

УДК 614.8

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0039

ВЛИЯНИЕ ПЛОЩАДИ ОБВАЛОВАНИЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ОБЛАКОВ ПРИ ПРОЛИВАХ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

© 2021

Николенко Татьяна Михайловна, инженер

ООО «Газпром проектирование»

(191036, Россия, Санкт-Петербург, Суворовский пр. 16/13, e-mail: tnikolenko@gazpromproject.ru)

Ефремов Сергей Владимирович, кандидат технических наук,

доцент кафедры Эргономики, экологии и трудового права

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

(190121, Россия, Санкт-Петербург, улица Лоцманская, дом 3, e-mail: sefremov@rambler.ru)

Аннотация. Для обеспечения достаточного уровня безопасности на объектах, где используется, производится, транспортируется и хранится сжиженный природный газ, необходима всесторонняя оценка возможных опасных ситуаций и формируемых опасных зон, возникающих при авариях с участием СПГ. В процессе разрушения трубопровода или емкости содержащей криогенную жидкость происходит ее растекание по подстилающей поверхности, мгновенное вскипание и интенсивное испарение. Охлажденные пары СПГ распространяются вдоль земной поверхности, смешиваются с воздухом и формируют опасные облака. Для формирования адекватных мер по защите конструкций и персонала важно знать размеры и динамику развития опасных зон. Автором определено, что расчет зон опасной загазованности может быть выполнен с использованием физической модели и математического аппарата «Методики моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». Существующая модель дополнена критериями дальности и учетом влажности воздуха. Модель и программный комплекс, разработанные автором, позволяют отследить динамику распространения, дальность и время существования опасных облаков смеси природного газа с воздухом и на базе этих знаний сформировать адекватные меры по защите персонала и конструкций. Одной из мер по защите конструкций и персонала является строительство ограждающих конструкций, позволяющих уменьшить площадь растекания. С помощью разработанной модели проведен анализ зависимости дальности распространения опасных облаков, время их существования от площади ограждающей конструкции. Произведена оценка эффективности их использования на объектах содержащих сжиженный природный газ.

Ключевые слова: промышленная безопасность, сжиженный природный газ, опасные облака, обвалование, дальность распространения, пролив СПГ, ограждающая конструкция, модель распространения тяжелых облаков газа, методика расчета, опасные зоны, пары сжиженного природного газа.

INFLUENCE OF THE COLLAPSE AREA ON THE FORMATION AND PROPAGATION OF DANGEROUS CLOUDS IN THE CASE OF LIQUEFIED NATURAL GAS SPILLS

© 2021

Nikolenko Tatiana Mikailovna, engineer

LLC Gazprom proekirovanie

(191036, Russia, St. Petersburg, Suworovsky pr. 16/13, e-mail: tnikolenko@gazpromproject.ru)

Efremov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor

Saint Petersburg State Marine Technical University

(190121, Russia, Saint Petersburg, Lotsmanskaya street 3, e-mail: sefremov@rambler.ru)

Abstract. To ensure a sufficient level of safety at facilities where liquefied natural gas is used, produced, transported and stored, a comprehensive assessment of possible hazardous situations and emerging hazardous areas arising from accidents involving LNG is necessary. In the process of destruction of the pipeline or container containing cryogenic liquid, it spreads over the underlying surface, instantaneous boiling and intense evaporation. The cooled LNG vapors spread along the earth's surface, mix with the air, and form dangerous clouds. To form adequate measures for the protection of structures and personnel, it is important to know the size and dynamics of the development of hazardous areas. The author determined that the calculation of zones of dangerous gas contamination can be performed using a physical model and the mathematical apparatus of the "Methodology for modeling the spread of accidental releases of hazardous substances". The existing model is supplemented with the range criteria and taking into account the humidity of the air. The model and software package developed by the author allow us to track the dynamics of propagation, range and lifetime of dangerous clouds of a mixture of natural gas and air and, based on this knowledge, to form adequate measures to protect personnel and structures. One of the measures to protect structures and personnel is the construction of enclosing structures that reduce the spreading area. With the help of the developed model, the analysis of the dependence of the range of propagation of dangerous clouds, the time of their existence on the area of the enclosing structure is carried out. The efficiency of their use at facilities containing liquefied natural gas is evaluated.

Keywords: industrial safety, liquefied natural gas, dangerous clouds, collapse, propagation range, LNG strait,

enclosure structure, heavy gas cloud propagation model, calculation method, hazardous areas, liquefied natural gas vapors.

Введение. При проектировании и строительстве объектов содержащих сжиженный природный газ (СПГ) приоритетными должны являться меры для обеспечения безопасности персонала и целостности конструкций. Достижение высокого уровня защищенности объектов невозможно без всестороннего анализа опасностей, исследования динамики аварийных процессов, определения уровней реализации негативных факторов и возможных последствий аварий [1-7].

В случае возникновения аварии с участием сжиженного природного газа происходит пролив криогенной жидкости на подстилающую поверхность, формируются опасные зоны, ограниченные площадью пролива. Разлития СПГ могут вызвать серьезные травмы у людей, в том числе "холодные ожоги", а также привести к негативному воздействию на механические характеристики конструктивных материалов. При попадании человека в пролив такой жидкости без специальной обуви возможно получение серьезных травм ног, а также летальный исход [8].

Поскольку сжиженный природный газ хранится и транспортируется при температуре близкой к температуре кипения (-162°C) процесс растекания сопровождается интенсивным испарением и кипением [1, 9-12]. Таким образом, в атмосферу попадает большое количество паров сжиженного природного газа, распространяющиеся на большие удаления под воздействием ветра, а также за счет силы тяжести и диффузии. При этом движение воздуха в приземном слое атмосферы практически всегда имеет турбулентный характер [13, 14].

Сжиженный природный газ имеет ряд характерных особенностей, оказывающих значительное влияние на процессы распространения его паров. Непосредственно после испарения газ также имеет температуру близкую к приведенной выше точке кипения. При столь низких температурах метан (составляющий до 98% природного газа) обладает плотностью, значительно превосходящей плотность окружающего воздуха, поэтому может быть отнесен к категории «тяжелых газов» до тех пор, пока плотность его не достигнет плотности воздуха [10, 11, 12, 15, 16].

В процессе распространения облака тяжелого газа под действием силы тяжести прижимаются к земной поверхности и растекаются. В результате чего формируются протяженные зоны загазованности с небольшой высотой и значительной площадью распространения опасного вещества [1, 9, 17, 18].

Со временем происходит подмешивание воздуха и теплообмен с окружающей средой, из-за этого плотность смеси снижается, и облако может приобрести нулевую плавучесть, вследствие чего произойдет отрыв от подстилающей поверхности, затем облако уйдет в верхние слои атмосферы.

Наиболее эффективной мерой по уменьшению площади пролива является строительство обвало-

ваний и ограждающих конструкций, а также любые сооружения позволяющие предотвратить дальнейшее распространение криогенной жидкости. Кроме того, в соответствии с СП 240.1311500.2015 для обеспечения безопасности на площадках содержащих сжиженный природный газ обеспечивается сбор аварийных проливов по перехватывающим каналам в бассейны-накопители [20]. Такая конструкция позволяет сократить площадь, с которой испаряется вещество [21].

Целью исследования является оценка влияния площади обвалования или бассейна накопителя на размеры опасных зон, формируемых опасными облаками.

Для полноценного анализа необходимо знать количество вещества, которое перешло в горючее состояние, момент времени такого перехода, точки пространства, где достигаются взрывопожароопасные концентрации, а также время существования пожаровзрывоопасных облаков.

Для достижения поставленной цели необходимо смоделировать пролитие СПГ с ограничением площади растекания и изучить оценить размеры и динамику развития опасных зон на объектах производства, хранения и транспортировки сжиженного природного газа. Анализ этих параметров позволяет оценить эффективность мер по защите персонала и конструкций на опасных производственных объектах (ОПО).

Материалы и результаты исследования. Поскольку облака испарившегося природного газа представляют опасность для людей и конструкций преимущественно в то время, когда они распространяются вдоль земной поверхности и, по сути, относятся к «тяжелым газам», расчет зон опасной загазованности может быть выполнен с использованием физической модели и математического аппарата, разработанных авторами методики моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ [9]. Выбранная модель учитывает турбулентное перемешивание опасного вещества с воздухом, гравитационное растекание облака, а также воздействие скорости ветра. Авторами учтены фазовые переходы опасного вещества в облаке, в том числе за счет нагрева подмешиваемым воздухом и теплообмена с подстилающей поверхностью.

Методика с достаточной для практики полнотой решает вопрос растекания тяжелых облаков, к которым относятся пары сжиженного природного газа до снижения их плотности ниже плотности атмосферного воздуха. Однако с целью доведения точности получаемого решения до инженерных пределов автором введены критерии длительности существования облаков и модель влияния влажности воздуха. Предварительные оценки показали, что суммарный вклад, влажности воздуха в общий баланс энергии может составлять до 15% [19].

В различные моменты времени в окружающем

пространстве находится разное количество взрывоопасной смеси. Наибольшую опасность распространения облаков природного газа представляет их воспламенение с образованием волн избыточного давления, воздействием открытого пламени и термической радиации. При этом природный газ в чистом виде не является пожаровзрывоопасным, однако при смешении с воздухом его пары могут воспламеняться. Для этого необходимо, чтобы его концентрация в воздухе лежала в диапазоне ограниченном нижним концентрационным пределом воспламенения (НКП) и верхним концентрационным пределом (ВКП) [11, 12]. Если концентрация менее НКП, то газа будет недостаточно для начала возгорания, а если более ВКП, то в смеси будет слишком мало кислорода.

Для уменьшения площади пролития и снижения интенсивности испарения на площадках содержащих сжиженный природный газ строятся обвалования и бассейны-накопители.

Размеры сборников аварийных проливов СПГ и расстояние от них до резервуаров и другого оборудования должны определяться исходя из безопасной плотности потока теплового излучения, при пожаре пролитого в бассейн-накопитель продукта. Для этого необходимо знать динамику формирования, распространения и максимальные размеры опасных облаков

смеси СПГ с воздухом. Кроме того, опасные зоны, формируемые взрывоопасной смесью, значительно превосходят площадь пролива криогенной жидкости [20].

Таким образом, при оценке эффективности принятых мер по обеспечению безопасности объекта наиболее важным этапом является распространение плотных тяжелых облаков вдоль земной поверхности.

Анализ показал, что для определения пределов существования и распространения взрывоопасного облака следует использовать два критерия:

- достижение на всей его протяженности концентрации меньше нижнего концентрационного порога воспламенения;
- снижение плотности, отрыв облака от поверхности земли и его уход в верхние слои атмосферы.

На рисунках 1 и 2 приведены динамика распространения опасных облаков и динамика массы газа входящей во взрывоопасное облако при различной площади пролива. При этом расчеты выполнены для истечения из трубопровода Ду300 по бетонной поверхности (в соответствии с СП 240.1311500.2015), при скорости ветра 2,5 м/с, температуре воздуха 10°C, и влажности воздуха 60%. При этом для показательности принять, что вещество в пролив поступает в течение 300 с.

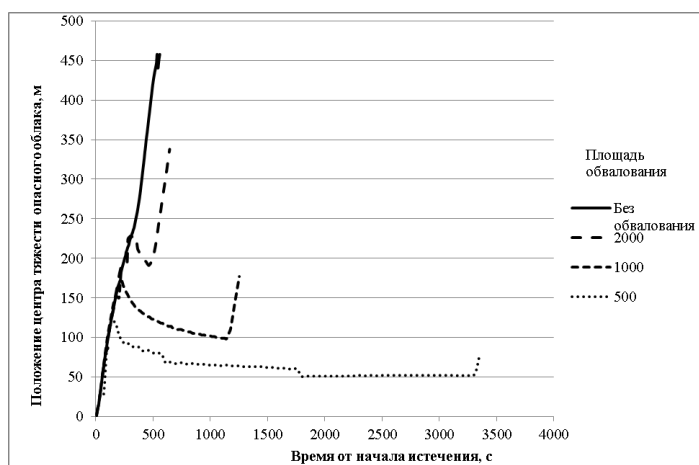


Рисунок 1 – Зависимость положения центра тяжести опасного облака от времени для различных площадей обвалования

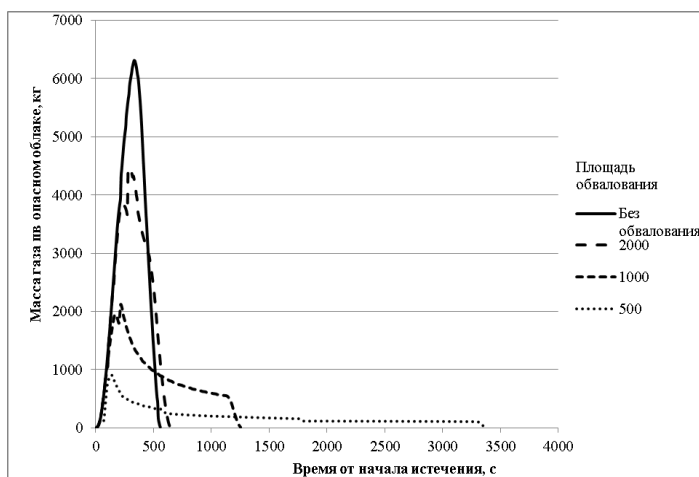


Рисунок 2 – Зависимость массы газа во взрывоопасном облаке от времени для различных площадей обвалования

В начальный момент времени площадь пролива увеличивается, происходит растекание в рамках ограждающей конструкции или по площадке ОПО, что провоцирует рост поступления паров в окружающее пространство. В результате происходит интенсивное распространение паров СПГ и формирование опасной смеси охлажденного природного газа с воздухом. Размеры опасного облака увеличиваются в течение 300 секунд, до тех пор, пока криогенная жидкость продолжает поступать в пролив. В дальнейшем масса газа в опасном облаке снижается, размеры облака постепенно начинают уменьшаться, продолжая дрейфовать по ветру вдоль земной поверхности. В рассмотренном случае распространение продолжается до тех пор пока концентрация природного газа в опасном облаке не достигает нижнего концентрационного предела.

Из рисунков 1 и 2 видно, что при отсутствии ограждающих конструкций за относительно небольшой отрезок времени опасные облака улетают почти на 500 м от места пролива. Распространения происходит почти по линейной зависимости, а время существования опасных концентраций в воздухе вдвое превышает время существования напорного режима истечения. При этом, при отсутствии поступления криогенной жидкости в пролив, резко снижается масса газа в опасном облаке, но оно продолжает дрейфовать вдоль земной поверхности, удваивая дальность распространения.

В случае существования конструкции, позволяющей уменьшить площадь, при достижении ее стенок прекращается рост и незначительно снижается масса взрывоопасной смеси, центр тяжести опасного облака

смещается ближе к проливу. Снижение связано с превышением ВКП вблизи пролива. В дальнейшем может наблюдаться небольшой рост массы паров СПГ перешедшей во взрывоопасное состояние, но местоположение центра тяжести опасного облака продолжает смещаться ближе к проливу. Таким образом, применение ограждающих конструкций даже большой площади позволяет значительно снизить дальность отлета опасных облаков. Однако создание обвалованных и бассейнов-накопителей небольшой площади может значительно увеличить время существования опасных концентраций природного газа в приземном пространстве.

Таким образом, строительство ограждающих конструкций позволяет снизить массу газа в опасных облаках. И как следствие размеры облаков, а также дальность распространения опасных облаков вдоль земной поверхности.

При принятии решения и формировании мер по обеспечению безопасности объектов необходимо оценить расстояния, на которые приемлемо распространение опасных облаков и в соответствии с этим принимать размеры опасных зон.

В процессе моделирования распространения паров СПГ в окружающем пространстве можно оценивать размеры наиболее опасных облаков, массу смеси, приходящейся на 1 м длины облака, и для них производить расчеты возможного теплового воздействия на персонал и конструкции. На рисунках 3 и 4 приведены зависимости наибольшей высоты и полуширины облака опасных концентраций от расстояния до центра пролива СПГ при площади обвалования 1000 м².



Рисунок 3 – Зависимость наибольшей высоты облака опасной концентрации газа от расстояния до центра пролива



Рисунок 4 – Зависимость наибольшей полуширины облака опасной концентрации газа от расстояния до центра пролива

Из рисунков видно, что по мере удаления от места пролива СПГ происходит растекание облаков, то есть увеличение его ширины. В то же время увеличивается высота облака газа, пока не достигается некоторого предельного значения. По мере удаления от места пролива и увеличения ширины опасного облака происходит снижение его высоты. Кроме того моделирование позволяет определить фрагментация взрывоопасных облаков. В рассмотренном случае на расстоянии примерно 250 м происходит снижение высоты облака и затем его плавное нарастание.

Ориентируясь на величины, представленные на рисунках 3 и 4, можно построить график локальных опасных концентраций на местности. Выявить конструкции, попадающие под воздействие опасных факторов, полноценно оценить возможные опасные зоны и сформировать планировочные решения.

Заключение. Использование программного комплекса и модели разработанной автором позволяет на ранних этапах проектирования сформировать адекватные меры по защите персонала и конструкций, разместить ключевые элементы опасного производственного объекта вне зоны действия опасных факторов, определить наиболее безопасное расположение бассейнов-накопителей на площадке ОПО.

Сформированная модель показала результативность адекватного использования ограждающих конструкций, обвалований и бассейнов-накопителей. Однако при выборе конструкций необходим полноценный анализ формируемых опасных зон и динамики распространения облаков. Все эти действия помогут снизить последствия аварий на объектах содержащих сжиженные природный газ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Болодьян, И.А. Горение водородно-воздушных смесей большого объема в свободном пространстве / И.А. Болодьян, В.Н. Куликов, В.И. Макеев, В.В. Строганов [и др.] // Сборник материалов II Всесоюзной научно-технической конференции «Взрывобезопасность технологических процессов, пожаро- и взрывозащита оборудования и зданий». – Черкассы, 1985. – С.15-16.
2. Васильчук, М.П. Проблемы технической безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса / М.П. Васильчук // Безопасность труда в промышленности. – 1993. – №12. – С. 2-6.
3. Лесконого А.А. Особенности и основные проблемы обеспечения промышленной безопасности терминалов сжиженного природного газа / А.А. Лесконого, Г.Ю. Чуркин // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 12. – С. 57–62.
4. Пожаробезопасное применение малотоннажных установок хранения и распределения сжиженного природного газа. Рекомендации / ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – М., 2013. – 46 с.
5. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Анализ состояния проблемы / И.А. Болодьян и др. – Пожарная безопасность, – 2000 г., – № 2. – С. 86 – 96.
6. Пожаровзрывоопасность сжиженных и газообразных горючих: Сб. научн. Тр. – М.: ВНИИПО, 1990. – 82 с.
7. Яковлев В.В. Экологическая безопасность, оценка риска. Монография. // В.В. Яковлев – СПб.: «Международный центр экологической безопасности региона Балтийского моря», Издательство НП «Стратегия будущего», 2006. – 476 с.
8. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Процессы испарения и формирование пожаровзрывоопасных облаков при проливе жидкого

метана. Методика оценки параметров./ И.А. Болодьян, В.П. Молчанов, Ю.И. Дешевых [и др.] // Пожарная безопасность. – 2000. – №4. – С. 108-121.

9. Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору – утв. приказом № 158 от 20.04.2015 – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – Текст: электр.

10. Бармин И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / И.В. Бармин, И.Д. Кунис – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.

11. Глинка Н.Л. Общая химия / Н.Л. Глинка – М.: 2003. – 728 с.

12. Литвинова Г.Ж. Свойства вредных и опасных веществ, обращающихся в нефтегазовом комплексе / Г.Ж. Литвинова, С.Б. Ошеров, А.П. Вогман [и др.] – Воронеж.: ДОО «Газпроектинжиниринг», 2005. – 358 с.

13. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. / Г.Н. Абрамович – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. – 716 с.

14. Аристов В.В. Изучение устойчивых и неустойчивых струйных течений на основе уравнения Больцмана / В.В. Аристов // Механика жидкости и газа. – 1998. – №2. – С. 153-157.

15. Старовойтова Е. В. Формирование взрывоопасного облака при аварийном выбросе сжиженного углеводородного газа в атмосферу / Е. В. Старовойтова, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров // Вестник Казан. Технол. Ун-та. – 2012. – №14. – С. 213-214.

16. Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Д.Я. Исламхузин, Ф.М. Гимранов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (часть 7) – С. 1452-1460.

17. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа / А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, А.В. Пчельников, С.И. Сумской // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46-52.

18. Савицкая Т.В., Егоров А.Ф., Захарова А.Ю. Верификация моделей рассеяния газа с использованием специализированных программных комплексов TOXI+ и FLACS / Т.В. Савицкая, А.Ф. Егоров, А.Ю. Захарова // Безопасность Труда в Промышленности, – 2015, – № 12. – С. 70-75.

19. Николенко Т.М. Моделирование рассеяния паров сжиженного природного газа в атмосфере. / Т.М. Николенко // Техносферная безопасность как комплексная научная и образовательная проблема : материалы Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 4–6 октября 2018 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, – 2018. – 354 с. – С. 251-256.

20. СП 240.1311500.2015 Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности // Министерство РФ по делам ГО, ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий – утв. 20.08.2015 – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – Текст: электр.

21. Улыбин В.Б., Николенко Т.М. Влияние площади обвалования на процесс аварийного пролива сжиженного природного газа. / В.Б. Улыбин, Т.М. Николенко // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XX Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (3-6 апреля 2017 года) том 2, «Технические средства противодействия терроризму», РАРАН-Москва, НПО СМ – СПб., – 2017, – С.152-157.

Статья поступила в редакцию 13.04.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021