

УДК 614.849

***НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ
ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
УСТАНОВОК С ГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ И ЖИДКОСТЯМИ***

Аксенов С.Г.

*д-р э.н., профессор,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Бикбулатов А.А.

*студент,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Аннотация. В статье рассмотрены актуальные вопросы развития научных основ и совершенствования методов обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования, работающего с горючими газами и жидкостями. Проанализированы современные подходы к оценке рисков аварийных ситуаций, включая методы математического моделирования процессов истечения, испарения и воспламенения горючих сред. Особое внимание уделено инженерным методам расчета критических параметров взрывозащиты, таким как предельно допустимые концентрации, минимальная энергия зажигания и безопасные разрывы.

Ключевые слова: пожаровзрывобезопасность, горючие газы, горючие жидкости, технологическое оборудование, взрывозащита.

***SCIENTIFIC FOUNDATIONS AND PRACTICAL METHODS FOR
IMPROVING THE RELIABILITY OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY
SYSTEMS DURING THE OPERATION OF INSTALLATIONS WITH
FLAMMABLE GASES AND LIQUIDS***

Aksyonov S.G.

*Doctor of Economics, Professor,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Bikbulatov A.A.

*Student,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation*

Abstract. This article examines current issues in the development of scientific foundations and improvement of methods for ensuring fire and explosion safety of process equipment handling flammable gases and liquids. Modern approaches to assessing the risks of emergency situations are analyzed, including methods for mathematical modeling of the flow, evaporation, and ignition of flammable media. Particular attention is paid to engineering methods for calculating critical explosion protection parameters, such as maximum permissible concentrations, minimum ignition energy, and safe ruptures.

Keywords: fire and explosion safety, flammable gases, flammable liquids, process equipment, explosion protection.

Развитие научных основ обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования с горючими газами и жидкостями является критически важной задачей в связи с высокой аварийностью объектов нефтегазового, химического и нефтехимического комплексов. Анализ статистических данных показывает, что доля аварий, связанных с утечками горючих сред и последующими взрывами, составляет около 60% от всех инцидентов на опасных производственных объектах. Основными причинами остаются износ оборудования, человеческий фактор и недостаточная

эффективность существующих систем защиты. Научные исследования в этой области направлены на создание физико-химических моделей процессов возникновения и развития взрывов, что позволяет перейти от эмпирических методов к прогнозированию с высокой точностью. Важнейшим достижением последних лет стало применение вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования распространения газовых облаков в ограниченном и открытом пространстве, а также оценка параметров ударной волны при детонации. Такие модели учитывают турбулентность, взаимодействие с преградами и влияние вентиляции, что значительно повышает достоверность расчетов безопасных расстояний и зон поражения [1,2].

Современные методы обеспечения пожаровзрывобезопасности базируются на концепции предотвращения образования горючей среды и исключения источников зажигания. Для горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей критически важным параметром является нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), который зависит от температуры, давления и компонентного состава. Разработаны новые аналитические зависимости для расчета НКПР бинарных и многокомпонентных смесей, что особенно актуально при аварийных выбросах на установках переработки углеводородов. Одновременно совершенствуются методы оценки эффективности вентиляции, включая использование анемометрических сеток и численное моделирование воздушных потоков. Практическим результатом стало внедрение систем активного газоконтроля с порогами срабатывания на уровне 20% от НКПР, что позволяет заблаговременно принимать меры по локализации утечек. Однако такие системы требуют регулярной калибровки и устойчивости к ложным срабатываниям в условиях агрессивных сред [4].

Значительный прогресс достигнут в области пассивных методов взрывозащиты, в частности использовании огнепреградителей и разрывных

мембран. Научные исследования механизмов гашения пламени в узких каналах позволили создать огнепреградители нового поколения с увеличенной площадью проходного сечения и низким гидравлическим сопротивлением. Критерий эффективности основан на соотношении диаметра канала к длине, при котором происходит отвод тепла от фронта пламени ниже критической температуры. Экспериментально подтверждено, что для смесей водорода с воздухом требуются зазоры не более 0,5 мм, тогда как для метана – до 1,5 мм. Развитие методов лазерной обработки материалов позволило изготавливать высокоточные щелевые и сетчатые огнепреградители из нержавеющей сталей и сплавов, устойчивых к коррозии и циклическим нагрузкам. Кроме того, активно внедряются быстродействующие отсекающие клапаны с пиротехническими или пневматическими приводами, время срабатывания которых составляет менее 50 миллисекунд – этого достаточно, чтобы остановить поток газа до развития взрывного горения.

Совершенствование методов расчета пожаровзрывобезопасности технологического оборудования немислимо без учета особенностей реальных аварийных ситуаций, таких как утечки из фланцевых соединений, сальниковых уплотнений насосов и зон коррозионного растрескивания. Предложен новый подход, основанный на комбинировании детерминистических и вероятностных методов оценки риска. Например, для оценки частоты разгерметизации используется база данных OREDA (Offshore Reliability Data), дополненная корректирующими коэффициентами для конкретных условий эксплуатации. При моделировании истечения газов и жидкостей применяются уравнения изоэнтропийного и двухфазного течения, а для расчета площади разлива и скорости испарения – модели утечек из отверстий различной формы. Особое внимание уделяется учету влияния ветра, температуры поверхности и свойств подстилающей поверхности на интенсивность испарения, что позволяет корректно определить размеры

взрывоопасной зоны. Численное моделирование таких процессов стало обязательным этапом при проектировании новых производств, особенно в стесненных условиях действующих предприятий [6].

Важнейшим направлением совершенствования методов обеспечения пожаровзрывобезопасности является разработка и внедрение систем предупреждения взрывов на основе активного подавления. В отличие от пассивной защиты, такие системы включают датчики давления и пламени, быстродействующий блок управления и подающие устройства с огнетушащим составом. Принцип действия основан на обнаружении начальной стадии взрыва (нарастание давления от 0,1 до 0,5 бар) и впрыске аэрозольного или порошкового ингибитора в защищаемый объем в течение 10-30 миллисекунд. Научными исследованиями установлено, что эффективность подавления взрыва горючих газов достигается при концентрации ингибитора 100-200 г/м³, причем для водорода требуются более высокие значения из-за его высокой реакционной способности. Разработаны математические модели, описывающие кинетику взаимодействия ингибитора с радикалами в пламени, что позволило оптимизировать состав порошков (например, на основе бикарбоната натрия с добавками карбонатов калия). Промышленные испытания показали, что такие системы способны ограничить избыточное давление при взрыве метановоздушной смеси до 0,3 бар, что значительно ниже разрушающего для большинства технологических аппаратов [2,4].

Нормативно-правовая база в области обеспечения пожаровзрывобезопасности также требует постоянного совершенствования с учетом научно-технического прогресса. Действующие в Российской Федерации своды правил (например, СП 12.13130.2009) и отраслевые нормы во многом основаны на детерминированных подходах, зачастую не учитывающих специфику конкретного оборудования и реальные сценарии аварий. Гармонизация с международными стандартами, такими как IEC 60079

(взрывозащита электрооборудования), ISO 16852 (огнепреградители) и NFPA 69 (системы предотвращения взрывов), позволила бы внедрить риск-ориентированные методы. Перспективным является внедрение методологии LOPA (Layer of Protection Analysis), которая количественно оценивает достаточность независимых уровней защиты. Для технологического оборудования с горючими газами и жидкостями рекомендуется проводить анализ опасностей и работоспособности (HAZOP) на всех стадиях жизненного цикла – от проектирования до вывода из эксплуатации. Требуется также пересмотр нормативных требований к расстояниям между оборудованием, заменяя унифицированные разрывы расчетами на основе CFD-моделирования последствий аварий [3].

Особую проблему представляют технологические процессы, протекающие при повышенных температурах и давлениях, в которых горючие газы и жидкости находятся в докритическом или сверхкритическом состоянии. При разгерметизации таких аппаратов происходит бурное парообразование с образованием двухфазного факела, что значительно усложняет прогнозирование размеров взрывоопасных зон. Научные исследования в этой области привели к созданию модифицированных моделей истечения, учитывающих эффект Джоуля-Томсона и конденсацию паров. Экспериментально установлено, что для сжиженных углеводородных газов (пропан, бутан) скорость испарения на начальном этапе может достигать 200-300 кг/(м²·с), что требует установки дополнительных средств локализации – водяных завес и аварийных емкостей. Разработаны критерии применения систем аварийного сброса давления с использованием предохранительных клапанов и разрывных мембран, причем пропускная способность таких устройств рассчитывается исходя из максимальной производительности источника выброса. Внедрение систем автоматического управления технологическим процессом с обратной связью по давлению и температуре

также является эффективной мерой, предотвращающей достижение опасных режимов [3].

Немаловажным аспектом является человеческий фактор, который, по данным исследований аварий, становится причиной или способствующим условием более чем в 50% случаев взрывов на технологическом оборудовании. Развитие научных основ эргономики и когнитивной психологии применительно к операторскому персоналу позволило разработать методики снижения риска ошибочных действий. К ним относятся улучшение интерфейсов систем управления (цветовое кодирование, мнемосхемы, приоритизация алармов), внедрение системы блокировок и взаимозависимых действий, а также регулярные тренажи на полномасштабных симуляторах. Совершенствование методов обучения с использованием виртуальной реальности (VR) позволяет моделировать аварийные ситуации без реальной опасности и вырабатывать у персонала правильные алгоритмы поведения. Однако технические меры остаются приоритетными, поскольку человек не может соревноваться в быстродействии с автоматикой, особенно в критических фазах развития взрыва – от первых миллисекунд до нескольких секунд [5].

В области совершенствования методов диагностики и мониторинга состояния технологического оборудования активно применяются неразрушающие методы контроля, такие как акустическая эмиссия, тепловизионный контроль и лазерная спектроскопия. Эти методы позволяют выявлять дефекты на ранней стадии – коррозионные поражения, трещины, ослабление фланцевых соединений – до возникновения утечек горючих сред. Для непрерывного мониторинга концентраций горючих газов в рабочей зоне используются оптические детекторы (инфракрасные и лазерные диодные), которые обладают высокой избирательностью и устойчивостью к отравлениям, в отличие от электрохимических сенсоров. Созданы

распределенные системы волоконно-оптических датчиков, позволяющие контролировать температуру и деформации на протяженных участках трубопроводов и аппаратов колонного типа. Интеграция этих систем с предиктивной аналитикой на основе машинного обучения обеспечивает переход к обслуживанию по техническому состоянию, а не по регламенту – это снижает частоту несанкционированных вскрытий оборудования, которые сами по себе являются потенциальными источниками взрывопожароопасных ситуаций [1].

Перспективным направлением научных исследований является использование нанотехнологий для создания интеллектуальных покрытий и материалов, повышающих пожаровзрывобезопасность. Например, нанесение на внутренние поверхности аппаратов каталитически активных слоев, инициирующего контролируемое окисление горючих газов при концентрациях ниже НКПР, может предотвратить накопление взрывоопасных смесей. Разрабатываются самоочищающиеся поверхности с эффектом лотоса, которые препятствуют прилипанию капель жидкостей и образованию электростатических зарядов. В области взрывоподавления исследуются наноразмерные ингибиторы (наночастицы оксидов металлов), обладающие высокой площадью поверхности и, как следствие, повышенной реакционной способностью по отношению к свободным радикалам в пламени. Лабораторные эксперименты показывают, что добавление 2-3% таких наночастиц в традиционный порошок позволяет снизить требуемую массу ингибитора на 30-40%. Однако внедрение этих разработок в промышленность требует дополнительных исследований по стабильности свойств, устойчивости к агрессивным средам и экономической эффективности.

Таким образом, комплексное обеспечение пожаровзрывобезопасности технологического оборудования с горючими газами и жидкостями возможно только при системном подходе, объединяющем научные исследования,

инженерные методы и организационные меры. Основными направлениями дальнейшего развития являются: создание открытых баз данных по параметрам воспламенения и взрыва для реальных многокомпонентных смесей, разработка высокоточных моделей с использованием методов многомасштабного моделирования (от молекулярной динамики до CFD), а также внедрение риск-ориентированного подхода в нормативное регулирование. Требуется ускорить гармонизацию национальных стандартов с международными документами, такими как серия EN 1127 и IEC 80079, которые регламентируют методы идентификации взрывоопасных зон и выбора оборудования. Важно также повысить уровень подготовки специалистов в области промышленной безопасности, создав специализированные магистерские программы и центры компетенций на базе ведущих технических вузов. Только совместные усилия научного сообщества, разработчиков, эксплуатирующих организаций и надзорных органов позволят снизить аварийность на опасных производственных объектах до приемлемого уровня.

Библиографический список

1. Аксенов С. Г., Мугинова Е. Р. Система управления пожарной безопасностью на нефтеперерабатывающих заводах: интеграция прецедентов и поддержка принятия решений // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 2-2. С. 48–53.
2. Аксенов С. Г., Семёнов С. И. Анализ пожарной безопасности на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: стратегии, вызовы и инновации // Экономика строительства. 2023. № 11. С. 214–217.
3. Балаганский, И.А. Природные и техногенные катастрофы: учебное пособие [Электронный ресурс] / И.А. Балаганский. - Новосибирск, 2003. - 55 с.

4. Быльев Ю. В., Медведева А. Н., Афанасьев Р. В., Минаев Ю. А., Лобарь И. Н. Повышение безопасности эксплуатации резервуаров и трубопроводов сжиженного углеводородного газа путем подавления процесса распространения топливно-воздушной смеси // European research. — 2015. — № 8 (9). — С. 35–37.

5. Липкович, И.Э. Теория горения и взрыва: учебное пособие для практических занятий / И.Э. Липкович, Н.В. Петренко, И.В. Орищенко. - Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. - 121 с.