

**КАФЕДРА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
АКАДЕМИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ  
МЧС РОССИИ: СЛАВНОЕ ПРОШЛОЕ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ БУДУЩЕЕ**

**Елтышев И.П., Копылов П.С., Первенев Э.Э., Петрилин Д.А.,  
Тетерин И.А., Тимохин В.В., Шангараев Р.Р.**

*Цель.* Изучение и анализ основных направлений научной деятельности кафедры процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности) Академии Государственной противопожарной службы.

*Методы.* В ходе выполнения работы были применены теоретические методы исследования (обзор, описание, анализ).

*Результаты.* В работе приведены основные вехи становления кафедры «Процессы горения и экологической безопасности». Рассмотрены научные достижения, появившиеся благодаря кропотливой работе коллектива кафедры с момента ее создания. Описываются новейшие разработки кафедры в области предотвращения взрыва, снижения рисков возникновения пожара, повышения безопасности техногенной зоны.

*Область применения исследований.* Результаты проведенного анализа показывают новейшие разработки в области обеспечения безопасного применения сжиженного природного газа, создания негорючих хладагентов и новых огнетушащих веществ, снижения угрозы взрыва на объектах различного назначения, изучения пиррофорных коррозионных отложений. Данный обзор может быть полезен исследователям, работающим в схожих областях.

*Ключевые слова:* взрыв, безопасность, хладагенты, огнетушащие вещества, коррозия.

(Поступила в редакцию 15 июля 2022 г.)

**Введение**

Кафедра «Процессы горения» (в настоящее время – кафедра «Процессы горения и экологической безопасности (ПГиЭБ)») в Высшей инженерной пожарно-технической школе МВД СССР (в настоящее время – Академия Государственной противопожарной службы МЧС России) была создана в 1975 г. Это стало возможным в результате понимания руководством учебного заведения и прежде всего его начальником генерал-майором внутренней службы А.Н. Смуровым, что горение – главный, основной процесс на пожаре, подготовку высококвалифицированных инженерных кадров для пожарной охраны страны необходимо вести на базе современных представлений о теории этого сложнейшего явления.

Первым начальником кафедры стал инициатор ее создания доктор технических наук, профессор И.М. Абдурагимов.

На кафедре преподавались две дисциплины «Процессы горения» и «Физико-химические основы развития и тушения пожаров». В первые годы становления кафедры особое внимание уделялось созданию учебно-научной лабораторной базы. Первым начальником лаборатории стал С.И. Зернов.

С 1989 г. на кафедре преподается новая учебная дисциплина «Экология». Большая заслуга в ее становлении и развитии принадлежит доценту Л.К. Исаевой, сейчас доктору технических наук, профессору, заслуженному экологу Российской Федерации.

В настоящее время научную деятельность кафедры можно разделить на следующие направления: обеспечение безопасности применения сжиженного природного газа, созда-

ние негорючих хладагентов, разработка новых огнетушащих веществ, снижение угрозы взрыва на объектах различного назначения, в том числе в жилых многоквартирных домах и транспортных тоннелях, изучение пиррофорных коррозионных отложений.

Данная статья посвящена изучению научной деятельности кафедры ПГиЭБ с момента ее создания. Описаны основные направления научных исследований, проводимых в настоящее время.

### Основная часть

**Краткий обзор развития научной деятельности кафедры.** За время работы кафедры были достигнуты заметные результаты в научной деятельности профессорско-преподавательского состава. Большой вклад в понимание развития пожаров твердых горючих материалов внесен И.М. Абдурагимовым, А.С. Андросовым, Е.В. Крыловым и др. Разработаны и внедрены в практику системы порошково-залпового тушения пожаров фонтанов (УЗТПФ, ППП-200), на которые были получены авторские свидетельства СССР, медали ВДНХ СССР (И.М. Абдурагимов, А.С. Андросов, В.Е. Макаров), в стенах кафедры зарождалась и нашла практический выход в установке «Пурга» идея подачи комбинированной пены (адъюнкт Г.Н. Куприн, И.М. Абдурагимов, В.Е. Макаров), системы подавления взрывов в технологических аппаратах химической промышленности (И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров, А.С. Андросов), разработан и внедрен способ тушения разливов горючих жидкостей на аэродромах (И.М. Абдурагимов, Е.Н. Понимасов, В.Е. Малейкин, Л.К. Исаева, И.Р. Бегишев). Развивались приемы тушения пожаров в квартирах порошковыми огнетушителями (И.М. Абдурагимов, С.А. Бобков, дипломник А.Ф. Недоступ, адъюнкт С.К. Субизаретто) и на их основе в СССР и на Кубе созданы и поставлены в боевые расчеты автомобили быстрого реагирования.

Теоретически обоснована и доведена до практического внедрения экологически чистая, пожаровзрывобезопасная технологическая система нефтепродуктообеспечения на основе жидкого азота (А.С. Андросов).

В 1990-х гг. кафедра принимала активное участие в решении проблемы замены озоноразрушающих веществ. По заказу Российского научного центра «Прикладная химия» на кафедре проводились исследования пожарной опасности смесевых композиций альтернативных хладонов (И.Р. Бегишев, С.А. Бобков, С.Ю. Смирнов, А.К. Беликов, П.В. Комраков, Л.Ю. Тимченко). В эти же годы был проведен большой цикл исследований по воспламенению кислород- и хлорсодержащих горючих смесей под действием УФ-излучения, были установлены новые закономерности и явления.



Рисунок 1. – Экспериментальные установки по исследованию пожарной опасности альтернативных хладонов и фотовоспламенения хлорсодержащих горючих смесей

Созданы научные основы пожаровзрывобезопасности фотохимических производств, разработаны рекомендации для ряда конкретных промышленных технологических процессов. Результаты исследований внедрены на Кирово-Чепецком и Волгоградском химических

заводах (И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, С.Ю. Смирнов, О.Л. Громовенко, П.В. Комраков). Исследовались параметры горения углеводородных газов в искусственной окислительной среде диоксида углерода и кислорода, разработаны рекомендации по созданию экологически безопасной технологии сжигания углеводородных видов топлива (И.Р. Бегишев, А.В. Бабурин).

Сотрудниками, адъюнктами, слушателями кафедры А.Г. Власовым, А.Г. Грачевым, С.В. Легусовым, В.А. Сулименко, С.В. Соловьевым под руководством профессора Л.К. Исаевой в 1990-х гг. начаты и продолжаются в настоящее время исследования по обеспечению экологической и пожарной безопасности полигонов и свалок, жилых зданий, лесов и торфяников, объектов обращения нефти и нефтепродуктов, подземных зданий, сооружений и др. Изучение эколого-экономических последствий загрязнения окружающей среды при пожарах завершилось внедрением в практику методики определения размера вреда, причиненного окружающей среде загрязнением атмосферного воздуха в результате пожаров на территории г. Москвы (Постановление Правительства Москвы от 13 сентября 2005 г. № 689-ПП).

На кафедре проводились исследования условий самовозгорания пиррофорных отложений, образующихся в резервуарах с сернистой нефтью (И.Р. Бегишев, А.С. Андросов, С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков). Разработанные рекомендации использованы при создании новой технологии хранения сернистой нефти, обеспечивающей пожаровзрывобезопасность резервуарного парка.

В рамках ОКР с Минобороны России коллективом кафедры разработана технология тушения пожаров внутри штабеля специзделий на начальной стадии развития пожаров, высокую эффективность которой подтвердили полигонные испытания.

**Современное направление исследований.** Современные технологические процессы на объектах энергетики с участием сжиженного природного газа (СПГ) характеризуются высоким уровнем пожаровзрывоопасности, что подтверждается пожарами, которые происходят в различных странах мира [1]. Наиболее важными параметрами, определяющими уровень пожаровзрывоопасности пролива СПГ, является размер образующейся взрывоопасной зоны, определяемый по достижению нижнего концентрационного предела. В ряде работ рассмотрено поведение СПГ при проливе на различную подстилающую поверхность [2], в том числе на водную [3].

До сих пор не рассмотрены сценарии формирования парогазовоздушного облака при развивающихся пожарах и авариях, когда в зону утечки газа попадают нагретые до значительных температур оборудование, арматура и прочие технологические элементы, а также не учитываются теплофизические свойства подстилающей поверхности [4].

Особенностью аварийных выбросов СПГ является возможность образования паров метана, содержащих мелкодисперсные аэрозольные жидкие капли. Важную роль играют фазовые переходы в образовании аэрозольного облака, которые влияют на температурные параметры. Поэтому детальное изучение формирования аэрозолей при аварийных выбросах с учетом нестандартных условий, свойств парожидкостных облаков, создание математических моделей, адекватно описывающих распространение облака, процесса горения, представляет собой актуальную задачу. Решение данной задачи является важным элементом оценки риска и обеспечения безопасности на объектах энергетики, что позволяет получать более реалистичные результаты при расчете характеристики облаков СПГ и оценке их опасности.

Одной из наиболее типичных аварийных ситуаций на объектах с наличием СПГ является пролив продукта, его растекание и образование взрывоопасного газопаровоздушного облака [1]. Рассмотрим более детально данный случай аварии.

Характер распространения СПГ после разгерметизации зависит от внешних условий. При отсутствии ветра СПГ будет стелиться по поверхности, в дальнейшем, ввиду различных плотностей метана и воздуха, облако поднимется вверх. На формирование облака

и его размер влияют метеоусловия: направление и скорость ветра, температура, давление и влажность воздуха.

При аварийной разгерметизации резервуаров с СПГ может распространяться без воспламенения, с воспламенением в непосредственной близости с резервуаром и на расстоянии. При предварительном длительном нагревании резервуара до его разгерметизации возможен взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости, образование огненного шара.

На формирование облака газозвушной смеси при утечке СПГ влияет целый ряд факторов: неоднородность концентраций, наличие двухфазного компонента, процесс испарения капель в облаке, изменение температурных полей, процесс перемешивания газа с воздухом, наличие водяного пара [5]. Данными процессами можно объяснить появление множества очагов иницирования по всему объему газозвушного облака, что приводит к значительной турбулизации фронта пламени.

Таким образом, исследования в этой области требуют дальнейшего совершенствования и являются актуальными, т.к. процессы формирования взрывопожароопасной зоны при аварийном выбросе в рассмотренных условиях отличаются от существующих рассчитанных моделей.

Особо важным направлением исследований, проводимых кафедрой ПГиЭБ, является создание новых пожаробезопасных хладагентов с коротким временем жизни в атмосфере, в связи с тем что под запрет производства в соответствии с Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой Земли [6], попали широко применяющиеся в холодильной технике хладагенты R-11 ( $\text{CFCl}_3$ ) и R-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ), являющиеся озоноразрушающими веществами. Вещества, пришедшие им на замену, оказались парниковыми газами (R-134a, R-23, R-125, R-227ea), внося свой вклад в укрепление парникового эффекта. Производство данных веществ в соответствии с Кигалийской поправкой к Монреальскому протоколу [7] будет ограничено на 85 % к 2036 г. Дальнейший поиск экологически безопасных хладагентов остановился на предельных и некоторых галогензамещенных углеводородах, таких как пропан – R-290 ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), бутан – R-600 ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), трифторпропен – R-1243 ( $\text{C}_3\text{F}_3\text{H}_3$ ), тетрафторпропен – R-1234yf ( $\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_3$ ). Несмотря на то что данные вещества являются короткоживущими в атмосфере (не являются парниковыми газами), обладают необходимыми термодинамическими параметрами для работы в холодильном оборудовании, они являются горючими веществами и их применение повышает риск возникновения пожара, а также приводит к увеличению затрат на обеспечение пожаровзрывобезопасности установок, в которых они используются.

Данное исследование направлено на решение проблемы горючести хладагентов путем создания пожаробезопасных смесевых композиций с коротким временем жизни в атмосфере. Для создания смесевых хладагентов применяемые в настоящее время горючие хладагенты смешивают с ингибиторами горения. Этот способ позволяет также сократить использование парниковых газов в холодильной технике.

Поставленная задача решалась путем определения концентрационных пределов распространения пламени создаваемых смесей. Серии опытов были проведены на экспериментальном оборудовании (установки «Вариант» и «Предел-2»), соответствующем стандарту<sup>1</sup>. Установки позволяют 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.

Для целенаправленного подбора ингибиторов горения для горючего хладагента, был произведен расчет механизма деструкции фторированных углеводородов в углеводород-

<sup>1</sup> Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). – Введ. 01.01.91. – М.: Стандартинформ, 2006. – 99 с.

ном (пропановом) пламени, который позволит полностью описать экспериментально наблюдаемую картину их превращения в пламени. Благодаря данному механизму был обоснован выбор в качестве ингибиторов горения хладонов 23, 125 и 227ea, а также перспективного огнетушащего вещества  $C_6F_{12}$  и современного огнетушащего вещества ФК-5-1-12 ( $C_6F_{12}O$ ). В работе в целях понимания опасности некоторых хладагентов были определены классы опасности для хладагентов: R-365mfc и R-1243.

Получен широкий спектр смесевых композиций: 1) смеси пропана (R-290) с хладагенами 23, 125, 227ea; 2) смеси R-365mfc с  $C_6F_{12}$ ,  $C_6F_{12}O$ ,  $CF_3I$ ; 3)  $CH_2Cl_2$  и  $C_2H_4Cl_2$  с пропаном (R-290) и хладагенами 125, 227ea; 4) смеси тетрафторпропена (R-1234yf) с хладагенами 125, 227ea.

Полученные результаты позволяют в дорогостоящем фторсодержащем хладагенте, обладающем большим потенциалом глобального потепления, уменьшить содержание парниковой компоненты на 88 % по массе, внося тем самым вклад в решение проблемы глобального потепления, получив при этом негорючий смесевой продукт. Варьированием состава смеси можно также добиться максимальной термодинамической эффективности хладагента применительно к конкретным условиям его использования в холодильном оборудовании.

В настоящее время на кафедре ведутся научные исследования, касающиеся обеспечения взрывобезопасности объектов различного назначения. Особый интерес представляют жилые многоквартирные дома и автотранспортные тоннели. Статистика показывает, что в 2021 г. на территории Российской Федерации газифицировано 72,1 % от общего числа жилых домов<sup>2</sup>. Только в Москве газифицировано 24 088 жилых строений, из которых 19 823 – многоквартирные жилые дома [8].

Чрезвычайные ситуации, связанные со взрывами бытового газа в жилых домах на территории Российской Федерации, – явление довольно частое. Порой эти случаи не только сопровождаются локальным возгоранием, но и приводят к разрушению квартир, обрушению этажей и подъездов жилых зданий.

Таким образом, актуальность исследований, проводимых на кафедре ПГ и ЭБ в данной области, обусловлена аварийными взрывами газовоздушных смесей внутри жилых домов, следствием которых являются человеческие жертвы и большой материальный ущерб (рис. 2), а также отсутствие конструктивных решений, позволяющих снизить ущерб от дефлаграционных взрывов.

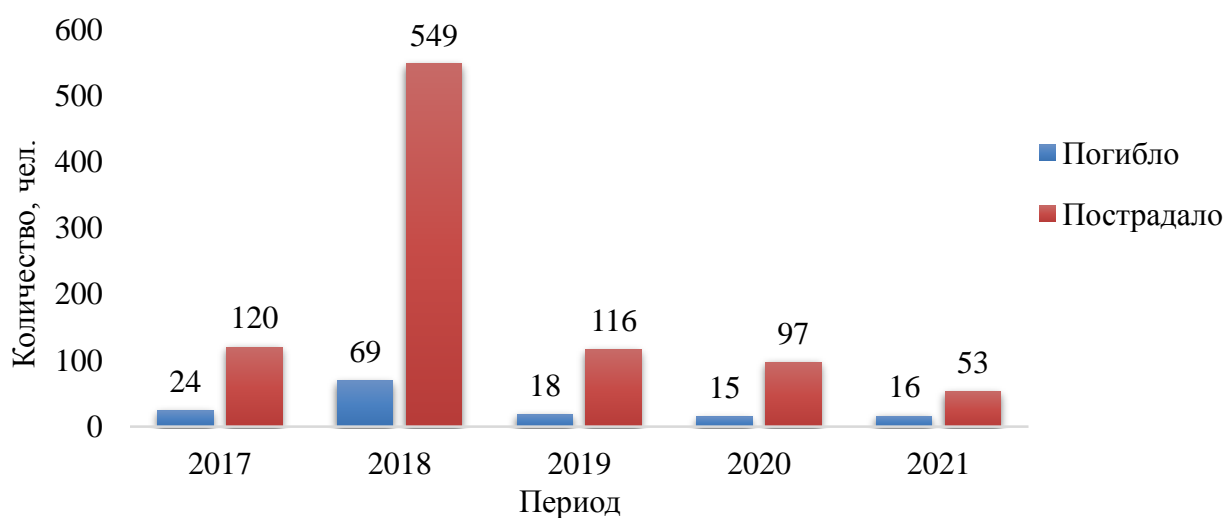


Рисунок 2. – Динамика числа погибших и пострадавших при взрывах в жилых многоквартирных газифицированных домах

<sup>2</sup> Результат реализации программ газификации за период 2005–2020 гг. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/about/production/gas-infrastructure-expansion/>. – Дата доступа: 26.09.2020.

Для того чтобы минимизировать последствия взрывов бытового газа в жилых многоквартирных домах, необходимо определить основные факторы, характеризующие степень тяжести последствий в результате взрыва.

Таким образом, основные направления в работе кафедры по данной проблеме:

– анализ способов обеспечения взрывобезопасности и защиты жилых домов от разрушения при внутреннем дефлаграционном взрыве с выявлением их отличительных особенностей;

– экспериментальное установление динамики изменения параметров взрыва газовой смеси стехиометрического состава в зависимости от параметров предохранительных конструкций;

– получение на основе проведенных экспериментальных исследований параметров конструкций, необходимых для обеспечения взрывоустойчивости жилых многоквартирных домов.

Проблема обеспечения взрывобезопасности транспортных тоннелей возникла с большим развитием тоннелестроения. Например, 24 марта 1999 г. в тоннель под Монбланом на границе Италия–Франция въехал грузовик с 9 т маргарина и 12 т муки, в результате взрыва этого грузовика погибло 39 человек (рис. 3).

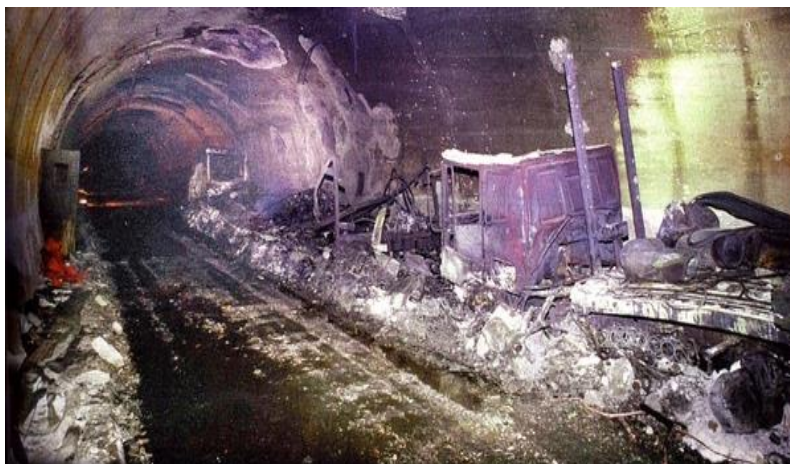


Рисунок 3. – Последствия взрыва грузовика в тоннеле под Монбланом

В последнее время с разработкой новых, прогрессивных технологий строительства тоннелей, увеличением длины сложных транспортных развязок встал вопрос создания надежной системы безопасности, базирующейся на оценке и расчетах критических параметров взрыва углеводородно-воздушных смесей. Пропан-бутановая газовоздушная смесь часто является причиной внутренних аварийных взрывов в тоннелях при эксплуатации личных автотранспортных средств и автотранспортных средств, осуществляющих перевозку углеводородных видов топлива, поскольку она выгодна как с экономической, так и с экологической стороны [9].

Описание модели взрыва в транспортном тоннеле связано с рядом сложностей:

во-первых, трудно определить место аварийной ситуации ввиду постоянного перемещения транспортного средства по дорожной сети, т.е. подразумеваются нестационарные условия;

во-вторых, транспортное средство является источником повышенной опасности, которая может вызывать неконтролируемое воспламенение;

в-третьих, горение низкомолекулярных углеводородных видов топлива при определенных условиях может переходить в детонацию. Например, в транспортных тоннелях аспект турбулизации может существенно изменить характеристики парогазовоздушного облака, протяженность взрывоопасной зоны, концентрационные пределы воспламенения.

Не до конца остается решенным вопрос о механизме порождения турбулентности при горении углеводородновоздушных смесей в протяженных транспортных тоннелях. Поскольку движение газа в среднем радиальное, генерация турбулентности из-за наличия сдвига поля скорости потока играет существенную роль. При этом сдвиг наблюдается не только по горизонтали, но и по всем поверхностям тоннеля, что подтверждается серией экспериментов, специально направленных на прояснение высокого уровня турбулентности.

В качестве дальнейших перспективных исследований в этой области кафедрой ПГиЭБ поставлены следующие задачи: разработать математическую модель развития взрывных явлений в транспортных тоннелях и турбулизации фронта пламени в зависимости от проектных решений для определения критических показателей взрывных процессов; исследовать развитие взрывного давления с учетом конструктивных особенностей протяженных объектов на пути распространения волны, которая сможет применяться для прогнозирования последствий аварийных выбросов углеводородных видов топлива в транспортных тоннелях.

На кафедре продолжается активная работа и в области защиты объектов нефтяного оборудования от коррозии. Необходимость проведения исследований в данной области вызвали пожары, произошедшие в 2000 и 2002 гг. в Самарской области в резервуарном парке Радаевской установки подготовки нефти. Руководством ОАО «Самаранефтегаз» совместно с Академией ГПС МЧС России было принято решение о разработке специальной системы, исключающей возможность самовозгорания пирофорных отложений внутри резервуара. Работа данной системы основана на вытеснении инертным газом окислителя из парогазового пространства вертикального стального резервуара (РВС). На основании анализа, проведенного коллективом кафедры ПГиЭБ, предпочтение было отдано газообразному азоту, получаемому разделением воздуха на мембранной установке [10].

При реализации на практике данного метода была сконструирована мембранная газораспределительная установка, извлекающая азот из воздуха. Установка состоит из двух мембранных блоков (основного и резервного) и двух ресиверов для хранения вырабатываемого азота. Это позволяет обеспечивать резервуары азотом во время максимальных нагрузок. Строительство установки было завершено в конце 2003 г., и с тех пор она функционирует в опытном режиме на Самарском нефтехранилище при постоянном контроле скорости коррозии металла и роста пирофорных отложений [10–12].

Проводились исследования материалов, из которых изготавливаются резервуары. Для этого используются углеродистые и низколегированные стали. Опыты, проводимые в лаборатории кафедры ПГиЭБ, показали, что стойкость данных материалов против локальной и общей коррозии определяется их структурно-фазовым составом. Выявлена связь между наличием в сталях неметаллических включений различного состава и скоростью локальной коррозии [13].

Наиболее распространенный вид стали при изготовлении РВС – сталь марки Ст3. Коллективом кафедры ПГиЭБ проводились регулярные исследования кинетики коррозионного процесса резервуарной стали Ст3 на различных поясах товарных и сырьевых резервуаров с сернистой нефтью и нефтепродуктами, переведенных на эксплуатацию в условиях замены собственной парогазовой фазы на азотную подушку [14].

В дальнейшем научным коллективом кафедры ПГиЭБ были проанализированы результаты 15-летней эксплуатации системы азотной защиты резервуарного парка с сернистой нефтью. Анализ показал, что при азотной защите скорость локальной коррозии внутренней поверхности резервуаров снижается более чем в 100 раз. Также происходит предотвращение дальнейшего образования пирофорных коррозионных отложений [15].

Пирофорные коррозионные отложения – один из основных источников пожаров на резервуарах с нефтью. Наиболее опасно образование пирофорных отложений в РВС для хранения нефти и нефтепродуктов, где их самовозгорание может привести к воспламенению паровоздушной среды и взрыву.

Коллективом кафедры процессов горения и экологической безопасности (ПГиЭБ) проводились исследования пирофорных отложений на поверхности нефтегазового оборудования. Они представляют собой пористые или слоистые образования [16].

Однако способ применения азотной подушки имеет и некоторые недостатки. Высокая стоимость и сложность установки и эксплуатации мембранной газораспределительной установки заставляют задумываться о разработке других способов защиты резервуаров с нефтью и нефтепродуктами.

Широко известен метод защиты РВС от коррозии путем обработки их внутренней поверхности антикоррозионными лакокрасочными покрытиями. Однако современные материалы не обладают требуемой защитной способностью. Поэтому в настоящее время научный коллектив кафедры ПГиЭБ занимается разработкой нового химического состава антикоррозионного лакокрасочного покрытия.

Кафедра принимает активное участие в разработке новых газовых огнетушащих веществ (ГОТВ), не обладающих потенциалом глобального потепления. Работа ведется в двух направлениях: создание принципиально новых короткоживущих ГОТВ и получение высокоэффективных огнетушащих смесей на базе применяемых ГОТВ (хладоны 23, 125, 227ea).

Последнее направление позволяет сократить объемы применения парниковых огнетушащих газов, если смесь эффективнее, чем исходный хладон, а также если добавка в смесь имеет короткое время жизни в атмосфере.

В рамках первого направления проведен расчет времени жизни в атмосфере ряда перспективных веществ. Получено, что время жизни в атмосфере  $\text{CH}_2\text{Br}_2$  составляет 15,8 дня,  $\text{CF}_2\text{Br}_2$  – 226 дней,  $\text{C}_6\text{F}_{12}$  (перфторгексен и его циклическая производная) – 17,4 дня. Таким образом,  $\text{CH}_2\text{Br}_2$  и  $\text{C}_6\text{F}_{12}$  являются веществами, быстро разрушающимися в атмосфере.

Определена огнетушащая концентрация ФОЛ-62, которая составляет 3,5 % об., перфторгексена с активной связью – 3,3 % об., его циклической производной – 3,6 % об. Таким образом, предложены принципиально новые ГОТВ, превосходящие по огнетушащей эффективности ближайший аналог – фторированный кетон ФК 5-1-12, на 18,2–25 % [17].

В целях создания высокоэффективных огнетушащих смесей на базе применяемых ГОТВ с использованием известных кинетических параметров элементарных реакций и значений концентраций активных промежуточных веществ впервые разработан кинетический механизм деструкции в углеводородном пламени фторированных углеводородов – хладона 23 ( $\text{CF}_3\text{H}$ ) и хладона 227ea ( $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ ), позволяющий полностью описать экспериментально наблюдаемую картину их превращения в пламени. На основании разработанного кинетического механизма предложены наиболее эффективные добавки к указанным хладонам, повышающие их огнетушащую эффективность: для хладона 23 –  $\text{CF}_3\text{I}$ , для хладона 227ea –  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ . Экспериментально показано, что, например, для хладона 227ea минимальная огнетушащая концентрация для n-гептана падает с 6,4 до 2,5 % об. (в 2,56 раза) при добавлении всего 5 % масс.  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ .

Также на установке «Цилиндр»<sup>3</sup> проведены исследования огнетушащей эффективности смесей ФК 5-1-12 с  $\text{C}_4\text{F}_5\text{H}_5$ ,  $\text{C}_3\text{F}_3\text{H}_3$ , изомерами перфторгексена, его циклической производной и  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ . Добавки к ФК 5-1-12 снижают его минимальную огнетушащую концентрацию для n-гептана с 4,4 до 3,5–3,7 % об. (в 1,2–1,25 раза) при содержании добавки в смеси с ФК 5-1-12 в количестве 5–20 % масс. Аналогичные эффекты наблюдаются при составлении смесей изомеров перфторгексена, его циклической производной,  $\text{C}_4\text{F}_5\text{H}_5$  и  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$  друг с другом.

<sup>3</sup> Методика определения минимальной огнетушащей концентрации газовых огнетушащих веществ, находящихся при нормальных условиях в жидкой фазе («метод цилиндра»). – М.: ВНИИПО, 2019. – 4 с.



Таким образом, в рамках разработки новых ГОТВ были найдены принципиально новые газовые огнетушащие вещества и создан ряд высокоэффективных огнетушащих смесей на базе ныне применяемых ГОТВ. Полученные данные могут привести к решению проблем, связанных с отсутствием газовых огнетушащих составов, удовлетворяющих современным экологическим требованиям.

### Заключение

Таким образом, с начала своего создания кафедра «Процессы горения и экологической безопасности» занималась одним из самых важных процессов на пожаре – изучением самого горения, без понимания которого не может быть и речи об эффективном тушении. Только с опорой на накопленный за почти полувековое существование кафедры опыт возможно решение задач по обеспечению пожарной безопасности, которые возникают в условиях все более усложняющихся технологий.

На данный момент на кафедре продолжается работа по изучению формирования взрывопожароопасной зоны при аварийном выбросе сжиженного природного газа. Одной из наиболее типичных аварийных ситуаций на объектах с наличием СПГ является пролив продукта, его растекание и образование взрывоопасного газопаровоздушного облака.

Для нужд энергетического комплекса получен широкий спектр пожаробезопасных смесевых композиций хладагентов, отвечающих современным экологическим требованиям: 1) смеси пропана (R-290) с хладагентами 23, 125, 227ea; 2) смеси R-365mfc с  $C_6F_{12}$ ,  $C_6F_{12}O$ ,  $CF_3I$ ; 3)  $CH_2Cl_2$  и  $C_2H_4Cl_2$  с пропаном (R-290) и хладагентами 125, 227ea; 4) смеси тетрафторпропена (R-1234yf) с хладагентами 125, 227ea.

Проводится анализ существующих способов обеспечения взрывобезопасности и защиты жилых домов от разрушения при внутреннем дефлаграционном взрыве с выявлением их отличительных особенностей, ведутся эксперименты по установлению динамики изменения параметров взрыва газозвушной смеси стехиометрического состава в зависимости от параметров предохранительных конструкций с целью получения на их основе параметров конструкций, необходимых для обеспечения взрывоустойчивости жилых многоквартирных домов.

Разрабатывается математическая модель развития взрывных явлений в транспортных тоннелях и турбулизации фронта пламени в зависимости от проектных решений для определения критических показателей взрывных процессов. Исследуется развитие взрывного давления с учетом конструктивных особенностей протяженных объектов на пути распространения волны, которая сможет применяться для прогнозирования последствий аварийных выбросов углеводородных видов топлива в транспортных тоннелях.

Ведется активная работа в области защиты объектов нефтяного оборудования от коррозии. В настоящее время научный коллектив кафедры ПГиЭБ занимается разработкой нового химического состава антикоррозионного лакокрасочного покрытия.

Найдены принципиально новые газовые огнетушащие вещества: перфторгексен (два изомера: ФОЛ-62 (соединение с неактивной двойной связью) и изомер с активной двойной связью), а также циклическая производная перфторгексена. Создан ряд высокоэффективных огнетушащих смесей на базе применяемых ГОТВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалл, В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
2. Шебеко, А.Ю. Численное моделирование распространения паров сжиженного природного газа при проливе на твердую поверхность / А.Ю. Шебеко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 1. – С. 36–41. – DOI: 10.25257/FE.2019.1.36-41. – EDN: AJEVEU.
3. Люгай, Д.В. Обоснование возможных сценариев и оценка последствий утечек сжиженного природного газа при аварийных нарушениях герметичности грузовых емкостей танкеров /

- Д.В. Люгай, В.С. Сафонов // Вести газовой науки: науч.-техн. сб. – 2018. – № 2 (34). – С. 166–176. – EDN: UUXOHY.
4. Сулименко, В. А. Исследование параметров горения сжиженного природного газа / В.А. Сулименко, И.А. Тетерин, Э.Э. Первенов, И.Е. Василенко // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 4 ч. – М.: АГПС МЧС России, 2022. – Ч. 3. – С. 7–12. – EDN: ISDAVO.
  5. Сулименко, В.А. Параметры горения низкомолекулярных углеводородов при наличии водяного пара / В.А. Сулименко, И.А. Тетерин, А.С. Войтенко // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: тезисы докл. I Всеросс науч.-практ. конф., Москва, 30 ноября – 1 декабря 2021 г. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. – С. 104–107.
  6. Монреальский Протокол по веществам, разрушающим озоновый слой Земли [Электронный ресурс] // Ozone Secretariat: ozone.unep.org. – Режим доступа: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>. – Дата доступа: 25.06.2022.
  7. The Kigali Amendment (2016): The amendment to the Montreal Protocol agreed by the Twenty-Eighth Meeting of the Parties (Kigali, 10–15 October 2016) [Electronic resource] // Ozone Secretariat: ozone.unep.org. – Mode of access: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/amendments/kigali-amendment-2016-amendment-montreal-protocol-agreed>. – Date of access: 25.06.2022.
  8. Годовой отчет акционерного общества «МОСГАЗ» за 2020 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.mos-gaz.ru/upload/dynamic/2021-07/29/MOSGAZ\\_otchet\\_2020\\_int-007fe5c2.pdf](https://www.mos-gaz.ru/upload/dynamic/2021-07/29/MOSGAZ_otchet_2020_int-007fe5c2.pdf). – Дата доступа: 25.06.2022.
  9. Хуснутдинов, Д.З. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере: монография / Д.З. Хуснутдинов [и др.]. – М-во образования и науки Росс. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. – М.: МГСУ, 2014. – 80 с. – EDN: SNTDGP.
  10. Крикунов, А.А. Об обеспечении пожарной и экологической безопасности резервуарных парков с сернистой нефтью / А.А. Крикунов [и др.] // Технические газы. – 2012. – № 1. – С. 62–67. – EDN: SJKMPP.
  11. Способ предотвращения образования пирофорных отложений из серосодержащих нефтепродуктов: пат. RU 2253698 / Л.А. Нисельсон, Ю.А. Бейлин, И.И. Бегишев, Л.И. Филимонов, А.С. Андросов, И.И. Реформатская, А.Б. Ленский, А.К. Раптанов. – Опубл. 10.06.2005.
  12. Бейлин, Ю.А. Коррозионные пирофорные отложения как промоторы самовозгорания резервуаров с сернистой нефтью / Ю.А. Бейлин [и др.] // Защита металлов. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 290–295. – EDN: IAGQIB.
  13. Реформатская, И.И. Роль неметаллических включений и микроструктуры в процессе локальной коррозии углеродистых и низколегированных сталей / И.И. Реформатская [и др.] // Защита металлов. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 498–504. – EDN: OVYDJN.
  14. Шишканов, Б.А. Кинетические закономерности коррозионных процессов на внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью / Б.А. Шишканов, И.Р. Бегишев, И.И. Реформатская // Материалы 15-й научно-технической конференции «Системы безопасности» – СБ-2006 Международного форума информатизации, 26 октября 2006 г., Москва. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. – С. 178–180.
  15. Реформатская, И.И. Противокоррозионная защита внутренней поверхности резервуаров с сернистой нефтью как способ предотвращения их самовозгорания / И.И. Реформатская, И.Р. Бегишев, И.И. Ащеулова // Актуальные вопросы электрохимии, экологии и защиты от коррозии: материалы Международной конференции, посвященной памяти профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ В.И. Вигдоровича, Тамбов, 23–25 октября 2019 г. – Тамбов: ТГТУ, 2019. – С. 84–88.
  16. Заседателева, Н.А. Образование пожароопасных пирофорных отложений при коррозии стали в сероводородной газовой среде / Н.А. Заседателева, И.И. Реформатская, А.Н. Подобаев, И.Р. Бегишев // Материалы 14-й научно-технической конференции «Системы безопасности» – СБ-2005 Международного форума информатизации, 27–28 октября 2005 г., Москва. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – С. 194–196.
  17. Копылов, П.С. Огнетушащая эффективность перфторизогексенов / П.С. Копылов // Пожарная безопасность, 2021. – № 1. – С. 47–53. – DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.67.54.005. – EDN: HSRDNA.

**Кафедра процессов горения и экологической безопасности  
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России:  
славное прошлое – перспективное будущее**

**Chair of combustion processes and environmental safety of the Academy of State  
Fire Service of EMERCOM of Russia: a glorious past – a promising future**

***Елтышев Илья Павлович***

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: [ilin-007@mail.ru](mailto:ilin-007@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-4956-8441

***Ilya P. Eltyshev***

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: [ilin-007@mail.ru](mailto:ilin-007@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-4956-8441

***Копылов Павел Сергеевич***

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: [pskopylov@mail.ru](mailto:pskopylov@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-3829-0512

***Pavel S. Kopylov***

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: [pskopylov@mail.ru](mailto:pskopylov@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-3829-0512

***Первенев Эдуард Эрднеевич***

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: [pervenove@mail.ru](mailto:pervenove@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-2344-0135

***Eduard E. Pervenov***

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: [pervenove@mail.ru](mailto:pervenove@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-2344-0135

***Петрилин Дмитрий Андреевич***

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: [petrilind@mail.ru](mailto:petrilind@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-8482-3703

***Dmitry A. Petrilin***

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: [petrilind@mail.ru](mailto:petrilind@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-8482-3703

***Тетерин Иван Александрович***

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: [ivan\\_teterin3@mail.ru](mailto:ivan_teterin3@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-5469-1383

***Ivan A. Teterin***

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: [ivan\\_teterin3@mail.ru](mailto:ivan_teterin3@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-5469-1383

**Тимохин Василий Вячеславович**

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: private006672@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0182-9139

**Vasiliy V. Timokhin**

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: private006672@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0182-9139

**Шангараев Рустам Рашитович**

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, факультет подготовки научно-педагогических кадров, адъюнкт

Адрес: ул. Бориса Галушкина, 4,  
129366, г. Москва, Россия

Email: robson-rus7@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4300-8366

**Rustam R. Shangaraev**

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, adjunct

Address: Borisa Galushkina str., 4,  
129366, Moscow, Russia

Email: robson-rus7@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4300-8366

**CHAIR OF COMBUSTION PROCESSES AND ENVIRONMENTAL SAFETY  
OF THE ACADEMY OF THE STATE FIRE SERVICE OF EMERCOM OF RUSSIA:  
A GLORIOUS PAST – A PROMISING FUTURE**

**Eltyshev I.P., Kopylov P.S., Pervenov E.E., Petrilin D.A.,  
Teterin I.A., Timokhin V.V., Shangaraev R.R.**

*Purpose.* The purpose of this work is to study and analyze the main areas of scientific activity of the Chair of Combustion Processes and Environmental Safety (as a part of the scientific research complex of Combustion Processes and Environmental Safety) of the State Fire Academy of EMERCOM of Russia.

*Methods.* In the process of the work, theoretical research methods (review, description, analysis) were applied.

*Findings.* The paper presents the main stages of the formation of the department of «Combustion Processes and environmental safety». The scientific achievements that have appeared due to the laborious work of the department's staff since its creation are considered. The latest developments of the department in the field of explosion prevention, fire risk reduction, and safety increasing of the technogenic zone are described.

*Application field of research.* The results of the analysis show the latest developments in the field of ensuring the safe use of liquefied natural gas, the creation of non-flammable refrigerants and new extinguishing agents, reducing the threat of explosion at various facilities, the study of pyrophoric corrosive deposits. This review may be useful to researchers working in similar fields.

*Keywords:* explosion, safety, refrigerants, fire extinguishing agents, corrosion.

(The date of submitting: July 15, 2022)

**REFERENCES**

1. Marshall V.C. *Major chemical hazards*: transl. from English. Moscow: Mir, 1989. 672 p. (rus)
2. Shebeko A.Yu. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya parov szhizhennogo prirodnogo gaza pri prolive na tverduyu poverkhnost' [Numerical modeling of liquefied natural gas vapor spread when spilt on a hard surface]. *Fires and emergencies: prevention, elimination*, 2019. No. 1. Pp. 36-41. (rus). DOI: 10.25257/FE.2019.1.36-41. EDN: AJEBEU.
3. Lugai D.V., Safonov V.S. Obosnovanie vozmozhnykh stsenariiev i otsenka posledstviy utechek szhizhennogo prirodnogo gaza pri avariynykh narusheniyakh germetichnosti gruzovykh emkostey tankerov [Substantiation of possible scenarios and assessment of liquefied natural gas spillage after-effects at accidental tightness violation of tanker cargo reservoirs]. *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific and technical papers*, 2018. No. 2 (34). Pp. 166–176. (rus). EDN: UUXOXY.
4. Sulimenko V.A., Teterin I.A., Pervenov E.E., Vasilenko I.E. Issledovanie parametrov goreniya szhizhennogo prirodnogo gaza [Investigation of the combustion parameters of liquefied natural gas]. *Proc. VI Intern. scientific-practical conf. dedicated to World Civil Defense Day «Civil defense on the guard of peace and security»*. In 4 parts. Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2022. Part 3. Pp. 7–12. (rus). EDN: ISDAVO.
5. Sulimenko V.A., Teterin I.A., Voytenko A.S. Parametry goreniya nizkomolekulyarnykh uglevodородov pri nalichii vodyanogo para [Combustion processes parameters of low molecular weight hydrocarbons in the presence of water vapor]. *Proc. VI All-Russian scientific-practical conf. «Liquefied natural gas: problems and prospects»*, Moscow, November 30 – December 1, 2021. Moscow: National University of Oil and Gas «Gubkin University», 2021. Pp. 104–107. (rus)
6. The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Available at: <http://ozone.unep.org/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer/32506> (accessed: June 25, 2022).
7. The Kigali Amendment (2016): The amendment to the Montreal Protocol agreed by the Twenty-Eighth Meeting of the Parties (Kigali, 10–15 October 2016). Available at: <http://ozone.unep.org/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer/81853/2197> (accessed: June 28, 2022).
8. Annual Report of Joint Stock Company «MOSGAZ» for 2020. Available at: [https://www.mos-gaz.ru/upload/dynamic/2021-07/29/MOSGAZ\\_otchet\\_2020\\_int-007fe5c2.pdf](https://www.mos-gaz.ru/upload/dynamic/2021-07/29/MOSGAZ_otchet_2020_int-007fe5c2.pdf) (accessed: June 25, 2022). (rus)

9. Khusnutdinov D.Z., Mishuev A.V., Kazennov V.V., Komarov A.A., Gromov N.V. *Avariynye vzryvy gazovozdushnykh smesey v atmosphere [Emergency explosions of gas-air mixtures in the atmosphere]*: monograph. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2014. 80 p. (rus). EDN: SNTDGP.
10. Krikunov A.A., Lensky A.B., Begishev I.R., Androsov A.S., Reformatskaya I.I., Shishkanov B.A. Ob obespechenii pozharnoy i ekologicheskoy bezopasnosti rezervuarnykh parkov s sernistoy neft'yu [On ensuring fire and environmental safety of tank farms with sulfuric oil]. *Industrial Gases*, 2012. No. 1. Pp. 62–67. (rus). EDN: SJKMPP.
11. Nisel'son L.A., Beilin Yu.A., Begishev I.I., Filimonov L.I., Androsov A.S., Reformatskaya I.I., Lensky A.B., Raptanov A.K. *Sposob predotvrashcheniya obrazovaniya pirofornykh otlozheniy iz serosoderzhashchikh nefteproduktov [Method of preventing the formation of pyrophoric deposits from sulfur-containing petroleum products]*: patent RU 2253698. Published June 10, 2005. (rus)
12. Beilin Yu.A., Nisel'son L.A., Begishev I.R., Filimonov L.I., Podobaev A.N., Ascheulova I.I., Reformatskaya I.I. [Corrosive pyrophoric deposits as promoters of spontaneous combustion of tanks with sulfurous oil]. *Protection of metals*, 2007. Vol. 43, No. 3. Pp. 290–295. (rus). EDN: IAGQIB.
13. Reformatskaya I.I., Rodionova I.G., Podobaev A.N., Beilin Yu.A., Nisel'son L.A., Begishev I.R. The role of nonmetallic inclusions and microstructures in the process of local corrosion of carbon and low-alloy steels. *Protection of metals*, 2004. Vol. 40. No. 5. Pp. 447–452. DOI: 10.1023/B:PROM.0000043062.19272.c5. EDN: LINGJH.
14. Shishkanov B.A., Begishev I.R., Reformatskaya I.I. Kineticheskie zakonomernosti korrozionnykh protsessov na vnutrenney poverkhnosti rezervuarov s sernistoy neft'yu [Kinetic patterns of corrosion processes on the inner surface of tanks with sulfurous oil]. *Proc. 15th scientific-technical conf. «Safety systems» – SS-2006 of International informatization forum, October 26, 2006, Moscow*. Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2006. Pp. 178–180. (rus)
15. Reformatskaya I.I., Begishev I.R., Ascheulova I.I. Protivokorroziyonnaya zashchita vnutrenney poverkhnosti rezervuarov s sernistoy neft'yu kak sposob predotvrashcheniya ikh samovozgoraniya [Anti-corrosive protection of the inner surface of tanks with sulfurous oil as a way to prevent their spontaneous combustion]. *Proc. Intern. scientific-technical conf. dedicated to the memory of Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation V.I. Vigdorovich «Topical issues of electrochemistry, ecology and corrosion protection», Tambov, October 23–25, 2019. Moscow*. Tambov: Tambov State Technical University, 2019. Pp. 84–88. (rus)
16. Zasedateleva N.A., Reformatskaya I.I., Podobaev A.N., Begishev I.R. Obrazovanie pozharoopasnykh pirofornykh otlozheniy pri korrozii stali v serovodorodnoy gazovoy srede [Formation of fire-hazardous pyrophoric deposits during corrosion of steel in a hydrogen sulfide gas environment] *Proc. 14th scientific-technical conf. «Safety systems» – SS-2006 of International informatization forum, October 27–28, 2005, Moscow*. Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2005. Pp. 194–196. (rus)
17. Kopylov P.S. Ognetchashchaya effektivnost' perflorizogeksenov [Fire extinguishing efficiency of perfluoro-isohexenes]. *Fire safety*, 2021. No. 1 (102). Pp. 47–53. (rus). DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.67.54.005. EDN: HSRDNA.