

Научная статья
УДК 665.72:614.84
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.51.48.014

Натурное моделирование эвакуации персонала с завода сжиженного природного газа при пожаре

Борис Александрович Клементьев¹
Андрей Владимирович Калач²
Татьяна Павловна Сысоева³
Зелимхан Бекханович Евлоев³
Николай Викторович Мартинович⁴

¹Арктик СПГ 2

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

³Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

⁴Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор ответственный за переписку: Николай Викторович Мартинович, martin-nv@mail.ru

Аннотация: В статье анализируются современное состояние и перспективы развития предприятий сжиженного природного газа. Особое внимание уделено оценке устойчивости нефтеперерабатывающих заводов. Подчеркивается важность детальной проработки и пересмотра подходов к оценке достаточности обеспеченности эвакуации и спасения работников предприятий по производству сжиженного природного газа. Приведены результаты натурного сценарного моделирования эвакуации на предприятии по производству сжиженного природного газа. В качестве расчетных рассматривались сценарии, отличающиеся наиболее протяженными и затрудненными путями эвакуации людей. Процесс эвакуации рассматривался как движение одного однородного людского потока, при этом слияние потоков, а также образование скопления людей на каком-либо участке путей эвакуации до достижения критической плотности потока, не рассматривались вследствие значительного рассредоточения персонала на объекте.

Ключевые слова: моделирование, сжиженный природный газ, пожарная безопасность, пожар, эвакуация

Для цитирования: Клементьев Б.А., Калач А.В., Сысоева Т.П., Евлоев З.Б., Мартинович Н.В. Натурное моделирование эвакуации персонала с завода сжиженного природного газа при пожаре// Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 3 (26). С. 62-68. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2022.51.48.014>.

NATURAL SIMULATION OF PERSONNEL EVACUATION FROM THE LIQUEFIED GAS PLANT IN CASE OF FIRE

Boris A. Klementiev¹
Andrew V. Kalach²
Tatiana P. Sysoeva³
Zelimkhan B. Evloev³
Nikolay V. Martinovich⁴

¹Arctic LNG

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

⁴Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Nikolay V. Martinovich, martin-nv@mail.ru

Abstract. The article analyzes the current state and prospects for the development of liquefied natural gas enterprises. Particular attention is paid to assessing the sustainability of oil refineries. Emphasizes the importance of detailed elaboration and revising approaches to assessing the adequacy of the evacuation and rescue of employees of enterprises producing liquefied natural gas. The results of full-scale scenario modeling of evacuation at an enterprise for the production of liquefied natural gas are presented. Scenarios that differ in the most extended and difficult ways of evacuating people were considered as calculated ones. The evacuation process was considered as the movement of one homogeneous human flow, while the merging of flows, as well as the formation of crowds of people in any section of the evacuation routes until the critical flow density was reached, were not considered due to the significant dispersal of personnel at the facility.

Keywords: modeling, liquefied natural gas, fire safety, fire, evacuation

For citation: Klementiev B.A., Kalach A.V., Sysoeva T.P., Evloev Z.B., Martinovich N.V. Natural simulation of personnel evacuation from the liquefied gas plant in case of fire// Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 3 (26). С. 62-68. (In Russ.) <https://10.34987/vestnik.sibpsa.2022.51.48.014>.

Введение

В Российской Федерации на постоянной основе происходит проектирование и строительство особо опасных и технически сложных объектов нефтегазового комплекса повышенной пожарной опасности, аварии с пожарами и взрывами, на которых могут привести к катастрофическим последствиям. Особое место среди таких объектов занимают предприятия по производству сжиженного газа и стабильного газового конденсата [1, 2].

На фоне проведения специальной военной операции на Украине и в связи с введением антиросийских санкций рядом государств, произошел ценовой шок на мировом рынке природного газа, что, в целом, способствовало развитию СПГ-проектов в России. Эксперты прогнозируют дальнейший рост мирового спроса на газ (рис. 1) [1-4].



Рис. 1. Состояние мирового спроса на СПГ

Современное состояние и плановое развитие в России объектов СПГ приведены на рис. 2 [3].



Рис. 2. Современное состояние и перспективы развития СПГ-объектов в России

Следует отметить, что ежегодный мировой спрос на СПГ растет, в среднем, на 7,6 % [5, 6]. Спрос на сжиженный природный газ к 2035 году оценивают в количестве порядка 5,5 млн т.

Аварийность предприятий нефтегазового комплекса

Для оценки устойчивости нефтеперерабатывающих заводов применяют индекс Нельсона [3], при расчетах которого в большинстве случаев учитывают производство дополнительных продуктов (газовый конденсат, гелий, пропан-бутановая фракция) [3]. В качестве примера на рис. 3 приведены значения SK-индекса для некоторых российских СПГ-предприятий.

Завод	Производство СПГ, млн т	Углеродный след, т СПГ/СПГ	Технология, млн т/млн т	Производство побочных продуктов, млн т (млн м ³ для редких газов)				SK-Индекс	
				газовый конденсат	C2	C3+	редкие газы	2020	2021
Ямал СПГ	18,57	0,28	20	1,181				1,288	1,151
Сахалин-2	11,4	0,28	700	1,52				1,332	1,160
Якутский СПГ	18	0,30	1300	1,5				1,117	1,245
Балтийский СПГ	19,5	0,36	*	0,2	3,8	2,4	5	2,026	1,647
Дальне-восточный СПГ	6,2	0,28	250	0,1				1,146	1,097

Рис. 3. Значения SK-индекса для некоторых СПГ-проектов

Известно, что обеспечение безопасной эвакуации людей из производственных помещений достигается за счет исполнения противопожарных требований. Анализ и обобщение сведений об авариях и индексах устойчивости нефтеперерабатывающих заводов позволяет сделать вывод о том, что объекты нефтегазового комплекса представляют собой особо опасные и технически сложные производства повышенной пожарной опасности, аварии с пожарами и взрывами, на которых могут привести к катастрофическим последствиям [8].

Ростехнадзором установлено, что в период 2017–2021 годы произошло порядка 260-ти аварий, среди которых 27 пожаров; 39 выбросов горючих веществ; 36 разрушений сооружений; 75 повреждений и (или) разрушений ТУ; около 35-ти неконтролируемых взрывов [9].

Общая диаграмма аварий на объектах нефтегазовой отрасли за 2017–2022 приведена на рис. 4.

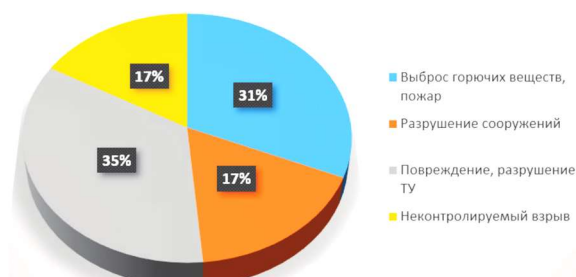


Рис. 4. Статистика аварий на объектах нефтегазовой отрасли за 2017–2022

Необходимо отметить, что основные риски в области обеспечения пожарной безопасности на СПГ связаны с обеспечением процессов эвакуации и спасения работников [10].

Таким образом, действующие и реализуемые проекты производства СПГ в России требуют дополнительных исследований в обязательном порядке, а также детальной проработки и пересмотра подходов к оценке достаточности обеспеченности эвакуации и спасения работников.

Целью проводимой работы заключалась в экспериментальном определении времени эвакуации и времени спасения персонала с технологической линии завода по производству сжиженного природного газа.

Моделирование эвакуации персонала с завода по производству сжиженного природного газа

Для выполнения требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» проведено экспериментальное исследование процессов эвакуации и спасения людей-работников реального газоперерабатывающего завода.

В качестве расчетных рассматривались сценарии, отличающиеся наиболее протяженными и затрудненными путями эвакуации людей. Процесс эвакуации рассматривался как движение одного однородного людского потока, при этом слияние потоков, а также образование скоплений людей на каком-либо участке путей эвакуации до достижения критической плотности потока, не рассматривались вследствие значительного рассредоточения персонала на объекте [11].

Сложность пути эвакуации определялась максимальной суммарной протяженностью путей по горизонтальному маршруту. Сложность пути эвакуации определялась максимальной суммарной протяженностью путей по горизонтальному пути и участкам наклонных лестничных маршей. При этом на основании консервативного подхода рассматривались эвакуационные пути, характеризующиеся наличием персонала на наиболее удаленных от выхода на дамбу участках.

Были рассмотрены 4 сценария, в которых начальные участки движения персонала по путям эвакуации в соответствии с выбранными маршрутами из наиболее удаленных точек. Расчетное время эвакуации определялось в соответствии с методикой [12].

Сценарий 1. Эвакуация производится от участка, расположенного на отм. +157,000 модуля ТМР-005 (наиболее удаленная точка). Далее по горизонтальному участку до перехода на модуль ТМР-005 по наклонной лестнице на отм. +140,500, по горизонтальному участку до лестницы на главный ярус на отм. +109,500, по горизонтальному участку до лестницы на верхнюю плиту ОГТ на отм. +99,500, по горизонтальному участку до перехода с верхней плиты ОГТ на ИЗУ до лестницы с отм. +99,500 на отм. +88,800 ИЗУ (безопасная зона).

Суммарная протяженность горизонтальных участков путей эвакуации: 370,5 м. Суммарная протяженность путей по наклонным эвакуационным лестницам 105,6 м. Расчетное время эвакуации в соответствии со сценарием 1 составило 3 мин 55 с.

Сценарий 2. Эвакуация производится от участка, расположенного на отм. +160,000 модуля ТМР-003 (наиболее удаленная точка). Далее по горизонтальному участку до лестницы на отм. +150,000, по горизонтальному участку до лестницы на отм. 141,500, по горизонтальному участку до перехода по наклонному лестничному маршу на модуль ТМР-004 на отм. 136,000, по горизонтальному участку до лестницы на главный ярус на отм. +109,500, по горизонтальному участку до лестницы на верхнюю плиту ОГТ на отм. +99,500, по переходу с верхней плиты ОГТ на ИЗУ до лестницы с отм. +99,500 на отм. +88,800 ИЗУ (безопасная зона).

Суммарная протяженность горизонтальных участков путей эвакуации: 493,1 м. Суммарная протяженность путей по наклонным эвакуационным лестницам 94,4 м. Расчетное время эвакуации в соответствии со сценарием 2 составило 4 мин 21 с.

Сценарий 3. Эвакуация производится от участка, расположенного на отм. +150,500 модуля ТМР-002 (наиболее удаленная точка). Далее по горизонтальному участку до лестницы;

по лестнице до отм. 141,000; по горизонтальному участку до перехода на модуль ТМР-001; по лестнице на модуль ТМР-001 до отм. +145,500; по горизонтальному участку до лестницы; по лестнице до отм. +109,500; по горизонтальному участку до лестницы на верхнюю плиту ОГТ; по лестнице до отм. +99,500; по переходу с верхней плиты ОГТ на ИЗУ до лестницы с отм. +99,500 на отм. +88,800 ИЗУ (безопасная зона).

Суммарная протяженность горизонтальных участков путей эвакуации 452 м. Суммарная протяженность путей по наклонным эвакуационным лестницам: 103,5 м. Расчетное время эвакуации в соответствии со сценарием 3 составило 4 мин 20 с.

Сценарий 4. Эвакуация производится от участка, расположенного на отм. +75,500 (наиболее удаленная точка) сухого отсека 4 от выхода на лестницу. Далее по горизонтальному участку до лестницы; по лестнице до отм. +99,500; по горизонтальному участку до выхода на ИЗУ; по лестнице до отм. +88,800 ИЗУ (безопасная зона).

Суммарная протяженность горизонтальных участков путей эвакуации: 531,6 м. Суммарная протяженность путей по наклонным эвакуационным лестницам 64,2 м. Расчетное время эвакуации в соответствии со сценарием 4 составило 4 мин 9 с.

Необходимое время эвакуации рассчитывали по выражению:

$$t_{\text{эвак}} = \max(t_{\text{расч}}) + t_{\text{н.э.}} = 6 \text{ мин } 21 \text{ с}$$

где $t_{\text{н.э.}}$ – максимальное время начала эвакуации в соответствии с содержанием, принимали равным 2 мин [11].

Движение человека по различным видам пути всегда отличается друг от друга, поэтому для определения скорости движения людей были рассмотрены разные виды пути (вертикальная лестница вверх/вниз, маршевая лестница вверх/вниз, а также по горизонтальной плоскости).

При определении скорости движения по горизонтальному пути и маршевым лестницам проводилась эвакуация с верхней точки модуля до уровня земли. Общая протяженность 175,4 м, из которых 72 м – это маршевые лестницы.

Для получения оптимальных значений скорости были проведены статистические характеристики случайной величины скорости движения людей (т. е. анализ основных свойств данных, нахождение в них общих закономерностей, распределений и аномалий). Количественное описание посредством основных статистических показателей для скорости движения по маршевой лестнице приведено в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики случайной величины скорости движения людей при эвакуации по маршевой лестнице

Статистические данные		Вид пути	
		Маршевая лестница	
		вверх	вниз
Среднее, м/мин.		43,77	52,71
95% доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	36,60	46,07
	Верхняя граница	50,96	59,35
Среднее по выборке, усеченной на 5 %		43,52	51,90
Медиана		44,86	50,22
Дисперсия		154,78	247,09
Среднеквадратичное отклонение		12,44	15,72
Минимум		27,07	31,48
Максимум		64,97	88,96
Диапазон		37,90	57,48

Таким образом, по результатам проведения натурального эксперимента установлено, что время расчетное эвакуации для первого сценария – $t_{\text{расч}} = 3 \text{ мин } 55 \text{ с}$; для второго сценария – $t_{\text{расч}} = 4 \text{ мин } 21 \text{ с}$; для третьего сценария – $t_{\text{расч}} = 4 \text{ мин } 20 \text{ с}$; для четвертого сценария $t_{\text{расч}}$ составляет 4 мин 9 с.

Список источников

1. The 2021 IHS Markit Energy and Climate Scenarios: Global gas summary // Strategy Report. Energy and Climate Scenarios. July 2021. <https://connect.ihsmarket.com/document/show/phoenix/3274463?connectPath=EnergyClimateScenariosLandingPage.Home.FeaturedResearch>.
2. IHS Markit Eurasian Gas Export Outlook – April 2021 // IHS Markit. April 2021. <https://connect.ihsmarket.com/document/show/phoenix/3956006?connectPath=Search&searchSessionId=fed78a69-65d5-421b-897d-0e3e131fc458>.
3. Климентьев А.А. Карта российской СПГ отрасли 2022 // Neftegaz.RU. – 2022. – №4. – С. 50-60.
4. Гойда А.Н., Шиян С.И., Шаблий И.И. Современное состояние и перспективы развития рынка сжиженного природного газа // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № 4. – С. 124-142.
5. Кондратов Д.И. Будущее мирового рынка природного газа // Российский внешнеэкономический вестник. – 2022. – № 1. – С. 66-82.
6. Кондратов Д.И. Мировой рынок газа: современные тенденции и перспективы развития // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 4. – С. 360-371.
7. Полякова С.А., Ильичёв С.С. Анализ аварийности на объектах нефтегазовой отрасли России. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2022. – № 16 (411). – С. 115-117. – URL: <https://moluch.ru/archive/411/90471/> (дата обращения: 22.08.2022).
8. Гордиенко Д.М. Пожарная безопасность особо опасных и технически сложных производственных объектов нефтегазового комплекса: диссертация ... доктора технических наук: 05.26.03 / Гордиенко Денис Михайлович; [Место защиты: Акад. гос. противопожарной службы МЧС России]. – Москва, 2017. – 386 с.
9. Интернет-ресурс <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 22.08.2022).
10. Клементьев Б.А., Калач А.В. Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности производства сжиженного газа // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций. сборник материалов Международной научно-практической конференции. Красноярск, 2021. – С. 24-26.
11. Лагозин А.Ю., Шебеко Ю.Н., Леончук П.А., Клементьев Б.А., Самошин Д.А. Экспериментальное исследование процессов эвакуации и спасения людей при пожаре с этажерки технологической линии газоперерабатывающего завода // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 6. – С. 69-74.
12. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утверждена приказом МЧС от 10.07.2009 г. № 404, с изменениями) // СПС Консультант плюс.

List of sources

1. The 2021 IHS Markit Energy and Climate Scenarios: Global gas summary // Strategy Report. Energy and Climate Scenarios. July 2021. <https://connect.ihsmarket.com/document/show/phoenix/3274463?connectPath=EnergyClimateScenariosLandingPage.Home.FeaturedResearch>.
2. IHS Markit Eurasian Gas Export Outlook – April 2021 // IHS Markit. April 2021. <https://connect.ihsmarket.com/document/show/phoenix/3956006?connectPath=Search&searchSessionId=fed78a69-65d5-421b-897d-0e3e131fc458>.
3. Klimentiev A.A. Map of Russian LNG industry 2022 // Neftegaz.RU. 2022. 4. P. 50-60.
4. Goida A.N., Shiyani S.I., Shabliy I.I. Current state and prospects of liquefied natural gas market development // Science. Technology. Technology (Polytechnic Bulletin). 2020. 4. P. 124-142.
5. Kondratov D.I. The Future of the World Natural Gas Market // Russian External Economic Bulletin. 2022. 1. P. 66-82.

6. Kondratov D.I. World gas market: modern trends and prospects of development // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2022. Т. 92. 4. P. 360-371.
7. Polyakova S.A., Ilyichev S.S. Analysis of accidents at facilities of the oil and gas industry of Russia. Text: direct // Young scientist. 2022. 16 (411). P. 115-117. URL: <https://moluch.ru/archive/411/90471/> (date of address: 22.08.2022).
8. Gordienko D.M. Fire safety of particularly dangerous and technically complex production facilities of oil and gas complex: thesis ... Doctor of Technical Sciences: 05.26.03 / Gordian Denis Mikhailovich; [Place of protection: Akad. State Fire Service of the Russian Emergencies Ministry]. - Moscow, 2017. - 386 p.
9. Internet resource <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (date of circulation: 22.08.2022).
10. Klementiev B.A., Kalach A.V. Actual issues of ensuring fire safety of liquefied gas production // Monitoring, modelling and forecasting of natural hazards and emergencies. collection of materials of the International scientific and practical conference. Krasnoyarsk, 2021. P. 24-26.
11. Lagozin A.Y., Shebeko Y.N., Leonchuk P.A., Klementiev B.A., Samoshin D.A. Experimental study of the processes of evacuation and rescue of people in a fire from the storehouse of the gas processing plant/ Safety of work in industry. 2021. 6. P. 69-74.
12. Method of determination of calculated values of fire risk at production facilities (approved by order of the Ministry of Emergency Situations from 10.07.2009 404, with modifications) // ATP Consultant plus.

Информация об авторах

Калач А.В. – доктор химических наук, профессор
Сысоева Т.П. – кандидат технических наук, доцент

Information about the author

Kalach A.V. – Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Chemical Sciences,
Full Professor

Sysoeva T.P. – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакция 20.08.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 29.09.2022. The article was submitted 20.08.2022, approved after reviewing 20.09.2022, accepted for publication 29.09.2022.