

УДК 614.842.61

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0042

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРОВ НА СКЛАДАХ СУГ И СПГ В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

© 2021

Пелех Михаил Теодозиевич, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института
Симонова Марина Александровна, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института
Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого
(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
e-mails: peleh_mt@spbstu.ru, simonova_ma@spbstu.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены аварийные ситуации на складах СПГ и СУГ, описана возможность каскадного развития аварии. Представлен анализ возможности повреждения технологического оборудования складов. Рассматриваются существующие системы обнаружения утечек при авариях и мониторинга температуры. Проведен анализ имеющихся методов тушения пожаров и применяемых огнетушащих веществ на складах хранения СУГ и СПГ, и совершенствование методов локализации и ликвидации горения СУГ и СПГ с учетом низких температур в районах Крайнего Севера. Приводятся основные недостатки применяемых методов тушения пожаров при проливах топлив, в том числе криогенных. Рассматривается возможность совершенствования методов локализации и ликвидации горения СУГ и СПГ с учетом низких температур в районах Крайнего Севера без применения огнетушащих составов на основе воды. Предложена возможность локализации и ликвидации пожара применением пористых материалов с размером пор меньше максимального безопасного экспериментального зазора, а также систем аварийного слива с использованием огнепреградителя с конструкцией теплообменных устройств, обеспечивающих локализацию пламени в течение длительного периода времени. Применение представленных решений позволит повысить эффективность тушения пожаров и обеспечить безопасность складов СУГ и СПГ.

Ключевые слова: тушение пожаров, СУГ, СПГ, сжиженные газы, система многополосного аварийного слива, система предотвращения пожара СПГ с использованием пористых материалов.

FEATURES OF LOCALIZATION AND ELIMINATION OF FIRES IN LPG AND LNG WAREHOUSES IN RESERVOIRS IN THE ARCTIC ZONE

© 2021

Pelekh Mikhail Teodozievich, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
Simonova Marina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, associate professor,
associate Professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great

(195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, e-mails: peleh_mt@spbstu.ru, simonova_ma@spbstu.ru)

Abstract. The article considers emergency situations in LNG and LPG warehouses, describes the possibility of cascade development of the accident. An analysis of the possibility of damage to the process equipment of warehouses is presented. Existing accident leak detection and temperature monitoring systems are considered. An analysis of existing fire fighting techniques and fire extinguishing agents in LPG and LNG storage facilities has been carried out, and methods for localizing and eliminating LPG and LNG combustion have been improved, taking into account low temperatures in the Far North. The main disadvantages of the applied methods of fire extinguishing in case of fuel spills, including cryogenic ones, are given. The possibility of improving LPG and LNG combustion containment and elimination methods in view of low temperatures in the Far North without the use of water-based fire extinguishing compositions is being considered. The possibility of fire localization and elimination with the use of porous materials with pore size less than the maximum safe experimental gap, as well as emergency drain systems using a fire retardant with the design of heat exchange devices ensuring flame localization for a long period of time is proposed. The application of the presented solutions will increase the efficiency of fire fighting and ensure the safety of LPG and LNG warehouses.

Keywords: fire extinguishing, LPG, LNG, liquefied gases, multi-lane emergency discharge system, LNG fire prevention system using porous materials.

Введение. Мировая практика знает много случаев, когда из-за аварийных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) случались пожары и взрывы, сопровождающиеся с массовой гибелью людей и значительными материальными потерями.

Одна из самых крупных по последствиям аварий произошла при взрыве газобензиновой смеси 4 июня 1989 года в Иглинском районе Башкирской АССР [1]. Произошло локальное повреждение трубы продуктопровода «Западная Сибирь – Урал – Поволжье». После падения давления в трубопроводе, увеличена

подача газа для восстановления давления. Газобензиновая смесь тяжелее воздуха, поэтому газ скопился в низине, в 900 м от Транссибирской железнодорожной магистрали и при прохождении через этот участок двух пассажирских поездов, произошел взрыв унесший жизни 575 человек, из них 181 ребенка, травмы получили порядка 600 человек.

10 августа 2020 года произошел взрыв и пожар на автомобильной газозаправочной станции города Волгоград [2]. Взрывная волна сотрясла дома, а в небо взметнулся огромный столб огня. Причиной стало возгорание трубопровода автоцистерны, сбрасывающего в атмосферу избыточное давление, во время пополнения хранилища.

12 июня 2020 года на Казанской кустовой базе ООО «Газпром сжиженный газ» при сливе жидкой фазы сжиженного углеводородного газа из железнодорожных цистерн в стационарные произошло возгорание и последующий взрыв [3]. При этом произошло разрушение здания операторной, один человек погиб, двое травмированы.

Россия, бесспорно, входит число стран, которые лидируют по добыче и транспортировке горючих газов, и, конечно же, не приходится рассчитывать на то, что наряду с наращиванием объемов экспорта газа будет происходить снижение аварий на объектах ТЭК. Так по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [4] Федеральный государственный надзор на объектах нефтегазодобывающей промышленности осуществляется в отношении 8019 опасных производственных объектов нефтегазодобычи. Распределение по классам опасности представлено на рисунке 1.

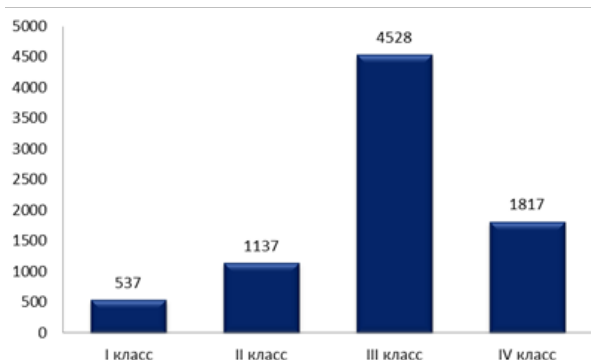


Рисунок 1 – Распределение объектов различных классов опасности в Российской Федерации в 2021 году

За 6 месяцев 2020 года на объектах нефтегазодобывающей промышленности произошло 3 аварии, 6 человек травмировано в результате несчастных случаев, из них смертельно – 5 человек. По результатам проведенных в I полугодии 2020 года проверок было выявлено 2634 нарушений требований промышленной безопасности.

На сегодняшний день, практически отсутствуют методы тушения пожаров, в том числе в районах Крайнего Севера, особенно при разливах больших объемов сжиженных углеводородных газов (СУГ) и

сжиженных природных газов (СПГ).

Согласно Своду правил “Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности” [5] запас воды на таких объектах для обеспечения работы системы противопожарного водоснабжения рассчитывается из условия обеспечения максимальной потребности в воде в течение времени не менее 6 часов, что практически невозможно для районов Крайнего Севера.

Анализируя технологические схемы, описывающие основное оборудование и технологический процесс на складах СУГ и СПГ можно сделать вывод о том, что в резервуарах, технологических трубопроводах и другом технологическом оборудовании отсутствует свободный объем, т.к. весь объем оборудования заполнен паровой фазой в концентрациях, во много раз превышающих верхний концентрационный предел распространения пламени. Поэтому возникновение пожаров, как правило, локализовано вне технологического оборудования. Причиной выхода вышеуказанных веществ из технологического оборудования, в основном, является утечка во время погрузочно-разгрузочных работ, хранения и транспортировки [6], а также при повреждениях и через неплотности фланцевых соединений [7].

Повреждения аппаратов и трубопроводах в условиях низких температур, характерных для Арктической зоны, возникают из-за повышения хрупкости конструкционных сталей и растрескивания и уменьшения адгезионных характеристик прокладочных материалов фланцевых соединений. Местами возникновения являются ослабленные элементы конструкции, например сварные соединения или узлы установки контрольной и запорной арматуры.

Влияние также оказывает неожиданное тепловое напряжение на металлической конструкции, когда СПГ вступает в контакт с ней. Вызванное тепловое напряжение может сочетаться с другим рабочим напряжением, вызывая в системе аномально высокие уровни напряжения, а небольшие трещины или дефекты конструкции могут быстро образовываться в условиях повышенного напряжения. Это может привести к полному разрушению конструкции. В исследования [8] показано, что случайный выброс СПГ не вызывает быстрого образования трещин, однако оказывает значительное влияние на срок службы конструкции.

Существует вероятность возникновения каскадных сценариев, например выброса углеводородов, пожара, взрыва и рассеивания продуктов сгорания. Последствия таких сценариев в совокупности могут быть более серьезными, чем их индивидуальное воздействие [9].

Для мониторинга состояния технологического оборудования и своевременного обнаружения утечек возможно использование комплексной аналитической системы. Такая система может состоять из размещенных на площадке газоанализаторов, оценивающих наличие СПГ и СУГ в воздухе, а также система температурного мониторинга состояния технологического

оборудования. В настоящее время оценивают наличие источников тепла внутри резервуаров с СПГ и СУГ. Однако представляется целесообразным мониторинг температурных полей снаружи оборудования. По очагу изменения температуры возможно установить источник истечения СПГ и СУГ.

В последние годы, в связи с ростом спроса на сжиженный природный газ (СПГ) во всем мире, большое количество СПГ хранится, обрабатывается и транспортируется в портах. Резервуары для хранения СПГ в порту могут стать мишенью для террористических атак, потому что выход из строя или разрушение этих объектов подвергнет рынки, города и окружающую среду высокому риску [10].

Все выше сказанное говорит об актуальности темы, связанной с тушением пожаров на складах СУГ и СПГ в районах Крайнего Севера.

Целью работы является анализ имеющихся методов тушения пожаров и применяемых огнетушащих веществ на складах хранения СУГ и СПГ, и совершенствование методов локализации и ликвидации горения СУГ и СПГ с учетом низких температур в районах Крайнего Севера.

В данной статье будут рассмотрены методы тушения сжиженных газов, их достоинства и недостатки, в том числе при тушении подобных пожаров при отрицательных температурах, ведь в Арктической зоне температура окружающей среды достигает минус 60°C.

Материалы и результаты исследования. В ходе данного исследования были использованы: метод анализа литературных источников; метод моделирования и метод синтеза. Метод анализа литературных источников позволяет проанализировать нормативные документы, из которых будет сделан вывод о целесообразности применения тех или иных методов и средств пожаротушения. Метод моделирования позволяет смоделировать технические устройства для ограничения распространения пожара. В завершении исследовательской работы будет использован метод синтеза, который позволит объединить полученную информацию, имеющийся опыт, связанный с тушением пожаров и сделать выводы о результатах исследования.

Для тушения пожаров СУГ в соответствии с «Рекомендациями по обеспечению пожарной безопасности объектов хранения и переработки СУГ» [11] применяются: порошки, газообразный и жидкий азот, газообразная и жидкая двуокись углерода, инертные газы (*He, Ar, Kr*), хладоны, распыленная вода, водяной пар, воздушно-механическая пена средней кратности на основе специальных синтетических пленкообразующих пенообразователей, а также комбинированные их составы.

В основу методов тушения пожаров СУГ и СПГ заложены принципы тушения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ). Так в работе [12] рассматривались типы резервуаров, для хранения нефтепродуктов, а также способы тушения пожаров на резервуарах

с ЛВЖ. К таким способам тушения ЛВЖ относятся применение: воздушно-механической пены низкой и средней кратности (тушение на поверхности жидкости и «подслойное» тушение), в том числе подачи самовспенивающейся газоаэрозоленасыщенной пены, получаемой с использованием твердотопливных генераторов давления; установок газового пожаротушения с использованием модулей изотермических для жидкой двуокиси углерода; автоматических установок газопорошкового пожаротушения. Также в работе рассмотрены проблемные вопросы, связанные с локализацией и ликвидацией горения ЛВЖ в условиях низких температур.

Хотелось бы отметить, что разлив сжиженного газа происходит на значительную площадь, что связано с его низкой плотностью. Для защиты от растекания может применяться обвалование, защитные стенки и т.п. А при кваземгновенном разрушении резервуара площадь растекания сжиженного газа может составить несколько десятков тыс.кв.м. Соответственно суммарная массовая скорость испарения возрастет в разы с увеличением площади испарения.

В работах [13], [14] рассмотрена возможность тушения сжиженных газов с применением воздушно-механических пен. Эффект тушения пенами достигается за счет снижения температуры поверхностного слоя горячей жидкости и его изоляции.

При рассмотрении физико-химических свойств основных компонентов сжиженных газов мы видим, что температура кипения метана, этана, пропана, этилена и пропилена меньше минус сорока градусов. В условиях Крайнего Севера при возникновении аварийных ситуаций при температуре окружающей среды ниже нуля градусов объемная температура сжиженных газов отрицательная. При этом пена – это смесь воды с пенообразователем, подача которых возможна только при температуре выше пяти градусов Цельсия. Поэтому если рассматривать систему взаимодействия пена-СУГ, можно отметить, что температурный градиент направлен от менее нагретых СУГ в сторону пены, что в общем случае приведет к повышению интенсивности испарения. Исследования возможности применения водовоздушной пены средней кратности на основе синтетического углеводородного пенообразователя для ликвидации проливов и пожаров СУГ и СПГ показали, что при подаче пены на поверхность сжиженного газа, на границе разделения фаз образуется третья твердая фаза – лед, при этом лед обладает высокой пористостью. Так как, под влиянием различных факторов (изменение температуры, поверхностного натяжения, воздействие давления насыщенных паров, «старение» пены и т.п.) пене свойственно разрушаться, это приводит к увеличению толщины ледяного слоя. При этом пена, охлаждаясь, выделяет тепло как в направлении СПГ или СУГ, так и в окружающую среду. При этом большая часть теплового потока пойдет в ту сторону, температура которой ниже. Таким образом, тепловой поток, проходящий через слой льда, будет направлен в сторону жидкой фазы газа.

С одной стороны пена обладает газоизолирующей способностью двухслойного препятствия на пути прохождения паров сжиженного газа в зону горения. С другой стороны, по законам молекулярной диффузии поток холодного горючего газа частично проходя через пористую ледяную подложку, будет поступать в зону горения. А здесь, как раз и наступает момент, когда происходит ликвидация горения. Как и в слое ледяной подложки, так и в пенном слое идет насыщение газа, по мере увеличения слоя пены концентрация паров горючего газа над ее поверхностью будет снижаться, тем самым проникновения паров в зону горения будет уменьшаться. Регулируя толщину пены можно организовать управляемое горение пены.

Основным недостатком тушения пожаров будет являться значительное время на управляемый режим ликвидации подобных аварий, и требовать привлечения огромных сил и средств, в том числе значительного запаса пенообразователя и воды, что в условиях Крайнего Севера сделать это практически невозможно.

В рекомендациях [15] в качестве наиболее эффективных научно-обоснованных технических решений по повышению пожарной безопасности объектов малотоннажного хранения и распределения СПГ предлагаются следующие технические решения по обеспечению и повышению пожарной безопасности объектов малотоннажного хранения и распределения сжиженного природного газа:

- использование пористых материалов с размером пор меньше максимального безопасного экспериментального зазора в пределах ограждения резервуара (рис. 2);
- использование защитных водоупорных экранов в пределах ограждения резервуара (рис. 3);
- защитные водяные завесы.

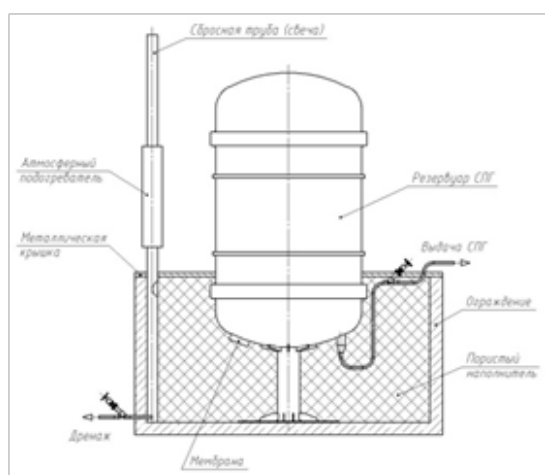


Рисунок 2 – Применение пористых материалов с размером пор меньше максимального безопасного экспериментального зазора

Стационарная система предотвращения пожара СПГ, пролитого в пределах ограждения резервуара, с использованием пористых материалов с размером пор меньше максимального безопасного эксперимен-

тального зазора предназначена для вертикальных резервуаров СПГ с арматурой, размещенной в нижней части резервуара. Наибольшую опасность представляет нижняя часть резервуара, которая должна располагаться внутри защитного ограждения и закрываться крышей из негорючего газонепроницаемого материала (рис. 2), оснащенной системой газосброса (дренажной трубой), рассчитанной из условия сброса и эффективного рассеивания паров СПГ, при этом внутренний объем между крышей и ограждением должен заполняться пористым материалом. В качестве пористого материала могут быть использованы строительные негорючие теплоизоляционные материалы, имеющие размеры пор меньше максимального безопасного экспериментального зазора. Кроме того, организованный сброс газа, с использованием данного способа, позволяет существенно снизить опасность загазованности окружающего пространства. Однако с точки зрения технологического обслуживания емкости данный способ вызывает трудности с визуальным осмотром, а также проведения ремонта в случае необходимости, так как необходимо будет демонтировать пористый материал, а именно как с временными, так и финансовыми затратами.

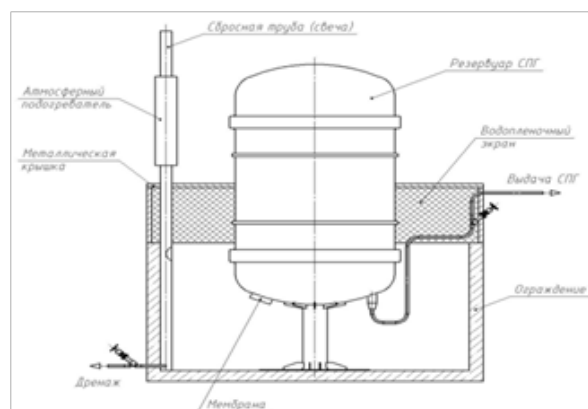


Рисунок 3 – Принципиальная схема системы предотвращения пожара СПГ, базирующейся на использовании защитных водоупорных экранов

Система предотвращения пожара СПГ, пролитого в пределах ограждения резервуара с использованием защитных водоупорных экранов предназначена для предотвращения пожара СПГ, пролитого в пределах ограждения резервуара. Внутри защитного ограждения располагается нижняя часть резервуара, по верхней кромке которого устанавливается сплошной по периметру защитный водоупорный экран. Защитный водоупорный экран выполняется в виде двух закрепленных между собой с зазором поверхностей, выполненных из металлических сеток. В зазоре между сетками устанавливаются форсунки. При аварийном истечении СПГ по сигналу газоанализаторов на сеточных поверхностях образуется сплошная пленка из жидкости, что делает эти поверхности непроницаемыми для проникновения сквозь них газов и паров. При этом парогазовое облако локализуется внутри защищаемого объема. Для образования сплошной

пленки из жидкости, непроницаемой для газов и паров следует подавать воду с давлением не менее 0,3 МПа при расходе не менее 0,08 л/сек на 1 кв.м сеточной поверхности.

Защитная водяная завеса может использоваться для разбавления горючих газов после утечки, чтобы снизить риск взрыва горючего газа [16].

Основной недостаток данного способа, как и применение защитных водяных завес, для борьбы с загряззованностью, заключается в применении воды, что в условиях низких температур может привести к отказу работы оборудования.

Согласно [5] на изотермических резервуарах для тушения СУГ рекомендуется применять сухие порошки на базе бикарбоната натрия или бикарбоната калия. В работе [17] рассматривалось тушение сжиженных газов гидроксидом магния ($Mg(OH)_2$), бикарбонатом натрия ($NaHCO_3$) и коммерческими порошками ABC – MAP, а также влияние дисперсности порошка на эффективность тушения огня. Автоматическими установками порошкового пожаротушения должны оснащаться места возможных утечек СУГ (зоны размещения штуцеров, клапанов, оборудования рабочих площадок, мест установки отсекающей и другой арматуры, насосная станция). Также возможно применение газопожаротушения.

Тушение СУГ и СПГ вышеописанными способами осуществляется подачей огнетушащего вещества в очаг горения. При этом происходит выброс в зону горения большого количества огнетушащих веществ и локализовать очаг горения как правило затруднительно из-за постоянной подпитки зоны горения. При этом подача ОТВ в зону горения сразу приводит к потере эксплуатационных характеристик газов, а следовательно, к большому экономическому ущербу. В случае применения газового тушения в связи с особенностями конструктивного исполнения резервуаров необходим огромный расход огнетушащего газа.

Применение огнепреградителей на системах аварийного слива позволяет снизить риск распространения пожара в аварийную емкость. Однако, в настоящее время исследования характеристик огнестойкости огнепреградителей в мире в основном сосредоточены на изучении закона распространения пламени при определенных условиях с отсутствием систематических исследований их огнестойкости [18, 19].

Для локализации и ликвидации горения сжиженных газов возможно применение комбинированной системы аварийного слива. Эффект тушения должен достигаться за счет применения многополосной системы слива с применением огнепреграждающего устройства с системой охлаждения. Температура при горении метана может достигать 2065°C, а это может привести к кипению и быстрому испарению сжиженного газа. Поэтому на входе в систему аварийного слива требуется предусмотреть каскадный огнепреградитель с теплообменным устройством, использование которого позволяет охлаждать СУГ и обеспечить теплоотвод от пламегасящего элемента и корпуса ог-

непреградителя, предложенный в работе Хорошилова О.А. [20] (рис. 4), а также гидравлический затвор.

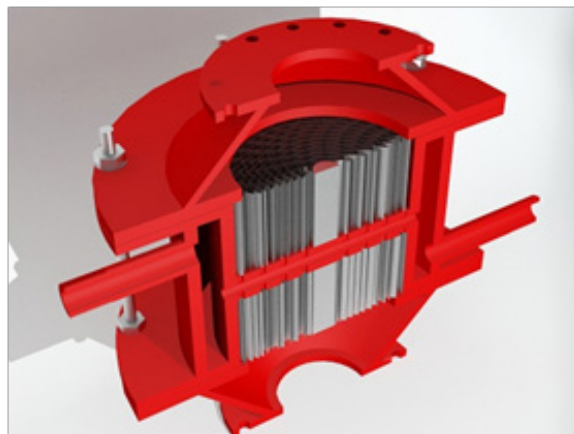


Рисунок 4 – Огнепреградитель с теплообменным блоком в разрезе

Также исходя из исследования протекания процессов истечения СУГ и СПГ через отверстия кажется целесообразной разработка системы предотвращения взрыва для резервуаров с вертикальными стенками на основе применения импульсных установок подачи ОТВ в зону возникновения локальных повреждений, устанавливаемых по изменению температуры стенки резервуара.

Изменение температуры на поверхности резервуара можно найти из соотношения:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1)$$

где T_1 – температура в резервуаре, К
 T_2 – температура окружающей среды, К
 P_1 – давление в резервуаре, кПа
 P_2 – давление окружающей среды, кПа
 k – показатель адиабаты газа

Исходя из вышеуказанного соотношения можно сделать вывод о том, что при хранении газов при давлении около 150 МПа и температуре 293 К температура газа на выходе из резервуара составит 54 К. Эта ситуация характерна для идеального истечения газа. Однако при истечении СУГ будет происходить незначительное повышение температуры в данной зоне за счет протекания процессов испарения и теплообмена с окружающей средой. При этом такое падение температуры на поверхности резервуара возможно зафиксировать средствами температурного дистанционного контроля. Такая система позволит своевременно обнаружить зону утечки и принять необходимые организационно-технические мероприятия.

Горение СПГ и чаще всего характеризуется факельным характером с отрывом факела от стенки резервуара на некоторое расстояние, зависящее от давления газа в резервуаре. В настоящее время повсеместно внедряются роботизированные комплексы по локализации и ликвидации горения. И в связи с этим представляется целесообразной разработка и внедрение комплекса импульсного пожаротушения. В системах импульсного пожаротушения предлагается использо-

вать огнетушащие вещества, которые распыляются и метаются в очаг пожара с помощью энергии либо пневмоимпульса, либо взрыва заряда взрывчатого вещества вдоль стенки резервуара в зону факельного горения. Именно использование энергии импульса добавляет к механизмам прекращения горения используемых обычных огнетушащих веществ эффект механического срыва пламени, что приводит к резкому повышению огнетушащей эффективности.

Закключение. Тушение сжиженных газов даже в нормальных условиях вызывает ряд трудностей, так как газы горят при высоких температурах, и поэтому испарение происходит в десятки раз быстрее по сравнению с жидкостями. В районах Крайнего Севера, когда отрицательная температура окружающей среды сохраняется почти круглый год, применение огнетушащих составов на основе воды или водных растворов затруднено, поэтому предпочтение отдается методам локализации и ликвидации горения СУГ и СПГ без применения огнетушащих составов, таких как использование пористых материалов с размером пор меньше максимального безопасного экспериментального зазора, и система аварийного слива с использованием огнепреградителя с конструкцией теплообменных устройств, обеспечивающих локализацию пламени в течение длительного периода времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Крупнейшая железнодорожная катастрофа в истории СССР: Трагедия под Уфой | Крупнейшие катастрофы | Яндекс Дзен [Электронный ресурс]. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5ad47a2100b3dd0ec8010315/krupneishaia-jeleznodorojnaia-katastrofa-v-istorii-sssr-tragediia-pod-ufoi-5ac36a9200b3dd64a60ebfd7> (дата обращения: 8.03.2021).
2. СК показал последствия взрыва и пожара на газовой заправке в Волгограде - Росбалт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosbalt.ru/russia/2020/08/13/1858419.html> (дата обращения: 8.03.2021).
3. «Мы были как бы не готовы...»: три причины взрыва, едва не погубившего пол-Казани [Электронный ресурс]. URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/481782> (дата обращения: 8.03.2021).
4. Доклады о правоприменительной практике контрольно-надзорной деятельности в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosnadzor.ru/public/law/enforcement/> (дата обращения: 8.03.2021).
5. Приказ МЧС России от 20 августа 2015 г. № 452 "Об утверждении свода правил "Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности" [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71088982/#review> (дата обращения: 8.03.2021).
6. Bariha N., Srivastava V.C., Mishra I.M. Theoretical and experimental studies on hazard analysis of LPG/LNG release: A review. № 4(33)Walter de Gruyter GmbH, 26.07.2017.
7. Xiaolin S., Xin Z. Tests and studies on pressurized LNG leakage and dispersion // IGT International Liquefied Natural Gas Conference Proceedings. 2019. (2). С. 791–803.
8. Baalisampang T., Khan F., Abbassi R., Garaniya V. Methodology to analyse LNG spill on steel structure in congested marine offshore facility // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. (62). DOI:10.1016/j.jlp.2019.103936.
9. Baalisampang T., Abbassi R., Garaniya V., Khan F., Dadashzadeh M. Modelling an integrated impact of fire, explosion and combustion products during transitional events caused by an accidental release of LNG // Process Safety and Environmental Protection. 2019. (128). С. 259–272. DOI:10.1016/j.psep.2019.06.005.
10. Zhu R., Hu X., Bai Y., Li X. Risk analysis of terrorist attacks on LNG storage tanks at ports // Safety Science. 2021. (137). DOI:10.1016/j.ssci.2021.105192.
11. Рекомендации. Обеспечение пожарной безопасности объектов хранения и переработки СУГ [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/rekomendacii-obespechenie-pozharnoy-bezopasnosti-obektov-hraneniya-i-pererabotki-sug_7d285360090.html (дата обращения: 8.03.2021).
12. Пелех М.Т., Симонова М.А. Проблемные вопросы при тушении пожаров на резервуарах в арктической зоне // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 2. С. 47–51.
13. Проблемы пожаровзрыво-безопасности СУГ и СПГ: тушить нельзя купировать! | Secuteck.Ru [Электронный ресурс]. URL: <http://secuteck.ru/articles2/firesec/problemypozharovvzryvo-bezopasnosti-sug-i-spg-tushit-nelzya-kupirovat> (дата обращения: 8.03.2021).
14. Hurlley M.J., Gottuk D., Hall J.R., Harada K., Kuligowski E., Puchovsky M., Torero J., Watts J.J., Wiecek C. SFPE handbook of fire protection engineering, fifth edition Springer New York, 2016. 1–3493 с. ISBN:9781493925650.
15. Пожаробезопасное применение малотоннажных установок хранения и распределения сжиженного природного газа. Рекомендации. Москва, 2013. [Электронный ресурс]. URL: http://www.norm-load.ru/PB/INF_DND/5781/metodik/SPG/1-5.htm (дата обращения: 8.03.2021).
16. Zhou Y., Chen C., You J. Research on Simulation Test of Water Curtain Suppression of Liquefied Nature Gas Leakage // Petrochemical Equipment. 2020. № 5(49). С. 1–8. DOI:10.3969/j.issn.1000-7466.2020.05.001.
17. Ibrahim H., Patruni J.R. Experimental assessment on LPG fire extinguishing properties of three chemical powders before and after milling action // Fire and Materials. 2020. № 5(44). С. 747–756. DOI:10.1002/fam.2853.
18. Wang Y.N., Wang Z.R., Ma W.D., Ye Y.J., Liu C.P., Chen W.T. Development of Fire Resistance Performance Test System for Oil Gas Pipeline Flame Arrester // Petrochemical Equipment. 2020. № 2(49). С. 17–22. DOI:10.3969/j.issn.1000-7466.2020.02.004.
19. Mahuthannan A.M., Damazo J.S., Kwon E., Roberts W.L., Lacoste D.A. Effect of propagation speed on the quenching of methane, propane and ethylene premixed flames between parallel flat plates // Fuel. 2019. (256). DOI:10.1016/j.fuel.2019.115870.
20. Хорошилов О.А. Методологические и нормативные основы конструирования, испытания и эксплуатации промышленных огнепреградителей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. 2011.

Статья поступила в редакцию 30.04.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021