

Оригинальная статья / Original article

УДК 699.81

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-69-81>

Защитное покрытие строительных конструкций от криогенного воздействия на основе цементных плит

М. В. Гравит ¹ ✉, Е. С. Недвига ¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург 195251, Российская Федерация

✉ e-mail: marina.gravit@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве энергоносителя расширяется ежегодно. Поэтому целью данной статьи является анализ нормативных требований к защите конструкций от пролива криогенных жидкостей, таких как СПГ. Также в статье оценивается способность огнезащитных материалов сопротивляться не только высокотемпературным воздействиям, но и низкотемпературным.

Методы. В статье рассмотрены основные методики испытания материалов на противодействие проливу криогенных жидкостей и возможность применения средств огнезащиты в качестве криозащитных материалов. Объектом исследования стала огнезащитная конструктивная система, состоящая из плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Защитная система производства ООО «ПРОЗАСК» состоит из двух слоев огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» с негорючей мембраной. А предметом исследования – криозащитная функция такой системы.

Результаты. Средняя температура образца после 60-минутного криогенного воздействия составила 53°C, сделаны выводы о целесообразности проведения последовательных испытаний на низкотемпературное и огневое воздействия ввиду высокой вероятности развития пожара после пролива криогенной жидкости при наличии источника пламени.

Заключение. В статье показаны и проанализированы результаты испытания защитной системы производства ООО «ПРОЗАСК». При корректном выборе марки стали (в том числе по требованию к ударной вязкости) несущих конструкций объектов нефтегазового комплекса, можно сделать вывод о работоспособности конструкций, защищенных системой конструктивной огнезащиты с плитами «ПРОЗАСК Файерпанель», после часового криогенного воздействия.

Ключевые слова: сжиженный природный газ; криозащитные материалы; защита строительных конструкций; конструктивная огнезащита.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Гравит М. В., Недвига Е. С. Защитное покрытие строительных конструкций от криогенного воздействия на основе цементных плит // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 69-81. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-69-81>.

Поступила в редакцию 21.05.2024

Подписана в печать 18.07.2024

Опубликована 30.09.2024

© Гравит М. В., Недвига Е. С., 2024

Protective coating of steel structures from cryogenic effects based on cement slabs

Marina V. Gravit ¹ ✉, Ekaterina S. Nedviga ¹

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Polytechnicheskaya str. 29, Saint Petersburg 195251, Russian Federation

✉ e-mail: marina.gravit@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The use of liquefied natural gas (LNG) as an energy carrier is expanding annually. Therefore, the purpose of this article is to analyze the regulatory requirements for the structure protection from the cryogenic liquid spill such as LNG. The article also evaluates the ability of fireprotective materials to resist not only high-temperature influences, but also low-temperature ones.

Methods. The article discusses the main methods of material testings to counteract the cryogenic liquid spill and the possibility of using fireprotective products as cryoprotective materials. The results of testing the protective system manufactured by LLC "PROSASK" are shown and analyzed. The object of the study is a fire-retardant structural system consisting of "PROSASK Fire Panel" plates. The protective system consists of two layers of flame-retardant plates "PROSASK Fire Panel" with a non-flammable membrane " in the middle, manufactured by LLC "PROSASK". And the subject of the research is the cryoprotective function of this system.

Results. The average temperature of the sample after 60 minutes cryogenic exposure was - 53 °C, conclusions were drawn about the expediency of conducting successive tests for low-temperature and fire exposure due to the high probability of fire after the cryogenic liquid spill in the presence of a flame source.

Conclusion. The article shows and analyzes the test results of the protective system manufactured by LLC "PROSASK". With the correct choice of steel grade (including the requirement for impact strength) of load-bearing structures of oil and gas facilities, it can be concluded that structures protected by a structural fire protection system with PROSASK Firepanel plates are operable after an hour of cryogenic exposure.

Keywords: liquefied natural gas; cryoprotective materials; protection of building structures; structural fire protection.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Gravit M. V., Nedviga E. S. Protective coating of steel structures from cryogenic effects based on cement slabs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 69-81 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-69-81>.

Received 21.05.2024

Accepted 18.07.2024

Published 30.09.2024

Введение

Сжиженный природный газ (СПГ) – криогенная многокомпонентная смесь легких углеводородов, в основном, со-

стоящая из метана. СПГ используют в качестве энергоносителя, топлива автотранспорта и морских судов [1-4].

СПГ является одной из перспективных отраслей энергетики будущего, значительно опережая водород и возобновляемые источники энергии. СПГ является наиболее доступным для массового производства и внедрения в рыночный оборот.

Так объемы потребления и экспорта СПГ из России увеличиваются каждый год, за 2022 год импорт СПГ в страны ЕС увеличился в 1,5 раза, а в Китай – в 2 раза. Также это отраслевое развитие инициируется правительством России, выделяются гранты в качестве компенсации затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию СПГ-оборудования.

Согласно прогнозам Shell's LNG Outlook 2024 ожидается, что в долгосрочной перспективе к 2040 году мировой спрос на СПГ вырастет более чем на 50%, поскольку промышленный переход с угля на газ набирает обороты в Китае, а страны Южной и Юго-Восточной Азии используют больше СПГ для поддержки своего экономического роста.

Основная роль при работе с СПГ должна быть уделена созданию и поддержанию особых специфических условий для хранения и транспорта сжиженного газа, поскольку они имеют свои особенности: СПГ занимает объем в 600 раз меньше, чем природный газ, и имеет температуру -162°C [5-6].

Магистральные трубопроводы, по которым транспортируется СПГ, пролегают не только на охраняемых промышленных площадках, а прокладыва-

ются еще и вдоль магистралей, по территориям городов и на других неохранных участках. Следовательно, существует постоянная вероятность вмешательства третьих лиц или влияния иных факторов на целостность трубопроводов. Также повреждение трубопроводов влечет за собой значительный риск для людей, находящихся неподалеку. Зона опасности, связанная с повреждением, будет зависеть от характера повреждения трубопровода, времени до возгорания, состояния окружающей среды в месте повреждения и метеорологических условий [7-10]. По некоторым оценкам опасное расстояние, связанное с трубопроводом, колеблется от менее 20 м для меньшего трубопровода при более низком давлении до более 300 м для более крупного трубопровода при более высоком давлении [11-15]. Поэтому необходимы дополнительные усилия по повышению безопасности объектов СПГ.

Одним из вариантов повреждения газопровода является нарушение герметичности (в виду дефекта продольного шва в трубе, вмешательства извне и др.), вследствие чего происходит утечка СПГ.

Криогенная жидкость, попавшая на металлические конструкции, имеющие температуру, равную атмосферной, начинает кипеть и интенсивно снижает их температуру. Например, температура кипения жидкого этана составляет минус 89°C , СПГ - минус 160°C , жидкого азота - минус $195,8^{\circ}\text{C}$. Сильное охлаждение углеродистой или низколегированной стали, попавшей в зону пролива

криогенных жидкостей, приводит к охрупчиванию и разрушению металлических опорных и ограждающих строительных конструкций¹ [16-17].

Согласно ГОСТ 52630-2012 «Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия», ГОСТ 27772-2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия» специальные хладостойкие марки конструкционной стали типа 09Г2С, используемые для изготовления опорных и ограждающих стальных конструкций, имеют порог хладостойкости минус 70°C, а наиболее применяемые марки строительных углеродистых сталей имеют порог хладостойкости не более -40°C [18].

Поэтому в международной и российской нормативной документации отмечена необходимость контроля разлива и утечек криогенных жидкостей, а также мероприятий по снижению количества аварийных ситуаций. Требуется предусмотреть зону удержания утечек, ограждение или обвалование резервуаров СПГ для предотвращения растекания горючих жидкостей, ограничение минимального расстояния от объектов СПГ до источников воспламенения и предусмотреть защиту конструкций от криогенного и огневого воздействия.

¹ Патент № 2683449 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/94. Способ защиты металлических конструкций от негативного воздействия внешней среды (варианты) / Н. Д. Войтех, В. В. Ряхин, А. А. Степкин; заявитель Акционерное общество "НИПИгазпереработка" (АО "НИПИГАЗ"). № 2018112867; заявл. 09.04.2018; опубл. 28.03.2019. EDN ZDUIBV.

Согласно ГОСТ Р 56352-2015 «Нефтяная и газовая промышленность. Производство, хранение и перекачка сжиженного природного газа. Общие требования безопасности» конструкции и материалы ограждений, ограничивающих зону растекания жидкостей, должны быть рассчитаны в том числе и на криогенное воздействие.

Зарубежные стандарты EN 1473 и NFPA 59A и отраслевые стандарты крупнейших компаний нефтегазового комплекса (НГК) предписывают, чтобы стальные конструкции оборудования, технологических установок и эстакад с обращением и хранением СПГ должны быть стойкими к криогенному воздействию, то есть к воздействию газов, сжатых до жидкого состояния, находящихся при криогенных температурах (ниже -150 °C) [19-21].

Несмотря на то, что потребность в сертифицированных испытаниях криозащитных покрытий назрела уже давно, только в 2016 году опубликована первая часть документа ISO 20088, регламентирующего проведение испытаний различных материалов на низкотемпературное воздействие. Благодаря этому стал возможен сравнительный анализ эффективности защитных материалов, так как до этого производители проводили индивидуальные испытания продукции на основании собственных неаттестованных методик.

Серия стандартов ISO 20088 содержит три части в зависимости от вида криогенного воздействия и проверяет влияние:

– внезапного криогенного пролива (жидкая фаза);

– паровой фазы, действующей на конструкции;

– выпуска криогенной струи.

Стоит отметить, что ведутся работы над четвертой частью стандарта, которая охватывает выбросы воспламеняющихся криогенных струй.

Российский стандарт ГОСТ Р 71127-2023 «Нефтяная и газовая промышленность. Средства защиты строительных конструкций от воздействия криогенных сред. Общие требования. Методы испытаний» по испытаниям криогенной защиты введен в действие 01.04.2024 и гармонизирован с международным ISO 20088-1.

Криогенный пролив СПГ при наличии источника пламени приводит к возгоранию с повышенным давлением и тепловой нагрузкой, поэтому любая конструкция, к которой предъявляются требования по хладостойкости, должна быть защищена на огневое воздействие.

Для определения материалов, способных выполнять двойную защитную функцию, выполняют и комбинированные тесты. К примеру, сначала выполняются криогенные испытания в соответствии с ISO 20088, за которыми следуют стандартные испытания на огнестойкость, такие как испытание на режим струйного горения по ISO 22899 или испытание на ударную нагрузку под давлением [14-15]. К сожалению, специальные стандарты, охватывающие комбинированные тесты, на данный момент отсутствуют. Требования к продолжительности и подверженности определенному

режиму воздействия определяются инженерами и разработчиками средств огнезащиты индивидуально, в зависимости от проектных решений объекта.

Материалы и методы

Большая часть решений для защиты от криогенных проливов возникла на основе материалов, применяемых в качестве пассивной огнезащиты. К таким средствам относятся специальные огнезащитные штукатурки, кожухи, плиты и интумесцентные краски [18].

Часть материалов, используемых в качестве пассивной конструктивной огнезащиты, обладают хорошими теплоизоляционными свойствами как при высоких, так и при низких температурах и способны эффективно защищать как от разливов криогенных веществ, так и от пожаров. Для этого материалы должны сохранять свою целостность и температурно-изоляционные свойства в диапазоне от -200°C до 1300°C .

В данной статье рассматривается вариант пассивной огнезащиты в виде смонтированной на конструкцию облицовки из плит «ПРОЗАСК Файерпанель» на основе цементного связующего с легким минеральным наполнителем. Указанные плиты состоят из портландцемента и легкого минерального заполнителя, заармированы с двух сторон стеклосеткой и с лицевой стороны для повышения защитных свойств покрыты пропиточным лакокрасочным материалом.

Применение крио-огнезащиты на основе цементных плит заводского из-

готовления позволяет производить монтаж как в летнее, так и в зимнее время, а также снижает риски, связанные с производством работ на строительной площадке.

Для огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель» на цементном связующем проведен эксперимент по исследованию сопротивляемости криогенному воздействию.

Плиты являются негорючими с типоразмерами 1200 x 900 x 12,5 мм. Образец представляет из себя конструкцию из огнезащитных плит, смонтированных в два слоя с общей толщиной 25 мм на несущий металлический каркас, размещенный на металлической конструкции марки Fe 430, с размерами основания 1500 x 1500 x 10 мм и размерами бортов

1500 x 500 x 10 мм (рис. 1). Между слоями плит установлена негорючая воздухопроницаемая мембрана «ИЗО-ТЕКС 200 НГ W».

Испытание проводилось в НИЦ «ПБ» ИКБС НИУ МГСУ по собственной методике, разработанной на основании стандарта ISO 20088-1 «Determination of the resistance to cryogenic spillage of insulation materials – Part 1: Liquid phase».

Сущность метода заключается в определении достижения предельных значений (температуры - 49°C по средним значениям показаний датчиков температуры или времени воздействия равного 60 минутам) при воздействии на образец пролива 250 литров жидкого азота. Схема испытательного стенда выполнена в соответствии с ISO 20088-1.

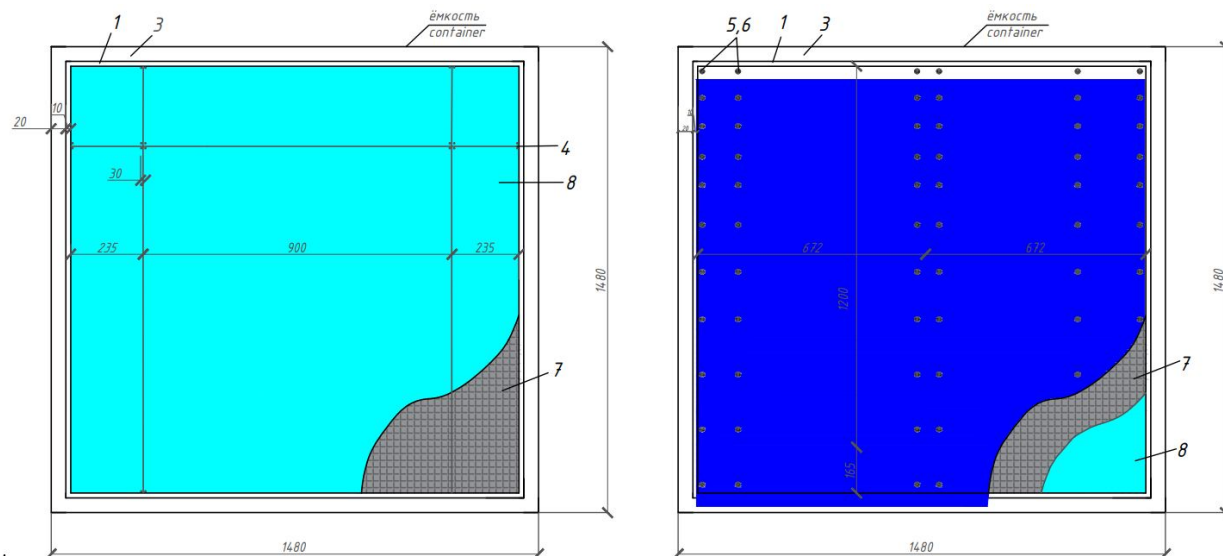


Рис. 1. Схема установки огнезащитной системы на основе огнезащитных плит «ПРОЗАСК Файерпанель». Схема раскладки плит первый слой (слева), второй слой (справа)

Fig. 1. Installation diagram of a fire-retardant system based on fire-retardant plates "PROSASK Fire panel". The layout of the plates is the first layer (left), the second layer (right)

Перед испытанием производилась установка термоэлектрических преоб-

разователей (ТЭП) для контроля уровня жидкости в образце, а также кабельных

термоэлектрических преобразователей типа КТХА для измерения температуры. Схема размещения термоэлектрических преобразователей на образце соответствует с ISO 20088-1.

Начало испытания совпадало с моментом излития 250 литров криогенной

жидкости в образец из резервуара подачи. В процессе испытания поддерживался уровень жидкого азота не ниже 5 см от основания образца. Образец до и после испытания представлен на рис. 2. Испытание проводилось в течение 60 минут [22-23].



Рис. 2. Общий вид образца плит до и после криогенного воздействия

Fig. 2. General view of the plate sample before and after cryogenic exposure

Результаты и их обсуждение

По окончании испытания производился слив жидкого азота из образца в течение периода времени, составляющего не более 15 минут, затем в течение 15 минут проводилась инспекция об-

разца. Значительных повреждений на защитном покрытии образца не зафиксировано. Наблюдался иней на всей поверхности плит. Показания 12 датчиков ТЭП температуры усреднены и представлены на рис. 3.

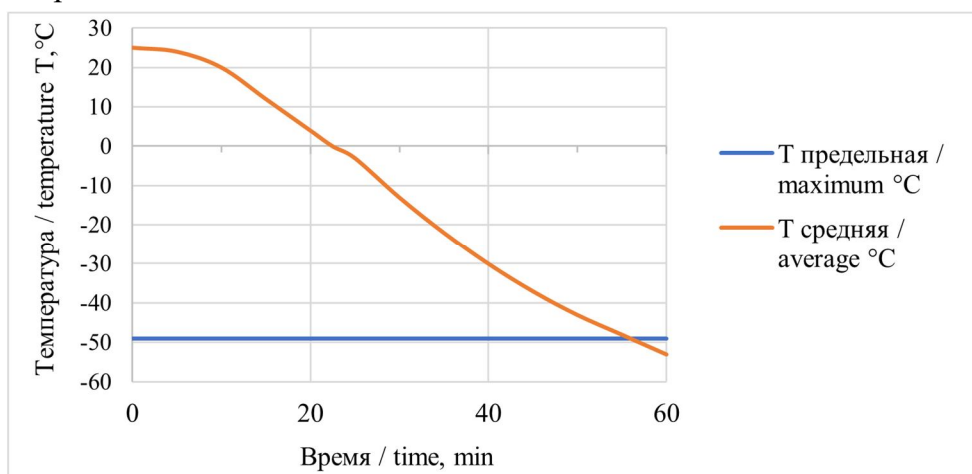


Рис. 3. График зависимости средней температуры по показаниям датчиков от времени

Fig. 3. Graph of the dependence of the average temperature according to sensor readings on time

Таким образом, рейтинг огнезащитной системы на основе огнезащитных плит «ПРОЗАКС Файерпанель» согласно методике, гармонизированной с ISO 20088-1, составляет «CL/металло-конструкция/минус49/53», где CL означает Liquid exposure (воздействие криогенной жидкостью) с достижением минус 49°C на металлоконструкции и спустя 53 минуты от начала криогенного воздействия (при этом расположение термомпар не соответствует участкам с наибольшим повреждением образца).

При испытании на криогенное воздействие системы плит «ПРОЗАКС Файерпанель» зафиксировано достижение критической температуры минус 49°C спустя 53 минуты по показаниям более чем трех термоэлектрических преобразователей, соответствующих участкам с наибольшим повреждением образца. Через час после низкотемпературного воздействия, средняя температура образца составила - 53°C, что выше минимальной эксплуатационной температуры стальных

конструкций (-60°C), требования к которым указаны в СП 16.13330.2017. При корректном выборе марки стали (в том числе по требованию к ударной вязкости) несущих конструкций объектов НГК, можно сделать вывод о работоспособности конструкций, защищенных системой конструктивной огнезащиты с плитами «ПРОЗАКС Файерпанель», после часового криогенного воздействия [23].

Выводы

Отсутствие существенных дефектов и сохранение целостности внешнего покрытия после низкотемпературного воздействия указывает на возможность дальнейшей работы системы защиты стальных конструкций с цементными плитами и противопожарным барьером и в условиях возгорания криогенной жидкости. Таким образом, требуется выполнить комбинированные последовательные испытания системы защиты на криогенное и огневое воздействия в соответствии с ISO 20088 и UL1709.

Список литературы

1. Производство СПГ в России должно вырасти в 4 раза к 2035 году. URL: https://www.vedomosti.ru/industry/energy_future/articles/2023/09/11/994392-proizvodstvo-spg-v-rossii-dolzno-virasti (дата обращения: 14.04.2024).
2. Mojarad A.A.S., Atashbari V., Tantau A. Challenges for Sustainable Development Strategies in Oil and Gas Industries // Proceedings of the 12th International Conference on Business Excellence 2018. Bucharest, 2018. P. 626-638. DOI: 10.2478/picbe-2018-0056.
3. Optimization of Cryogenic Spill Protection Insulation Thickness / Yoshinori Hiroya, Masayuki Tanabe, Shunji Kataoka, Yoshinori Yamada, Tomonori Miyashita // An International Research Journal. Chemical Engineering Transactions. 2016. №48. P. 643-648.

4. A combined fluid-dynamic and thermodynamic model to predict the onset of rapid phase transitions in LNG spills / K. Y. Lervåg, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. № 69. P. 104354.

5. Березняков А. А., Калаушин Д. Р., Симонов М. Ю. Анализ применения различных теплообменных аппаратов в области сжиженного природного газа // *Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 08–09 ноября 2022 года* / отв. ред. Е.Б. Федорова. М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2023. С. 88-91. EDN RUHDQQ.

6. Simplified Method to Define the Cryogenic Spill Hazard in LNG Liquefaction Facility / Y. Hiroya, M. Tanabe, S. Kataoka, Y. Yamada, T. Miyashita // *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. 2019. №77. P. 505-510. <https://doi.org/10.3303/CET1977085>

7. Jo Y.-D., Ahn B.J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2002. Vol. 15, is. 3. P. 179-188.

8. Mitigation of Risks Associated with Gas Pipeline Failure by Using Quantitative Risk Management Approach: a Descriptive Study on Gas Industry / A. H. Abdoul Nasser, P. D. Ndalila, E. A. Mawugbe, M. Emmanuel Kouame, M. A. Paterne, Y. Li // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. №9(10). P. 1098. <https://doi.org/10.3390/jmse9101098>.

9. Jet fires and cryogenic spills: How to document extreme industrial incidents / R.F. Mikalsen, K. Glansberg, E.D. Wormdahl, R. Stolen // *In Proceedings of the Sixth Magdeburg Fire and Explosion Days conference proceedings. Magdeburg, Germany, 25–26 March. 2019*. P. 1-6.

10. Methodology to analyse LNG spill on steel structure in congested marine offshore facility / T. Baalisampang, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. № 62. 103936 p.

11. Young-Do Jo, Bum Jong Ahn. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas // *Journal of Hazardous Materials*. 2005. Vol. 123, is. 1–3. P. 1-12.

12. Bradley I., Willoughby D., Royle M. A review of the applicability of the jet fire resistance test of passive fire protection materials to a range of release scenarios // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. №122. P. 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.004>.

13. Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames / Delphine M. Laboureur, Nirupama Gopalaswami, Bin Zhang, Yi Liu, M. Sam Mannan // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016. № 41. P. 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.013>.

14. Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident / Liu Y., et al. // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. № 146. P. 1–8.
15. Nguyen L. D., Kim M., Chung K. Vaporization of the non-spreading cryogenic-liquid pool on the concrete ground // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. N 163. P. 120464.
16. Nubli H., et al. Structural impact under accidental LNG release on the LNG bunkering ship: Implementation of advanced cryogenic risk analysis // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. № 186. P. 329–347.
17. Yu X., et al. Flame characteristics of under-expanded, cryogenic hydrogen jet fire // *Combustion and Flame*. 2022. № 244. P. 112294.
18. Cryogenic Spill Protection Requirements. Part 1. Fundamentals. URL: <https://www.pfpnet.com/wp-content/uploads/2023/11/PFPNet-Fundamentals-of-Cryogenic-Spill-Protection-Part-1.pdf> (дата обращения: 14.04.2024).
19. Gravit M., Shabunina D., Klementev B. Fire resistance of steel structures with epoxy fire protection under cryogenic exposure // *Buildings*. 2021. Vol. 11, № 11. <https://doi.org/10.3390/buildings11110537>. EDN XRCOPQ.
20. Клементьев Б. А., Калач А. В., Гравит М. В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов // *Пожаровзрывобезопасность*. 2021. Т. 30, № 5. С. 5–22. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22>. EDN MNGMRT.
21. Гравит М.В., Шабунина Д.Е. Штукатурные составы как огнезащита стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2022. № 3. С. 46–55. <https://doi.org/10.25257/FE.2022.3.46-55>.
22. Системы огнезащиты стальных конструкций с цементными плитами и противопожарным барьером при криогенном и Jet-Fire воздействиях / С. П. Антонов, М. В. Гравит, Е.С. Недвига, О.А. Фридрих // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2024. № 2.
23. Гарашенко А.Н., Антонов С.П., Виноградов А.В. Исследование теплотехнических характеристик и эффективности конструктивной огнезащиты на основе цементных плит типа «ПРОЗАСК Файерпанель» при воспроизведении условий высокотемпературного воздействия // *Пожаровзрывобезопасность*. 2022. Т. 31, № 6. С. 13–29. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29>.

References

1. LNG production in Russia should grow 4 times by 2035(In Russ). Available at: https://www.vedomosti.ru/industry/energy_future/articles/2023/09/11/994392-proizvodstvo-spg-v-rossii-dolzno-virasti (accessed: 14.04.2024).

2. Mojarad A.A.S., Atashbari V., Tantau A. Challenges for Sustainable Development Strategies in Oil and Gas Industries. *Proceedings of the 12th International Conference on Business Excellence 2018*. Bucharest; 2018. P. 626-638. <https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0056>.
3. Yoshinori Hiroya, Masayuki Tanabe, Shunji Kataoka, Yoshinori Yamada, Tomonori Miyashita. Optimization of Cryogenic Spill Protection Insulation Thickness. *An International Research Journal. Chemical Engineering Transactions*. 2016; (48): 643-648.
4. Lervåg K. Y., et al. A combined fluid-dynamic and thermodynamic model to predict the onset of rapid phase transitions in LNG spills. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; (69): 104354.
5. Bereznyakov A. A., Kalaushin D. R., Simonov M. Yu. Ed. by Fedorova E.B. Analysis of the use of various heat exchangers in the field of liquefied natural gas. In: *Szhizhennyyi prirodnyy gaz: problemy i perspektivy. Tezisy dokladov II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Liquefied natural gas: problems and prospects: Abstracts of the II All-Russian Scientific and practical conference..* Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University); 2023. P. 88-91. (In Russ). EDN RUHDQQ.
6. Hiroya Y., Tanabe M., Kataoka S., Yamada Y., Miyashita, T. Simplified Method to Define the Cryogenic Spill Hazard in LNG Liquefaction Facility. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. 2019; (77): 505-510. <https://doi.org/10.3303/CET1977085>
7. Jo Y.-D., Ahn B.J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2002; 15 (3): 179-188.
8. Abdoul Nasser A. H., Ndalila P. D., Mawugbe E. A., Emmanuel Kouame M., Paterne M. A., Li Y. Mitigation of Risks Associated with Gas Pipeline Failure by Using Quantitative Risk Management Approach: a Descriptive Study on Gas Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021; (9): 1098. <https://doi.org/10.3390/jmse9101098>.
9. Mikalsen R.F., Glansberg K., Wormdahl E.D., Stolen R. Jet fires and cryogenic spills: How to document extreme industrial incidents. In: *Proceedings of the Sixth Magdeburg Fire and Explosion Days conference proceedings*. Magdeburg, Germany, 25–26 March. 2019. P. 1-6.
10. Baalisampang T., et al. Methodology to analyse LNG spill on steel structure in congested marine offshore facility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; (62): 103936.
11. Young-Do Jo, Bum Jong Ahn. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of Hazardous Materials*. 2005; 123 (1–3): 1-12.
12. Bradley I., Willoughby D., Royle M. A review of the applicability of the jet fire resistance test of passive fire protection materials to a range of release scenarios. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; (122): 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.004>.

13. Delphine M. Laboureux, Nirupama Gopalaswami, Bin Zhang, Yi Liu, M. Sam Man-nan, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.013>.
14. Liu Y., et al. Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; (146): 1–8.
15. Nguyen L. D., Kim M., Chung K. Vaporization of the non-spreading cryogenic-liquid pool on the concrete ground. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; (163): 120464.
16. Nubli H., et al. Structural impact under accidental LNG release on the LNG bunkering ship: Implementation of advanced cryogenic risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024; (186): 329–347.
17. Yu X., et al. Flame characteristics of under-expanded, cryogenic hydrogen jet fire. *Combustion and Flame*. 2022; (244): 112294.
18. Cryogenic Spill Protection Requirements. Part 1. Fundamentals. Available at: <https://www.pfpnet.com/wp-content/uploads/2023/11/PFPNet-Fundamentals-of-Cryogenic-Spill-Protection-Part-1.pdf> (accessed: 14.04.2024).
19. Gravit M., Shabunina D., Klementev B. Fire resistance of steel structures with epoxy fire protection under cryogenic exposure. *Buildings*. 2021; 11(11). <https://doi.org/10.3390/buildings11110537>. EDN XRCOPQ.
20. Klement'ev B. A., Kalach A. V., Gravit M. V. Comparative analysis of the requirements of Russia and the USA for fire resistance of building structures of oil refineries and petrochemical plants. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and explosion safety*. 2021; 30(5): 5-22. (In Russ). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.5-22>. EDN MNGMRT.
21. Gravit M.V., Shabunina D.E. Plastering compounds as fire protection of steel structures of oil and gas facilities. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: preduprezhdenie, likvidatsiya = Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2022; (3): 46-55 (In Russ). <https://doi.org/10.25257/FE.2022.3.46-55>.
22. Antonov S. P., Gravit M. V., Nedviga E.S., Fridrih O.A. Fire protection systems of steel structures with cement slabs and a fire barrier under cryogenic and Jet-Fire effects. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya = Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2024; (2). (In Russ).
23. Garashchenko A.N., Antonov S.P., Vinogradov A.V. Investigation of thermal engineering characteristics and effectiveness of structural fire protection based on cement slabs of the "PROSASK Fire Panel" type when reproducing high-temperature exposure conditions. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*. 2022; 31 (6): 13-29. (In Russ). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.06.13-29>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Гравит Марина Викторовна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Marina V. Gravit, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: marina.gravit@mail.ru

Недвига Екатерина Сергеевна, старший преподаватель Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: nck@bk.ru

Ekaterina S. Nedviga, Senior Lecturer, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: nck@bk.ru