

УДК 614.849

ПОВЫШЕННЫЙ РИСК И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Аксенов С.Г.

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

Попович Е.В.

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

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу пожарной опасности аварийных выбросов горючих газов на промышленных объектах. Рассматриваются основные факторы, определяющие характер и масштаб опасности: физико-химические свойства газов, параметры истечения струи, условия окружающей среды. Подробно проанализированы сценарии развития аварийной ситуации, включая образование объемных взрывоопасных облаков, стабилизацию диффузионных факелов и интенсивное тепловое излучение. Особое внимание уделено объектам повышенного риска в газовой и нефтехимической отраслях, а также современным подходам к предупреждению и расчету характеристик таких аварий. На основе обзора исследований сформулированы ключевые направления обеспечения безопасности, направленные на снижение вероятности выбросов и минимизацию их последствий.

Ключевые слова: аварийный выброс, горючий газ, пожарная опасность, диффузионный факел, тепловое излучение, взрыв, промышленная безопасность.

INCREASED RISK AND FORECASTING THE CONSEQUENCES OF ACCIDENTAL COMBUSTIBLE GASES EMISSIONS AT INDUSTRIAL FACILITIES

Aksyonov S.G.

Doctor of Economics, Professor,

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

Popovich E.V.

Student,

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

Annotation. The article is devoted to a comprehensive analysis of the fire hazard of emergency releases of combustible gases at industrial facilities. The main factors determining the nature and scale of the hazard are considered: the physicochemical properties of gases, the parameters of the jet outflow, and environmental conditions. Scenarios of emergency development, including the formation of volumetric explosive clouds, the stabilization of diffusion flames and intense thermal radiation, are analyzed in detail. Particular attention is paid to high-risk facilities in the gas and petrochemical industries, as well as modern approaches to the prevention and calculation of the characteristics of such accidents. Based on a review of research, the key areas of ensuring safety aimed at reducing the probability of releases and minimizing their consequences are formulated.

Keywords: emergency release, combustible gas, fire hazard, diffusion flame, thermal radiation, explosion, industrial safety.

Современное промышленное развитие характеризуется масштабным использованием горючих газов на всех этапах — от добычи и транспортировки до переработки и потребления. Данные вещества, являясь высокоэнергетическим топливом и ценным сырьем, одновременно представляют собой источник значительной техногенной опасности. Аварийные ситуации, связанные с неконтролируемым выбросом горючих газов в атмосферу, относятся к числу наиболее тяжелых, так как создают прямую угрозу возникновения мощных пожаров, взрывов и токсичных поражений. Особенностью таких аварий является быстротечность и интенсивность развития процессов, что часто сводит к минимуму время для принятия эффективных мер реагирования. Ключевыми опасными факторами

становится формирование протяженных факелов с мощным тепловым излучением, способных вызвать вторичные возгорания на значительном расстоянии, и образование взрывоопасных газовоздушных смесей в пределах технологических площадок и за их пределами. Актуальность глубокого изучения данной проблемы продиктована необходимостью разработки научно обоснованных методик прогнозирования параметров опасности, создания эффективных систем предотвращения аварий и защиты персонала и оборудования. Внедрение концепции приемлемого риска и количественного анализа опасности требует наличия надежных математических моделей, адекватно описывающих сложные газодинамические и теплофизические процессы, сопровождающие выброс и горение газа. Настоящий обзор ставит целью систематизировать современные представления о природе пожарной опасности аварийных выбросов горючих газов, выделить определяющие ее факторы и рассмотреть основные направления обеспечения безопасности на потенциально опасных объектах.

Пожарная опасность, возникающая при аварийном истечении горючего газа, является комплексной характеристикой, зависящей от трех групп взаимосвязанных факторов: свойств самого газа, параметров истечения и условий окружающей среды. Основополагающую роль играют физико-химические свойства горючего газа. К ним, прежде всего, относятся концентрационные пределы воспламенения (КПВ), которые определяют диапазон концентраций газа в воздухе, способных к воспламенению. Чем шире данный диапазон и ниже нижний концентрационный предел, тем выше вероятность образования взрывоопасной смеси при утечке. Например, водород имеет чрезвычайно широкие пределы воспламенения (от 4% до 75% по объему), что делает его особенно опасным. Важны также скорость распространения пламени, теплота сгорания и температура самовоспламенения. Высокая теплота сгорания, характерная для углеводородных газов, обуславливает колоссальную энергию, высвобождающуюся при пожаре, а значит, и разрушительную силу теплового излучения факела. Параметры истечения газа из поврежденного оборудования являются ключевыми для определения начальных условий развития аварии. К ним относятся давление в системе, диаметр и форма сбросного отверстия, которые в совокупности определяют скорость истечения и начальную геометрию газовой струи. Выбросы из-под высокого давления приводят к формированию сверхзвуковых турбулентных струй, для которых характерны сложные процессы смешения с воздухом. Направление

истечения (вертикальное, горизонтальное, под углом) напрямую влияет на конфигурацию образующегося факела и зону его теплового воздействия. Условия окружающей среды выступают в роли внешнего модулятора опасности. Скорость и направление ветра критически важны: ветер увеличивает турбулентность, ускоряет смешение газа с воздухом, что может способствовать более быстрому достижению взрывоопасных концентраций в смеси, а также сносу и деформации факела, расширяя зону теплового поражения. Температура и влажность воздуха также могут влиять на процессы испарения (для сжиженных газов) и горения. Таким образом, пожарная опасность конкретного аварийного выброса является результатом сложного взаимодействия указанных факторов, что требует комплексного подхода к ее оценке [1].

Развитие аварии после выброса горючего газа может следовать по нескольким сценариям, основными из которых являются образование объемной взрывоопасной смеси с последующим взрывом и немедленное воспламенение струи с формированием стабильного диффузионного факела. Сценарий с образованием взрывоопасного облака реализуется, если выброшенный газ не воспламеняется немедленно у источника. В данном случае он, смешиваясь с воздухом, образует облако топливовоздушной смеси, которое может распространяться на значительные расстояния под действием ветра и градиентов концентрации. Внутри данного облака формируются зоны с концентрациями, соответствующими КПВ. Любой источник зажигания (открытое пламя, искра, горячая поверхность) в такой зоне приводит к объемному взрыву. Детонация или дефлаграция облака создает ударную волну, способную вызвать прогрессирующие разрушения оборудования и зданий, а также привести к массовым поражениям людей. Взрыв может быть первичным событием или последовать за фазой пожара. Наиболее опасным сценарием для близлежащих объектов является немедленное воспламенение истекающей струи, приводящее к стабилизации турбулентного диффузионного факела. В данном случае горение происходит на границе струи газа, куда диффундирует кислород воздуха. Главным поражающим фактором такого пожара становится интенсивное тепловое излучение от факела. Длина, конфигурация и температура факела зависят от расхода, состава газа и условий обтекания. Экспериментальные и теоретические исследования выделяют различные режимы стабилизации пламени, такие как присопловой факел (горит у среза отверстия) и оторванный факел (зона стабилизации находится на некотором расстоянии от

среза). Оторванный факел представляет особую опасность, так как приводит к интенсивному прогреву самого сбросного устройства и прилегающих конструкций, что может вызвать эскалацию аварии. Тепловой поток от факела может достигать десятков и сотен киловатт на квадратный метр, вызывая воспламенение горючих материалов, деформацию металлоконструкций и ожоги у персонала в радиусе сотен метров от эпицентра. Дополнительными поражающими факторами при любом сценарии являются токсичные продукты горения (окись углерода, оксиды азота и серы, бензапирен) и возможность кислородного голодаания в закрытых помещениях при накоплении нетоксичных газов, таких как метан [2,4].

К числу объектов с наиболее высоким потенциалом опасности аварийных выбросов относятся предприятия полного цикла газовой и нефтехимической промышленности. Среди них можно выделить объекты добычи газа (скважины, установки комплексной подготовки), магистральные и промысловые трубопроводы, компрессорные и газораспределительные станции, а также объекты переработки — газоперерабатывающие и нефтехимические заводы. Отдельную высокую категорию риска представляют хранилища сжиженных углеводородных газов (СУГ) и сжиженного природного газа (СПГ). На данных объектах сосредоточены большие объемы горючих веществ под давлением или при криогенных температурах, а технологические процессы часто проходят при высоких параметрах. Причинами выбросов могут стать коррозионные повреждения, дефекты сварных швов, нарушение герметичности уплотнений, механические воздействия (например, при земляных работах), ошибки персонала или стихийные бедствия. Предотвращение подобных аварий строится на многоуровневой системе превентивных мер. Первый уровень — проектно-конструкторский — включает в себя соблюдение нормативных требований к прочности оборудования, материалам, противопожарным разрывам и обвалованиям для локализации проливов. Второй уровень — технологический и организационный — заключается в строгом соблюдении регламентов эксплуатации, проведении регулярного диагностического контроля (например, ультразвуковой дефектоскопии, контроля герметичности) и технического обслуживания. Третий, критически важный уровень — это системы активного предупреждения и защиты. Они включают в себя стационарные газоаналитические системы для непрерывного мониторинга концентрации горючих газов в воздухе рабочей зоны и

помещений. Современные системы, основанные на методах инфракрасной спектроскопии, способны обнаруживать сверхмалые утечки. При срабатывании датчиков автоматика должна обеспечивать аварийное отключение участков, включение принудительной вентиляции, блокировку возможных источников зажигания и оповещение персонала. Важнейшим элементом защиты являются также системы аварийного сброса давления и факельные установки для безопасного сжигания отводимых газов, хотя их работа сама по себе требует тщательного расчета для исключения опасности для окружающих объектов [3,4].

Пожарная опасность аварийных выбросов горючих газов представляет собой сложный комплекс физических и химических явлений, определяемый свойствами вещества, динамикой истечения и внешними условиями. Основными деструктивными сценариями являются образование взрывоопасных облаков с последующим объемным взрывом и формирование протяженных диффузионных факелов с мощным тепловым излучением. Для объектов топливно-энергетического комплекса, где такие риски сосредоточены, обеспечение безопасности должно базироваться на глубоком анализе опасности и концепции приемлемого риска. Это требует дальнейшего развития фундаментальных исследований процессов турбулентного горения газовых струй и совершенствования инженерных методик расчета параметров опасности. На практике необходима реализация комплексного подхода, сочетающего надежное проектирование, строгий технологический контроль, внедрение высокочувствительных систем автоматического обнаружения утечек и эффективных средств аварийной защиты. Только интеграция научного знания, современных технологий и строгой производственной дисциплины позволяет минимизировать вероятность катастрофических аварий, связанных с выбросами горючих газов, и обеспечить защиту людей, оборудования и окружающей среды.

Библиографический список

1. Аксенов С.Г., Гайзетдинова А.М. Анализ и оценка обеспечения пожарной безопасности на предприятиях пищевой промышленности на примере предприятий по изготовлению сиропа // Экономика строительства. - 2023, № 6. - С. 30-33.

2. Аксенов С.Г., Сайнашев М.Э. Анализ и оценка пожарной опасности мясоконсервного комбината // Экономика строительства. 2023. № 11. С. 86-88.
3. Головина Е.А. Экология в России: современное состояние и актуальные проблемы // Аграрная история. 2021. №8. С. 3-16.
4. Карпов В.Л. Пожарная опасность аварийных выбросов горючих газов: диссертация доктора технических наук. – Москва: ВНИИПО МЧС России, 2004. – 331 с.
5. Хорошилов А. Экология под угрозой – техногенные пожары лета 2024 года // Recyclemag. – 2024, № 8. – С. 28-35.