

ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Научная статья

УДК 614.8; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-192-205

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКОВЕНИЯ И ДИНАМИКИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ АВАРИЙНОМ РАЗЛИВЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

✉ Евлоев Зелимхан Бекханович.

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

✉ euloeff.zel@yandex.ru

Аннотация. Обосновывается необходимость совершенствования нормативно-технических требований на основе результатов численного моделирования в рамках нового сценарного подхода для эвакуации и спасения производственного персонала при чрезвычайных ситуациях, связанных с разливом сжиженного природного газа. Существующие нормативные требования, регулирующие вопросы обеспечения безопасности на производствах и в хранилищах сжиженного природного газа, не учитывают все специфические риски и особенности, связанные с быстрым распространением газов и их способностью к образованию плотных холодных облаков, создающие сложности при эвакуации производственного персонала из опасных зон в условиях ограниченной видимости из-за воздействия низких температур.

Внедрение нового сценарного подхода будет учитывать потенциальные угрозы, связанные с разливом сжиженного природного газа до момента наступления более опасных пожаровзрывоопасных ситуаций, что обеспечит разработку эффективных и своевременных мер по эвакуации и спасению производственного персонала на объектах производства и хранения сжиженного природного газа.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, развитие аварийной ситуации, чрезвычайная ситуация, численное моделирование, дерево событий, сценарный подход

Для цитирования: Евлоев З.Б. Моделирование возникновения и динамики чрезвычайной ситуации при аварийном разливе сжиженного природного газа // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 192–205. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-192-205

Scientific article

MODELLING OF EMERGENCY SITUATION OCCURRENCE AND DYNAMICS IN CASE OF EMERGENCY SPILL OF LIQUEFIED NATURAL GAS

✉ Evloev Zelimkhan B.

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

✉ euloeff.zel@yandex.ru

Abstract. This article substantiates the need to improve regulatory and technical requirements based on the results of numerical modelling within the framework of a new scenario approach for evacuation and rescue of production personnel in emergencies associated

with the spillage of liquefied natural gas. The existing regulatory requirements governing safety issues at liquefied natural gas production and storage facilities do not take into account all the specific risks and peculiarities associated with the rapid spread of gases and their ability to form dense cold clouds, which create difficulties in evacuating production personnel from hazardous areas in conditions of limited visibility due to low temperatures.

Implementation of the new scenario approach will take into account the potential threats associated with liquefied natural gas spills before more dangerous fire and explosion hazards occur, which will ensure the development of effective and timely evacuation and rescue measures for production personnel at liquefied natural gas production and storage facilities.

Keywords: liquefied natural gas, emergency situation development, emergency situation, numerical modelling, event tree, scenario approach

For citation: Evloev Z.B. Modelling of emergency situation occurrence and dynamics in case of emergency spill of liquefied natural gas // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 192–205. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-192-205.

Введение

Топливно-энергетические комплексы являются стратегически важными объектами, обладающими огромным потенциалом удовлетворять мировые потребности в энергетических ресурсах и сырье. В настоящее время Россия является одним из крупных мировых поставщиков энергоресурсов¹, активно развивает инфраструктуру производства и экспорта сжиженного природного газа (СПГ) с целью занять 15–20 % мирового рынка к 2035 г. Популярность СПГ как энергоносителя продолжает расти, что способствует расширению объектов его добычи, производства и хранения [1–3]. Показатели роста объектов СПГ в России² приведены на рис. 1.

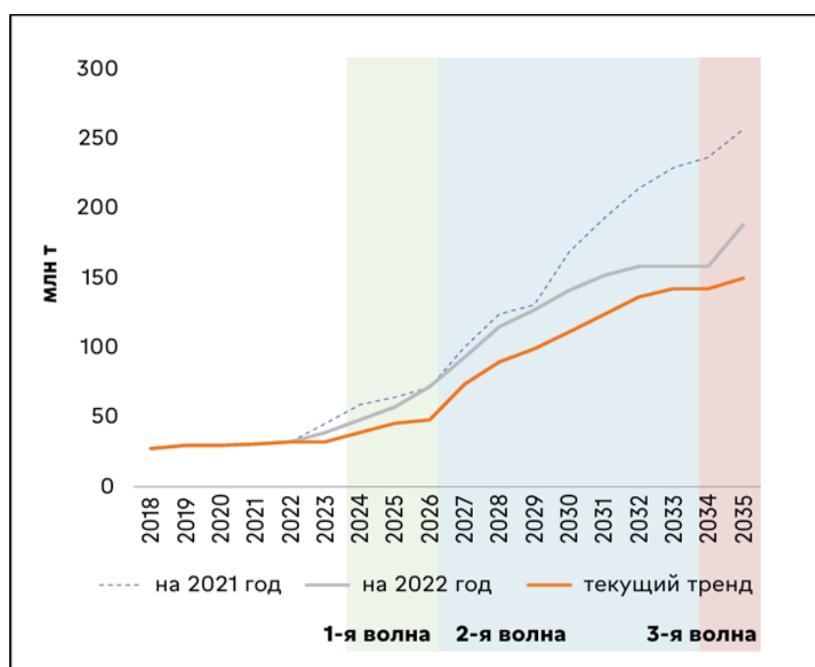


Рис. 1. Показатели роста объектов СПГ в России

¹ Мировой рынок СПГ. Структурные особенности и прогноз развития // Magazine.neftegaz.ru. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynek/769892-mirovoy-rynek-spg-strukturnye-osobennosti-i-prognoz-razvitiya/> (дата обращения: 29.01.2025)

² Справочные материалы карты российской СПГ отрасли 2024 // Экономическая лаборатория Александра КлиментьевА. URL: <https://ак.лаб.рф/Ingmap> (дата обращения: 29.01.2025)

В связи с появлением инновационных технологий и повышения интереса к альтернативным источникам энергии СПГ становится важным элементом трансформации отрасли, так как отвечает растущим требованиям к экологически чистым источникам энергии, выгодно отличаясь от угля и нефтепродуктов. Оценка уровня опасности при анализе рисков, связанных с технологическими процессами производства и хранения СПГ, является основой для принятия эффективных инженерно-технических мероприятий и управлеченческих решений руководителями организаций, что будет играть в перспективе ключевую роль в обеспечении безопасности на всех этапах эксплуатации. Наличие четко разработанных сценариев эвакуации, а также своевременное принятие оперативных решений при чрезвычайных ситуациях (ЧС) могут напрямую влиять на сохранение жизни людей и минимизацию ущерба для оборудования и инфраструктуры.

Моделирование процессов эвакуации является предметом многочисленных исследований, которые обосновывают важность этой задачи в контексте обеспечения безопасности на объектах производства и хранения СПГ. Необходимо отметить, что большинство существующих научно-исследовательских работ сосредоточено на изучении процессов эвакуации людей при пожаро-взрывоопасных сценариях. В то же время сценарии, связанные с разливами СПГ, исследованы недостаточно в нормативно-технических документах и научной литературе [4–11]. Однако специфика таких инцидентов требует учета опасных факторов, таких как крайне низкие температуры СПГ и их влияние на человека.

Анализ аварий на объектах производства и хранения СПГ

Анализ материалов о результатах деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в период с 2017 по 2023 гг. показал, что на потенциально опасных объектах производства произошло 152 аварии, из которых 71 % составили пожары и взрывы и 29 % – выбросы опасных веществ³. Общая диаграмма причин аварий на потенциально опасных объектах производства в период с 2017–2023 г. приведена на рис. 2.

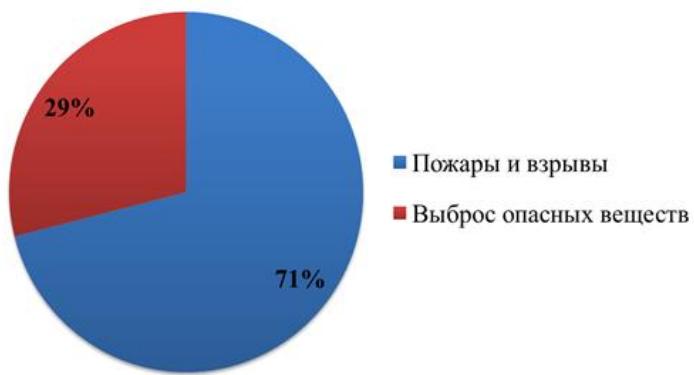


Рис. 2. Общая диаграмма причин аварий на потенциально опасных объектах производства в период с 2017 по 2023 г.

Эффективное управление рисками при выбросах опасных веществ может значительно снизить вероятность пожаров и взрывов, поскольку многие аварии на производственных объектах связаны с нарушениями в процессе основных технологических операций при переработке или перекачке легковоспламеняющихся веществ и горючих газов, которые могут привести к ЧС. С момента начала эксплуатации первых объектов СПГ в России

³ Доклады о правоприменительной практике контрольно-надзорной деятельности в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору // Gosnadzor.ru. URL: <https://www.gosnadzor.ru/public/law%20enforcement/> (дата обращения: 27.02.2025)

не было зафиксировано ни одной крупной аварии по официальным источникам. Однако вероятность их возникновения полностью исключить нельзя, что требует повышенного внимания к вопросам обеспечения безопасности. В отличие от России, многие зарубежные страны столкнулись с множеством проблем в области производства и хранения СПГ в период с 1944–2024 гг., что привело к возникновению у регулирующих органов ряда вопросов касательно механизмов и методов их контроля.

Ниже, в табл. 1, приведен перечень аварий, произошедших на объектах производства и хранения СПГ⁴ [12–15].

Таблица 1

Перечень аварий, произошедших на объектах производства и хранения СПГ

№ п/п	Дата аварии	Причина аварии
1	20.10.1944 (США)	Разрушение технологического оборудования привело к проливу СПГ на производственную площадку и систему ливневой канализации
2	24.10.1973 (Великобритания)	Неисправность в системе очистки технологического оборудования привело к проливу СПГ
3	1977 (Индонезия)	Неполадки в системе измерения уровня жидкости в технологическом оборудовании привело к проливу СПГ
4	1979 (США)	Сбой обратного клапана в системе трубопровода привел к выбросу СПГ
5	1979 (США)	Пролив СПГ из технологического резервуара
6	1986 (США)	Разгерметизация технологического оборудования привела к проливу СПГ
7	25.09.1998 (Австралия)	Разгерметизация технологического оборудования в результате повышения давления привела к проливу СПГ
8	30.07.2004 (Бельгия)	Разгерметизация технологического оборудования привела к проливу СПГ
9	08.06.2022 (США)	Избыточное давление и разрыв сегмента линии перекачки привели к выбросу СПГ
10	26.04.2024 (Норвегия)	Разгерметизация технологического оборудования привела к проливу СПГ

Опираясь на зарубежный опыт, можно не только учесть технические и организационные решения, но и выработать комплексный подход к вопросам обеспечения безопасности к устойчивости для объектов производства и хранения СПГ в России. Существующие сценарии эвакуации, ориентированные на пожары и взрывы, не могут в полной мере учесть все особенности процесса разлива СПГ, поскольку новые объекты СПГ в России, как правило, расположены на Крайнем Севере. Соответственно, традиционные расчетные сценарии эвакуации при аварийных ситуациях, ориентированные на температурные условия при + 18 °C, оказываются малоприменимыми для регионов Крайнего Севера.

Особенно важным является учет криогенных эффектов воздействия низких температур, вызванных испарением СПГ, на людей и инфраструктуру. Конструкции

⁴ Sunrise LNG in Timor-Leste: Dreams, Realities and Challenges // Laohamutuk.org. URL: <https://www.laohamutuk.org/Oil/LNG/app4.htm> (дата обращения: 27.02.2025)

и размещение технологического оборудования должны исключать попадание разливов СПГ на эвакуационные пути и маршруты. По нормативным требованиям, при разливе СПГ эвакуационные пути и выходы не блокируются, однако практика демонстрирует, что низкие температуры могут приводить к обледенению поверхностей, разрушению материалов, и созданию новых препятствий для эвакуации⁵.

Зоны поражения низкими температурами могут резко изменять динамику передвижения людей, затруднять эвакуацию и требовать создания альтернативных маршрутов, которые бы учитывали все эти угрозы, чтобы руководство организации было готово к принятию быстрых и обоснованных решений, а также имело четкое представление о возможных альтернативных путях эвакуации, если основные окажутся непригодными.

Основные угрозы, с которыми может сталкиваться производственный персонал при разливе СПГ, могут быть следующими:

- прямой контакт СПГ с оборудованием и сооружениями может вызвать потерю устойчивости инфраструктуры и усложнить процесс эвакуации производственного персонала из зоны разлива;

- обморожение различных частей тела или отдельных ее участков при непосредственном контакте с СПГ или его парами;

- вдыхание паров может привести к удушью и образованию кристаллов льда в органах дыхания, способных вызвать внутренние ожоги или даже разрыв легких;

- образованное холодное облако может перемещаться на большие расстояния по всей производственной площадке, создавая зоны обморожения и удушья;

- плотные облака газа могут ограничить видимость и затруднить эвакуацию людей из опасной зоны, особенно если разлив происходит в условиях низкой видимости, а концентрация газа остается высокой в течение длительного времени;

- быстрый фазовый переход с образованием взрыва без воспламенения на производственной площадке [16–18].

Дерево событий, описывающее сценарий развития аварийной ситуации на производственной площадке при разливе СПГ, приведено на рис. 3.

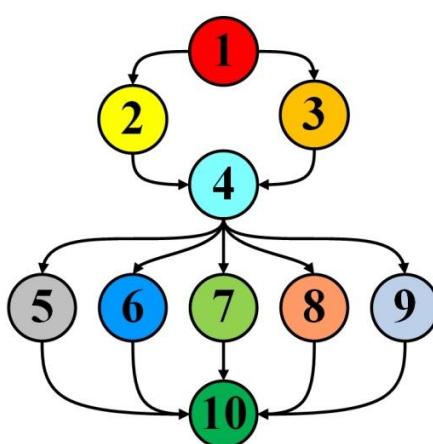


Рис. 3. Дерево событий, описывающее сценарий развития аварийной ситуации на производственной площадке при разливе СПГ:

- 1 – аварийный режим работы технологического оборудования с СПГ; 2 – частичная разгерметизация; 3 – полное разрушение; 4 – выброс в атмосферу или образование лужи пролива; 5 – образование плотного холодного облака; 6 – обморожение и гипотермия; 7 – удушье продуктами испарения; 8 – взрыв без воспламенения; 9 – рассеивание паров; 10 – эвакуация и спасение производственного персонала

⁵ СП 240.1311500.2015. Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200123953> (дата обращения: 27.02.2025)

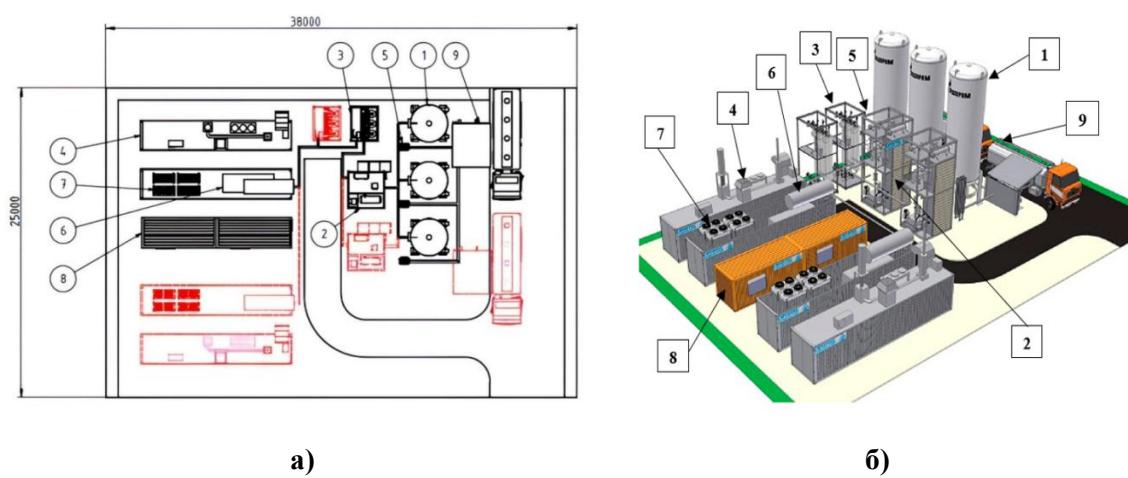
Необходимость в новых сценарных подходах обусловлена высокой сложностью и многофакторностью процессов при разливе СПГ. По сравнению с традиционными методами оценки рисков, новый сценарный подход позволит учесть нелинейные взаимосвязи между различными опасными факторами криогенного воздействия и их влияние на производственный персонал и инфраструктуру.

Соответственно, с учетом вышеизложенного, в целях повышения уровня безопасности объектов производства и хранения СПГ возникает необходимость разработки новых сценарных подходов для прогнозирования динамики и развития опасного фактора криогенного воздействия на процессы эвакуации и спасения людей с применением средств математического моделирования и современных комплексных программ, что будет способствовать развитию алгоритмов принятия решений, эффективному управлению рисками и совершенствованию протоколов реагирования на ЧС при разливе СПГ.

Методы исследования

Основой для калибровки и валидации расчетной модели разлива СПГ, в которой учтены процессы фазового перехода, теплообмена с окружающей средой и конвективного рассеивания холодного облака газа, стали натурные экспериментальные данные, полученные в серии испытаний «Burro», проведенных учеными: Ronald P. Koopman, J. Baker, R.T. Cederwall, H.C. Goldwire, W.J. Hogan, L.M. Kamppinen, R.D. Kiefer, J.W. McClure, Thomas G. McRae и D.L. Morgan. За время, прошедшее с момента проведения натурных экспериментов с СПГ серии «Burro», математик отдела исследований огня Инженерной лаборатории Национального института стандартов и технологий Kevin B. McGrattan усовершенствовал существовавшие расчетные модели на основе методов CFD (Computational Fluid Dynamics) в рамках программы Fire Dynamics Simulator (FDS) [19]. Разработанная им модель описания пролива СПГ на базе программы FDS в рамках серии натурного эксперимента «Burro – 3» показала высокую сходимость с экспериментальными данными и была адаптирована в данном исследовании для повышения точности прогнозирования поведения потоков газовой фазы и оценки различных сценариев функционирования объектов при разливе СПГ с учетом особенностей, возникающих на конкретном производственном объекте.

Исходной основой расчетной модели послужила типовая схема производственной площадки объекта СПГ⁶, впоследствии переведенная в трехмерную расчетную модель в FDS-Pyrosim (рис. 4).



⁶ Малотоннажный завод по производству СПГ производительностью 36 тонн в сутки // Fas.su.
URL: <https://fas.su/старый-контент/газификация-на-спг/малотоннажный- завод-по-производству-спг- производительностью-36-тонн-в-сутки> (дата обращения: 03.04.2025)

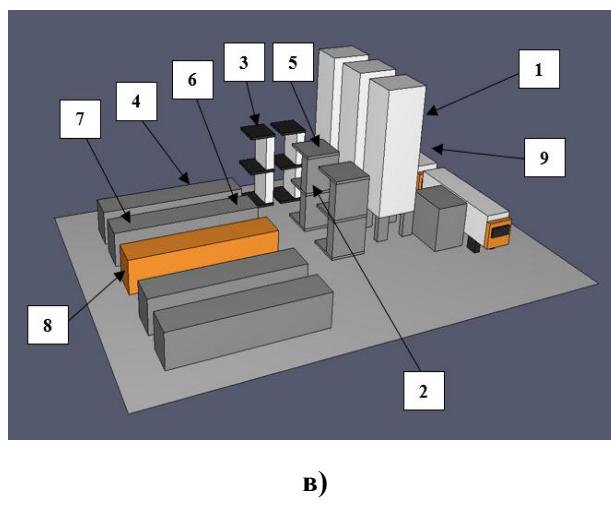


Рис. 4. Расчетная модель производственной площадки объекта СПГ:

а – типовая схема расчетной модели; б – трехмерная расчетная модель;

в – трехмерная расчетная модель в FDS-PyroSim. Основные компоненты:

- 1 – резервуары хранения СПГ; 2 – холодильный блок; 3 – блок очистки-осушки природного газа;
4 – блок производства электроэнергии; 5 – атмосферные испарители; 6 – компрессор;
7 – модуль охлаждения; 8 – операторская; 9 – комплекс наполнения транспортных средства

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках проведенного численного моделирования были разработаны различные сценарии разлива СПГ на типовой производственной площадке для трех временных интервалов с целью прогнозирования динамики и развития аварийной ситуации, а также выявления потенциально опасных зон риска для инфраструктуры и производственного персонала. Исходные данные численного моделирования для всех сценариев приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные численного моделирования

№ п/п	Параметр	Значение
1	Объем разлива СПГ	34 м ³
2	Начальная температуры СПГ	-161,5 °C
3	Массовая концентрация газа	1,289 кг/м ³
4	Температура окружающей среды	+18 °C
5	Скорость ветра	5,4 м/с
6	Влажность воздуха	5,2 %
7	Размер выделенной расчетной области	60x60
8	Размер производственной площадки	25x38

Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ на производственной площадке, представленные в виде изоповерхностей и температурных карт, наглядно демонстрируют формирование опасных зон с критически низкими температурами (рис. 5–10).

На ранней стадии разлива СПГ наблюдается формирование изоповерхности, демонстрируя начало формирования плотного холодного облака с выраженным криогенным эффектом, которое постепенно занимает всю производственную площадку, позволяя оценить мгновенное воздействие резкого температурного перепада и выявить потенциальную угрозу для ближайших эвакуационных путей (рис. 5, 6).

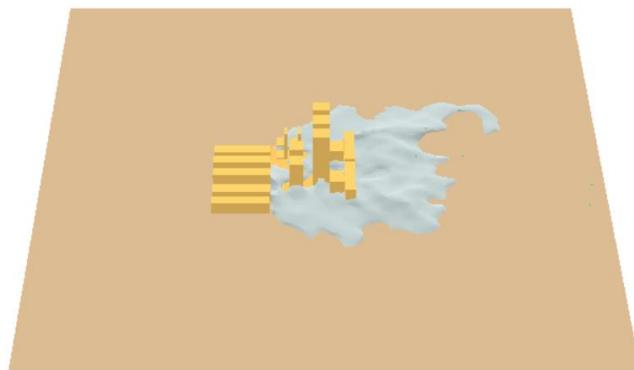


Рис. 5. Изоповерхность «газовая среда температурой от -60°C и ниже» через 15 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³ на производственной площадке. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м. Начальная температура СПГ: $-161,5^{\circ}\text{C}$. Температура окружающей среды: $+18^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

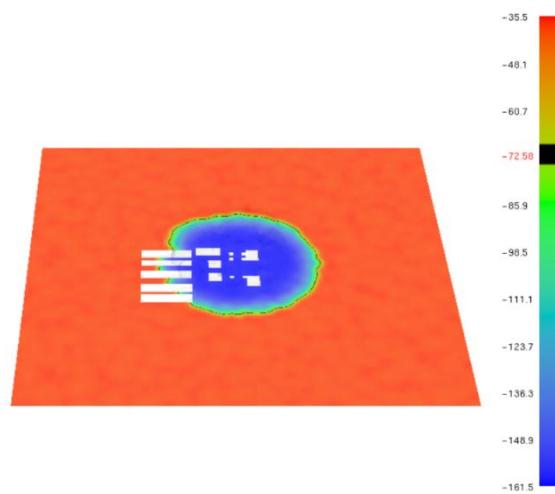


Рис. 6. Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ. Температура на поверхности производственной площадки через 15 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м. Начальная температура СПГ: $-161,5^{\circ}\text{C}$. Температура окружающей среды: $+18^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

На промежуточной стадии разлива СПГ наблюдается рост и расширение области изоповерхности, становящееся все более выраженной, что указывает на риск стремительного изменения условий на производственной площадке и, как следствие, может привести к блокировке стандартных путей эвакуации из-за обледенения и резкого ухудшения видимости (рис. 7, 8).

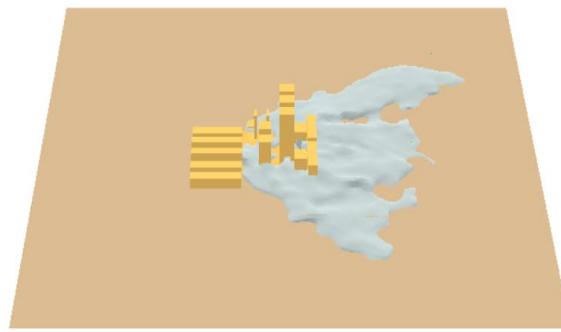


Рис. 7. Изоповерхность «газовая среда температурой от -60°C и ниже» через 35 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³ на производственной площадке. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м. Начальная температура СПГ: $-161,5^{\circ}\text{C}$. Температура окружающей среды: $+18^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

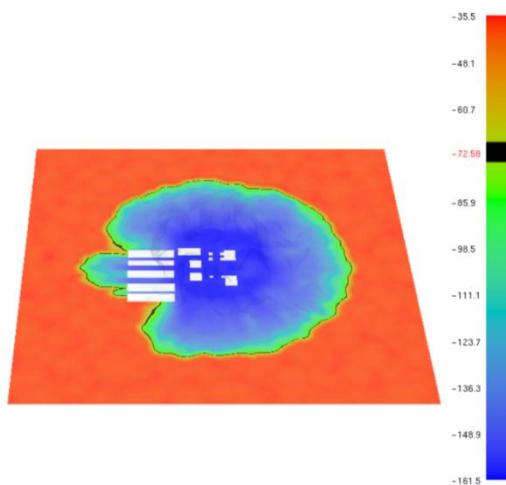


Рис. 8. Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ. Температура на поверхности производственной площадки через 35 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м. Начальная температура СПГ: $-161,5^{\circ}\text{C}$. Температура окружающей среды: $+18^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

На поздней стадии разлива СПГ происходит дальнейший рост изоповерхности и распространение холодного облака, а температура на поверхности площадки продолжает оставаться критически низкой (рис. 9, 10).



Рис. 9. Изоповерхность «газовая среда температурой от -60°C и ниже» через 55 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³ на производственной площадке. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м. Начальная температура СПГ: $-161,5^{\circ}\text{C}$. Температура окружающей среды: $+18^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

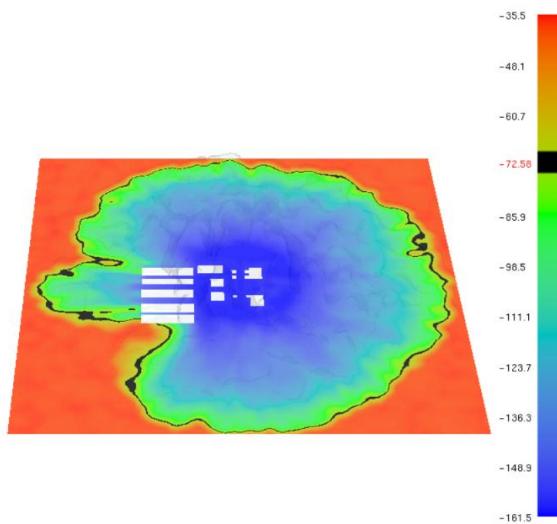


Рис. 10. Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ.

Температура на поверхности производственной площадки через 55 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м.

Начальная температура СПГ: –161, 5 °С. Температура окружающей среды: +18 °С.

Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

В параллельном расчете для всех стадий разлива СПГ была смоделирована угроза токсического воздействия (удушья) на производственный персонал, при которой массовая концентрация газа достигала 1,289 кг/м³ (рис. 11–13).

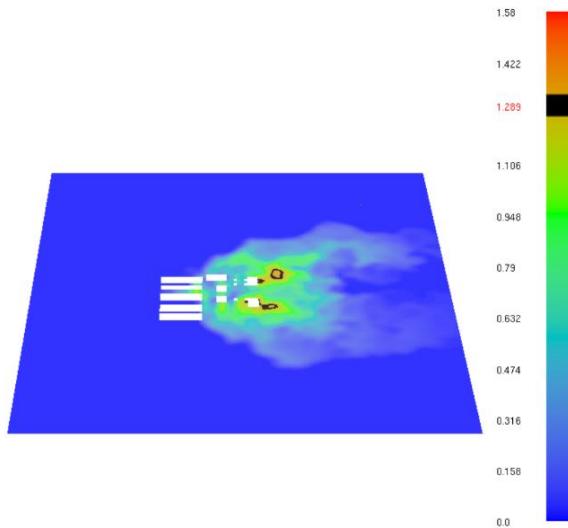


Рис. 11. Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ.

Температура на поверхности производственной площадки через 15 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м.

Начальная температура СПГ: –161, 5 °С. Массовая концентрация газа: 1,289 кг/м³.

Температура окружающей среды: +18 °С. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

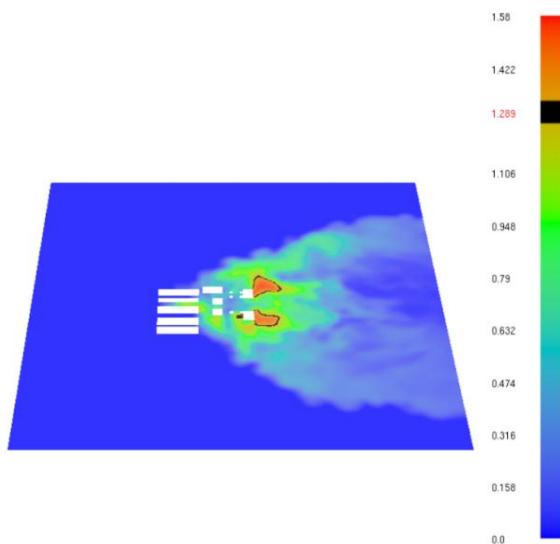


Рис. 12. Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ.

Температура на поверхности производственной площадки через 35 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м.

Начальная температура СПГ: – 161,5 °С. Массовая концентрация газа: 1,289 кг/м³.

Температура окружающей среды: + 18 °С. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

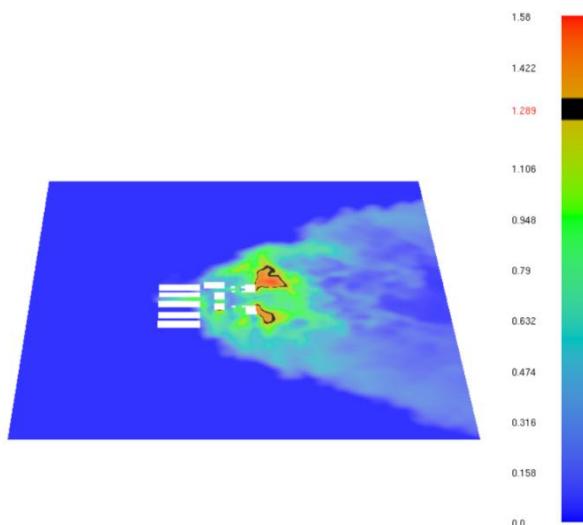


Рис. 13. Результаты численного моделирования процесса разлива СПГ.

Температура на поверхности производственной площадки через 55 с после начала разлива СПГ объемом 34 м³. Размер выделенной области 60x60 м, размер производственной площадки 25x38 м.

Начальная температура СПГ: – 161,5 °С. Массовая концентрация газа: 1,289 кг/м³. Температура окружающей среды: + 18 °С. Скорость ветра: 5,4 м/с. Влажность воздуха: 5,2 %

Особенно критична ситуация для людей, находящихся в непосредственной близости к поверхности или в первых метрах от места разлива: в таких случаях газ, не успевая рассеяться в атмосфере, создавая области с высокой концентрацией и вытесняя кислород, что может привести к потере сознания и острому удушью даже на сравнительно большом расстоянии от источника.

Анализируя результаты численного моделирования процесса разлива СПГ на примере трех временных этапов, можно сделать вывод, что наиболее критичным периодом для начала развития аварийной ситуации является промежуток от 15 до 55 с, когда динамика изменения условий наиболее выражена, а ее пиковый момент требует непрерывного мониторинга

и быстрого реагирования. Результаты моделирования показывают, что динамика прогнозирования и развития аварийной ситуации, приводящей к ЧС, связанной с разливом СПГ, требует учета быстро протекающих и многозначных изменений, так как традиционные расчетные сценарии эвакуации не справляются, что подчеркивает необходимость разработки алгоритмов эвакуации и спасения производственного персонала, способного оперативно адаптироваться к новым условиям и точно оценивать уровень опасности в реальном времени.

Использование разработанной трехмерной расчетной модели обеспечило более глубокий анализ процессов разлива СПГ на производственной площадке, что дает возможность заранее выявить потенциальные проблемные зоны и разработать меры по снижению рисков при эвакуации и спасении людей в условиях ЧС. Применимость расчетной модели позволяет не только визуализировать динамику процесса разлива СПГ в реальном времени и оценивать воздействие различных аварийных сценариев на инфраструктуру СПГ и производственный персонал, но и учитывать влияние множества переменных – от характеристик самого СПГ до особенностей метеорологических и термодинамических факторов. Кроме того, разработанная модель описания разлива СПГ позволит уточнить вопросы параметров воздействия разлитого СПГ на технологическое оборудование и прилегающую территорию (селитебную зону).

Заключение

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что условия эвакуации и спасения производственного персонала при разливе СПГ существенно отличаются от стандартных нормативных расчетов и требуют переосмыслиния традиционных подходов к безопасности. Стандартные алгоритмы эвакуации, разработанные для «нормальных» условий, оказываются неэффективными при разливе СПГ, что делает привычные пути эвакуации опасными или непригодными.

Дальнейшее компьютерное моделирование будет проводиться с использованием современного программного обеспечения, обеспечивающего гибкость в формировании исходных данных и наибольшую полноту учета действующих факторов для разработки и обоснования специализированных алгоритмов эвакуации, что позволит значительно повысить эффективность предпринимаемых мер безопасности на объектах производства и хранения СПГ. Полученные данные будут полезны для совершенствования нормативно-технических требований и внедрения новых сценарных подходов, адаптированных к специфике аварий, связанных с разливом СПГ.

Список источников

1. Голубева И.А., Мещерин И.В., Дубровина Е.П. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2016. № 6. С. 4–13.
2. Ткаченко Е.С. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: сб. тезисов. М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И.М. Губкина, 2018. С. 307.
3. Вишняков В.И. Мировой рынок сжиженного природного газа: конъюнктура и современные тенденции развития // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5-4 (119). С. 142–150.
4. Натурные наблюдения людских потоков: учеб. пособие / В.В. Холщевников [и др.]. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2009. 189 с.
5. Эвакуация и поведение людей при пожарах: учеб. пособие / В.В. Холщевников [и др.]. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2009.
6. Эвакуация и поведение людей при пожарах / В.В. Холщевников [и др.]. 2-е изд. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2015. 262 с.

7. Экспериментальное исследование процессов эвакуации и спасения людей при пожаре с этажерки технологической линии газоперерабатывающего завода / А.Ю. Лагозин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 69–74.
8. Натурное моделирование эвакуации персонала с завода сжиженного природного газа при пожаре / Б.А. Клементьев [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 3 (26). С. 62–68.
9. Применение расчетной модели эвакуации персонала с завода сжиженного природного газа при пожаре / Б.А. Клементьев [и др.] // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск: Сибирская пож.-спас. акад. ГПС МЧС России, 2022. С. 74–77.
10. Русских Д.В., Вытовтов А. В., Шевцов С.А. Особенности процесса эвакуации людей из производственного помещения при пожаре // Техносферная безопасность. 2019. № 1 (22). С. 70–82.
11. Степанов А.А. Анализ пожарной безопасности путей эвакуации из производственных помещений // Вестник науки. 2022. Т. 1. № 2 (47). С. 213–220.
12. Маршалл В. МЗО Основные опасности химических производств: пер. с англ. М.: Мир, 1989.
13. Самигуллин Г.Х., Кадочникова Е.Н., Симонова М.А. Обзор крупных аварий на объектах получения и применения сжиженного природного газа // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы формирования культуры безопасности жизнедеятельности: приоритеты, проблемы, решения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2018. С. 82–87.
14. Архипова Н.В. Аналитический обзор аварий с пожарами и взрывами на объектах с обращением сжиженного природного газа // Вестник науки. 2023. Т. 4. № 6 (63). С. 1041–1047.
15. Самигуллин Г.Х., Евлоев З.Б., Шарапов С.В. Сравнительный анализ чрезвычайных ситуаций на объектах по производству, хранению, отгрузке сжиженного природного газа и сжиженного углеводородного газа // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 81–92.
16. Assessment of cascading accidents of frostbite, fire, and explosion caused by liquefied natural gas leakage / C. Yue [et al.] // Advances in Civil Engineering. 2020. T. 2020. № 1. С. 8867202.
17. Shevchuk E.V. Storage of liquefied natural gas and problems of industrial safety // International Research Journal. 2016. № 11-4 (53). С. 141–143.
18. Cryogenic refrigerant burns: a rare occupational hazard / S. Dash [et al.] // Workplace Health & Safety. 2020. T. 69. № 3. P. 109–114.
19. LLNL/NWC 1980 LNG spill tests. Burro series data report / R.P. Koopman [et al.] // Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory. 1982. Vol. 1, 2.

References

1. Golubeva I.A., Meshcherin I.V., Dubrovina E.P. Proizvodstvo szhizhennogo prirodnogo gaza: vchera, segodnya, zavtra // Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanyh kompanij. 2016. № 6. С. 4–13.
2. Tkachenko E.S. Proizvodstvo szhizhennogo prirodnogo gaza: vchera, segodnya, zavtra // Aktual'nye problemy razvitiya neftegazovogo kompleksa Rossii: sb. tezisov. M.: Ros. gos. un-t nefti i gaza (nac. issled. un-t) im. I.M. Gubkina, 2018. С. 307.
3. Vishnyakov V.I. Mirovoj rynok szhizhennogo prirodnogo gaza: kon'yunktura i sovremennye tendencii razvitiya // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2022. № 5-4 (119). С. 142–150.
4. Naturnye nablyudenija lyudskih potokov: ucheb. posobie / V.V. Holshchevnikov [i dr.]. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2009. 189 s.
5. Evakuaciya i povedenie lyudej pri pozharah: ucheb. posobie / V.V. Holshchevnikov [i dr.]. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2009.
6. Evakuaciya i povedenie lyudej pri pozharah / V.V. Holshchevnikov [i dr.]. 2-e izd. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2015. 262 s.

7. Eksperimental'noe issledovanie processov evakuacii i spaseniya lyudej pri pozhare s etazherki tekhnologicheskoy linii gazopererabatyvayushchego zavoda / A.Yu. Lagozin [i dr.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2021. № 6. S. 69–74.
8. Naturnoe modelirovanie evakuacii personala s zavoda szhizhennogo prirodnogo gaza pri pozhare / B.A. Klement'ev [i dr.] // Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 3 (26). S. 62–68.
9. Primenenie raschetnoj modeli evakuacii personala s zavoda szhizhennogo prirodnogo gaza pri pozhare / B.A. Klement'ev [i dr.] // Monitoring, modelirovanie i prognozirovaniye opasnyh prirodnih yavlenij i chrezvychajnyh situacij: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk: Sibirskaya pozh.-spas. akad. GPS MCHS Rossii, 2022. S. 74–77.
10. Russkih D.V., Vytovtov A.V., Shevcov S.A. Osobennosti processa evakuacii lyudej iz proizvodstvennogo pomeshcheniya pri pozhare // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2019. № 1 (22). S. 70–82.
11. Stepanov A.A. Analiz pozharnoj bezopasnosti putej evakuacii iz proizvodstvennyh pomeshchenij // Vestnik nauki. 2022. T. 1. № 2 (47). S. 213–220.
12. Marshall V. MZO Osnovnye opasnosti himicheskikh proizvodstv: per. s angl. M: Mir, 1989.
13. Samigullin G.H., Kadochnikova E.N., Simonova M.A. Obzor krupnyh avariij na ob"ektaх polucheniya i primeneniya szhizhennogo prirodnogo gaza // Servis bezopasnosti v Rossii: opty, problemy, perspektivy formirovaniye kul'tury bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: prioritety, problemy, resheniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2018. S. 82–87.
14. Arhipova N.V. Analiticheskij obzor avariij s pozharami i vzryvami na ob"ektaх s obrashcheniem szhizhennogo prirodnogo gaza // Vestnik nauki. 2023. T. 4. № 6 (63). S. 1041–1047.
15. Samigullin G.H., Evloev Z.B., Sharapov S.V. Sravnitel'nyj analiz chrezvychajnyh situacij na ob"ektaх po proizvodstvu, hraneniyu, otgruzke szhizhennogo prirodnogo gaza i szhizhennogo uglevodorodnogo gaza // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 4 (72). S. 81–92.
16. Assessment of cascading accidents of frostbite, fire, and explosion caused by liquefied natural gas leakage / C. Yue [et al.] // Advances in Civil Engineering. 2020. T. 2020. № 1. S. 8867202.
17. Shevchuk E.V. Storage of liquefied natural gas and problems of industrial safety // International Research Journal. 2016. № 11-4 (53). S. 141–143.
18. Cryogenic refrigerant burns: a rare occupational hazard / S. Dash [et al.] // Workplace Health & Safety. 2020. T. 69. № 3. P. 109–114.
19. LLNL/NWC 1980 LNG spill tests. Burro series data report / R.P. Koopman [et al.] // Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory. 1982. Vol. 1, 2.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 24.03.2025; одобрена после рецензирования: 14.04.2025; принята к публикации: 06.05.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 24.03.2025; approved after review: 14.04.2025; accepted for publication: 06.05.2025

Сведения об авторе:

Евлоев Зелимхан Бекханович, аспирант факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: euloeff.zel@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6179-0999>, SPIN-код: 5043-1137

Information about the authors:

Evloev Zelimkhan B., adjunct at the faculty of higher education training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: euloeff.zel@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6179-0999>, SPIN: 5043-1137