

На правах рукописи



Елтышев Илья Павлович

**ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫЕ СМЕСЕВЫЕ ХЛАДАГЕНТЫ КАК РАБОЧИЕ
ВЕЩЕСТВА В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Бегишев Ильдар Рафатович

Официальные оппоненты:

Еремин Александр Викторович
доктор физико-математических наук,
профессор, ОИВТ РАН, лаборатория №19
неравновесных процессов, заведующий

Кириллов Игорь Александрович
кандидат физико-математических наук,
ООО «Кинтех Лаб»
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится «17» сентября 2024 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:
<https://academygps.ru/upload/iblock/5a1/oga9p42vkoj0vl39d5fano3u6kz8quol/Диссертация%20Елтышева%20И.П..pdf>

Автореферат разослан «03» июля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Соковнин Артем Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

В настоящее время в качестве хладагентов в теплоэнергетических установках на объектах энергетики, бытовом и промышленном холодильном оборудовании, а также в качестве огнетушащих веществ в газовом пожаротушении широко применяются гидрофторуглероды (ГФУ): R-23 (трифторметан, CF_3H), R-125 (пентафторэтан, $\text{C}_2\text{F}_5\text{H}$), R-227ea (гептафторпропан, $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$), R-134a (тетрафторэтан, $\text{C}_2\text{F}_4\text{H}_2$), R-32 (дифторметан, CH_2F_2) и т.д.). Они имеют нулевой озоноразушающий потенциал, но обладают большим временем жизни в атмосфере (десятки и сотни лет), вследствие чего являются парниковыми газами, многократно (в сотни и тысячи раз) превосходящими по тепловому воздействию на атмосферу Земли диоксид углерода (обладают большим значением потенциала глобального потепления). Для ограничения эмиссии парниковых веществ в 2016 году мировым сообществом была принята Кигалийская поправка к Монреальскому Протоколу о веществах, разрушающих озоновый слой Земли, вводящая поэтапное сокращение на 85% потребления всех парниковых газов, в том числе фторсодержащих хладагентов.

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации «О принятии Российской Федерацией поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой» пожаробезопасные хладагенты, применяемые в установках по охлаждению воздуха на объектах энергетики и в другом холодильном оборудовании, подлежат поэтапному ограничению потребления и замене.

В настоящее время для замены парниковых хладагентов предложены вещества, удовлетворяющие экологическим требованиям, касающимся эмиссии парниковых газов в атмосферу, например, предельные углеводороды (пропан, бутан и изобутан), а также не полностью фторированные углеводороды с двойной связью, основным из которых является фторолефин R-1234yf (тетрафторпропен, $\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$). Подавляющее большинство короткоживущих хладагентов (время жизни вещества в атмосфере не превышает 181 дня) являются горючими веществами, что затрудняет их применение на объектах энергетики и может привести к повышению категории по пожарной и взрывопожарной опасности помещений, где расположено холодильное оборудование. Это потребует больших затрат на обеспечение пожаро-и взрывобезопасности объектов.

По этой причине актуальной проблемой является применение ряда хладонов в качестве хладагентов, которые имеют хорошие термодинамические и экологические свойства, но не удовлетворяют требованиям пожарной безопасности по горючести.

Таким образом, разработка смесевых пожаробезопасных хладагентов, удовлетворяющих экологическим требованиям, касающимся эмиссии парниковых газов, позволит повысить уровень пожарной безопасности объектов энергетики и является **актуальной научной и практической**

задачей.

Степень разработанности темы исследования. Исследования, направленные на создания пожаробезопасных хладагентов были отражены в работах, проведенных в ФГБУ «Всероссийский ордена «Знака Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России (ВНИИПО) (Шебеко Ю.Н, Копылов С.Н.), Академии ГПС МЧС России (Бегишев И.Р.), Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Азатян В.В., Ларин И.К.), Российского научного центра «Прикладной химии» (Барабанов В.Г.), а также в зарубежных научных институтах, (Lavelle J., Babushok V., Linteris G.T., Yamamoto O.).

Данные исследования, основанные на эмпирических и теоретических выводах и фактах, не раскрывают полностью проблемы применения современных хладагентов. Несмотря на то, что указанные работы показали, какие химические процессы протекают при горении хладагентов в углеводородном пламени и подняли значимость вопроса о пожаробезопасности современных хладагентов, они не дают однозначного и точного ответа на вопрос о создании пожаро-безопасных и экологически безопасных хладагентов.

Среди всех современных хладагентов, после принятия ряда экологических международных соглашений, перспективным хладагентом в охладительном оборудовании на энергетических предприятиях, а также в климатических установках стал R-1234yf, который благодаря своим экологическим свойствам стали считать лучшим для замены озоноразрушающих хладагентов. Однако в работе Craig D. Needham and Phillip R. Westmoreland поднимается вопрос о том, что поведение данного хладагента в пламени представляет большую неопределённость и поэтому демонстрирует особый интерес к дальнейшему изучению. Что подтверждает необходимость дальнейших исследований данного хладагента.

Вместе с этим необходимо не только проанализировать и дать полный ответ на то, как ведет себя R-1234yf и его аналоги в пламени, но и продолжить работу в поиске пожаробезопасных короткоживущих и моновеществ, а также продолжить работу в целях создания эффективных смесевых пожаробезопасных хладагентов.

Таким образом, **целью исследования** является создание пожаробезопасных смесевых хладагентов для использования их на объектах энергетики. Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **задачи**:

– провести анализ сложившейся ситуации использования хладагентов, в том числе на объектах энергетики, предложить способ решения проблемы применения хладагентов;

– провести расчет времени жизни в атмосфере ряда перспективных веществ, определить, являются ли данные вещества короткоживущими и не обладающими озоноразрушающим и парниковым воздействием;

– провести расчет и анализ схемы кинетического механизма деструкции в углеводородном (пропановом) пламени фторированных углеводородов – хладона 23, хладона 227ea и R-1234yf для понимания процесса ингибирования,

которая позволит полностью описать экспериментально наблюдаемую картину их превращения в пламени;

– разработать негорючие смесевые хладагенты, с коротким временем жизни в атмосфере.

Объектом исследования является обеспечение пожарной безопасности на объектах энергетики.

Предметом исследования является горючесть и время жизни в атмосфере хладагентов, рекомендуемых к использованию на объектах энергетики.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Определены концентрационные пределы распространения пламени для ряда хладагентов.

2. Разработана схема механизма деструкции, позволяющая описать процесс, протекающий в пламени, для целенаправленного подбора ингибитора горения.

3. Проведен анализ схемы механизма деструкции, определены ответственные стадии за процесс ингибирования.

4. Определены времена жизни перспективных веществ, возможных применять в качестве пожаробезопасных смесевых хладагентов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что были впервые определены концентрационные пределы распространения пламени ряда горючих хладагентов, что благодаря разработанной схеме механизма деструкции фторированных хладонов в углеводородном пламени, получена реальная картина превращения вещества в углеводородном пламени. Проанализировав схему механизма деструкции, были выявлены ответственные стадии за процесс ингибирования, что дало возможность подобрать наиболее эффективные ингибиторы горения для создания негорючих смесевых хладагентов. Были определены времена жизни перспективных веществ в качестве смесевых пожаробезопасных хладагентов.

Предложены смесевые пожаробезопасные хладагенты с коротким временем жизни в атмосфере для применения их на объектах энергетики. Применение данных смесевых хладагентов позволит снизить пожарную опасность технологического холодильного оборудования и, по сравнению с горючими хладагентами, приведет к снижению категории по пожарной и взрывопожарной опасности помещений, где установлено холодильное оборудование, и тем самым, уменьшит затраты, на обеспечение пожаро-и взрывобезопасности объектов энергетического комплекса.

Методология и методы исследования. В основу исследования положен метод кинетической деструкции фторированных углеводородов в углеводородном пламени, расчеты и лабораторные эксперименты, применяемые для определения достоверности кинетического механизма деструкции.

Положения, выносимые на защиту: разработанные негорючие хладагенты для применения их на объектах энергетики; определение концентрационных пределов пентафторбутана и трифторпропена; схема

кинетического механизма деструкции фторированных углеводов в пропановом пламени; расчет времени жизни в атмосфере перспективных веществ в качестве хладагентов.

Степень достоверности основных результатов, выводов и рекомендаций исследования основана на научно выверенных и обоснованных методах анализа и обработки полученных данных. Экспериментальное исследование проводилось на лабораторной установке, в состав которой входит сертифицированное оборудование, выполняющее основное измерение (избыточное давление) с приемлемой точностью. Полученные значения имеют удовлетворительную сходимость с теоретическими данными.

Материалы диссертации реализованы: в рамках выбора хладагента на объекте: Архивного помещения Национального банка по Республике Дагестан, компанией ООО «Холдинг ОСК групп»; в практической деятельности ООО «ТПК Пожнефтехим» для замены штатного хладагента R-134a с целью обеспечения требований постановления Правительства Российской Федерации; при осуществлении образовательной деятельности в рамках учебной программы повышения квалификации специалистов, обучающихся мерам пожарной безопасности в учебном центре ФГБУ ВНИИПО МЧС России; в практической деятельности ООО «Сольвекс» для замены штатного хладагента R-410A с целью повышения пожарной безопасности, энергетической эффективности оборудования и снижения эксплуатационных затрат.

Апробация результатов. Основные результаты работы доложены на 21 научно-практической конференции, из них основные: XXXI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (МО, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2019); Международная научная конференция «FarEastCon-2019 – Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям» (г. Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, 2019); Двадцать восьмая международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2019» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); Международная научная конференция «FarEastCon-2020 – Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям» (г. Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, 2020); Двадцать девятая Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2020» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2020); X-Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); XXX Международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2022» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2022); Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2023» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России и 3 статьи – в изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus и получен 1 патент на изобретение.

Структура, объем работы и ее основные разделы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Содержание работы изложено на 125 страницах машинописного текста и включает в себя 40 таблиц, 51 рисунок, список литературы из 142 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и научно-практическая значимость темы диссертационного исследования, представлен объект и предмет исследования, сформулирована цель и задачи работы, представлены научная новизна диссертации, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных экспериментальных и расчетных данных, апробация работы и ее краткое содержание.

В первой главе диссертации «Поиск заменителей хладагентов, разрушающих озоновый слой Земли» проведен анализ влияния международных экологических правовых документов на использования хладагентов в холодильном оборудовании. Показано, что подписание Монреальского Протокола о веществах, разрушающих озоновый слой Земли привело к запрету производства хлорфторуглеродных (ХФУ) хладагентов R-11 (фтортрихлорметан) и R-12 (дифтордихлорметан). Показано, что вследствие запрета на производство веществ, разрушающих озоновый слой, его толщина на наиболее уязвимых участках начала увеличиваться, «озоновые дыры» начали затягиваться. Запрет производства хладагентов ХФУ привело к увеличению эмиссии гидрофторуглеродных хладагентов (ГФУ): R-23, R-125, R-227ea, R-134, R-32 и других, которые применялись не только в холодильном оборудовании, а также в установках газового пожаротушения. Оказалось, что хладагенты ГФУ обладают являются парниковыми газами и обладают большим временем жизни в атмосфере, что влияет на показатель глобального потепления (ППП). В связи с тем, что эмиссия данных веществ увеличивалась стремительнее, чем озоноразрушающих веществ (рисунок 1), мировым сообщество было принято внести Кигалийскую поправку к Монреальскому Протоколу, которая накладывает ограничения на производство ГФУ. К настоящему моменту Кигалийская поправка ратифицирована 48 странами, Российская Федерация ратифицировала данную поправку в 2020 году.

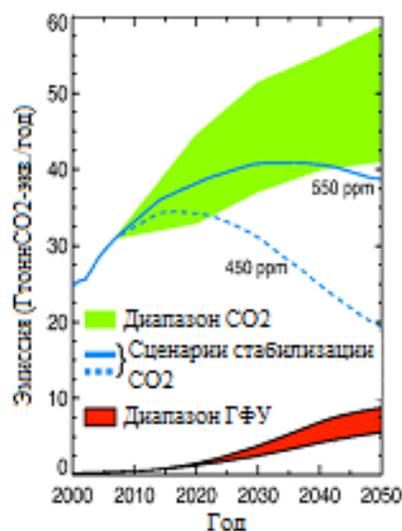


Рисунок 1 – Глобальная эмиссия CO₂ и гидрофторуглеродов в 2000–2050 гг.

Ратификация данной поправки приведет к сокращению производства парниковых хладагентов на 85% к 2036 году.

Исходя из того, что Монреальский протокол ограничил производство и использование ХФУ, а Кигалийская поправка ГФУ, в качестве альтернативных экологически безопасных веществ стали рассматривать предельные углеводороды (пропан, бутан и изобутан) и некоторые гидрофторолефины (ГФО): R-1234yf, R-1243, R-1233zd(E), так как время их жизни в атмосфере не превышает 181 день. Считается, что за это время вещество достигает стратосферы. Однако из приведенных веществ только R-1233zd(E) является негорючим (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики горения современных хладагентов

Хладагент	Нижний концентрационный предел в воздухе, % об.	Верхний концентрационный предел в воздухе % об.	Нормальная скорость горения, см/с	Классификация согласно ANSI/ASHRAE Standard 34-2016
R-290 C ₃ H ₈	2,2	10,0	46,0	3
R-600 C ₄ H ₁₀	2,2	10,0	46,0	3
R-600a C ₄ H ₁₀	1.8	8.4	35,0	3
R-1234yf CH ₂ =CFCF ₃	6,2	12,3	1,5	2L
R-1233zd(E) CF ₃ CH=CHCl	нет	нет	нет	1

Показано, что, несмотря на то, что R-1234yf относится к классу опасности 2L, данный хладагент способен к появлению огненного шара при утечке из холодильного оборудования. На рисунке 2 приведены результаты натуральных огневых испытаний с участием R-1234yf в смеси со смазочным маслом, легко видеть, что, если энергия источника зажигания существенно выше, чем минимальная энергия зажигания, смесь хладагента класса 2L и смазочного

масла может образовывать огненный шар при аварийной утечке из конденсатора автомобильного кондиционера.



Рисунок 2 – Появление огненного шара при аварийной утечке R-1234yf, смешанного со смазочным маслом, в присутствии источника зажигания с высокой энергией

Рассмотрена проблема энергетически сравнимых альтернативных хладагентов. Использование низкокипящих озонобезопасных хладагентов, как пропана или бутана, так и галогензамещенных углеводородов, вместо R-11 ведет к избыточным энергетическим потерям на объектах энергетики, связанных с обращением водяного пара. Соответственно, большинство хладагентов уступает R-11 в энергетической эффективности при их применении на объектах энергетики, в виду низких температур кипения. Предложено использовать в качестве хладагентов близких по термодинамическим свойствам к R-11 хладагенты R-30 и R-150 (дихлорметан и 1,2-дихлорэтан).

Рассмотрено, что основным способом выработки электрической энергии является её производство на тепловых электрических станциях (ТЭС). При этом до 10 % ТЭС использует газотурбинные установки (ГТУ), для эффективной работы которых необходимо охлаждать поступающий в компрессор воздух. Так для охлаждения воздуха используют в том числе парокompрессионные установки охлаждения, где обращаются горючие хладагенты, то, соответственно, увеличивает риск возникновения пожароопасной ситуации на 10 % объектов энергетического комплекса.

Предложено решение проблемы применения пожаро и экологически опасных хладагентов путем создания смесевых композиций горючего хладагента с ингибитором горения. Данный способ позволит сократить использование парниковой компоненты в хладагенте и позволит сделать хладагент негорючим. Для целенаправленного подбора ингибитора горения необходимо разработать кинетический механизм деструкции фторированных хладагентов в пропановом пламени.

Основные выводы по первой главе диссертации:

– правовое регулирование обращения ОРВ на территории Российской Федерации создало не имеющую аналогов в мире ситуацию, когда вопросы обращения озоноразрушающих хладагентов успешно регулируются только

рыночными механизмами и не требуют введения дорогостоящих национальных программ по выводу из обращения ОРВ;

– принятие Монреальского Протокола привела к тому, что толщина озонового слоя на наиболее уязвимых участках начала увеличиваться, «озоновые дыры» начали затягиваться и привела к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу;

– ратификации Российской Федерацией Кигалийской поправки к Монреальскому протоколу приведет к сокращению производства ГФУ для создания хладагентов на 85 % к 2036 году;

– смеси хладагентов класса 1, 2L и 2 со смазочным маслом должны быть более тщательно проверены на их пожаро- и взрывобезопасность;

– использование горючих хладагентов, в том числе пропана, на турбокомпрессорах средней и большой мощности нецелесообразно ввиду необходимости применения большого объема хладагента;

– необходимо снижение пожарной опасности пароконденсационные холодильных установок на объектах энергетики;

– необходимо разработать механизм деструкции фторированных алканов и олефинов в пламени, удовлетворительно описывающий экспериментально наблюдаемую картину их превращения в процессах горения.

Во второй главе диссертации «Расчет времени жизни в атмосфере хлорпроизводных углеводородов и механизма деструкции фторированных хладонов» представлены методика определения времени жизни в атмосфере химических соединений в атмосфере. Проведены расчеты времени жизни в атмосфере по методике Роберта Е. Тэпскотта, который установил, что основными процессами, ответственными за выведение химического соединения из тропосферы, являются реакция с гидроксильными радикалами, фотолиз, вымывание и реакция с тропосферным озоном. Время жизни в атмосфере t может быть представлено в виде выражения:

$$t = \frac{1}{k_{OH} [OH] + \frac{1}{t_{\text{фото}}} + k_e + k_{O_3} [O_3]}, \quad (1)$$

где k_{OH} – константа скорости реакции взаимодействия рассматриваемого соединения с гидроксильными радикалами, $t_{\text{фото}}$ – время снижения концентрации вещества в e раз за счет фотодиссоциации; k_e – константа выведения вещества из атмосферы за счет физических взаимодействий (соответствует времени снижения концентрации вещества в e раз за счет процессов физического выведения вещества из атмосферы); k_{O_3} – константа скорости реакции взаимодействия рассматриваемого соединения с озоном; $[OH]$ и $[O_3]$ – средние концентрации гидроксильных радикалов и озона в

тропосфере.

Исходя из данной методики были рассчитаны времена жизни для перспективных в качестве хладагентов, моно-веществ: R-30 (дихлорметан, CH_2Cl_2) и R-150 (1,2-дихлорэтан, $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$), время жизни которых составляет 11,2 дня для R-30 и 14,3 дня для R-150, таким образом оба вещества являются быстроразрушающимися, так как время их жизни не превышает 181 дня.

Для целенаправленного подбора ингибитора горения была разработана схема кинетического механизма горения ГФУ: R-23, R-227ea и ГФО – R-1234yf в пропановом пламени. Постадийный механизм строился путем сравнения скоростей элементарных реакций с учетом только тех элементарных реакций, кинетические параметры которых известны. Расчет проводился для бедной (мольное соотношение $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ 0,15), богатой (мольное соотношение $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ 0,25) и стехиометрической (мольное соотношение $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ 0,2) смеси пропана с кислородом при атмосферном начальном давлении в диапазоне температур 600 – 1200 К. Используемое в расчетах выражение для константы скорости химической реакции имеет вид:

$$k(T) = A \cdot (T/298)^n \cdot e^{E_a/R \cdot T} \left[\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \right], \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К); T – температура (К), E_a – энергия активации элементарной реакции; A – предэкспоненциальный множитель в выражении константы скорости реакции, молек./($\text{см}^3 \cdot \text{с}$) для реакций второго порядка, молек.²/($\text{см}^6 \cdot \text{с}^2$) для реакций третьего порядка.

В результате расчета механизма деструкции для хладагента R-23 (трифторметана, CF_3H), было получено, что реакция распада CF_3H в пламени пропанкислородной смеси любого состава (бедная, богатая, стехиометрическая) не значима; таким образом, при превращении трифторметана в пламени имеет место не его распад вследствие высокой температуры, а превращение вещества при его взаимодействии с активными атомами и радикалами. В стехиометрической и богатой смесях дальнейшее превращение трифторметана (стадии с участием CF_3 и CF_2) в основном протекают за счет взаимодействия с атомарным водородом, и именно эти стадии ответственны за ингибирование трифторметаном горения пропана в кислороде, которое наблюдается экспериментально. На рисунке 3 представлена схема (для стехиометрической смеси при температуре $T=1000$ К), качественно описывающая всю известную экспериментальную картину, наблюдаемую при горении смесей пропан – кислород – трифторметан при атмосферном начальном давлении.

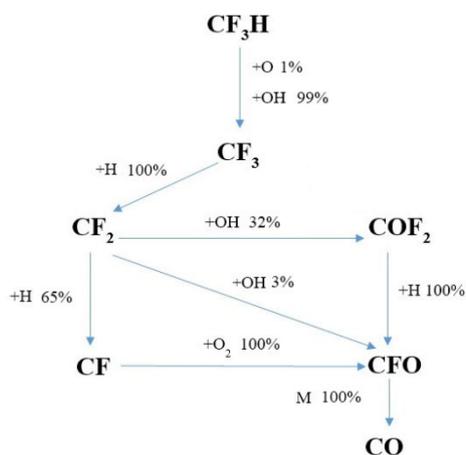


Рисунок 3 – Схема деструкции CF_3H в пламени стехиометрической пропанкислородной смеси, $T = 1000 \text{ K}$

В результате расчета механизма деструкции для хладагента R-227ea (гептафторпропана, $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$), было получено, в отличие от трифторметана, начальная стадия превращения $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ в богатой и стехиометрической смесях – его взаимодействие с атомарным водородом, и первая стадия превращения гептафторметана в пламени богатой и стехиометрической смесях является актом ингибирования реакции горения пропана в кислороде. В отличие от механизма превращения трифторметана в пламени пропанкислородной смеси, определяющую роль в деструкции гептафторпропана играют реакции распада промежуточных веществ (C_3F_7 , C_2F_5 , C_2F_4), большое тепловыделение которых обуславливает экспериментально наблюдаемые особенности самостоятельного горения гептафторпропана в кислороде при атмосферном давлении. На рисунке 4 представлена схема (для стехиометрической смеси при температуре $T=1000 \text{ K}$), качественно описывающая всю известную экспериментальную картину, наблюдаемую при горении смесей пропан – кислород – гептафторпропан при атмосферном начальном давлении.

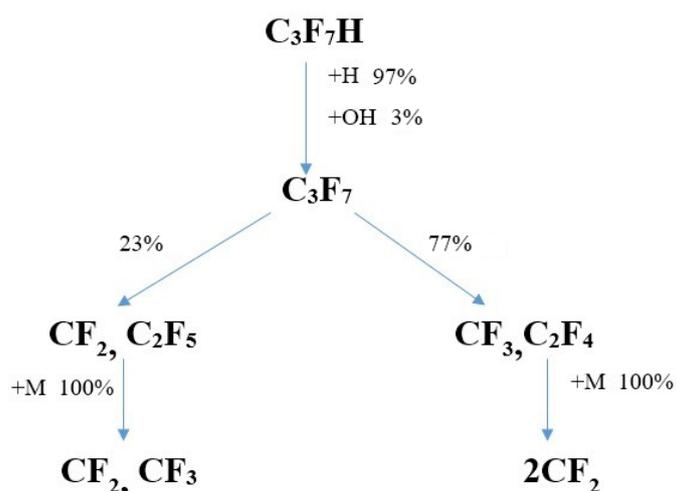


Рисунок 4 – Схема деструкции $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ в пламени стехиометрической пропанкислородной смеси, $T = 1000 \text{ K}$

В результате расчета механизма деструкции для хладагента R-1234yf (тетрафторпропена, $\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$), было получено, что начальная стадия превращения $\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$ в богатой, бедной и стехиометрической смесях – тепловое разложение с

образованием $C_2F_2H_2$. Во второй стадии превращения $C_3F_4H_2$ взаимодействие $C_2F_2H_2$ с радикалом Н незначимо; дифторэтилен преимущественно расходуется при взаимодействии с ОН и О при любом соотношении смеси. Так как основными процессами, определяющими превращение тетрафторпропена в пламени, являются обладающие большим тепловым эффектом реакции мономолекулярного распада и окисления, из полученных результатов расчета следует, что деструкция $C_3F_4H_2$ в пламени сопровождается большим тепловыделением. Подтверждением этого вывода является высокая максимальная адиабатическая температура горения R-1234yf в воздухе, составляющая 2076 К. Так как ответственные за ингибирование газофазного горения реакции с атомарным водородом в схеме деструкции тетрафторпропена в пламени пропан-кислородной смеси незначимы, и при этом превращение $C_3F_4H_2$ происходит со значительным тепловыделением, поддерживающим горение пропана, создание смесевых хладагентов на основе пропана и тетрафторпропена нецелесообразно. На рисунке 5 представлена схема (для стехиометрической описывающая всю известную экспериментальную смеси при температуре $T=1000$ К), качественно картину, наблюдаемую при горении смесей пропан – кислород – тетрафторпропен при атмосферном начальном давлении.

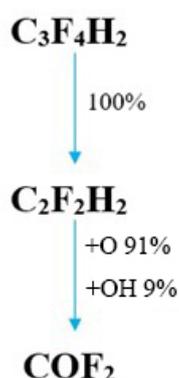


Рисунок 5 – Схема деструкции $C_3F_4H_2$ в пламени стехиометрической пропанкислородной смеси, $T = 1000$ К

Основные выводы по второй главе диссертации:

- основными механизмами выведения из атмосферы хлорсодержащих короткоживущих веществ являются реакция с гидроксильными радикалами и процессы физического выведения из атмосферы;
- оба рассмотренных вещества, R-30 (CH_2Cl_2) и R-150 ($C_2H_4Cl_2$), являются веществами, быстро разрушающимся в тропосфере и удовлетворяющим всем современным экологическим требованиям, предъявляемым к таким продуктам;
- в стехиометрической и богатой смеси механизма деструкции R-23 стадии с участием CF_3 и CF_2 в основном протекают за счет взаимодействия с атомарным водородом, и именно эти стадии ответственны за ингибирование трифторметаном горения пропана в кислороде, которое наблюдается

экспериментально;

– взаимодействие с атомарным водородом, и первая стадия превращения R-227ea в пламени богатой и стехиометрической смесей является актом ингибирования реакции горения пропана в кислороде.

– основными процессами, определяющими превращение R-1234yf ($C_3F_4H_2$) в пламени, являются обладающие большим тепловым эффектом реакции мономолекулярного распада и окисления, исходя из этого создание смесевых хладагентов на основе пропана и тетрафторпропена нецелесообразно.

В третьей главе диссертации «Разработка негорючих смесевых хладагентов с коротким временем жизни в атмосфере» представлены результаты проведенных экспериментальных исследований по созданию смесевых негорючих хладагентов. Эксперименты по созданию смесевых композиций хладагентов проводились на установках «Вариант» и «Предел-2», схема установки «Вариант» приведена на рисунке 6.

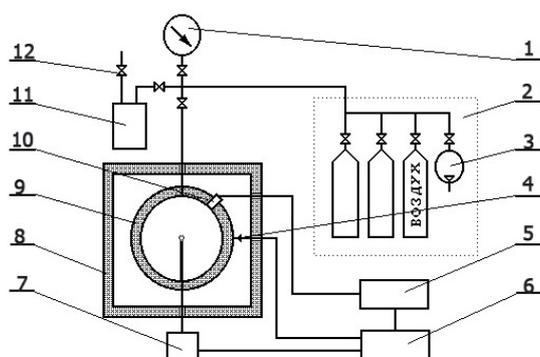


Рисунок 6 – Схема установки «Вариант»

1 – вакуумметр; 2 – система напуска; 3 – вакуумный насос; 4 – термопара;
5 – осциллограф; 6 – пульт управления; 7 – система зажигания; 8 – термостат; 9 – реактор;
10 – датчик давления; 11 – парогенератор; 12 – кран

Установка позволяет определять концентрационные пределы распространения пламени по горючей газовой смеси, максимальное развиваемое при взрыве давление, скорость нарастания давления взрыва, давление в реакционном сосуде после проведения опыта. Испытания на установке «Вариант» проводят при общем начальном давлении газовой смеси до 4 МПа и начальной температуре от комнатной до 523 К. Установка «Предел-2» (рисунок 7) предназначена для определения концентрационных пределов распространения пламени по газо- и паровоздушным смесям при атмосферном давлении и температуре от 15 до 150 °С. Данная установка выбрана для проведения экспериментов с трудногорючими веществами, а также для проверки результатов по концентрационным пределам распространения пламени, полученным в сосудах меньшего диаметра.

В рамках создания негорючих смесей R-290 (пропана) с R-23, 125 и 227ea с помощью установки «Вариант» были получены предельные по горючести смеси, представленные на рисунке 8, так, смесь составом R-290/R-23/воздух

соответствует объемному соотношению компонентов 16/84, или массовому соотношению R-290 (C_3H_8) – 10,7% масс./R-23 (CF_3H) – 89,3% масс.; смесь R-290/R-125/воздух соответствует объемному соотношению компонентов 16/84, или массовому соотношению R-290 (C_3H_8) – 6,5% масс./R-125 (C_2F_5H) – 93,5% масс.; смесь R-290/R-227ea/воздух соответствует объемному соотношению компонентов 27/73, или массовому соотношению R-290 (C_3H_8) – 8,7% масс./R-227ea (C_3F_7H) – 91,3% масс.

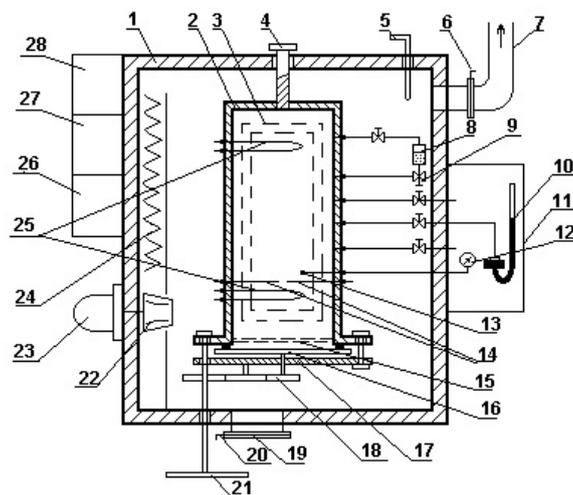


Рисунок 7 – Установка «Предел-2»

1 – термошкаф; 2 – реакционный сосуд; 3 – смотровое окно; 4 – продувочный патрубок; 5 – термоэлектропреобразователь блока регулирования температуры; 6 – задвижка; 7 – вентиляционный патрубок; 8 – испаритель; 9 – вентиль; 10 – ртутный манометр; 11 – пневмопульт; 12 – газовый термометр; 13 – датчик термометра; 14 – электроды источника зажигания; 15 – огнепреградитель; 16 – нижняя крышка; 17 – коромысло; 18 – шестерни; 19 – продувочное отверстие; 20 – заслонка; 21 – штурвал; 22 – вентилятор; 23 – электродвигатель; 24 – электронагреватели; 25 – перемешиватели; 26 – источник зажигания; 27 – электропульт; 28 – блок регулирования температуры

Исходя из полученных на рисунке 8 данных, можно заключить, что в дорогостоящем фторсодержащем хладагенте, обладающим большим потенциалом глобального потепления, можно заменить 6-10 % массы рабочего вещества на дешевый и короткоживущий в атмосфере незамещенный углеводород без потери термодинамической эффективности хладагента.

Из представленных на рисунке 8 данных следует также, что добавление фторированного углеводорода в пропановоздушную смесь вследствие эффекта индуцированного окисления хладагента приводит к снижению нижнего концентрационного предела распространения пламени смеси пропан – воздух. Вследствие этого доля фторсодержащего соединения в предельной негорючей смеси с пропаном оказывается меньше, чем она была бы, если бы нижний концентрационный предел распространения пропановоздушного пламени в присутствии фторированной добавки не изменялся бы.

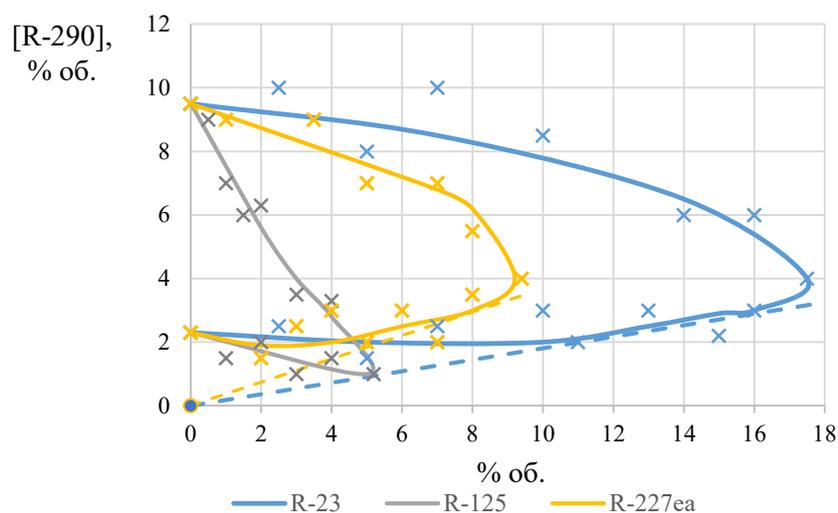


Рисунок 8 – Область распространения пламени в смесях R-290/R-23, R-125, R-227ea/воздух

Были определены показатели пожарной опасности для хладагентов R-365mfc (пентафторбутан, $C_4F_5H_5$) и R-1243 (трифторпропен, $C_3F_3H_3$). Получено, что концентрационные пределы распространения пламени в смеси R-365mfc/воздух составляют 9,5 – 17,5% об., а для смеси R-1243/воздух составляют 2,5 – 14,5% об. По полученным данным максимального давления взрыва были рассчитаны: адиабатическая температура горения $T_{ад}$, максимально нормальная скорость горения S_u и удельная теплота сгорания H_G^0 . По полученным расчетным величинам сделан вывод, что R-365mfc, как хладагент относится к классу A2L, а R-1243, как хладагент относится к классу A2.

Также в рамках создания смесевых хладагентов, были определены предельные по горючести смеси R-365mfc с перспективным в качестве огнетушащего вещества с коротким временем жизни в атмосфере, имеющем формулу C_6F_{12} : (перфтор-2-метилпентена-2 $((CF_3)_2C=CF_2CF_2CF_3$, перфторизогексен с активной двойной связью, в работе применяется обозначение $C_6F_{12}(a)$), а также известного ГОТВ $C_6F_{12}O$ (перфторэтил-изопропилкетон, ФК-5-1-12). Как следует из представленных на рисунке 9 данных, предельная негорючая смесь R-365mfc/ $C_6F_{12}(a)$ имеет соотношение компонентов R-365mfc – 54,2% масс./ $C_6F_{12}(a)$ – 45,8% масс.; предельная негорючая смесь R-365mfc/ФК-5-1-12 имеет соотношение компонентов R-365mfc – 90,4% масс./ФК-5-1-12 – 9,6% масс.

Исходя из полученных данных видно, что, создавая негорючие композиции, можно заменить почти половину массы вещества, являющегося парниковым газом, на короткоживущий агент. При этом: добавление к R-365mfc тяжелого вещества с высокой теплоемкостью оказывает сильное подавляющее воздействие на процесс его горения, особенно если это вещество, помимо высокой теплоемкости, способно химически ингибировать процесс горения за счет взаимодействия с активными центрами, ответственными за его протекание. Эффективность ингибирования горения R-365mfc $C_6F_{12}(a)$ и

ФК-5-1-12 определяется особенностями их термодеструкции в пламени.

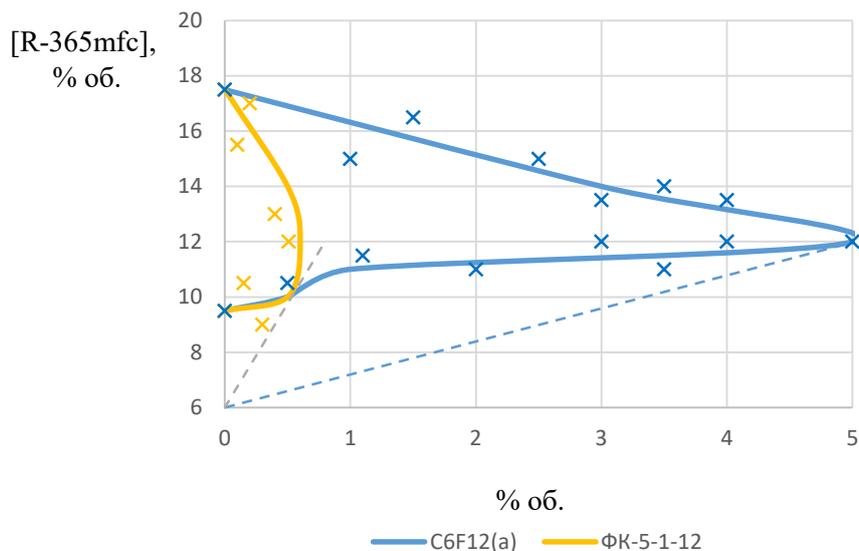


Рисунок 9 – Область распространения пламени смеси R-365mfc/ C₆F₁₂(a), ФК-5-1-12/воздух

На установке «Предел-2» были определены предельные по горючести смеси: R-30 (CH₂Cl₂) и R-150 (C₂H₄Cl₂) с R-125 и R-227ea. Как следует из данных на рисунках 10-11, предельная по горючести смесь R-30/R-125 и R-227ea имеет состав R-30 – 84,1% масс./R-125 – 15,9% масс.; R-30 – 93,0% масс./R-227ea – 7,0 % масс. А предельная по горючести смесь R-150/R-125 и R-227ea имеет состав R-150 – 59,1% масс./R-125 – 40,9% масс. и R-150 – 33,8% масс./R-227ea – 66,2% масс.

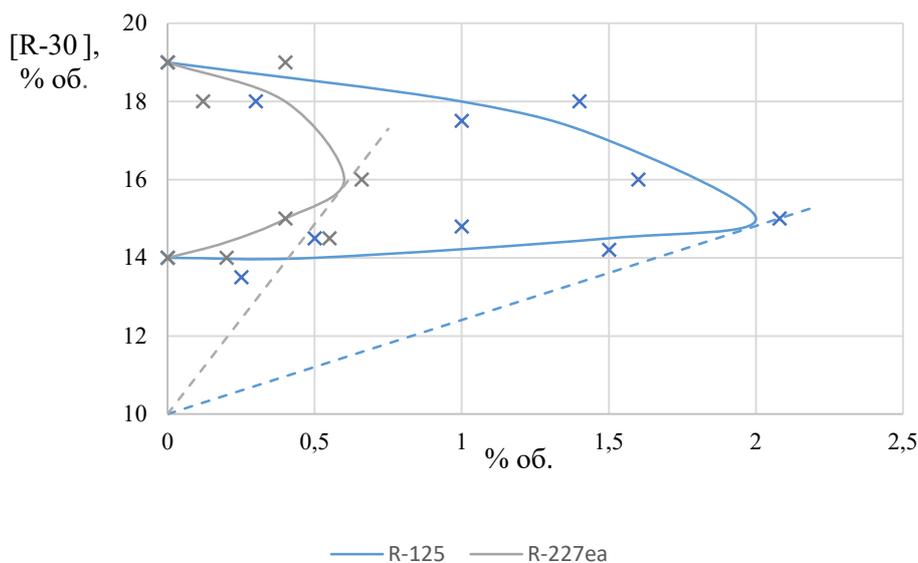


Рисунок 10 – Область распространения пламени смеси R-30/R-125, R-227ea/воздух

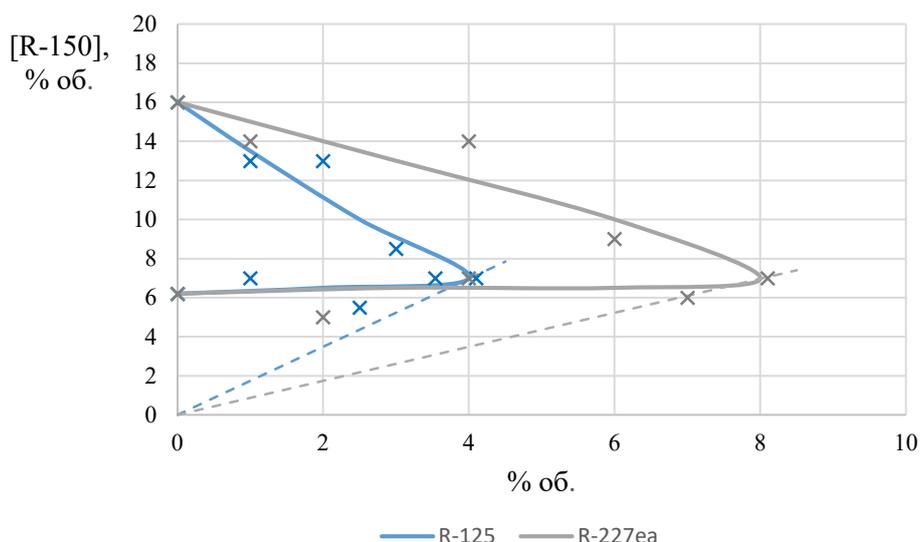


Рисунок 11 – Область распространения пламени смеси R-30/R-125, R-227ea/воздух

Исходя из полученных на рисунках 10,11 данных установлено, что R-30 (CH_2Cl_2) и R-150 ($\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$) оказывают сильное ингибирующее действие на процессы горения, в том числе самих этих веществ в воздухе, причем R-30 значительно эффективнее как ингибитор, чем R-150. R-125 и R-227ea эффективны при подавлении горения R-30 и R-150. Создавая негорючие смеси, в которые входят парниковые хладагенты R-125 и R-227ea с дихлоридами, можно уменьшить содержание парниковой компоненты в смесевом хладагенте на 93 % по массе, что является наилучшим результатом, полученным в данной работе. Эффективность R-125 и R-227ea по отношению к процессу горения дихлоридов в воздухе выше, чем по отношению к горению пропана.

В целях снижения пожарной опасности хладагента R-1234yf на установке «Предел-2» проведена оценка влияния ингибитора горения R-227ea на хладагент R-1234yf. Результаты экспериментов по оценке его воздействия приведены на рисунке 12.

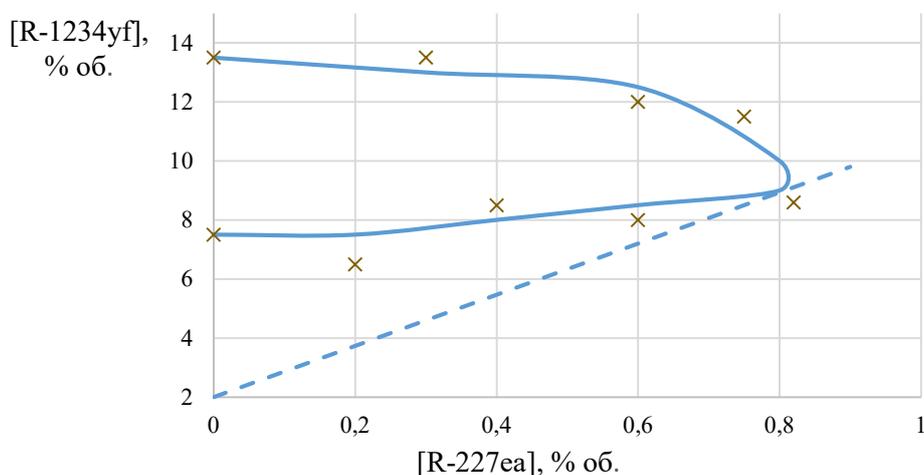


Рисунок 12 – Область распространения пламени смеси R-1234yf/R-227ea/воздух

Предельные негорючие смеси хладагона R-227ea с R-1234yf имеют состав R-1234yf – 88,2% масс./R-227ea – 11,7% масс. соответственно, то есть доля короткоживущего компонента в негорючем смесевом хладагенте оказывается достаточно велика.

Для снижения пожарной опасности хладагента R-1243, на установке «Вариант» проведена оценка влияния ингибиторов горения C₆F₁₂(ц), ФК-5-1-12 и C₃F₇I на хладагент R-1243. Результаты экспериментов по оценке их воздействия приведены на рисунке 13.

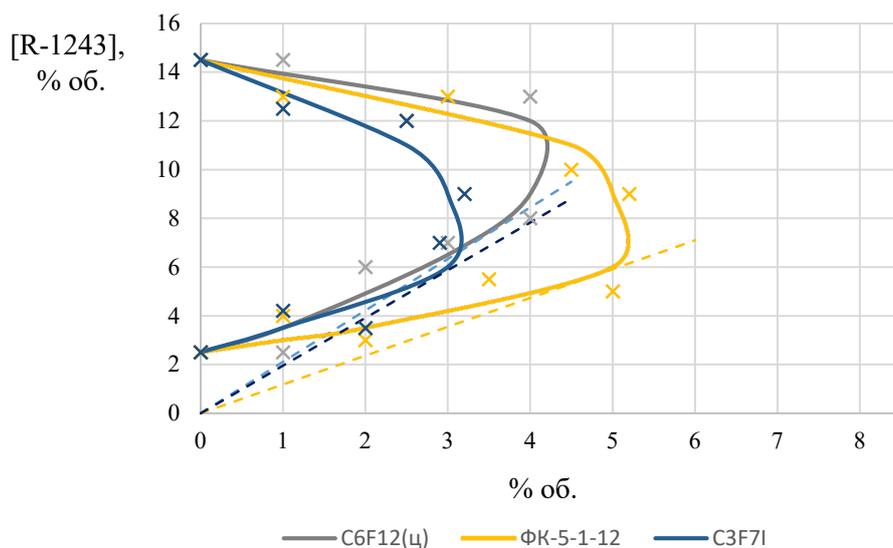


Рисунок 13 – Область распространения пламени смеси R-1243/C₆F₁₂(ц), ФК-5-1-12, C₃F₇I/воздух

Предельная негорючая смесь R-1243/C₆F₁₂(ц) имеет состав R-1243 – 39% масс./C₆F₁₂(ц) – 61% масс.; предельная негорючая смесь R-1243/ФК-5-1-12 имеет состав R-1243 – 26,7% масс./ФК-5-1-12 – 73,3% масс.; предельная по горючести смесь R-1243/C₃F₇I имеет состав R-1243 – 39,3% масс./C₃F₇I – 60,7% масс.

Все рассмотренные ингибиторы эффективны при подавлении горения хладагента R-1243.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Парокомпрессионные холодильные установки, охлаждающие воздух, поступающий в ГТУ, используют пожароопасные и трудногорючие хладагенты, что увеличивает пожарную опасность на объектах энергетики. Трудногорючие вещества могут образовывать взрывоопасные смеси с воздухом в широком диапазоне условий (начальная концентрация, давление, температура, источник возгорания (открытое углеводородное пламя, горячая поверхность)), даже будучи частью негорючей смеси, тем самым знание пределов воспламеняемости и скоростей горения недостаточно для обеспечения пожарной безопасности хладагентов.

2. В результате расчета времени жизни в атмосфере показано, что R-30 и R-150 являются быстроразрушающимися в тропосфере (время жизни не превышает 181 дня), таким образом их возможно применять для создания пожаробезопасных смесевых хладагентов.

3. Разработана схема механизма деструкции фторированных алканов в пропановом пламени, которая позволила установить ответственные реакции за процесс ингибирования пропана в кислороде и целенаправленно подбирать ингибитор горения горючему хладагенту.

4. Определены концентрационные пределы распространения пламени и класс опасности горючих хладагентов R-365mfc и R-1243.

5. Разработан широкий спектр пожаробезопасных смесевых хладагентов с возможностью замены до 93% парникового агента, для применения их на объектах энергетики. Разработка пожаробезопасных смесевых хладагентов позволяет снизить пожарную опасность технологического холодильного оборудования и, по сравнению с горючими хладагентами, приведет к снижению категории по пожарной и взрывопожарной опасности помещений, где установлено холодильное оборудование, тем самым, уменьшая затраты, на обеспечение пожаро-и взрывобезопасности объектов энергетического комплекса.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В научных изданиях, включенных в список ВАК

1. Елтышев, И.П. Особенности развития цепно-теплового взрыва при горении газовых смесей при атмосферном давлении [Текст] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев, Т.В. Губина // Химическая физика. – 2020. – Т. 39. – № 7. – С. 26-31.

2. Елтышев, И.П. Комбинации CH_2Cl_2 и $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ с пропаном и хладагентами 125, 227ea как перспективные негорючие хладагенты [Текст] / И.П. Елтышев // Пожарная безопасность. – 2021. – № 1(102). – С. 54-59.

3. Елтышев, И.П. Пожаровзрывоопасность хладагента R-365mfc и пожаробезопасные смеси на его основе [Текст] / И.П. Елтышев // Пожарная безопасность. – 2022. – № 3(108). – С. 63-69.

4. Елтышев, И.П. Роль радикалов при превращении трифторметана в пламени смесей метана с кислородом [Текст] / С. Н. Копылов, П. С. Копылов, И. П. Елтышев, И. Р. Бегишев // Журнал физической химии. – 2023. – Т. 97. – № 11. – С. 1674-1680.

5. Елтышев, И.П. Влияние состояния поверхности реакционного сосуда на характеристики горения газовых смесей, содержащих галогензамещенный углеводород [Текст] / С. Н. Копылов, П. С. Копылов, И. П. Елтышев, И. Р. Бегишев // Журнал физической химии. – 2023. – Т. 97. – № 8. – С. 1207-1212.

Публикации в международных журналах, индексируемых в базе данных Scopus

6. Елтышев, И.П. Fire Safety of 1, 2 and 21 Refrigerants: Myths and Reality [Электронный ресурс] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Russky Island, 04–06 марта 2019 года. Vol. 272, 2. – Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022064.

7. Елтышев, И.П. Characteristics of the Development of a Chain Thermal Explosion when Burning Gas Mixtures under Atmospheric Pressure / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев, Т.В. Губина // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 14. – No. 4. – P. 587-591. – DOI 10.1134/S1990793120040077. – EDN FRQQCH.

8. Елтышев, И.П. Trifluoromethane Destruction Mechanism in Methane-Oxygen Flame [Электронный ресурс] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Materials Science Forum. – 2023. – Vol. 1086 – pp. 187-192.

Остальные публикации по теме диссертации

9. Елтышев, И.П. О различии в результатах определения концентрационных пределов распространения пламени по ГОСТ 12.1.044 и ASTM E681-09 (2015) [Текст] / П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тезисы докладов XXX Международной научно-практической конференции, Ногинск, 06–08 июня 2018 года. – Ногинск: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2018. – С. 415-416.

10. Елтышев, И.П. Усиление ингибирования распада ацетилена пропаном в присутствии молекулярного кислорода [Текст] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности: Сборник тезисов докладов материалов международной научно-практической конференции, Москва, 18–19 октября 2018 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2018. – С. 823-826.

11. Елтышев, И.П. Ингибирование взрывного распада ацетиленовых углеводородов [Текст] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности, Иваново, 29–30 ноября 2018 года. Том Часть 2. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий». – 2018. – С. 55-58.

12. Елтышев, И.П. Создание негорючих смесевых хладагентов на основе тетрафторпропена [Текст] / П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 июня 2019 года. – Москва: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2019. – С. 190-191.

13. Елтышев, И.П. Использование ингибиторов горения для улучшения экологических характеристик хладагентов [Текст] / П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 июня 2019 года. – Москва: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2019. – С. 192-193.

14. Елтышев, И.П. Особенности начальной стадии деструкции трифторметана в пламени [Текст] / П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 июня 2019 года. – Москва: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2019. – С. 261-263.

15. Елтышев, И.П. Результаты расчёта нормальной скорости распространения пламени трудногорючих веществ [Текст] / П.С. Копылов, С.Н. Копылов, И.Р. Бегишев, И.П. Елтышев // Материалы международной научно-технической конференции "Системы безопасности". – 2019. – № 28. – С. 21-26.

16. Елтышев, И.П. Создание негорючих смесевых хладагентов со сниженной долей парниковых газов в них [Текст] / И.П. Елтышев // Материалы XII научно-практической конференции слушателей и молодых учёных «Экологические проблемы XXI века» – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2020. – С. 22-26.

17. Елтышев, И.П. Влияние международных соглашений на развитие хладагентов, применяемых в качестве хладоносителей [Текст] / И.П. Елтышев // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, 30 ноября 2020 года, г. Железногорск – Изд-во: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – 2020. – 548 с.

18. Елтышев, И.П. Ингибирование взрывного распада ацетиленовых углеводородов [Текст] / С.Н. Копылов, П.С. Копылов, И.П. Елтышев // Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛАПЛАЗ-2020: Сборник научных трудов VI Международной конференции, Москва, 11–14 февраля 2020

года. Том Часть 1. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – 2020. – С. 414-415.

19. Елтышев, И.П. Комбинации дихлорметана и 1,2-дихлорэтана с пропаном и хладагентами 125, 227ea как перспективные негорючие хладагенты [Текст] / И.П. Елтышев, С.Н. Копылов, И.Р. Бегишев // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2020. – № 29. – С. 126-129.

20. Елтышев, И.П. Экологические проблемы создания негорючих смесевых хладагентов [Текст] / И.П. Елтышев, И.Р. Бегишев // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В четырех частях, Москва, 01 марта 2021 года. Том Ч. II. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – С. 215-221.

21. Елтышев, И.П. Пожаровзрывоопасность хладагента ГФО-1243 [Текст] / И.П. Елтышев, И.Р. Бегишев // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2021. – № 10. – С. 108-113.

22. Елтышев, И.П. Перспективные негорючие хладагенты на основе смесей трифторпропена ($C_3F_3H_3$) с перфтор-1,2-диметилциклобутаном ($C_6F_{12}(II)$) [Текст] / И.П. Елтышев, И.Р. Бегишев, С.Н. Копылов, П.С. Копылов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий, Москва, 12–16 мая 2021 года. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – 2021. – С. 330-334.

23. Елтышев, И.П. Пожаровзрывоопасность хладагента R-365mfc [Текст] / И.П. Елтышев, И.Р. Бегишев // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2021. – № 30. – С. 300-303.

24. Елтышев, И.П. Перспективный негорючий смесевой хладагент на основе R-1243 с $C_6F_{12}O$ для применения в энергетике [Текст] / И.П. Елтышев // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2022. – № 11. – С. 132-136.

25. Елтышев, И.П. Механизм деструкции гептафторпропана в пламени смесей метана с кислородом [Текст] / С. Н. Копылов, П. С. Копылов, И. П. Елтышев, И. Р. Бегишев // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву: Тезисы докладов, Суздаль, 04–09 сентября 2022 года. – Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2022. – С. 276-277.

26. Елтышев, И.П. Смесевая композиция хладагента на основе трифторпропена ($C_3F_3H_3$) с гептафторйодпропаном (C_3F_7I) [Текст] / И.П. Елтышев // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы Международной XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, 23–24 августа 2022 года. – Москва: Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства

Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2022. – С. 213-217.

27. Елтышев, И.П. Обеспечение экологической безопасности холодильного оборудования [Текст] / И. П. Елтышев, И. Р. Бегишев // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2023. – № 12. – С. 134-138.

28. Елтышев, И.П. Оценка времени жизни в атмосфере хлорпроизводных углеводородов как перспективных хладагентов [Текст] / И.П. Елтышев, И.Р. Бегишев // Экологические проблемы XXI века: Материалы XV Научно-практической конференции слушателей и молодых ученых, Москва, 25 мая 2023 года / Сост. Т.Г. Грушева [и др.]. Под общей редакцией Т.Г. Грушевой. – Москва: Академия ГПС МЧС России. – 2023. – С. 33-37.

29. Елтышев, И.П. О возможности взрыва при применении экологически безопасных хладагентов в холодильном оборудовании [Текст] / И.П. Елтышев, С.Н. Копылов, Н.В. Голов, И.Р. Бегишев // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 2. – С. 24-29.

Патенты на изобретения и полезные модели РФ:

30. Патент № 2807753 Российская Федерация, МПК С09К 5/04 (2006.01), 5/045 (2023.05). Композиция хладагента: 2022135039: заявл. 28.12.2022: опубл. 21.11.2023 / Елтышев И.П.; заявитель Елтышев И.П. – 6 с.

Подписано в печать 27.06.2024. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 605

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4