное механическим воздействием или высокими температурами) приведет к внутреннему короткому замыканию с высокой вероятностью утечки тепла. Критические ситуации с точки зрения безопасности практически неизбежны.

Рассмотрим опасность возгорания при тепловой утечке.

Постоянно увеличивающаяся плотность энергии и старение аккумулятора являются причинами опасности.

Если исключить внешние механические воздействия, то возгорание, вызванное самими элементами аккумулятора, всегда происходит из-за возрастного повреждения сепаратора и последующего внутреннего короткого замыкания.

Возникающее в результате повышение температуры приводит к тому, что (обычно легковоспламеняющийся) электролит начинает испаряться. Как следствие, внутреннее давление внутри элемента будет продолжать расти до тех пор, пока пары электролита не будут выпущены либо через предохранительный клапан, либо при разрыве корпуса.

Без принятия мер будет образовываться взрывоопасная газоздушная смесь: необходим только источник воспламенения, и результатом будет взрыв. Если нагрев не остановить, произойдет загорание (рисунок 2).

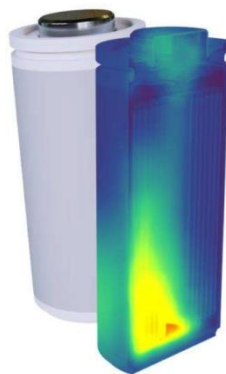


Рисунок 2 – Утечка тепла

нестабильны, что приводит к возникновению автокаталитической реакции с электролитами и выделению кислорода при повышенной температуре. В ходе испытаний также было обнаружено, что заряженные аккумуляторы более опасны, чем незаряженные.

Процесс горения был разделен на три стадии:

- воспламенение: лопнул клапан ограничения давления, и из него хлынули газы. Легковоспламеняющиеся газы воспламенились из-за высокой температуры электронагревателя и образовали факельное горение. Атомы лития вступают в реакцию с органическим растворителем в электролите и выделяют большое количество алканолефиновых газов, таких как C_2H_4 , C_3H_6 , C_2H_6 . Аккумулятор с более высоким уровнем заряда имеет более продолжительное пламя горения после разрыва и воспламенения. Кроме того, при более высоком уровне заряда время, необходимое для разрыва корпуса и воспламенения, сокращается, что указывает на то, что степень и скорость внутренних реакций напрямую зависят от уровня заряда.
- стабильное сгорание. На этом этапе сгорание аккумулятора становится стабильным, а диапазон пламени меняется медленно (0 % и 50 % уровне заряда). В это время внутри полностью заряженного аккумулятора произошли сильные реакции, которые привели к тому, что сгорание 100% заряженного аккумулятора стало более сложным, и его трудно было предсказать.

«Проблем, связанных с коротким замыканием, а также других опасных условий, можно значительно снизить, соблюдая следующие рекомендации:

- покрыть все токопроводящие рабочие поверхности изолирующим материалом;
- в рабочих зонах не должно быть острых предметов, которые могут проткнуть изоляционный материал» [2];
- никогда не разбирать элемент или батарейный блок, не предназначенный для разборки;

- персоналу, работающему с элементами питания, не следует носить токопроводящие материалы (ювелирные изделия и т.д.);
- элементы следует перемещать в лотках с помощью тележек, чтобы снизить вероятность падения, а упавшие элементы следует рассматривать как потенциально горячие;
- все инструменты для контроля должны быть непроводящими или покрыты непроводящим материалом;
- элементы должны быть проверены на наличие физических повреждений;
- после проверки элемента его следует вернуть в контейнер для хранения.

Вывод по 1 разделу.

В разделе установлено, что литий-железо-фосфатные аккумуляторы сочетают в себе материалы с высокой энергией и легко воспламеняющиеся электролиты. Поэтому раннее и надежное обнаружение пожара является обязательным условием при разработке систем противопожарной защиты систем с литий-железо-фосфатными аккумуляторами. Быстрое тушение также важно и может быть обеспечено использованием автоматизированных систем пожаротушения с использованием соответствующего огнетушащего средства.

2 Система и средства противопожарной защиты в аккумуляторных помещениях

Существуют некоторые общие рекомендации о том, как следует обеспечивать безопасность при использовании литий-железо-фосфатных аккумуляторов [18], но отсутствуют методы испытаний систем пожаротушения, которые можно было бы использовать для систем накопления энергии. Также существуют противоречивые рекомендации по подходящим средствам пожаротушения при возгорании аккумуляторных батарей и, следовательно, неопределенность в отношении соответствующих активных систем противопожарной защиты.

Как уже было определено ранее, выход из строя аккумулятора может быть вызван «рядом различных сценариев неправильного использования, таких как перегрев, перезаряд, прокол или раздавливание, погружение в воду или внешнее короткое замыкание. Разработка эффективных стратегий смягчения последствий требует изучения случаев выхода из строя аккумуляторных батарей и лучшего понимания важных характеристик, связанных с безопасностью, таких как выделение тепла, выброс опасных материалов и распространение тепла. С другой стороны, при возникновении пожара необходимо определить надлежащие стратегии» [1] пожаротушения, чтобы избежать его перерастания в развивающийся пожар. Часто это происходит из-за неправильного использования механизма, который вызывает повышение внутренней температуры, в результате чего электролит газифицируется, выделяется и воспламеняется. В результате возгорания могут воспламениться электроды, что приведет к возгоранию при высокой температуре как жидкостей, так и газов. Эти пожары трудно потушить и охладить. Инциденты могут варьироваться от простого разрыва корпуса ячейки и «утечки до выброса легковоспламеняющихся или токсичных газов и аэрозолей (фтористый водород и другие фторсодержащие токсичные вещества), вплоть до пожаров и взрывов. Тепловой разгон аккумулятора

считается наиболее потенциально серьезным последствием в аккумуляторной системе из-за ненормальных условий использования или, в меньшем количестве случаев, из-за производственных нарушений. Утечка тепла происходит, если температура элемента превышает критическую температуру, выше которой повышение температуры необратимо. В этом случае элемент может выделять значительное количество газов в результате начальных реакций разложения вплоть до процесса термического разложения, во время которого выделяется дым, иногда вплоть до воспламенения элемента и факельного горения. Помимо связанной с этим термической опасности (пожары, взрывы), утечка тепла также может быть причиной механических воздействий (разлет осколков, а также токсичных газов и испарений). Наиболее частыми иницирующими событиями являются внутреннее или внешнее короткое замыкание, перезаряд» [2], переразрядка или перегрев.

Были проведены испытания на перегрев отдельных элементов и аккумуляторной батареи путем воздействия пламени газовой горелки мощностью 7,5 кВт (рисунок 3). Во время испытаний использовались тепловизионная камера (FLIR) для контроля температуры ячейки и видеокамера.



Рисунок 3 – Испытания на перегрев

Проникновение кислорода при 20,9%-ной концентрации приводит к

полному распространению теплового выброса по всем элементам аккумулятора. Проникновение в атмосферу с пониженным содержанием кислорода ниже 11,3% не приводит к распространению теплового выброса.

В ходе испытаний на пожаротушение отдельную ячейку «нагревали до температуры около 650 °С, а затем применяли огнетушащее вещество. Для тушения возгорания литий-ионных элементов использовались углекислый газ, пена, сухой порошок, вода и ТРВ. При возгорании аккумуляторных блоков в качестве огнетушителя использовалась вода» [18].

Максимальная температура элемента во время испытаний на злоупотребление термическим воздействием приведена на рисунке 4.

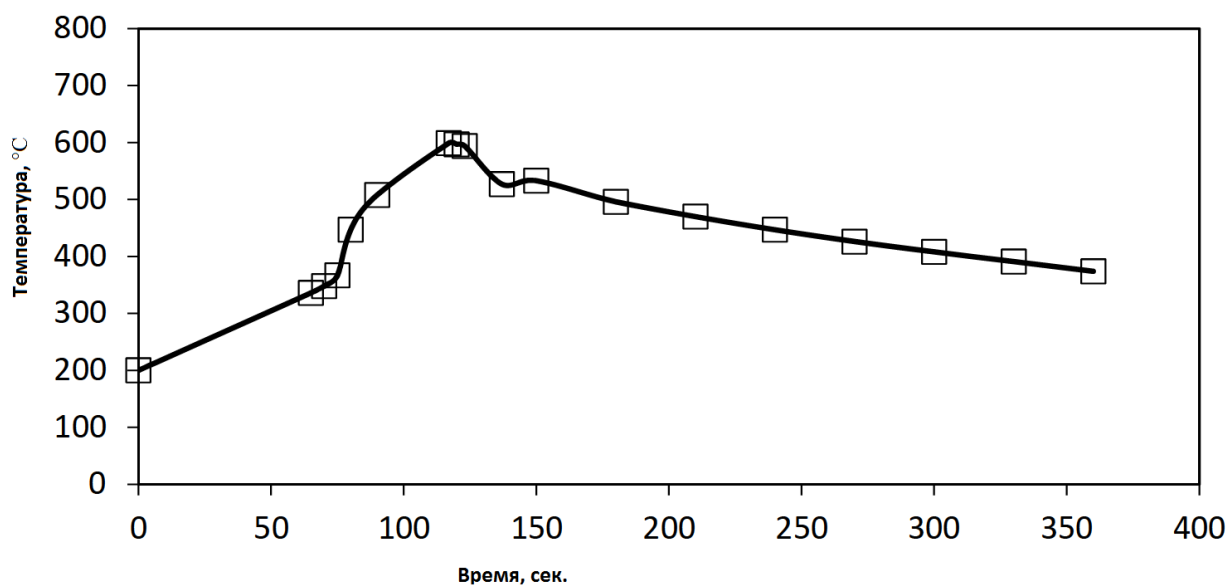


Рисунок 4 – Температурные показатели испытания

«В ходе этих испытаний элемент, подвергнутый воздействию пламени сжиженного газа, достиг температуры около 650 °С за 2 минуты (рисунок 5). После выключения горелки температура ячейки снизилась примерно до 400 °С за 6 минут. В ходе испытаний наблюдались следующие аспекты: утечка газов из элемента и их последующее воспламенение; разбухание элемента и утечка большого количества газов и пламени» [18]; тушение пожара по мере

прекращения утечки газов.

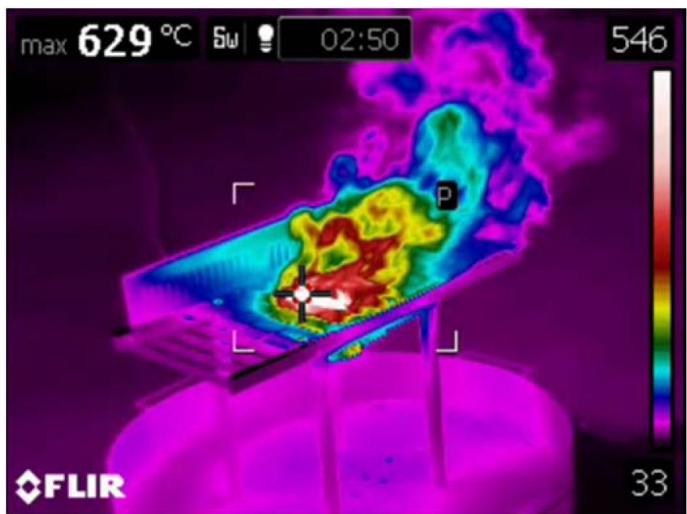


Рисунок 5 – Карта температуры при 2-минутном тестировании термического воздействия на одной ячейке

Результаты испытаний тушения пожаров аккумулятора приведены на рисунке 6.

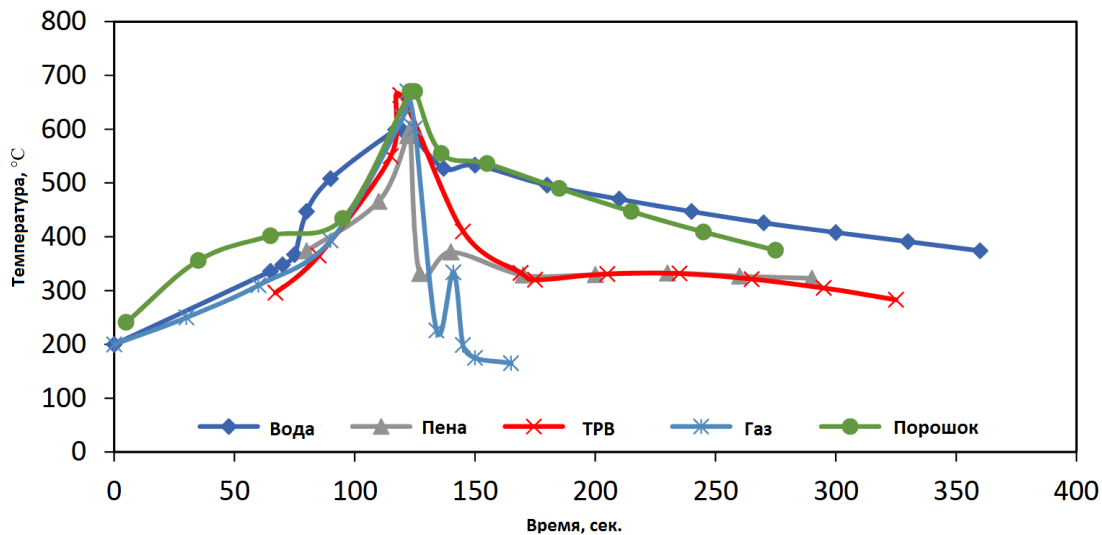


Рисунок 6 – Результаты испытаний тушения пожаров аккумулятора

«Огнетушащее вещество включает воду, ТРВ, пену, сухой порошок и углекислый газ. Среди различных исследованных газ и пена были наиболее

эффективными, поскольку быстро (<20 с) снижали температуру в камере и тушили пожар. Тонкораспылённая вода оказалась менее эффективным средством тушения. Система пожаротушения тонкораспылённой водой обладает следующими характеристиками: низкий расход воды, дешевое огнетушащее вещество, небольшой ущерб защищаемому объекту и защита экологии окружающей среды» [19]. «Однако в системе пожаротушения тонкораспылённой водой существует множество проблем:

- однородность водяного тумана не может быть гарантирована;
- капли жидкости достигают поверхности горения с определенной силой импульса» [18].

«Вода и сухой порошок оказались наименее эффективными в тушении аккумулятора, в частности, в случае сухого порошка струя высокого давления привела к падению ячейки на пол» [20].

Вывод по второму разделу.

В разделе установлено, что существуют противоречивые рекомендации по подходящим средствам пожаротушения при возгорании аккумуляторных батарей и, следовательно, неопределенность в отношении соответствующих активных систем противопожарной защиты.

Окисление лития, содержащегося в аккумуляторе приводит к возгоранию при нагревании аккумулятора, это основа сгорания и повторного воспламенения аккумуляторов. В случае с батарейным блоком было замечено, что тепловой разгон элемента вызывает тепловой разгон в соседних элементах.

Были проанализированы исследования средств пожаротушения и технологий предотвращения возгорания литиевых аккумуляторов.

3 Содержания в исправном состоянии систем и средств противопожарной защиты в аккумуляторных помещениях

В предыдущем разделе был произведён выбор наиболее подходящих систем обнаружения и тушения.

Для обнаружения пожара на проектируемом аккумуляторном помещении требуется детектор, который может надежно обнаруживать как возгорания, так и выход газообразного электролита в объём помещения. Это упрощает выбор, поскольку для обнаружения газообразного электролита требуется детектор с комбинацией ИК-датчиков (рисунок 7).



Рисунок 7 – Детектор с комбинацией ИК-датчиков

Высокая скорость воздуха также делает необходимыми аспирационные детекторы дыма (рисунок 8). Это приводит нас непосредственно к FDA241, как наиболее подходящему детектору для данного применения.



Рисунок 8 – Аспирационный детекторы дыма

Расположение точек аспирации должно учитывать поток воздуха, создаваемый системой кондиционирования воздуха.

В дополнение к управлению автоматической системой пожаротушения, система противопожарной защиты запускает все другие необходимые функции управления.

Как можно более раннее обнаружение с помощью аспирационной системы обнаружения дыма быстро и надежно обнаруживает пары электролита благодаря запатентованной технологии оптического обнаружения на двух длинах волн. В соответствии с нормативными требованиями для запуска автоматической системы пожаротушения требуются два независимых датчика.

Из-за опасности скрытых или накрытых очагов возгорания подойдут только газообразные огнетушащие вещества. Если необходимо избежать образования опасных продуктов разложения огнетушащего вещества и обеспечить длительное заполнение помещения, можно использовать только природные огнетушащие газы. Если огнетушащее вещество само по себе не должно представлять опасности для людей, использование CO_2 также может быть исключено. Подойдут азот, аргон или их смеси, однако, поскольку в данном случае мы имеем дело с перезаряжаемыми вторичными батареями без

металлического лития, редкий газ аргон не требуется.

Следовательно, выбор почти автоматически падает на хладон 125ХП.

Безопасное и устойчивое тушение пожара с помощью Sinorix N2.

Системы пожаротушения Sinorix N2 тушат возгорания электрооборудования, сдерживают начальный тепловой выброс, останавливают распространение теплового выброса и надежно предотвращают распространение вторичных возгораний.

Системы пожаротушения и подавления для этого риска должны быть спроектированы как системы полного заполнения аккумуляторного помещения с остаточной концентрацией кислорода ниже 11,3 %.

Примечание: остаточная концентрация кислорода 11,3% соответствует концентрации огнетушащего вещества 45,2%, концентрации газового огнетушащего вещества хладон 125ХП класса повышенной опасности.

В зависимости от используемого электролита могут потребоваться более высокие огнетушащие концентрации. Наши тесты показали, что чем ниже концентрация оставшегося кислорода, тем лучше защита от взрывного горения паров электролита.

Время выдержки в течение 30 минут не только дает пожарному отделению время на реагирование, но и предотвращает возможное промедление в проведении эвакуационных мероприятий.

Исходные данные для расчёта массы ГОТВ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта массы ГОТВ

Данные	Показатели
Высота помещения Н, м	3,00
Площадь, м ²	71,02
Объем помещения, м ³	213,06
Параметр негерметичности, не более, м ⁻¹	0,028
Температура эксплуатации Т, °С	+15...+25
Давление в газовом модуле при нормальной температуре, Мпа	5
Нормативное время выпуска хладона 125ХП, с	не более 10

Произведём расчет необходимой массы хладона 125ХП.

Коэффициент, учитывающий потери газового огнетушащего вещества через проемы помещения определяется по формуле 1.

$$K_2 = \Pi \cdot \delta \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \sqrt{H} \quad (1)$$

где Π – параметр, учитывающий расположение проемов по высоте защищаемого помещения, который равен $0,4 \text{ м}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1}$;

δ – параметр негерметичности (для помещений от 30 до 50 м^3) = $\Sigma F_{\text{н}}$.

$(V_{\text{п}})^{-1} = 0,028 \text{ м}^{-1}$;

$\tau_{\text{под}}$ – время подачи, с;

H – высота помещения, м.

Коэффициент, учитывающий утечки газового огнетушащего вещества из сосудов: $K_1 = 1,05$; $K_3 = 0,98$ – коэффициент, учитывающий положение защищаемого помещения относительно уровня моря.

$$K_2 = 0,4 \cdot 0,028 \cdot 10 \cdot \sqrt{3,00} = 0,175$$

Расчетная масса хладона 125 ХП в АУГП определяется по формуле 2.

$$M_{\text{Г}} = K_1 \cdot (M_{\text{р}} + M_{\text{бк}} \cdot n + M_{\text{тр}}), \quad (2)$$

где $M_{\text{тр}}$ – масса хладона 125, оставшаяся в трубопроводе после срабатывания, кг.

$$M_{\text{Г}} = K_1 \cdot (M_{\text{р}} + M_{\text{бк}} \cdot n) \cong 136,11 \text{ кг},$$

Произведём расчет времени подачи ГОС.

В соответствии с требованиями НПА время подачи для модульных АУГП, применяющих в качестве ГОС хладоны, время подачи ГОС в защищаемое помещение не должно превышать 10 с.

Произведём гидравлический расчет автоматической установки газового пожаротушения.

Изменение давления в баллоне модуля определяется по формуле 3.

$$P_k = P_0 \cdot (V_0/V_k)^{1,4} \quad (3)$$

где P_0, P_k – начальное и конечное давление в баллоне модуля, МПа;

V_0, V_k – начальный и конечный объем «газовой подушки» в баллоне модуля, м³.

Потери напора при течении хладона 125 ХП на участках трубопровода определяем по формуле 4.

$$\Delta H = \left(\frac{\lambda \cdot \Delta L}{d_{тр}} + \sum \xi \right) \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot (F_{тр})^2} \quad (4)$$

где λ – коэффициент сопротивления, определяемый по формуле Альтшуля (формула 5);

ΔL – длина участка трубопровода, м;

$d_{тр}$ – диаметр трубопровода, м;

ξ – коэффициент местного сопротивления;

Q – расход хладона 125 ХП по участку трубопровода, м³·с⁻¹;

$g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м·с⁻²;

$F_{тр}$ – площадь сечения трубопровода, м².

$$\lambda = \delta \cdot 0,11 \cdot \left(\frac{K_s}{d_{тр}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (5)$$

где $\delta = 1,2$ – коэффициент, учитывающий местные сопротивления (сужения трубопровода, фасонные части коллектора);

K_s – эквивалентная абсолютная шероховатость труб, м;

Re – число Рейнольдса (для турбулентного режима $> 10\,000$);

Расход хладона 125 ХП через насадок определяется по формуле 6.

$$q = \mu \cdot F_{\text{нас}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (6)$$

где μ – коэффициент расхода;

$F_{\text{нас}}$ – площадь сечения насадка, м^2 ;

H – напор на насадке, м.

Для комплектации АУГП требуются модуль типа МГП-50-100 (основной и резервный) и два насадка типа С-Р-В-Ф 1 1/2"-А. с внутренней трубной резьбой и распределением хладона 125 ХП на 360°.

Избыточное давления в помещении определяется по формуле 7.

$$P_{\text{пр}} = P_a \cdot \left\{ \left[\frac{(1 \cdot K_3 \cdot M_p)^2}{(0,7 \cdot K_1 \cdot \tau_{\text{под}} \cdot \rho \cdot \Sigma F)^2} \cdot \frac{\rho_v}{7 \cdot 10^6 \cdot P_a} + 1 \right]^{0,35} \right\} \quad (7)$$

где $P_{\text{пр}}$ – предельно-допустимое избыточное давление в помещении, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$;

$P_a = 10332$ – атмосферное давление, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$;

$\rho = 4,96 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность паров хладона 125 ХП.

$\rho_v = 1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность воздуха при температуре эксплуатации АУГП;

$K_1 = 1,05$ – коэффициент, учитывающий утечки из баллона ГОС;

$K_2 = 1,2$ – коэффициент запаса;

$K_3 = 1,0$ – коэффициент, учитывающий изменение давления сжиженных ГОС при его подаче (хладон 125 ХП относится к сжиженным ГОС, т.к. температура его кипения при давлении 760 мм.рт.ст. равна минус 48,5 °С);

$\tau_{\text{под}} = 10 \text{ с}$ – время подачи ГОТВ, определяемое из гидравлического

расчета;

$\Sigma F = 1,98 \text{ м}^2$ – площадь постоянно «открытых проемов» (открытая дверь).

При выпуске расчетной массы хладона 125 ХП избыточное давление в помещении равно $0,008 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$. При выпуске всей массы хладона 125 ХП в модуле избыточное давление в помещении равно $0,017 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$.

Схема установки пожаротушения помещения аккумуляторной представлена на рисунке 9.

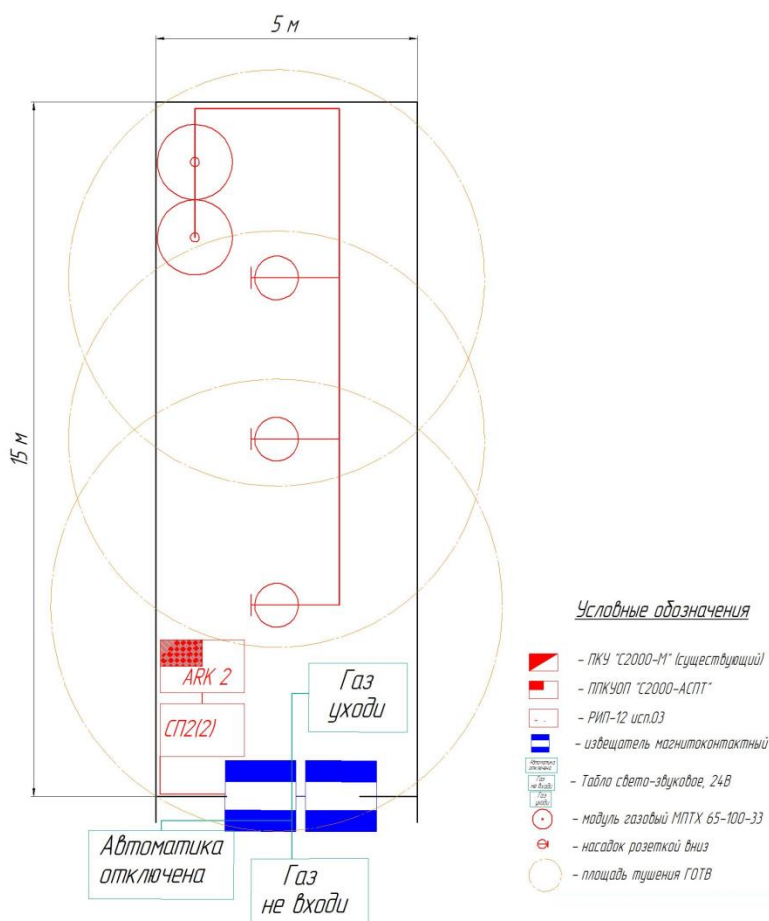


Рисунок 9 – Схема установки пожаротушения помещения аккумуляторной

Результаты гидравлического расчета для помещения:

- время выпуска расчетной массы хладона 125 ХП из баллона модуля

в помещение, составляет ~ 6 с;

- общее время выпуска хладона 125 ХП из баллона модуля составляет ~ 9 с;
- фактическая концентрация хладона 125 ХП в помещении – $0,97 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Как только обнаружен горячий элемент аккумулятора, весь персонал должен быть эвакуирован из возможной зоны загорания. Затем необходимо оцепить территорию, чтобы исключить проникновение постороннего персонала.

Если позволяет ситуация, перед эвакуацией специалист, который идентифицировал горячий элемент, должен быстро определить, нет ли внешнего короткого замыкания. После устранения короткого замыкания температура элемента должна начать падать. Помещение следует покинуть до тех пор, пока элемент не остынет до комнатной температуры и его не уберут из помещения. Если ситуация с горячим элементом сохраняется, возможно, потребуется экстренное реагирование путём ручной активации системы пожаротушения.

Оборудование для реагирования на аварийную ситуацию с перегревом элемента питания должно включать:

- бесконтактные средства контроля температуры (тепловизор, термометр и т.д.);
- защитные очки и ударопрочную защитную маску для лица;
- средства защиты тела, рук;
- средства для перемещения или поднятия аккумулятора или элемента питания.

Эти рекомендации включают, но не ограничиваются ими:

- письменные инструкции по работе и обучению для каждого производственного процесса работы с аккумуляторами;
- транспортировать элементы питания в лотках на тележках, чтобы снизить вероятность падения;

- поверх элементов можно положить термочувствительные листы, так как они при нагревании они меняют цвет;
- запрещать припаивать и использовать неправильные методы сборки при присоединении проводов или токопроводящих выступов к корпусу элемента;
- при пайке к вкладкам следует использовать радиаторы, контакт должен быть ограничен несколькими секундами;
- соблюдайте осторожность при обращении с элементами рядом с емкостями для припоя. При лужении проводов лужить только по одному за раз, чтобы предотвратить короткое замыкание. Элемент, опущенный в емкость для припоя, может закоротить и привести к перегреву элемента;
- элементы не следует вставлять в корпуса с применением чрезмерной силы, так как это может привести к деформации;
- не следует применять чрезмерные усилия для извлечения батареи или элемента из корпуса;
- при загрузке элементов во время кратковременных электрических испытаний соблюдать осторожность, чтобы не превысить номинальный ток предохранителя;
- при загрузке элементов во время длительных эксплуатационных испытаний соблюдать осторожность, чтобы не превышать максимальный постоянный ток элементов;
- элементы, подвергнутые непрерывному сильному разряду, могут перегреться, что приведет к небезопасному состоянию. Риск перегрева повышается, когда элементы находятся в изолированной среде.

Выводы по разделу.

В разделе предложено обеспечить мета работы с аккумуляторами:

- бесконтактными средствами контроля температуры (тепловизор, термометр и т.д.);

- защитными очками и ударопрочными защитными масками для лица;
- средствами защиты тела, рук;
- средствами для перемещения или поднятия аккумулятора или элемента питания.

Для обнаружения пожара в проектируемом аккумуляторном помещении предложен детектор, который может надежно обнаруживать как возгорания, так и выход газообразного электролита в объём помещения. Это упрощает выбор, поскольку для обнаружения газообразного электролита требуется детектор с комбинацией ИК-датчиков и аспирационные детекторы дыма.

Разработаны основные параметры системы пожаротушения Sinorix N2, которая тушит возгорания электрооборудования, сдерживают начальный тепловой выброс, останавливает распространение теплового выброса и надежно предотвращает распространение вторичных возгораний.

Необходимая масса хладона 125ХП составляет 136,11 кг. Для комплектации АУГП требуются модуль типа МГП-50-100 (основной и резервный) и два насадка типа С-Р-В-Ф 1 1/2”-А. с внутренней трубной резьбой и распределением хладона 125 ХП на 360°. Время выпуска расчетной массы хладона 125 ХП из баллона модуля в помещение, составляет ~ 6 с, общее время выпуска хладона 125 ХП из баллона модуля составляет ~ 9 с; фактическая концентрация хладона 125 ХП в помещении –0,97 кг·м⁻³.

4 Охрана труда

В соответствии с Приказом Минтруда России от 29.10.2021 № 776н «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда» составим реестр профессиональных рисков для рабочих мест производственного подразделения исследуемой организации [6].

«Следует использовать систематический, прозрачный и всеобъемлющий процесс идентификации опасности, основанный на подробном и точном описании условий труда. Идентификация опасности должна учитывать все режимы работы и все ожидаемые виды деятельности» [7].

«После сопоставления результатов обследования с перечнем (классификатором) опасностей составляется перечень идентифицированных опасностей и оцененных профессиональных рисков на рабочем месте (профессии, должности)» [7].

Реестр рисков на рабочих местах машиниста компрессора, аккумуляторщика и диспетчера представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Реестр рисков на рабочих местах машиниста компрессора, аккумуляторщика и диспетчера

Опасность	ID	Опасное событие
«Струи газа или жидкости под давлением» [6]	1.1	«Воздействие струи газа или жидкости под давлением» [6]
«Разлетающиеся предметы и детали» [6]	2.1	«Контактные удары при столкновении с разлетающимися предметами и деталями» [6]
«Повышенная температура поверхностей технологического оборудования» [6]	3.1	«Воздействие повышенной температуры поверхностей технологического оборудования» [6]
«Падение с высоты» [6]	4.1	«Падение при разности высот» [6]
«Движущиеся и неподвижные предметы, детали и машины» [6]	5.1	«Зашемление между движущимися и неподвижными предметами, деталями и машинами» [6]

Продолжение таблицы 2

Опасность	ID	Опасное событие
«Электрический ток» [6]	6.1	«Поражение электрическим током» [6]
«Вредные и опасные химические вещества, электролит аккумуляторных батарей» [6]	7.1	«Воздействие вредного вещества при обращении с ним (в т.ч. попадание в глаза), получение химических ожогов» [6]
«Природный газ под высоким давлением в технологических коммуникациях, сосудах работающих под давлением, образование взрывоопасной газовой смеси» [6]	8.1	«Разгерметизация технологических коммуникаций, взрыв, пожар, высокие температуры, воздействие осколков и частей разрушенных конструкций» [6]

«Определение величины риска производится с целью установления его степени и ранжирования факторов опасности» [7].

Оценка вероятности представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка вероятности

Степень вероятности		Характеристика	Коэффициент, А
1	Весьма маловероятно»	«Практически исключено» [7]. «Зависит от следования инструкции» [7]. «Нужны многочисленные поломки/отказы/ошибки» [7].	1
2	Маловероятно	Сложно представить, однако может произойти. «Зависит от следования инструкции» [7]. «Нужны многочисленные поломки/отказы/ошибки» [7].	2
3	Возможно	«Иногда может произойти» [7]. «Зависит от обучения (квалификации)» [7]. «Одна ошибка может стать причиной аварии/инцидента/несчастного случая» [7].	3
4	Вероятно	«Зависит от случая, высокая степень возможности реализации» [7]. «Часто слышим о подобных фактах» [7]. Периодически наблюдаемое событие.	4
5	Весьма вероятно	«Обязательно произойдет» [7]. «Практически несомненно» [7]. «Регулярно наблюдаемое событие» [7].	5

Оценка степени тяжести последствий представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Оценка степени тяжести последствий

Тяжесть последствий		Потенциальные последствия для людей	Коэффициент, U
5	Катастрофическая	Групповой несчастный случай на производстве (число пострадавших 2 и более человек). Несчастный случай на производстве со смертельным исходом. Авария. Пожар.	5
4	Крупная	«Тяжелый несчастный случай на производстве (временная нетрудоспособность более 60 дней)» [7]. «Профессиональное заболевание» [7]. Инцидент.	4
3	Значительная	«Серьезная травма, болезнь и расстройство здоровья с временной утратой трудоспособности продолжительностью до 60 дней» [7]. Инцидент.	3
2	Незначительная	«Незначительная травма – микротравма (легкие повреждения, ушибы), оказана первая медицинская помощь» [7]. Инцидент. Быстро потушенное загорание.	2
1	Приемлемая	«Без травмы или заболевания» [7]. Незначительный, быстроустраняемый ущерб.	1

Количественная оценка профессионального риска рассчитывается по формуле 8.

$$R=A \cdot U, \quad (8)$$

где А – «коэффициент вероятности;

U – коэффициент тяжести последствий» [6].

«Оценка риска, R:

- 1-8 (низкий);
- 9-17 (средний);
- 18-25 (высокий)» [6].

По результатам проведенной идентификации на каждом «рабочем месте

заполняется Анкета в соответствии Приказом Минтруда России от 28.12.2021 № 926 «Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков» [7].

Анкета уровня профессиональных рисков на рабочем месте машиниста ТК представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Анкета уровня профессиональных рисков на рабочем месте машиниста компрессора

Рабочее место	Опасность	Опасное событие	Степень вероятности, А	Коэффициент, А	Тяжесть последствий, U	Коэффициент, U	Оценка риска, R	Значимость оценки риска
Машинист компрессора	Повышенная температура поверхностей технологического оборудования	Воздействие повышенной температуры поверхностей технологического оборудования и материалов	Возможно	3	Незначительная	2	6	Низкий
	Движущиеся и неподвижные предметы, детали и машины	Защемление между движущимися и неподвижными предметами, деталями и машинами и их частями	Возможно	3	Значительная	3	9	Средний

Анкета уровня профессиональных рисков аккумуляторщика отражена в таблице 6.

Таблица 6 – Анкета уровня профессиональных рисков аккумуляторщика

Рабочее место	Опасность	Опасное событие	Степень вероятности, А	Коэффициент, А	Тяжесть последствий, U	Коэффициент, U	Оценка риска, R	Значимость оценки риска
Аккумуляторщик	«Электрический ток» [6]	«Поражение электрическим током» [6]	Вероятно	4	Значительная	3	12	Средний
	«Вредные и опасные химические вещества, электролит аккумуляторных батарей» [6]	«Воздействие вредного вещества при обращении с ним (в т.ч. попадание в глаза), получение химических ожогов» [6]	Вероятно	4	Значительная	3	12	Средний

Анкета уровня профессиональных рисков диспетчера отражена в таблице 7.

Таблица 7 – Оценка уровня профессиональных рисков диспетчера

Рабочее место	Опасность	Опасное событие	Степень вероятности, А	Коэффициент, А	Тяжесть последствий, U	Коэффициент, U	Оценка риска, R	Значимость оценки риска
Диспетчер	Электрический ток	Воздействие электрического тока	Возможно	3	Незначительная	2	6	Низкий

В частности, случайное короткое замыкание является обычным явлением в местах проведения проверок аккумуляторов из-за частого обращения.

Все элементы используемых в организации аккумуляторов с высокой ёмкостью имеют внутреннюю защиту от опасностей, связанных с короткими замыканиями. Это достигается за счет быстродействующего использования

под крышкой клеммы. Хотя вероятность нагрева, выброса или взрыва плавящихся элементов при прямом коротком замыкании меньше, они становятся нефункциональными. На протяжении всего процесса приема и проверки следует принимать меры, чтобы избежать короткого замыкания элементов и батарей.

Вывод по разделу.

Определено, что случайное короткое замыкание является обычным явлением в местах проведения проверок аккумуляторов. При наличии любого из признаков необходимо немедленно отключить устройство или аккумулятор от сети и поместите его вдали от легковоспламеняющихся материалов. Если батареи повреждены, необходимо извлечь их, поместить в огнестойкий контейнер (например, металлический барабан) с песком или другим огнетушащим веществом; необходимо следовать инструкциям производителя по тушению возгораний небольших аккумуляторов, которые могут включать использование сухих химических огнетушителей ABC, огнетушителей класса D (для металлических литиевых) или песка.

Все элементы используемых в организации аккумуляторов с высокой ёмкостью имеют внутреннюю защиту от опасностей, связанных с короткими замыканиями. Это достигается за счет быстродействующего использования под крышкой клеммы. Хотя вероятность нагрева, выброса или взрыва плавящихся элементов при прямом коротком замыкании меньше, они становятся нефункциональными. На протяжении всего процесса приема и проверки следует принимать меры, чтобы избежать короткого замыкания элементов и батарей.

5 Охрана окружающей среды и экологическая безопасность

Оценка антропогенной нагрузки предприятия на окружающую среду представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Антропогенная нагрузка колледжа на окружающую среду

Наименование объекта	Подразделение	Воздействие на атмосферный воздух (выбросы, перечислить виды выбросов)	Воздействие на водные объекты (сбросы, перечислить виды сбросов)	Отходы (перечислить виды отходов)
ИК	Котельная	Газообразные	Сточные воды	ТКО
Количество в год		0,03 т	–	171,002 т

Сведения о применяемых на объекте технологиях и соответствие наилучшей доступной технологии представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Сведения о применяемых на объекте технологиях [10]

Структурное подразделение (площадка, цех или другое)		Наименование технологии	Соответствие наилучшей доступной технологии
Номер	Наименование		
1	Котельная	Обращение с отходами I и II классов опасности	Нет

Перечень загрязняющих веществ, включенных в план-график контроля стационарных источников выбросов представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень загрязняющих веществ

Номер ЗВ	Наименование загрязняющего вещества
1	Азота диоксид
2	Азот (II) оксид
3	Углерод оксид

Отчёт по производственному экологическому контролю на предприятии представлен в таблицах 11-12.

Таблица 11 – Результаты контроля стационарных источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух

№ п/п	Структурное подразделение (площадка, цех или другое)		Источник		Наименование загрязняющего вещества	Предельно допустимый выброс или временно согласованный выброс, г/с	Фактический выброс, г/с	Превышение предельно допустимого выброса или временно согласованного выброса в раз (гр. 8 / гр. 7)	Дата отбора проб	Общее количество случаев превышения предельно допустимого выброса или временно согласованного выброса	Примечание
	номер	наименование	номер	наименование							
1	1	ИК	1	Котельная	Азота диоксид	0,02	0,01	–	25.02.2023	–	–
					Азот (II) оксид	0,02	0,01	–	25.02.2023	–	–
					Углерод оксид	0,02	0,01	–	25.02.2023	–	–
Итого						0,06	0,03	–	–	–	--

Таблица 12 – Сведения об образовании, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления

№ строки	Наименование видов отходов	Код по федеральному классификационному каталогу отходов, далее - ФККО	Класс опасности отходов	Наличие отходов на начало года, тонн		Образовано отходов, тонн	Получено отходов от других индивидуальных предпринимателей и юридических лиц, тонн	Утилизировано отходов, тонн	Обезврежено отходов, тонн
				хранение	накопление				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Отходы литий-ионных аккумуляторов неповрежденных [9]	48220131532	2	0	0	0,2	0	0	0,2
2	«Мусор и смет производственных помещений малоопасный» [9]	73321001724	4	0	0	60,000	0	60,000	0
3	«Смет с территории предприятия» [9]	7 33 390 01 71 4	4	0	0	40,000	0	40,000	0

Продолжение таблицы 12

№ строки	Наименование видов отходов	Код по федеральному классификационному каталогу отходов, далее - ФККО	Класс опасности отходов	Наличие отходов на начало года, тонн		Образовано отходов, тонн	Получено отходов от других индивидуальных предпринимателей и юридических лиц, тонн	Утилизировано отходов, тонн	Обезврежено отходов, тонн
				хранение	накопление				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	«Отходы бумаги и картона» [9]	4 05 122 02 60 5	5	0	0	0,100	0	0,100	0

Продолжение таблицы 12

№ строки	Передано отходов другим индивидуальным предпринимателям и юридическим лицам, тонн					
	Всего	для обработки	для утилизации	для обезвреживания	для хранения	для захоронения
	11	12	13	14	15	16
1	0,2	–	0,2	–	–	–
2	60,000	–	60,000	–	–	–
3	40,000	–	40,000	–	–	–
4	0,100	–	0,100	–	–	–

Продолжение таблицы 12

№ стр ок и	Размещено отходов на эксплуатируемых объектах, тонн					Наличие отходов на конец года, тонн	
	Всего	Хранение на собственных объектах размещения отходов, далее - ОРО	Захоронение на собственных ОРО	Хранение на сторонних ОРО	Захоронение на сторонних ОРО	Хранение	Накопление
	17	18	19	20	21	22	23
1	0,2	0	0,2	0	0	0	0
2	60,000	0	60,000	0	0	0	0
3	40,000	0	40,000	0	0	0	0
4	0,100	0	0,100	0	0	0	0

Вывод по 5 разделу.

Определено, что наиболее опасными отходами производства являются отходы литий-ионных аккумуляторов.

Утилизация аккумуляторов имеет решающее значение для снижения затрат и устранения потенциальных рисков, которые компоненты аккумуляторов представляют для окружающей среды.

Однако электролит не извлекается, а просто утилизируется в процессе переработки аккумуляторов.

Ввиду пористости, большой площади поверхности электродов и высокой вязкости электролита, для эффективного сбора отработанных электролитов первоочередной задачей является отделение электролита от электродов.

Для решения вышеуказанных проблем предлагается процесс отделения электролита, очищения при использовании сжиженного газа под давлением паров и температурой в растворителях.

6 Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности

Для обнаружения пожара в проектируемом аккумуляторном помещении предложен детектор, который может надежно обнаруживать как возгорания, так и выход газообразного электролита в объём помещения. Это упрощает выбор, поскольку для обнаружения газообразного электролита требуется детектор с комбинацией ИК-датчиков и аспирационные детекторы дыма.

Разработаны основные параметры системы пожаротушения Sinorix N2, которая тушит возгорания электрооборудования, сдерживают начальный тепловой выброс, останавливает распространение теплового выброса и надежно предотвращает распространение вторичных возгораний.

План реализации мероприятий по обеспечению техносферной безопасности представлен в таблице 13.

Таблица 13 – План реализации мероприятий по обеспечению техносферной безопасности

Мероприятия	Срок исполнения
Проектирование системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма	2024 год
Проектирование системы газового пожаротушения Sinorix N2	2024 год
Монтаж системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма	2024 год
Монтаж системы газового пожаротушения Sinorix N2	2024 год
Пуско-наладочные работы	2024 год

Необходимая масса хладона 125ХП составляет 136,11 кг. Для комплектации АУГП требуются модуль типа МГП-50-100 (основной и резервный) и два насадка типа С-Р-В-Ф 1 1/2”-А. с внутренней трубной резьбой и распределением хладона 125 ХП на 360°. Время выпуска расчетной массы хладона 125 ХП из баллона модуля в помещение, составляет ~ 6 с, общее время выпуска хладона 125 ХП из баллона модуля составляет ~ 9 с; фактическая концентрация хладона 125 ХП в помещении –0,97 кг·м⁻³.

Расчёт ожидаемых потерь ИК-2 от пожаров будет производиться по двум вариантам:

- в аккумуляторном помещении отсутствуют системы обнаружения пожара и пожаротушения;
- в аккумуляторном помещении смонтированы системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2.

Данные для расчёта ожидаемых потерь представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Данные для расчёта ожидаемых потерь

Показатель	Измерение	Обоз.	1 вариант	2 вариант
«Площадь объекта» [16]	м ²	F	3456	
«Стоимость поврежденного технологического оборудования и оборотных фондов» [16]	руб./м ²	C _т	50000	55000
Стоимость поврежденных частей здания	руб/м ²	C _к	10000	
«Площадь пожара при отказе всех средств пожаротушения» [16]	м ²	F'' _{пож}	3456	3456
«Площадь пожара при тушении средствами автоматического пожаротушения» [16]	м ²	F* _{пож}	-	100
«Вероятность возникновения пожара» [16]	1/м ² в год	J	5·10 ⁻⁵	
«Площадь пожара на время тушения первичными средствами» [16]	м ²	F _{пож}	4	
«Вероятность тушения пожара первичными средствами» [16]	-	p ₁	0,79	
«Вероятность тушения пожара привозными средствами» [16]	-	p ₂	0,95	
«Вероятность тушения средствами автоматического пожаротушения» [16]	-	p ₃	0,86	
«Коэффициент, учитывающий степень уничтожения объекта тушения пожара привозными средствами» [16]	-	-	0,52	
«Коэффициент, учитывающий косвенные потери» [16]	-	к	1,63	
«Линейная скорость распространения горения по поверхности» [16]	м/мин	V _л	1,5	
«Время свободного горения» [16]	мин	B _{св}	12	5
«Норма текущего ремонта» [16]	%	H _{т.р.}	-	5
«Норма амортизационных отчислений» [16]	%	H _а	-	10
Заработная плата 1 работника	руб/мес	ЗПЛ	0	36000
«Период реализации мероприятия» [16]	лет	T	10	

Рассчитаем площадь пожара при тушении привозными средствами по

формуле 9:

$$F'_{пож} = \pi \times (v_l \cdot B_{св})^2, \text{ м}^2, \quad (9)$$

«где v_l – линейная скорость распространения горения по поверхности, м/мин;
 $B_{св}$ – время свободного горения, мин.» [16].

$$F1_{пож} = 3,14 \times (1,5 \times 12)^2 = 1017 \text{ м}^2,$$

$$F2_{пож} = 3,14 \times (1,5 \times 5)^2 = 176,6 \text{ м}^2,$$

Произведём расчёт ожидаемых потерь от пожаров по формуле 10.

$$M(\Pi) = M(\Pi_1) + M(\Pi_2) + M(\Pi_3) + M(\Pi_4), \quad (10)$$

«где $M(\Pi_1)$ – математическое ожидание годовых потерь от пожаров, потушенных первичными средствами пожаротушения;
 $M(\Pi_2)$ – математическое ожидание годовых потерь от пожаров, ликвидированных подразделениями пожарной охраны;
 $M(\Pi_3)$ – математическое ожидание годовых потерь от пожаров при отказе всех средств пожаротушения» [16]:

$$M(\Pi_2) = J \cdot F \cdot C_T \cdot F'_{пож} \cdot (1+k) \cdot p_1; \quad (11)$$

«где J – вероятность возникновения пожара, $1/\text{м}^2$ в год;

F – площадь объекта, м^2 ;

C_T – стоимость поврежденного технологического оборудования и оборотных фондов, руб./ м^2 ;

$F_{пож}$ – площадь пожара на время тушения первичными средствами;

p_1 – вероятность тушения пожара первичными средствами;

k – коэффициент, учитывающий косвенные потери» [16].

$$M(\Pi_2) = J \cdot F \cdot (C_T \cdot F'_{пож} + C_k) \cdot 0,52 \cdot (1+k) \cdot [1 - p_1 - (1 - p_1) \times p_3] \cdot p_2 \quad (12)$$

«где p_2 – вероятность тушения пожара привозными средствами;

C_k – стоимость поврежденных частей здания, руб./м²;

$F'_{\text{пож}}$ – площадь пожара за время тушения привозными средствами»

[16].

$$M(\Pi_3) = J \cdot F \cdot (C_T \cdot F''_{\text{пож}} + C_k) \cdot (1+k) \cdot [1-p_1 - (1-p_1) \cdot p_2] \quad (13)$$

где $F''_{\text{пож}}$ – площадь пожара при отказе всех средств пожаротушения, м².

$$M(\Pi_4) = J \cdot F \cdot (C_T \cdot F''_{\text{пож}} + C_k) \cdot (1+k) \cdot \{1-p_1 - (1-p_1) \cdot p_3 - [1-p_1 - (1-p_1) \cdot p_3] \cdot p_2\} \quad (14)$$

Для первого варианта:

$$M(\Pi_1) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times 50000 \times 4 \times (1+1,63) \times 0,79 = 71805,31 \text{ руб./год};$$

$$M(\Pi_2) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times (50000 \times 1017 + 10000) \times 0,52 \times (1+1,63) \times (1-0,79) \times 0,95 = \\ = 2397850,41 \text{ руб./год.}$$

$$M(\Pi_3) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times (50000 \times 3456 + 10000) \times (1+1,63) \times \\ \times [1-0,79 - (1-0,79) \times 0,95] = 2670221,41 \text{ руб./год.}$$

Для второго варианта:

$$M(\Pi_1) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times 55000 \times 4 \times (1+1,63) \times 0,79 = 78985,84 \text{ руб./год};$$

$$M(\Pi_2) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times 55000 \times 100 \times (1+1,63) \times (1-0,79) \times 0,86 = \\ = 451419,09 \text{ руб./год};$$

$$M(\Pi_3) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times (55000 \times 176,6 + 10000) \times (1+1,63) \times [1-0,79 - (1-0,79) \times 0,86] \times \\ \times 0,95 = 117538,84 \text{ руб./год.}$$

$$M(\Pi_4) = 5 \times 10^{-5} \times 3456 \times (55000 \times 3456 + 10000) \times (1+1,63) \times \{1-0,79 - (1-0,79) \times \\ \times 0,86 - [1-0,79 - (1-0,79) \times 0,86] \times 0,95\} = 126991,92 \text{ руб./год.}$$

Общие ожидаемые потери ИК-2 от пожаров составят:

– если в аккумуляторном помещении отсутствуют системы

обнаружения пожара и пожаротушения:

$$M(\Pi)_1 = 71805,31 + 2397850,41 + 2670221,41 = 5139877,13 \text{ руб./год};$$

- если в аккумуляторном помещении смонтированы системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2:

$$M(\Pi)_2 = 78985,84 + 451419,09 + 117538,84 + 126991,92 = 774935,69 \text{ руб./год}.$$

Стоимость монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2 представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Стоимость реализации предложенных технических решений

Виды работ	Стоимость, руб.
Проектирование системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма	50000
Проектирование системы газового пожаротушения Sinorix N2	50000
Монтаж системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма	700000
Монтаж системы газового пожаротушения Sinorix N2	100000
Стоимость оборудования	8000000
Пуско-наладочные работы	200000
Итого:	10000000

Рассчитаем эксплуатационные расходы на содержание системы пенного пожаротушения по формуле 15:

$$P = A + C \quad (15)$$

где A – «затраты на амортизацию систем автоматических устройств пожаротушения, руб./год;

C – текущие затраты указанных систем (зарплата обслуживающего персонала, текущий ремонт), руб./год» [16].

$$P=1000000+932000=1932000 \text{ руб.}$$

Текущие затраты рассчитаем по формуле 16:

$$C_2 = C_{m.p.} + C_{c.o.n.} \quad (16)$$

где « $C_{т.р.}$ – затраты на текущий ремонт;

$C_{с.о.п.}$ – затраты на оплату труда обслуживающего персонала» [16].

$$C_2=500000+432000=932000 \text{ руб.}$$

Затраты на текущий ремонт рассчитывается по формуле 17:

$$C_{m.p.} = \frac{K_2 \cdot H_{т.р.}}{100\%} \quad (17)$$

«где K_2 – капитальные затраты на приобретение, установку автоматических средств тушения пожара, руб.;

$H_{т.р.}$ – норма текущего ремонта, %» [16].

$$C_{m.p.} = \frac{10000000 \times 5}{100} = 500000 \text{ руб.}$$

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала рассчитывается по формуле 18:

$$C_{c.o.n.} = 12 \times Ч \times ЗПЛ \quad (18)$$

«где $Ч$ – численность работников обслуживающего персонала, чел.;

$ЗПЛ$ – заработная плата 1 работника, руб./мес» [16].

$$C_{\text{с.о.п.}} = 12 \times 1 \times 36000 = 432000 \text{ руб.}$$

Затраты на амортизацию систем автоматических устройств пожаротушения рассчитываются по формуле 19:

$$A = \frac{K_2 \cdot H_a}{100\%} \quad (19)$$

«где K_2 – капитальные затраты на приобретение, установку автоматических средств тушения пожара, руб.;

H_a – норма амортизации, %» [16].

$$A = \frac{10000000 \times 10}{100} = 1000000 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorig N2 составит:

$$И = \sum_{t=0}^T ([M(\Pi_1) - M(\Pi_2)] - [P_2 - P_1]) \times \frac{1}{(1+НД)^t} - (K_2 - K_1) \quad (20)$$

«где T – горизонт расчета (продолжительность расчетного периода);

t – год осуществления затрат;

$НД$ – постоянная норма дисконта, равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал.

$M(\Pi_1)$, $M(\Pi_2)$ – расчетные годовые материальные потери в базовом и планируемом вариантах, руб./год;

K_1 , K_2 – капитальные вложения на осуществление противопожарных мероприятий в базовом и планируемом вариантах, руб.;

P_1 , P_2 – эксплуатационные расходы в базовом и планируемом вариантах в t -м году, руб./год» [16].

Расчёт денежных потоков от монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2 представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Расчёт денежных потоков

Год осуществления проекта	$M(П1)-M(П2)$	P_2-P_1	$\frac{1}{(1+НД)^t}$	$\frac{[M(П1)-M(П2)-(C_2-C_1)]^*}{1/(1+НД)^t}$	K_2-K_1	Чистый дисконтированный поток доходов по годам проекта)
1	4364941,44	1932000	0,91	2213976,71	10000000	-7786023,29
2	4364941,44	1932000	0,83	2019341,40	-	2019341,40
3	4364941,44	1932000	0,75	1824706,08	-	1824706,08
4	4364941,44	1932000	0,68	1654400,18	-	1654400,18
5	4364941,44	1932000	0,62	1508423,69	-	1508423,69
6	4364941,44	1932000	0,56	1362447,21	-	1362447,21
7	4364941,44	1932000	0,51	1240800,13	-	1240800,13
8	4364941,44	1932000	0,47	1143482,48	-	1143482,48
9	4364941,44	1932000	0,42	1021835,40	-	1021835,40
10	4364941,44	1932000	0,39	948847,16	-	948847,16

Вывод по разделу.

В разделе разработан план монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2 в помещениях аккумуляторной и рассчитан экономический эффект от его реализации.

Интегральный экономический эффект от монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2 за десять лет составит 4938260,44 рублей.

Заключение

В первом разделе установлено, что литий-железо-фосфатные аккумуляторы сочетают в себе материалы с высокой энергией и легковоспламеняющиеся электролиты. Поэтому раннее и надежное обнаружение пожара является обязательным условием при разработке систем противопожарной защиты систем с литий-железо-фосфатными аккумуляторами. Быстрое тушение также важно и может быть обеспечено использованием автоматизированных систем пожаротушения с использованием соответствующего огнетушащего средства.

Во втором разделе определено, что существуют противоречивые рекомендации по подходящим средствам пожаротушения при возгорании аккумуляторных батарей и, следовательно, неопределенность в отношении соответствующих активных систем противопожарной защиты.

Окисление лития, содержащегося в аккумуляторе приводит к возгоранию при нагревании аккумулятора, это основа сгорания и повторного воспламенения аккумуляторов. В случае с батарейным блоком было замечено, что тепловой разгон элемента вызывает тепловой разгон в соседних элементах.

Были проанализированы исследования средств пожаротушения и технологий предотвращения возгорания литиевых аккумуляторов.

В третьем разделе предложено обеспечить мета работы с аккумуляторами:

- бесконтактными средствами контроля температуры (тепловизор, термометр и т.д.);
- защитными очками и ударопрочными защитными масками для лица;
- средствами защиты тела, рук;
- средствами для перемещения или поднятия аккумулятора или элемента питания.

Для обнаружения пожара в проектируемом аккумуляторном помещении предложен детектор, который может надежно обнаруживать как возгорания, так и выход газообразного электролита в объём помещения. Это упрощает выбор, поскольку для обнаружения газообразного электролита требуется детектор с комбинацией ИК-датчиков и аспирационные детекторы дыма.

Разработаны основные параметры системы пожаротушения Sinorix N2, которая тушит возгорания электрооборудования, сдерживают начальный тепловой выброс, останавливает распространение теплового выброса и надежно предотвращает распространение вторичных возгораний.

Необходимая масса хладона 125ХП составляет 136,11 кг. Для комплектации АУГП требуются модуль типа МГП-50-100 (основной и резервный) и два насадка типа С-Р-В-Ф 1 1/2"-А. с внутренней трубной резьбой и распределением хладона 125 ХП на 360°. Время выпуска расчетной массы хладона 125 ХП из баллона модуля в помещение, составляет ~ 6 с, общее время выпуска хладона 125 ХП из баллона модуля составляет ~ 9 с; фактическая концентрация хладона 125 ХП в помещении $-0,97 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Определено, что случайное короткое замыкание является обычным явлением в местах проведения проверок аккумуляторов. При наличии любого из признаков необходимо немедленно отключить устройство или аккумулятор от сети и поместите его вдали от легковоспламеняющихся материалов. Если батареи повреждены, необходимо извлечь их, поместить в огнестойкий контейнер (например, металлический барабан) с песком или другим огнетушащим веществом; необходимо следовать инструкциям производителя по тушению возгораний небольших аккумуляторов, которые могут включать использование сухих химических огнетушителей АВС, огнетушителей класса D (для металлических литиевых) или песка.

Все элементы используемых в организации аккумуляторов с высокой ёмкостью имеют внутреннюю защиту от опасностей, связанных с короткими замыканиями. Это достигается за счет быстродействующего использования под крышкой клеммы. Хотя вероятность нагрева, выброса или взрыва

плавающих элементов при прямом коротком замыкании меньше, они становятся нефункциональными. На протяжении всего процесса приема и проверки следует принимать меры, чтобы избежать короткого замыкания элементов и батарей.

Определено, что наиболее опасными отходами производства являются отходы литий-ионных аккумуляторов.

Утилизация аккумуляторов имеет решающее значение для снижения затрат и устранения потенциальных рисков, которые компоненты аккумуляторов представляют для окружающей среды.

Однако электролит не извлекается, а просто утилизируется в процессе переработки аккумуляторов.

Ввиду пористости, большой площади поверхности электродов и высокой вязкости электролита, для эффективного сбора отработанных электролитов первоочередной задачей является отделение электролита от электродов.

Для решения вышеуказанных проблем предлагается процесс отделения электролита, очищения при использовании сжиженного газа под давлением паров и температурой в растворителях.

В шестом разделе разработан план монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2 в помещениях аккумуляторной и рассчитан экономический эффект от его реализации.

Интегральный экономический эффект от монтажа системы обнаружения пожара с комбинацией ИК-датчиков и аспирационными детекторами дыма и системы газового пожаротушения Sinorix N2 за десять лет составит 4938260,44 рублей.

Все задачи решены, цель работы достигнута.

Список используемых источников

1. Елисеев Ю. Н., Мокряк А. В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-pozharnoy-opasnosti-litii-ionnyh-akkumulyatornyh-batarey> (дата обращения: 19.02.2024).
2. Ковалышин В. В. Подход к математическому моделированию развития и тушения пожаров, возникающих в каналах различными средствами // CNBOP-PIB. 2013. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-matematicheskomu-modelirovaniyu-r-azvitiya-i-tusheniya-pozharov-voznikayuschih-v-kanalah-razlichnymi-sredstvami> (дата обращения: 19.02.2024).
3. О пожарной безопасности [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_113658/ (дата обращения: 10.02.2024).
4. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 12.02.2024).
5. Об установлении правил противопожарного режима в Российской Федерации [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=443384> (дата обращения: 12.02.2024).
6. Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда [Электронный ресурс] : Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 776н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=409457&ysclid=1d8jr94kat939272210> (дата обращения: 12.02.2024).

7. Об утверждении рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков [Электронный ресурс] : Приказ Минтруда России от 28.12.2021 № 926. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=411523&ysclid=1d8jqdwcm8100411018> (дата обращения: 12.02.2024).

8. Об утверждении Рекомендаций по классификации, обнаружению, распознаванию и описанию опасностей [Электронный ресурс] : Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 31.01.2022 № 36. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=414162&ysclid=1d8mh9t1uh805514136> (дата обращения: 02.02.2024).

9. Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов [Электронный ресурс] : Приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22.05.2017 № 242. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542600531> (дата обращения: 12.02.2024).

10. Об утверждении формы отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля [Электронный ресурс] : Приказ Минприроды России от 14.06.2018 № 261 (ред. от 23.06.2020). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=377676&ysclid=1dsbgkkxui183890770> (дата обращения: 12.02.2024).

11. Орлов О. И., Комельков В. А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. №4 (49). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pozharnaya-opasnost-litiiy-ionnyh-akkumulyatorov> (дата обращения: 19.02.2024)

12. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [Электронный ресурс] : ГОСТ 12.1.004-91. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3254/?ysclid=1ga9r9fn5z366382597> (дата обращения: 12.02.2024).

13. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты [Электронный ресурс] : СП 2.13130.2020. URL:

<https://docs.cntd.ru/document/565248963?ysclid=17hqwyvw68251196235> (дата обращения: 18.02.2024).

14. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219> (дата обращения: 12.02.2024).

15. Трудовой кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 30.12.2001 № 197-ФЗ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 12.02.2024).

16. Фрезе Т. Ю. Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности. Выполнение раздела выпускной квалификационной работы по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» : электронное учебно-методическое пособие / Т.Ю. Фрезе. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2022. 1 оптический диск. ISBN 978-5-8259-1456-5.

17. Чеберяк В. В. Правила и способы тушения электромобилей пожарной охраной // Достижения науки и образования. 2020. №9 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravila-i-sposoby-tusheniya-elektromobiley-rozharnoy-ohranoy> (дата обращения: 19.02.2024).

18. Wagner R., Preschitschek N., Passerini S., Leker J., Winter M., 2023, Current research trends and prospects among the various materials and designs used in lithium-based batteries, *J Appl Electrochem*, 43(5), 481496.

19. Wang, P., Han, H., Liu, R., et al., 2020. Effect of outlet diameter on atomization characteristics and dust reduction performance of x-swirl pressure nozzle. *Process Saf. Environ. Prot.* 137,340-351.

20. Zhou, Y., Bu, R., Zhang, X., et al., 2019. Performance evaluation of water mist fire suppression: a clean and sustainable fire-fighting technique in mechanically- ventilated place. *J. Clean. Prod.* 209, 1319-1331.