

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 77–85
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):77-85

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.844

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.77-85>

Методика проведения экспериментального исследования тушения струйного горения газа автоматическими установками газопорошкового пожаротушения

Дмитрий Александрович Корольченко¹✉, Владимир Иванович Селивёрстов²,
 Александра Борисовна Саенкова²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² ООО «Каланча Инжиниринг», г. Сергиев Посад, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в РФ активно осуществляется проектирование и строительство объектов обращения сжиженного природного газа (СПГ). Аварии на данных объектах, как правило, начинаются с разгерметизации оборудования, истечения и последующего возгорания горючих веществ. В результате воздействия опасных факторов пожара от первичной аварии возможно разрушение соседнего оборудования и каскадное развитие аварии. В основном, опубликованные работы, посвященные тушению СПГ, рассматривают вопросы тушения или локализации пролива СПГ. Вопросы, связанные с тушением пожара горючих газов, истекающих под давлением, мало изучены.

Цель. Разработка методики проведения огневых испытаний при тушении струйного горения газа.

Задачи. Обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ; анализ частоты возникновения утечек и их наиболее вероятный диаметр; определение параметров модельного очага струйного пожара; определение параметров испытательного стенда и порядка проведения огневых испытаний.

Аналитическая часть. Методика разработана на основе анализа статистических данных по авариям на нефтехимическом оборудовании. На основе данных по частоте разгерметизации технологического оборудования и наиболее вероятного эквивалентного диаметра аварийного отверстия определены параметры испытательного стенда для проведения испытаний по тушению струйного горения СПГ.

Выводы. Сделан обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ, а также анализ частоты возникновения утечек и их наиболее вероятный диаметр. На основе данного анализа определены параметры испытательного стенда и предложен порядок проведения огневых испытаний. Разработана методика проведения испытаний при тушении струйного горения для определения огнетушащей эффективности модулей пожаротушения.

Ключевые слова: модуль пожаротушения; методика испытаний; сжиженный природный газ; факельное горение; струйное горение

Для цитирования: Корольченко Д.А., Селивёрстов В.И., Саенкова А.Б. Методика проведения экспериментального исследования тушения струйного горения газа автоматическими установками газопорошкового пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 77–85. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.77-85

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Methodology for experimental investigation of gas jet fire suppression using automatic gas-powder fire extinguishing systems

Dmitriy A. Korolchenko¹✉, Vladimir I. Seliverstov², Alexandra B. Saenkova²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² Kalancha Engineering LLC, Sergiev Posad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, the design and construction of liquefied natural gas (LNG) facilities are actively taking place in the Russian Federation. Accidents at these facilities typically start with equipment leaks, followed by the release and subsequent ignition of flammable substances. The impact of such fire hazards can lead to the destruction of adjacent equipment and cascading accidents. Existing literature on LNG fire suppression mainly focuses on extinguishing or containing LNG spills. However, there is limited research on fire suppression of pressurized combustible gases.

This publication **aims** are to develop a methodology for conducting fire tests on gas jet fire suppression. The **tasks** include reviewing the results of previous experiments on jet releases of LNG, analyzing the frequency of leaks and their most probable diameter, determining the parameters of the model fire source, defining the parameters of the test setup, and outlining the procedure for conducting fire tests.

Analytical part. The methodology is developed based on the analysis of statistical data on accidents in the petrochemical industry. Parameters of the test setup for conducting LNG jet fire suppression tests are determined using data on the frequency of equipment leaks and the most probable equivalent diameter of the accidental openings.

Conclusions. A review of previous experiments on LNG jet releases and an analysis of leak frequencies and their most probable diameters have been conducted. Based on this analysis, parameters for the test setup and a procedure for conducting fire tests have been proposed. A methodology for conducting fire tests on gas jet fire suppression to determine the fire extinguishing effectiveness of fire suppression modules has been developed.

Keywords: fire suppression module; test methodology; liquefied natural gas; flare combustion; jet fire

For citation: Korolchenko D.A., Seliverstov V.I., Saenkova A.B. Methodology for experimental investigation of gas jet fire suppression using automatic gas-powder fire extinguishing systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):77-85. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.77-85 (rus).

✉ Dmitry Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgmsu.ru

Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации активно развивается рынок СПГ, идет строительство сети криогенных заправок станций (Крио-АЗС) и комплексов по сжижению природного газа. До 2025 г. планируется увеличить количество действующих объектов газозаправочной СПГ-инфраструктуры в 3 раза по сравнению с 2022 г.¹ В то же время увеличиваются поставки СПГ на внешние рынки, осуществляется строительство СПГ-заводов в арктической зоне, ориентированных на экспорт². Одновременно ведется работа по актуализации и развитию нормативной базы, содержащей требования по пожарной безопасности для объектов СПГ^{3, 4, 5}.

В мире технология СПГ развивается и активно применяется для транспортирования природного газа морскими путями уже более 50 лет.

За эти годы был проведен ряд испытаний, направленных на исследования свойств СПГ при горении. В основном проводилось два типа исследований: пожар пролива СПГ в очаг фиксированного размера и пролив СПГ, свободно растекающийся по поверхности воды. Диаметр очага для первого варианта варьируется от 2 до 35 м в зависимости от серии опытов [1, 2].

В работах [3–7] приведены данные по тушению пролива СПГ пенами высокой кратности. Проведенные исследования показывают, что пена высокой кратности может снизить тепловой поток от пламени и уменьшить испарение паров с поверхности, однако полного тушения СПГ не происходит.

СПГ хранится и транспортируется по трубам под давлением. Поэтому при разгерметизации оборудования через отверстие СПГ будет вытекать под давлением и формировать струю. При свободном

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.02.2021 № 350-п. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102180025?index=6&rangeSize=1>

² GIIGNL — International Group of Liquefied Natural Gas Importers. The LNG Industry GIIGNL Annual Report 2022; GIIGNL: Neuilly-sur-Seine, France, 2022. URL: tandardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXedAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MzE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDI0MAAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

³ Уведомление о разработке проекта свода правил Изменения № 1 СП 240.1311500.2015 «Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности». URL: https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXedAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MzE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDI0MAAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

⁴ Уведомление о разработке проекта свода правил Изменения № 1 СП 326.1311500.2017 «Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности». URL: tandardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXedAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MjE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDMyNgAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

⁵ Уведомление о разработке проекта свода правил СП «Бункеровка водного транспорта сжиженным природным газом. Требования пожарной безопасности». URL: tandardization/notification/notificationssetrules?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXedAAZsZW5ndGgAAAABAAIxMAAGYWN0aW9uAAAAAQAMbm90aWZpY2F0aW9uAAJpZAAAAAEABiA2MzE5MgAEcGFhZQAAAAEAATAABHRIeHQAAAAABAAjRgdC_IDMyNgAFc3RhdGUAAAAABAAZBQ1RVQUwABHR5cGUAAAAABAAAAB19fRU9GX18*&portal:componentId=5bb1aa96-ad4f-4e66-afe1-a7d403577940

истечении СПГ под давлением через отверстия не наблюдалось формирование пролива СПГ [2, 8]. При наличии препятствий на пути струи СПГ выпадает на поверхность и образуется пролив. При горизонтальном истечении СПГ без воспламенения при массовом расходе 5 кг/с через отверстие диаметром 25 мм при давлении от 3,5 до 7 бар зона с концентрацией метана более 5 % измеряется на расстоянии 80 м по направлению выброса. При вертикальном выбросе СПГ в условиях слабого ветра легковоспламеняющееся облако может опуститься до уровня земли, но выпадение капель СПГ зафиксировано не было. При воспламенении длина пламени достигала 25 м при массовой скорости выброса 5 кг/с [2].

В работе [9] описаны испытания с поджогом струй СПГ. Были проанализированы длина, форма и температура факела пламени при разном массовом расходе СПГ. Диаметр сопла во всех опытах составлял 10 мм, давление менялось в пределах 5,2–10,1 бар. В опыте с массовым расходом СПГ 0,02 кг/сек и давлением 5,5 бар наблюдалось выпадение капель СПГ из факела и образование пролива на поверхности земли.

В серии экспериментов (Coyote series tests) облако паров СПГ поджигалось с помощью горячей струи смеси пропана с воздухом, но существенного влияния на характер горения облака СПГ отмечено не было [1, 10]. Скорость распространения пламени по облаку СПГ уменьшается по мере удаления от источника воспламенения, и избыточное давление наблюдалось лишь в несколько миллибар.

В работах [11–19] представлены данные по проведению огневых испытаний при выпуске горючих газов под давлением. В работе [15] проводились эксперименты с природным газом и смесью природного газа с водородом. Газ выпускался из отверстий диаметром 20, 35 и 50 мм под давлением около 60 бар, расход газа находился в пределах от 3 до 20 кг/сек. При этом длина пламени доходила до 50 м.

В работах [20, 21] проведен анализ данных аварий, в которых было зафиксировано струйное воспламенение. На основе частоты реализации различных сценариев протекания аварий было построено дерево событий. Примерно в 50 % случаев струйный пожар вызывает другое событие с серьезными последствиями, т.е. авария развивается по принципу домино. В работе [22] отмечено, что возникновение струйного горения СПГ может привести к катастрофическим последствиям.

Таким образом, разгерметизация оборудования, утечка СПГ под давлением и его дальнейшее воспламенение приводят к риску каскадного развития

аварии. При этом исследования по тушению такого рода пожаров не проводились. В связи с чем разработка методики исследования тушения струйного горения газа и проведения соответствующих испытаний для различных видов огнетушащих веществ является актуальной задачей.

Целью данной публикации является разработка методики проведения огневых испытаний при тушении струйного горения газа. Для этого решаются следующие задачи: обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ, анализ частоты возникновения утечек

Таблица 1. Частота разгерметизации оборудования
Table 1. Frequency of equipment depressurization

Оборудование Equipment	Частота возникновения утечек (случаев на единицу оборудования в год) Frequency of leaks (cases per unit of equipment per year)	
	эквивалентный диаметр отверстия ≥ 1 мм equivalent hole diameter ≥ 1 mm	эквивалентный диаметр отверстия ≥ 50 мм equivalent hole diameter ≥ 50 mm
Технологический сосуд Technological vessel	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Центробежный насос Centrifugal pump	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Поршневой насос Piston pump	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Центробежный компрессор Centrifugal compressor	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Поршневой компрессор Piston compressor	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Теплообменник (оболочковый) Heat exchanger (shell)	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Теплообменник (труба в трубе) Heat exchanger (pipe in pipe)	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
Теплообменник (пластинчатый) Heat exchanger (plate)	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Теплообменник (с воздушным охлаждением) Heat exchanger (air-cooled)	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
Фильтр Filter	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$

⁶ СТО Газпром 2-2.3-569–2011. Методическое руководство по расчету и анализу рисков при эксплуатации объектов производства, хранения и морской транспортировки сжиженного и сжатого природного газа. ООО «Газпром», 2011.

Таблица 2. Параметры очага струйного пожара СПГ
Table 2. Parameters of the LNG jet fire source

Параметр Parameter	Значение Value
Условный диаметр отверстия, мм Nominal diameter of the hole, mm	25
Агрегатное состояние истекающего продукта Aggregate state of the expiring product	Жидкая фаза и пары Liquid phase and vapors
Расход горючего, не более, кг/с Fuel consumption, not more than, kg/s	5
Характер отверстия The nature of the hole	Круглое Round
Направление истечения Direction of expiration	Горизонтально Horizontal
Давление подачи, МПа Supply pressure, MPa	0,12

и их наиболее вероятный диаметр; определение параметров модельного очага струйного пожара; определение параметров испытательного стенда и порядка проведения огневых испытаний.

Аналитическая часть.

Разработка методики проведения испытаний

Определение параметров испытательного стенда

Для проведения адекватных огневых испытаний установки пожаротушения необходимо смоделировать очаг пожара, который наиболее вероятен и характерен для объекта защиты.

Согласно данным, представленным в табл. 1, наиболее вероятны утечки с диаметром менее 50 мм.

Оборудование на объектах малотоннажного производства и потребления СПГ, на котором возможны утечки, — баллоны для хранения сжатого природного газа (КПГ), резервуары для хранения СПГ, регуляторы давления, запорная арматура, трубопроводы, компрессоры, насосы, оборудование для газификации СПГ, узлы залива и слива СПГ.

Согласно данным, представленным в [23], наиболее вероятна утечка диаметром 2 мм и более, 97 % утечек приходится на диаметр отверстия менее 22 мм. В работе [24] также отмечено, что наибольшая вероятность образования утечки из отверстий менее 50 мм. При горизонтальном истечении СПГ риск попадания в зону теплового воздействия факела пожара соседнего оборудования наиболее вероятен.

Таким образом, можно предложить следующие параметры модельного очага струйного пожара СПГ (представлены в табл. 2).

Таблица 3. Технические характеристики модуля пожаротушения
Table 3. Technical characteristics of the fire extinguishing module

Наименование параметра Name of the parameter	Значение Value
Обозначение модуля Module designation	МГПП-110-CO2-30- PX-ABCE-Y2 MGPP-110-CO2-30- RH-ABCE-U2
Защищаемый объем, м³ Protected volume, m³	110
Класс пожара А Fire class A	900
Класс пожара В Fire class B	600
Классы пожаров Classes of fires	A, B, C, E
Огнетушащее вещество Extinguishing agent	Газопорошковое Gas powder
Температурный диапазон эксплуатации, °С Operating temperature range, °C	От минус 50 до плюс 50 From minus 50 to plus 50
Полная масса модуля, не более, кг The total weight of the module, not more than, kg	365
Масса применяемого огне- тушащего порошка «Феникс ABCE-70», не менее, кг The mass of the applied fire extinguishing powder “Phoenix ABCE-70”, kg, not less than	80
Масса применяемого рабо- чего газа — двуокиси угле- рода жидкой, не менее, кг The mass of the working gas used is liquid carbon dioxide, not less than, kg	30
Быстродействие модуля, не более, сек Module performance, no more than, sec	1
Время подачи огнетушащего вещества, не более, сек Time of fire extinguishing agent supply, no more than, seconds	10
Габаритные размеры, ширина × глубина × высота, мм Overall dimensions, width × depth × height, mm	630 × 670 × 1740
Срок службы, не менее, лет Service life, not less than, years	20
Производитель Manufacturer	ООО «Каланча» LLC “Kalancha”

Объект испытаний

Модули газопорошкового пожаротушения успешно прошли испытания и применяются для защиты объектов нефтехимической промышленности уже более 20 лет^{7, 8} [25]. Для защиты технологического оборудования, установленного на открытых площадках, подача огнетушащего вещества осуществляется с четырех сторон для компенсации влияния ветра и создания огнетушащей концентрации на время, достаточное для тушения очага пожара. Так как технология газопорошкового пожаротушения является объемной, то не имеет значения, в какой точке защищаемого пространства происходит утечка и в каком направлении будет сконцентрировано пламя. Порошок, распределенный в объеме, будет попадать в зону горения вместе с потоком воздуха и осуществлять тушение. Для проведения данных испытаний планируется использовать модуль с раздельным хранением компонентов МГПП-110-CO₂-30-PX-ABCE-Y2. Основные характеристики модуля приведены в табл. 3.

Цель экспериментального исследования: подтверждение огнетушащей эффективности модулей

⁷ Патент WO 2007117168 (A1). Fire-extinguishing gas-dispersed composition, a fire-fighting method and a device for carrying out said method, A62C13/66; A62C2/00; A62D1/06, WO 2006RU00167 20060407; 18.10.2007 / Seliverstov V.I., Stenkovoy V.I., Veretinsky P.G. et. al.

⁸ Патент № 2362599 C1 Российская Федерация, МПК A62C 2/00, A62D 1/00, A62C 35/02. Огнетушащий газодисперсный состав, способ тушения пожара и устройство для его осуществления: № 2007147314/12, заявл. 21.12.2007, опубл. 27.07.2009 / В.И. Селиверстов, В.И. Стенковой, П.Г. Веретинский и др.: пат. RU 2362599C1 USA.

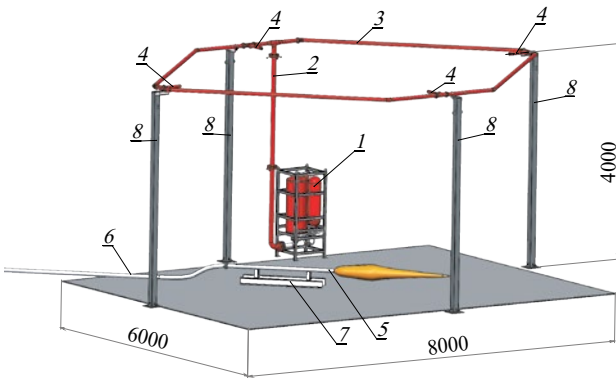


Схема испытательного стенда: 1 — модуль газопорошкового пожаротушения; 2 — магистральный трубопровод подачи ГПОВ; 3 — кольцевой трубопровод подачи ГПОВ; 4 — насадок распыления ГПОВ; 5 — сопло; 6 — трубопровод подачи СПГ; 7 — опора; 8 — опора трубопровода ГПОВ

Diagram of the test stand: 1 — gas-powder fire extinguishing module; 2 — main pipeline for supplying GPOV; 3 — annular pipeline for supplying GPOV; 4 — GPOV spray nozzles; 5 — nozzle; 6 — LNG supply pipeline; 7 — support; 8 — support of the GPOV pipeline

Таблица 4. Перечень используемых для экспериментальных исследований средств измерений

Table 4. List of measuring instruments used for experimental studies

Наименование средства измерения Name of measuring instrument	Диапазон измерений Measurement range	Класс точности, погрешность измерений Accuracy class, measurement error
Преобразователи термоэлектрические кабельные КТХА Thermoelectric cable converters KTXA	(–40 ... +1100) °C	Класс точности 1 Accuracy class 1

Измеритель параметров микроклимата «МЕТЕОСКОП-М»

Meter of microclimate parameters "METEOSKOP-M"

Измерение температуры Temperature measurement	(–40 ... +85) °C	± 0,2 °C
Измерение влажности Humidity measurement	(5 ... 97) %	± 3 %
Измерение давления воздуха Air pressure measurement	(80 ... 110) кПа (80 ... 110) kPa	± 0,13 кПа ± 0.13 kPa
Скорость воздушного потока Air flow velocity	(0,1 ... 20) м/с (0.1 ... 20) m/s	± (0,1 + 0,05V), где V — значение измеряемой скорости, м/с ± (0.1 + 0.05V), where V is the value of the measured velocity, m/s

газопорошкового пожаротушения при струйном горении СПГ на открытых технологических установках.

Схема испытательного стенда

На рисунке представлена схема проведения эксперимента по тушению струйного возгорания с помощью установки газопорошкового пожаротушения. Модельный очаг представляет собой сопло 5 с диаметром выходного отверстия 25 мм. Сопло расположено в центре защищаемого пространства и жестко закреплено на опоре 7. По трубопроводу 6 осуществляется подача СПГ на сопло. Подача осуществляется с помощью насоса. Массовая скорость подачи находится в пределах до 5 кг/с. Модуль пожаротушения 1 устанавливается вблизи испытательного стенда, но так,

чтобы на него не оказывалось прямого воздействия пламени. Модуль подключается к магистральному трубопроводу 2, далее идет кольцевой коллектор 3. Кольцевой коллектор применяется для равномерной подачи огнетушащего вещества из четырех насадков распыления 4. Насадки расположены на высоте и закреплены на опорах 8.

В зоне пламени устанавливаются термодатчики для измерения температуры пламени и фиксации результатов тушения. Дополнительно ведется фиксация испытаний на видеоаппаратуру. Перечень средств измерений указан в табл. 4.

Порядок проведения испытаний

При проведении экспериментального исследования необходимо выполнить шаги в следующей последовательности:

- проверяется работоспособность всех средств управления и обеспечения безопасности исследования (клапаны, запорная арматура и т.п.);
- проверяется работоспособность всех измерительных средств;
- перед испытаниями систему трубопроводов подачи СПГ заполняют жидким азотом для охлаждения и проверки на наличие утечек в соединениях;
- открывается вентиль подачи СПГ;
- после подачи СПГ на сопло производится поджог струи открытым пламенем или высоковольтным искровым разрядом;
- устанавливается требуемый расход СПГ до 5 кг/с;
- после достижения устойчивого и стабильного горения производится ручной пуск модуля;

- через 5 с прекращается подача СПГ для предотвращения загазованности испытательной площадки;
- производится фиксация результатов испытаний.

Испытания считаются успешными, если произошло тушение пламени и не было повторного возгорания в течение минуты после срабатывания модуля.

В ходе испытаний регистрируются следующие параметры:

- скорость и направление ветра;
- расход и давление подачи СПГ;
- время выхода СПГ и ГПОВ;
- время тушения;
- температура в зоне струйного горения.

Определение тушения осуществляется визуально (по данным видеофиксации) — не должно наблюдаться открытого пламени факела. Также критерием тушения является снижение показаний термодатчиков до температуры ниже температуры самовоспламенения природного газа, равной 537 °С.

Выводы

Проведен обзор результатов проведенных экспериментов со струйным истечением СПГ, сделан анализ частоты возникновения утечек и их наиболее вероятный диаметр. На основе данного анализа были определены параметры испытательного стенда и предложен порядок проведения огневых испытаний.

Разработана методика проведения испытаний при тушении струйного горения для определения огнетушащей эффективности модулей пожаротушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 444–464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
2. Cleaver P., Johnson M., Ho B. A summary of some experimental data on LNG safety // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 429–438. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.047
3. Suardin J.A., Wang Y., Willson M., Mannan M. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 165. Issue 1–3. Pp. 612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
4. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key findings of liquefied natural gas pool fire outdoor tests with expansion foam application // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50. Issue 4. Pp. 2359–2372. DOI: 10.1021/ie101365a
5. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key Observations of Liquefied Natural Gas Vapor Dispersion Field Test with Expansion Foam Application // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50. Issue 3. Pp. 1504–1514. DOI: 10.1021/ie100822h
6. Zhang Z., Krishnan P., Jiao Z., Mannan M., Wang Q. Developing a CFD heat transfer model for applying high expansion foam in an LNG spill // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104456. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104456
7. Yang J., Li Y., Zhu J., Han H. Quantitative study of the factors of LNG liquid foam stability: Operating parameters and collection containers and time // Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 117. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
8. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling // Journal of Hazardous Materials. 2006. Vol. 132. Issue 2. Pp. 119–140. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.008

9. Zhang Q., Liang D., Wen J. Experimental study of flashing LNG jet fires following horizontal releases // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 57. Pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.007
10. Koopman R.P., Ermak D.L. Lessons learned from LNG safety research // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 412–428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.042
11. Lu H., Delichatsios M.A., Li X., Liu S., Lv J., Hu L. Flame geometrical characteristics of downward sloping buoyant turbulent jet fires // *Fuel*. 2019. Vol. 257. P. 116112. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.06.227
12. Hu L., Wang Q., Delichatsios M.A., Tang F., Zhang X., Lu S. Flame height and lift-off of turbulent buoyant jet diffusion flames in a reduced pressure atmosphere // *Fuel*. 2013. Vol. 109. Pp. 234–240. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.12.050
13. Zhang X., Hu L., Zhang X., Tang F., Jiang Y., Lin Y. Flame projection distance of horizontally oriented buoyant turbulent rectangular jet fires // *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 176. Pp. 370–376. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.10.016
14. Bradley D., Gaskell P.H., Gu X., Palacios A. Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates // *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 164. Pp. 400–409. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.09.009
15. Lowesmith B.J., Hankinson G. Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures // *Process Safety and Environmental Protection*. 2012. Vol. 90. Issue 2. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.psep.2011.08.009
16. Gopalaswami N., Liu Y., Laboureux D.M., Zhang B., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 41. Pp. 365–375. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.003
17. Laboureux D.M., Gopalaswami N., Zhang B., Liu Y., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. Vol. 41. Pp. 355–364. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.013
18. Palacios A., Rengel B. Flame shapes and thermal flux of vertical hydrocarbon flames // *Fuel*. 2020. Vol. 276. P. 118046. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118046
19. Palacios A., García W., Rengel B. Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames // *Fuel*. 2020. Vol. 279. P. 118328. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118328
20. Gómez-Mares M., Luis Z., Joaquim C. Jet fires and the domino effect // *Fire Safety Journal*. 2008. Vol. 43. № 8. Pp. 583–588.
21. Casal J., Gómez-Mares M., Messineo M.A.M., Muñoz Messineo M.A. Jet fires: a “minor” fire hazard? // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. Vol. 26. Pp. 13–20. DOI: 10.3303/CET1226003
22. Zwęgliński T. Conventional event tree analysis on emergency release of liquefied natural gas: 5 // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Issue 5. P. 2961. DOI: 10.3390/ijerph19052961
23. Selvan R.T., Siddiqui N.A. Risk assessment of natural gas gathering station & pipeline network // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017. Vol. 12. Issue. 2. Pp. 227–242.
24. Fitzgerald G.A. Calculating facility siting study leak sizes-one size does not fit all // *Process Safety Progress*. 2016. Vol. 35. Issue 2. Pp. 176–178. DOI: 10.1002/prs.11764
25. Стенковой В.И., Селиверстов В.И., Молчадский И.С., Баратов А.Н. Газопорошковое тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах // *Пожарная безопасность*. 2011. № 1. С. 100–106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15608220>

REFERENCES

1. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):444–464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
2. Cleaver P., Johnson M., Ho B. A summary of some experimental data on LNG safety. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):429–438. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.047
3. Suardin J.A., Wang Y., Willson M., Mannan M. Field experiments on high expansion (HEX) foam application for controlling LNG pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165(1-3):612–622. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.040
4. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key findings of liquefied natural gas pool fire outdoor tests with expansion foam application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011; 50(4):2359–2372. DOI: 10.1021/ie101365a
5. Yun G., Ng D., Mannan M.S. Key observations of liquefied natural gas vapor dispersion field test with expansion foam application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011; 50(3):1504–1514. DOI: 10.1021/ie100822h

6. Zhang Z., Krishnan P., Jiao Z., Mannan M., Wang Q. Developing a CFD heat transfer model for applying high expansion foam in an LNG spill. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104456. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104456
7. Yang J., Li Y., Zhu J., Han H. Quantitative study of the factors of LNG liquid foam stability: Operating parameters and collection containers and time. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; 117:223-231. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.005
8. Luketa-Hanlin A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 132(2):119-140. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.008
9. Zhang Q., Liang D., Wen J. Experimental study of flashing LNG jet fires following horizontal releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:245-253. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.007
10. Koopman R.P., Ermak D.L. Lessons learned from LNG safety research. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):412-428. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.042
11. Lu H., Delichatsios M.A., Li X., Liu S., Lv J., Hu L. Flame geometrical characteristics of downward sloping buoyant turbulent jet fires. *Fuel*. 2019; 257:116112. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116112
12. Hu L., Wang Q., Delichatsios M.A., Tang F., Zhang X., Lu S. Flame height and lift-off of turbulent buoyant jet diffusion flames in a reduced pressure atmosphere. *Fuel*. 2013; 109:234-240. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.12.050
13. Zhang X., Hu L., Zhang X., Tang F., Jiang Y., Lin Y. Flame projection distance of horizontally oriented buoyant turbulent rectangular jet fires. *Combustion and Flame*. 2017; 176:370-376. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.10.016
14. Bradley D., Gaskell P.H., Gu X., Palacios A. Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates. *Combustion and Flame*. 2016; 164:400-409. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.09.009
15. Lowesmith B.J., Hankinson G. Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures. *Process Safety and Environmental Protection*. 2012; 90(2):108-120. DOI: 10.1016/j.psep.2011.08.009
16. Gopalaswami N., Liu Y., Laboureur D.M., Zhang B., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 41:365-375. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.003
17. Laboureur D.M., Gopalaswami N., Zhang B., Liu Y., Mannan M.S. Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 41:355-364. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.013
18. Palacios A., Rengel B. Flame shapes and thermal flux of vertical hydrocarbon flames. *Fuel*. 2020; 276:118046. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118046
19. Palacios A., García W., Rengel B. Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames. *Fuel*. 2020; 279:118328. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118328
20. Gómez-Mares M., Luis Z., Joaquim C. Jet fires and the domino effect. *Fire Safety Journal*. 2008; 43(8):583-588.
21. Casal J., Gómez-Mares M., Messineo M.A.M., Muñoz Messineo M.A. Jet fires: a “minor” fire hazard? *Chemical Engineering Transactions*. 2012; 26:13-20. DOI: 10.3303/CET1226003
22. Zwęgliński T. Conventional event tree analysis on emergency release of liquefied natural gas: 5. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022; 19(5):2961. DOI: 10.3390/ijerph19052961
23. Selvan R.T., Siddiqui N.A. Risk assessment of natural gas gathering station & pipeline network. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017; 12(2):227-242.
24. Fitzgerald G.A. Calculating facility siting study leak sizes-one size does not fit all. *Process Safety Progress*. 2016; 35(2):176-178. DOI: 10.1002/prs.11764
25. Stenkovoy V.I., Seliverstov V.I., Molchadskiy I.S., Baratov A.N. Gas-powder fire extinguishing of oil products in the tanks. *Fire safety*. 2011; 1:100-106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15608220> (rus).

Поступила 22.06.2023, после доработки 07.07.2023;

принята к публикации 17.07.2023

Received June 22, 2023; received in revised form July 7, 2023;

accepted July 17, 2023

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067;

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600;

Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

СЕЛИВЁРСТОВ Владимир Иванович, канд. техн. наук, генеральный конструктор, ООО «Каланча Инжиниринг», Россия, 141300, Московская область, г. Сергиев Посад, Скобяное шоссе, 3; РИНЦ ID: 975258; ResearcherID: IUP-8784-2023; ORCID: 0000-0002-8830-2366; e-mail: svi@kalancha.ru

САЕНКОВА Александра Борисовна, заместитель генерального конструктора, ООО «Каланча Инжиниринг», Россия, 141300, Московская область, г. Сергиев Посад, Скобяное шоссе, 3; РИНЦ ID: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; ORCID: 0000-0001-6502-6904; e-mail: asaenkova@kalancha.ru

Вклад авторов:

Корольченко Д.А. — научное руководство, разработка концепции статьи, окончательное утверждение версии статьи для публикации.

Селивёрстов В.И. — разработка концепции статьи.

Саенкова А.Б. — разработка концепции статьи, обзор публикации по теме статьи, написание текста статьи, подготовка графического материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Vladimir I. SELIVERSTOV, Cand. Sci. (Eng.), General Designer, Kalancha Engineering LCC Skobyano Highway, 3, Moscow Region, Sergiev Posad, 141300, Russian Federation; ID RISC: 975258; ResearcherID: IUP-8784-2023; ORCID: 0000-0002-8830-2366; e-mail: svi@kalancha.ru

Alexandra B. SAENKOVA, Deputy General Designer, Kalancha Engineering LCC Skobyano Highway, 3, Moscow Region, Sergiev Posad, 141300, Russian Federation; ID RISC: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; ORCID: 0000-0001-6502-6904; e-mail: asaenkova@kalancha.ru

Contribution of the authors:

Dmitriy A. Korolchenko — scientific management, the development of the article concept, final approval of the version of the article for publication.

Vladimir I. Seliverstov — the development of the article concept.

Alexandra B. Saenkova — the development of the article concept, review of publications on the topic of the article, writing the text of the article, preparing the graphical material.

The authors declare no conflicts of interests.