

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 614.8

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА КРИОГЕННОГО ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ РАЗЛИВЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Самигуллин Гафур Халафович, Евлоев Зелимхан Бекханович, Булатов Вячеслав Олегович
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Обеспечение безопасности людей при эксплуатации технологического оборудования со сжиженным природным газом внутри требует учета риска, связанного с его разгерметизацией и последующим разливом содержимого в условиях чрезвычайной ситуации. Одним из наиболее опасных факторов таких аварий является криогенное поражение окружающей среды, приводящее к серьезным последствиям для здоровья и жизни людей. Разработка эффективных подходов к прогнозированию и минимизации подобного воздействия является актуальной задачей при повышении уровня безопасности лиц, находящихся в опасной зоне.

Для решения обозначенной проблемы в настоящей статье предлагается усовершенствованная методика оценки риска криогенного поражения. В ходе работы в ветро-холодовой индекс был введен новый параметр понижения температуры, обозначающий ее снижение в окружающей среде вследствие воздействия низких температур сжиженного природного газа.

Предложенная усовершенствованная методика будет способствовать повышению уровня защищенности объектов производства и хранения сжиженного природного газа и минимизации возможных тяжелых последствий от криогенной угрозы благодаря учету локального снижения температуры при разливе содержимого криогенного оборудования в случае чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, криогенное поражение человека, ветро-холодовой индекс

Для цитирования: Самигуллин Г. Х., Евлоев З. Б., Булатов В. О. Методика оценки риска криогенного поражения человека в условиях чрезвычайной ситуации при разливе сжиженного природного газа // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 122–135.

THE METHODOLOGY OF ASSESSING THE RISK OF CRYOGENIC INJURY TO HUMANS IN EMERGENCY SITUATIONS DURING A SPILL OF LIQUEFIED NATURAL GAS

Gafur Kh. Samigullin, Zelimkhan B. Evloev, Vyacheslav O. Bulatov
Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Ensuring the safety of people when operating technological equipment with liquefied natural gas inside requires taking into account the risk associated with its depressurization and subsequent spillage of the contents in emergency situations. One of the most dangerous factors of such accidents is cryogenic damage to the environment, leading to serious consequences for human health and life. The development of effective approaches to predicting and minimizing such impact is an urgent task in increasing the safety level of persons in the danger zone.

In order to solve the indicated problem, this paper proposes an improved methodology for assessing the risk of cryogenic shock. During the work, a new parameter of temperature decrease was introduced into the wind-cold index, indicating its decrease in the environment due to the impact of low temperatures of liquefied natural gas.

The proposed improved methodology will contribute to increasing the level of protection of liquefied natural gas production and storage facilities and minimizing possible severe consequences from cryogenic threat by taking into account the local decrease in temperature when spilling the contents of cryogenic equipment in the event of emergency situations.

Keywords: liquefied natural gas, human cryogenic injury, wind-cold index

For Citation: Malyutina E. V., Timashev S. A. The methodology of assessing the risk of cryogenic injury to humans in emergency situations during a spill of liquefied natural gas // *Technosphere safety*. 2025. № 2 (47). pp. 122–135.

Введение

В эпоху стремительного развития инновационных решений в области криогенных технологий общество сталкивается с новыми вызовами, где возникает необходимость улучшения существующих традиционных подходов и методов снижения рисков возникновения аварий на объектах производства и хранения сжиженного природного газа (далее — СПГ). Особую опасность представляют физико-химические свойства СПГ, включая его крайне низкие температуры [1, 2]. Контакт человека с криогенным веществом может привести к таким серьезным последствиям, как глубокие обморожения, повреждения тканей и потеря конечностей [3]. Риск подобного исхода возрастает при эксплуатации технологического оборудова-

ния, где возможны аварийные утечки значительного объема СПГ в результате разгерметизации, что способно привести к возникновению ЧС. Факторами, обуславливающими повышение рисков поражения персонала, являются: недостаточная защищенность людей, отсутствие инновационных средств индивидуальной и коллективной защиты, а также возможные нарушения регламентов безопасности.

В северных регионах РФ холодовые травмы составляют до 20 % ото всех термических повреждений. Согласно данным Росстата с 2019–2022 гг., ежегодно за медицинской помощью обращаются 11–22,1 тыс. пострадавших с отморожениями, что составляет 7,5–15 % случаев на 100 тыс. человек населения [4]. Показатели холодовых травм в РФ приведены на рис. 1.

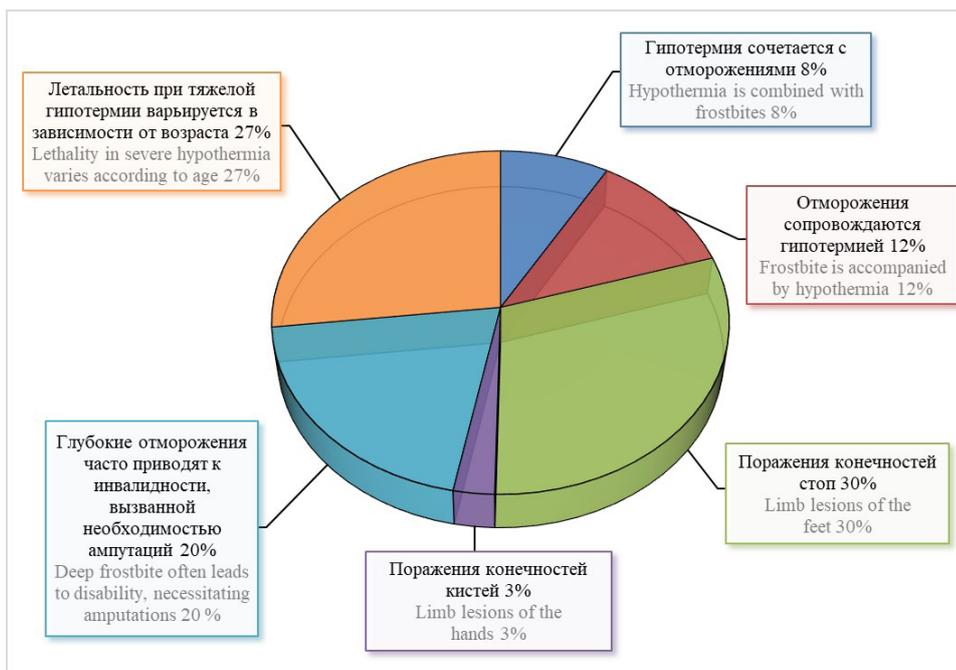


Рис. 1. Показатели холодových травм в РФ

Fig. 1. Indicators of cold injuries in Russia

Научный интерес к изучению воздействия холодных сред на человека обусловлен как производственными, так и экономическими факторами. Криогенное поражение человека, вызванное воздействием СПГ, имеет ряд специфических особенностей, усложняющих своевременную оценку риска и принятие превентивных мер. Обморожение происходит мгновенно при попадании СПГ на открытые участки тела человека, что приводит к резкому охлаждению тканей и повреждению клеточных структур. Визуальные признаки таких повреждений — покраснение, отечность и потеря чувствительности — могут проявляться не сразу, что затрудняет диагностику на начальных этапах, и в тяжелых случаях могут вызвать некроз тканей и утрату конечностей. Точная оценка рисков, связанных с воздействием криогенных температур при работе с СПГ, остается актуальной и в то же время недостаточно проработанной областью. Ситуация усугубляется тем, что существующие подходы к оценке рисков

недостаточно учитывают локальное снижение температуры и скорость теплообмена СПГ с окружающей средой. Поскольку СПГ обладает высокой теплоемкостью и поглощает тепло окружающих объектов практически мгновенно, последствия воздействия становятся необратимыми за считанные секунды. Поражающий эффект криогенной угрозы значительно повышается в условиях воздействия ветра, ускоряя возникновение травм при попадании СПГ на кожу или одежду человека. Соответственно, недооценка существующей угрозы является достаточно серьезной проблемой в области обеспечения безопасности человека при работе с криогенными технологиями. В связи с чем разработка и внедрение эффективных методов оценки и управления рисками при подобном воздействии остаются актуальными как для исследователей, так и для практиков [5–7].

В настоящей работе с целью снижения низкотемпературных поражений производственного персонала предложена усовер-

шенствованная методика оценки криогенного поражения при разливах СПГ. В отличие от традиционных подходов, методика включает дополнительный параметр понижения температуры в зоне воздействия СПГ, что позволяет учитывать влияние низких температур на окружающую среду и человека в реальных условиях.

Материалы и методы

На сегодняшний день существует ограниченное количество расчетных методов определения риска криогенного поражения человека, что делает крайне важным использование нормативно-технических документов, регламентирующих эту область, для дальнейшего научного изучения при проливе или выбросе в атмосферу холодных паров СПГ, в результате которых возникают ЧС.

Основополагающими документами являются два национальных стандарта РФ, разра-

ботанные на основе международных норм. Первый из них — ГОСТ Р ИСО 11079–2015. Указанный документ идентичен международному стандарту ISO 11079–2007 и представляет научно обоснованные методы оценки воздействия низких температур на человека, а также рекомендации по выбору средств защиты от холода. Вторым нормативным документом является ГОСТ Р ИСО 15743–2012, предназначенный для оценки условий работы как внутри помещений, так и на открытом воздухе. Оба стандарта дополняют друг друга, формируя комплексный подход к управлению, и могут быть адаптированы для различных специфических производственных условий [8, 9].

В соответствии с нормативными требованиями для оценки риска в условиях холодных температур используют ветро-холодовой индекс, позволяющий количественно определить воздействие холода на человека [10]. Формула расчета ветро-холодового индекса выглядит следующим образом:

$$t_{wc} = 13,12 + 0,6215 * t_a - 11,37 * v_{10}^{0,16} + 0,3965 * t_a * v_{10}^{0,16}, \quad (1)$$

где:

t_a — температура окружающей среды (°C);

$v_{10}^{0,16}$ — скорость ветра (м/с).

При интеграции влияния СПГ в расчеты оценки опасного воздействия на человека необходимо учитывать несколько ключевых факторов.

- Температуру СПГ, т. к. при проливе или выбросе в атмосферу может привести к резкому снижению температуры в зоне воздействия. Понижение температуры на исследуемой территории бу-

дет гораздо больше, учитывая низкую температуру СПГ.

- Местоположение производства и хранения СПГ на открытых площадках либо в закрытых помещениях, т. к. его воздействие будет зависеть от множества внешних факторов, таких как скорость ветра и температура окружающей среды.

Анализ натурных экспериментальных данных в сериях испытаний “Burro” по разливу СПГ [12], проведенных Koopman R. P., Baker J., Cederwall R. T., Goldwire H. C.,

Hogan W. J., Kamppinen L. M., Kiefer R. D., McClure J. W., McRae T. G., Morgan D. L., Morris L. K., Spann M. W., Lind C. D, показал, что понижение температуры зависит от метеорологических и термодинамических факторов. Существующие сведения были использованы для калибровки и валидации расчетных моделей разлива СПГ, в которых учитываются процессы фазового перехода, теплообмена с окружающей средой и конвективного рассеивания холодного облака газа.

С переходом на современные методы моделирования McGrattan K. B., математик отдела исследований огня Инженерной лаборатории Национального института стандартов

и технологий, обновил существовавшие модели на основе методов Computational Fluid Dynamics, реализованных в Fire Dynamics Simulator, для повышения точности прогнозирования поведения потоков газовой фазы. Предложенная им расчетная модель из серии натуральных экспериментов “Burro-3” [12] по разливу СПГ показала хорошую сходимость с экспериментальными данными. В настоящей статье она была доработана с учетом понижения температуры окружающей среды при испарении СПГ и уточнения пространственно-временной детализации для более точной оценки распространения холодного облака газа (рис. 2–9).

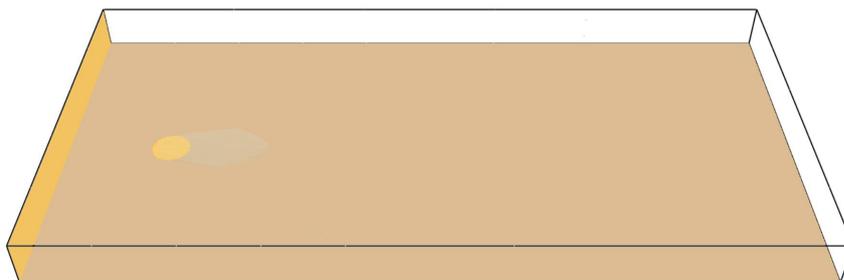


Рис. 2. Расчетная модель изоповерхности разлива СПГ объемом 34 м^3 на расстоянии 0–80 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 20 с. Температура СПГ — от -160 до -40 °С и ниже. Температура окружающей среды — $+33,8$ °С, скорость ветра — $5,4$ м/с

Fig. 2. Computational isosurface model of a 34 м^3 LNG spill at a distance of 0–80 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is 20 s. LNG temperature — from -160 to -40 °C and below. Ambient temperature — $+33,8$ °C, wind speed — $5,4$ m per second

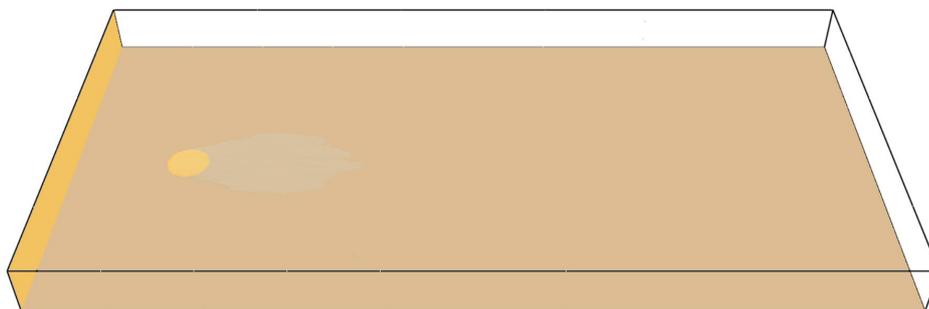


Рис. 3. Расчетная модель изоповерхности разлива СПГ объемом 34 м^3 на расстоянии 0–150 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 40 с. Температура СПГ — от -160 до -40 °С и ниже. Температура окружающей среды — $+33,8$ °С, скорость ветра — $5,4$ м/с

Fig. 3. Computational isosurface model of a 34 м^3 LNG spill at a distance of 0–150 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is 40 s. LNG temperature — from -160 to -40 °C and below. Ambient temperature — $+33,8$ °C, wind speed — $5,4$ m per second



Рис. 4. Расчетная модель изоповерхности разлива СПГ объемом 34 м³ на расстоянии 0–250 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 60 с. Температура СПГ — от –160 до –40 °С и ниже. Температура окружающей среды — +33,8 °С, скорость ветра — 5,4 м/с

Fig. 4. Computational isosurface model of a 34 m³ LNG spill at a distance of 0–250 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is 60 s. LNG temperature — from –160 to –40 °C and below. Ambient temperature — +33,8 °C, wind speed — 5,4 m per second

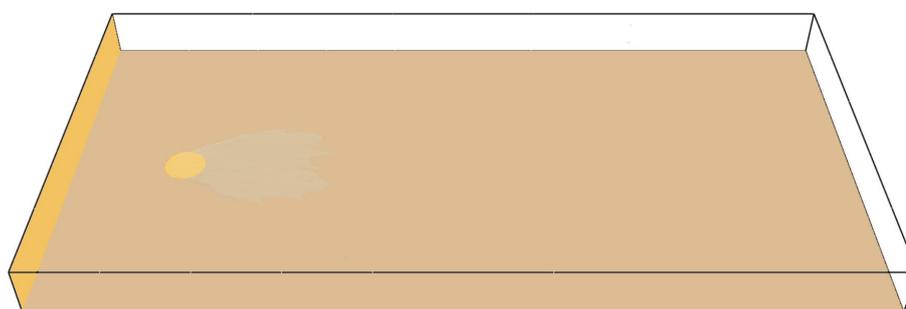


Рис. 5. Расчетная модель изоповерхности разлива СПГ объемом 34 м³ на расстоянии 0–350 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 80 с. Температура СПГ — от –160 до –40 °С и ниже. Температура окружающей среды — +33,8 °С, скорость ветра — 5,4 м/с

Fig. 5. Computational isosurface model of a 34 m³ LNG spill at a distance of 0–350 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is 80 s. LNG temperature — from –160 to –40 °C and below. Ambient temperature — +33,8 °C, wind speed — 5,4 metres per second

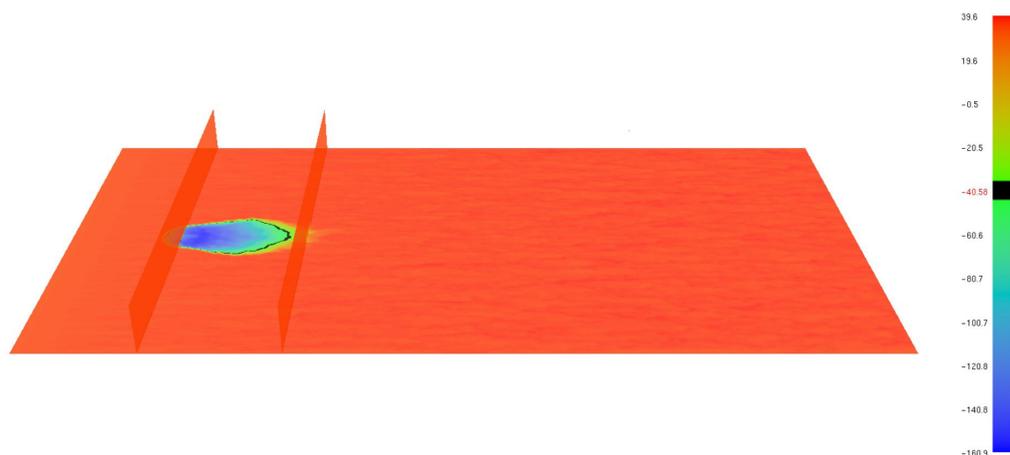


Рис. 6. Расчетная модель формирования и распространения холодного облака газа при разливе СПГ объемом 34 м³ на расстоянии 0–80 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 20 с. Температура СПГ — от –160 до –40 °С и ниже. Температура окружающей среды — +33,8 °С, скорость ветра — 5,4 м/с

Fig. 6. Computational model of cold gas cloud formation and propagation during a 34 m³ LNG spill at a distance of 0–80 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is — 20 s. LNG temperature — from –160 to –40 °C and below. Ambient temperature — +33,8 °C, wind speed — 5,4 m per second

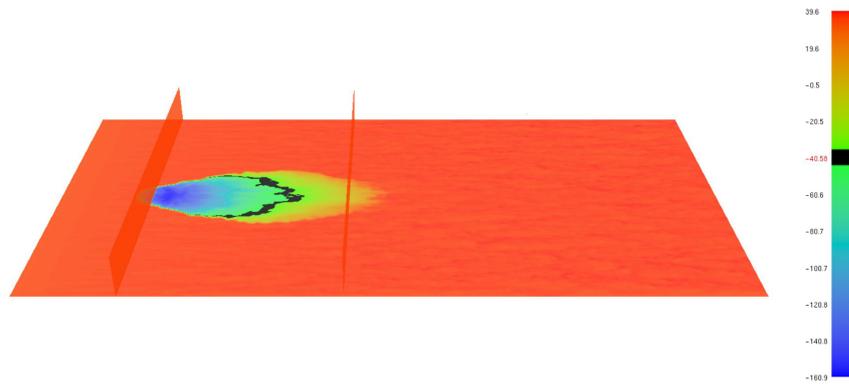


Рис. 7. Расчетная модель формирования и распространения холодного облака газа при разливе СПГ объемом 34 м³ на расстоянии 0–150 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 40 с. Температура СПГ — от –160 до –40 °С и ниже. Температура окружающей среды — +33,8 °С, скорость ветра — 5,4 м/с

Fig. 7. Computational model of cold gas cloud formation and propagation during a 34 m³ LNG spill at a distance of 0–150 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is — 40 s. LNG temperature — from –160 to –40 °C and below. Ambient temperature — +33,8 °C, wind speed — 5,4 m per second

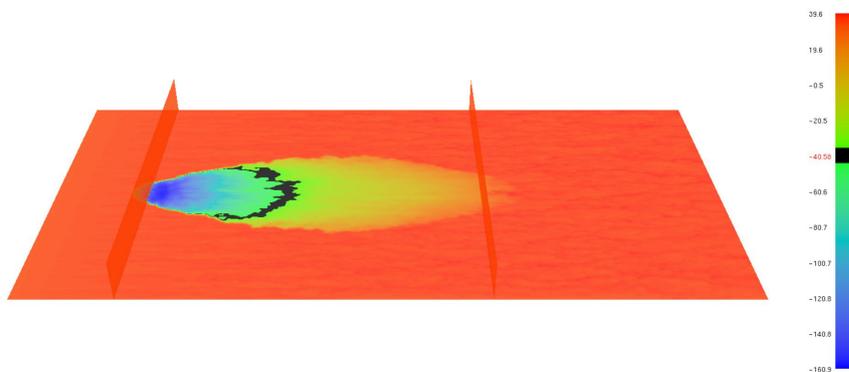


Рис. 8. Расчетная модель формирования и распространения холодного облака газа при разливе СПГ объемом 34 м³ на расстоянии 0–250 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 60 с. Температура СПГ — от –160 до –40 °С и ниже. Температура окружающей среды — +33,8 °С, скорость ветра — 5,4 м/с

Fig. 8. Computational model of cold gas cloud formation and propagation during a 34 m³ LNG spill at a distance of 0–250 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is — 60 s. LNG temperature — from –160 to –40 °C and below. Ambient temperature — +33,8 °C, wind speed — 5,4 m per second

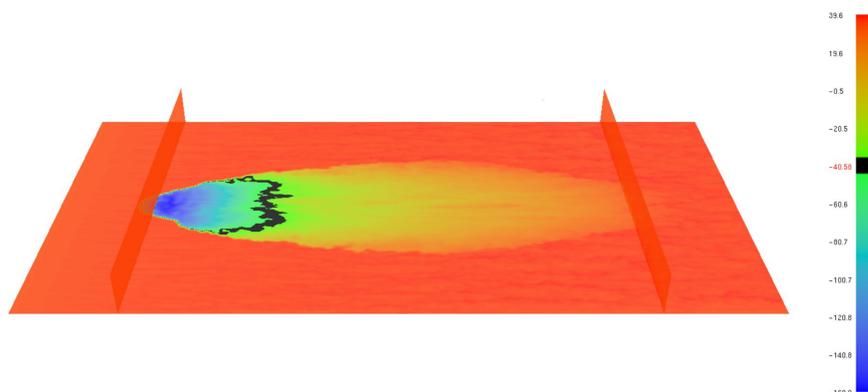


Рис. 9. Расчетная модель формирования и распространения холодного облака газа при разливе СПГ объемом 34 м³ на расстоянии 0–350 м от места разлива. Время после начала разлива СПГ — 80 с. Температура СПГ — от –160 до –40 °С и ниже. Температура окружающей среды — +33,8 °С, скорость ветра — 5,4 м/с

Fig. 9. Computational model of cold gas cloud formation and propagation during a 34 m³ LNG spill at a distance of 0–350 m from the spill site. The time after the start of the LNG spill is — 80 s. LNG temperature — from –160 to –40 °C and below. Ambient temperature — +33,8 °C, wind speed — 5,4 m per second

На примере модели видно, что понижение температуры при разливе СПГ в центре может достигать экстремально низких значений: в пределах от -160 °С и ниже. Однако на внешних границах зоны разлива этот показатель может постепенно повышаться до -40 °С, но даже при таких значениях не исключается риск обморожения, нарушения терморегуляции организма человека и других негативных последствий.

Следует также заметить, что экспериментальные данные подтверждают зависимость параметра понижения температуры СПГ от скорости ветра, где при высоких значениях (5–7 м/с) температура восстанавливается быстрее, тогда как при низких значениях (1–3 м/с) охлаждение происходит более продолжительно, что важно учитывать при оценке рисков криогенного воздействия на безопасность человека [11–12].

Результаты и их обсуждение

С учетом вышеизложенного в расчетную формулу предлагается ввести параметр понижения температуры на определенную величину в ветро-холодовой индекс, обозначающий снижение температуры окружающей среды, вызванное воздействием СПГ:

$$t_{wc, new} = 13,12 + 0,6215 \cdot (t - \Delta t_{LNG}) - 11,37 \cdot v^{0,16} + 0,3965 \cdot (t - \Delta t_{LNG}) \cdot v^{0,16}, \quad (2)$$

где:

t — температура окружающей среды (°С);

$v^{0,16}$ — скорость ветра (м/с);

Δt_{LNG} — снижение температуры окружающей среды из-за испарения СПГ [13–15].

Для оценки опасности криогенного поражения в целях определения риска для здоровья и жизни человека в разных температурных режимах при воздействии СПГ предлагается ввести шкалу на основе четырехступенной классификации при холодových травмах [16–18]. В частности, из международного стандарта ISO 11079–2007 были взяты параметры оценки теплопотерь человека в условиях низких температур, чтобы установить критические пороговые значения температурного воздействия, соответствующие различным уровням риска в раз-

работанной шкале. Шкала оценки уровня риска криогенного поражения человека в условиях низких температур при воздействии СПГ представлена в табл. 1.

В качестве примера проведем расчет для оценки риска криогенного поражения человека в случае разлива СПГ в окружающую среду со следующими исходными данными:

- температура окружающей среды $t = -10$ °С;
- скорость ветра $v = 4,17$ м/с;
- снижение температуры окружающей среды из-за испарения СПГ $\Delta t_{LNG} = -30$ °С.

Определим по формуле (3) температуру, ощущаемую человеком в условиях низких температур, с учетом скорости ветра и влияния СПГ:

$$t_{wc, new} = 13,12 + 0,6215 \cdot (-10 - 30) - 11,37 \cdot 4,17^{0,16} + 0,3965 \cdot (-10 - 30) \cdot 4,17^{0,16} = 13,12 + 0,6215 \cdot (-10 - 30) - 11,37 \cdot 1,256 + 0,3965 \cdot (-10 - 30) \cdot 1,256 = -46 \text{ °С}. \quad (3)$$

Таблица
Шкала оценки уровня риска криогенного поражения
человека в условиях низких температур при воздействии СПГ

Table 1
Scale for assessing the level of risk of cryogenic injury
to humans in low-temperature conditions during LNG exposure

Уровень риска Risk level	Температурный диапазон Temperature range	Время поражения Time of defeat	Рекомендации по защитной одежде Recommendations for protective clothing	
			Летняя	Зимняя
Низкий риск Low risk	от –20 до –30 °С from –20 to –30 °C	20–30 мин 20–30 min	Легкий комбинезон, очки, шлем, перчатки, обувь Lightweight overalls, goggles, helmet, gloves, shoes	Утепленный комбинезон, термобелье, очки, балаклава или капюшон, утепленные перчатки и обувь Insulated overalls, thermal underwear, goggles, balaclava or hood, insulated gloves and shoes
Средний риск Average risk	от –30 до –40 °С from –30 to –40 °C	10–20 мин 10–20 min	Комбинезон с усиленной термоизоляцией, очки, шлем, перчатки, обувь Heat-insulated overalls, goggles, helmet, gloves, shoes	Утепленный комбинезон с усиленной термоизоляцией, термобелье, очки, балаклава или капюшон, утепленные перчатки и обувь Insulated overalls with reinforced thermal insulation, thermal underwear, goggles, balaclava or hood, insulated gloves and shoes
Высокий риск High risk	от –40 до –60 °С from –40 to –60 °C	5–10 мин 5–10 min	Комбинезон с криозащитой и усиленной термоизоляцией, двойные очки, шлем, перчатки, обувь, средства индивидуальной защиты органов дыхания Overalls with cryoprotection and reinforced thermal insulation, double goggles, helmet, gloves, shoes, personal respiratory protection equipment	Утепленный комбинезон с криозащитой и усиленной термоизоляцией, очки, балаклава или капюшон, утепленные перчатки и обувь, средства индивидуальной защиты органов дыхания Insulated coveralls with cryoprotection and reinforced thermal insulation, goggles, balaclava or hood, insulated gloves and shoes, personal respiratory protection equipment

Окончание таблицы

Уровень риска Risk level	Температурный диапазон Temperature range	Время поражения Time of defeat	Рекомендации по защитной одежде Recommendations for protective clothing	
			Летняя	Зимняя
Критический риск Critical risk	от -60 °C и ниже from -60 °C and below	2-3 мин 2-3 min	Двойной комбинезон с криозащитой и усиленной термоизоляцией, очки, шлем, перчатки, обувь, средства индивидуальной защиты органов дыхания Double coveralls with cryoprotection and reinforced thermal insulation, goggles, helmet, gloves, shoes, personal respiratory protection equipment	Утепленный двойной комбинезон с криозащитой и усиленной термоизоляцией, очки, балаклава или капюшон, утепленные перчатки и обувь, средства индивидуальной защиты органов дыхания Insulated double coveralls with cryoprotection and reinforced thermal insulation, goggles, balaclava or hood, insulated gloves and footwear, personal respiratory protection equipment

На основе расчетных данных получена тепловая карта, показывающая, в каких температурных областях значения выходят за пределы безопасных диапазонов, где

уровень риска более высок в условиях низких температур для здоровья и жизни человека при воздействии СПГ. Тепловая карта представлена на рис. 10.

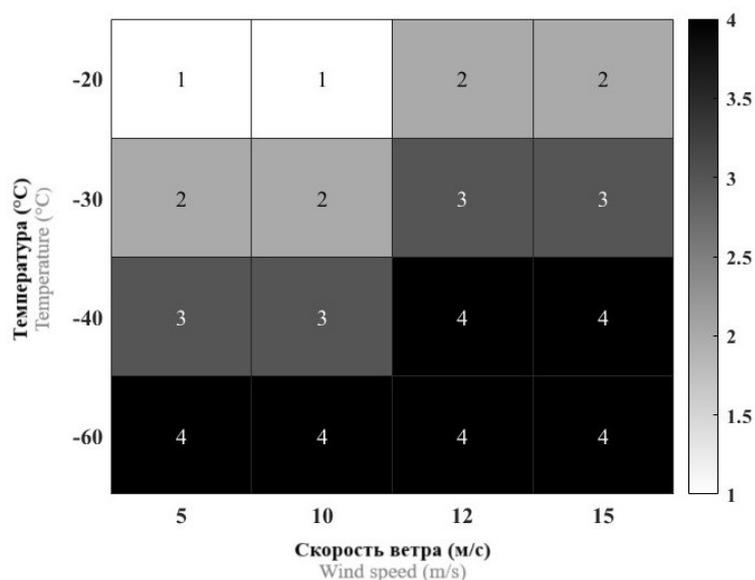


Рис. 10. Тепловая карта

Fig. 10. Heat map

Таким образом, температура, ощущаемая человеком в описанной ситуации, с учетом как скорости ветра, так и воздействия СПГ составит примерно $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Согласно табл. 1, полученное значение температурного диапазона ($-46\text{ }^{\circ}\text{C}$) попадает в диапазон от -40 до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует уровню высокого риска.

Заключение

Предлагаемая усовершенствованная методика является необходимым дополнением

к существующим традиционным подходам к оценке риска криогенного поражения человека. Реализация этой методики станет важным вкладом в повышение уровня защищенности объектов производства и хранения СПГ, обеспечивая эффективное управление рисками и минимизацию возможных последствий в случае ЧС. Кроме того, ее внедрение будет способствовать совершенствованию нормативно-технической базы, регламентирующей деятельность производств, сопряженных с криогенными технологиями, и уровню подготовки специалистов в исследуемой области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Assessment of Cascading Accidents of Frostbite, Fire, and Explosion Caused by Liquefied Natural Gas Leakage / Yue. Chengjun et al. // *Advances in Civil Engineering*. 2020. pp. 1–14.
2. Шевчук Е. В. Хранение сжиженного природного газа и проблемы обеспечения промышленной безопасности // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 11–4 (53). С. 141–143.
3. Cryogenic Refrigerant Burns: A Rare Occupational Hazard / S. Dash et al. // *Workplace Health & Safety*. 2020. № 69. pp. 109–114.
4. Клинические рекомендации. Отморожение. Гипотермия. Другие эффекты воздействия низкой температуры // Рубрикатор клинических рекомендаций : офиц. сайт. URL: https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/678_2 (дата обращения: 31.01.2025).
5. Palestini L., Sassu F. Risks and safety measures associated with the storage and transport of liquefied natural gas (LNG) // *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. Vol. 11, № 4. pp. 409–418.
6. Самигуллин Г. Х., Евлоев З. Б. Оценка вероятности эскалации аварий на объектах производства и хранения сжиженного природного газа // *Научный вестник НИИГД Респиратор*. 2024. № 4 (61). С. 97–106.
7. Техногенные риски на объектах по производству сжиженного природного газа / С. В. Ильницкий и др. // *Научный Лидер*. 2023. № 15 (113). С. 10–15.
8. ГОСТ Р ИСО 11079–2015. Эргономика термальной среды. Определение холодового стресса и его интерпретация на основе показателей требуемой термоизоляции одежды и локального охлаждающего воздействия : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и вве-

ден в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 8 октября 2015 г. № 1504-ст : введен впервые : дата введения 2016-12-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124975> (дата обращения: 31.01.2025).

9. ISO 11079–2007. Ergonomics of the thermal environment — Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects : междунар. стандарт // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/431802138> (дата обращения: 31.01.2025).

10. ГОСТ Р ИСО 15743–2012. Практические аспекты менеджмента риска. Менеджмент и оценка риска для холодных сред : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. № 1270-ст : введен впервые : дата введения 2013-12-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096448> (дата обращения: 31.01.2025).

11. База данных натуральных экспериментов для верификации математических моделей рассеяния облаков «тяжелого» газа / А. А. Агапов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 6. С. 35–44.

12. LLNL/NWC 1980 LNG spill tests. Burro series data report / R. P. Koopman et al. Livermore : Lawrence Livermore National Laboratory, 1982. № 1, 2. 286 p.

13. Implementation of a new Wind Chill Temperature Index by the National Weather Service // ms.confex : website. URL: https://ams.confex.com/ams/annual2002/techprogram/paper_27020.htm (date of application: 31.01.2025).

14. Study of Wind Chill Factor using Infrared Imaging / A. Tanveer et al. // The International Journal of Multiphysics. 2016. № 10. pp. 325–342.

15. Kargapolova N. Stochastic model of spatial fields of the average daily wind chill index // Information (Switzerland). 2020. Vol. 11, № 4. P. 177.

16. Accidental hypothermia-an update / P. Paal et al. // Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine. 2016. № 24 (1). P. 111.

17. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015: Section 4. Cardiac arrest in special circumstances / A. Truhlář et al. // Resuscitation. 2015. № 95. pp. 148–201.

18. Brown D. Hypothermia. New York : McGraw Hill, 2015. pp. 1357–1365.

REFERENCES

1. Assessment of Cascading Accidents of Frostbite, Fire, and Explosion Caused by Liquefied Natural Gas Leakage / Yue. Chengjun et al. // Advances in Civil Engineering. 2020. pp. 1–14.

2. Shevchuk E. V. Storage of liquefied natural gas and problems of industrial safety // International Research Journal. 2016. № 11–4 (53). pp. 141–143.

3. Cryogenic Refrigerant Burns: A Rare Occupational Hazard / S. Dash et al. // Workplace Health & Safety. 2020. № 69. pp. 109–114.

4. Clinical recommendations. Frostbite. Hypothermia. Other effects of exposure to low temperature // Rubricator of clinical recommendations : official website. URL: https://cr.minzdrav.gov.ru/view-cr/678_2 (date of application: 31.01.2025).

5. Palestini L., Sassu F. Risks and safety measures associated with the storage and transportation of liquefied natural gas (LNG) // International Journal of Safety and Security Engineering. 2021. Vol. 11, № 4. pp. 409–418.

6. Samigullin G. Kh. H., Evloev Z. B. Estimation of the probability of escalation of accidents at the facilities of production and storage of liquefied natural gas // Scientific Bulletin of NIIGD Respirator. 2024. № 4 (61). pp. 97–106.

7. Technogenic risks at liquefied natural gas production facilities / S. V. Ilitsky et al. // Scientific Leader. 2023. № 15 (113). pp. 10–15.

8. GOST R ISO 11079–2015. Ergonomics of thermal environment. Determination of cold stress and its interpretation on the basis of indicators of the required thermal insulation of clothing and local cooling effect : national standard of the Russian Federation : approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from October 8, 2015 № 1504-st : introduced for the first time : date of introduction 2016-12-01 // Codex : electronic fund of legal and regulatory-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124975> (date of application: 31.01.2025).

9. ISO 11079–2007. Ergonomics of the thermal environment — Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects : international standard // Codex : electronic fund of legal and regulatory information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/431802138> (date of application: 31.01.2025).

10. GOST R ISO 15743–2012. Practical aspects of risk management. Management and risk assessment for cold environments : national standard of the Russian Federation : approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from November 29, 2012 № 1270-st : introduced for the first time : date of introduction 2013-12-01 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical inform. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096448> (date of application: 31.01.2025).

11. Database of field experiments for verification of mathematical models of “heavy” gas cloud dispersion / A. A. Agapov et al. // Labor Safety in Industry. 2018. № 6. pp. 35–44.

12. LLNL/NWC 1980 LNG spill tests. Burro series data report / R. P. Koopman et al. Livermore : Lawrence Livermore National Laboratory, 1982. № 1, 2. 286 p.

13. Implementation of a new Wind Chill Temperature Index by the National Weather Service // ms.confex : website. URL: https://ams.confex.com/ams/annual2002/techprogram/paper_27020.htm (date of application: 31.01.2025).

14. Study of Wind Chill Factor using Infrared Imaging / A. Tanveer et al. // The International Journal of Multiphysics. 2016. № 10. pp. 325–342.

15. Kargapolova N. Stochastic model of spatial fields of the average daily wind chill index // Information (Switzerland). 2020. Vol. 11, № 4. P. 177.

16. Accidental hypothermia-an update / P. Paal et al. // Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine. 2016. № 24 (1). P. 111.

17. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015: Section 4. Cardiac arrest in special circumstances / A. Truhlář et al. // Resuscitation. 2015. № 95. С. 148–201.
18. Brown D. Hypothermia. New York : McGraw Hill, 2015. pp. 1357–1365.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самигуллин Гафур Халафович, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149); SPIN-код: 8830-4253; AuthorID: 1020610; ORCID: 0000-0002-5688-8921; e-mail: samigullin.g@igps.ru

Евлоев Зелимхан Бекханович, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149); SPIN-код: 5043-1137; AuthorID: 1170858; ORCID: 0000-0001-6179-0999; e-mail: euloeff.zel@yandex.ru

Булатов Вячеслав Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149); SPIN-код: 1739-4507; AuthorID: 974531; ORCID: 0000-0002-4907-1024; e-mail: 79112231238@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gafur K. Samigullin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Professor, Department of Physical and Chemical Bases of Combustion and Extinguishing Processes St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky pr., St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 8830-4253; Author ID: 1020610; ORCID: 0000-0002-5688-8921; e-mail: samigullin.g@igps.ru

Zelimkhan B. Yevloyev, Adjunct Faculty of Higher Qualification Training St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky pr., St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 5043-1137; Author ID: 1170858; ORCID: 0000-0001-6179-0999; e-mail: euloeff.zel@yandex.ru

Vyacheslav O. Bulatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky pr., St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 1739-4507; Author ID: 974531; ORCID: 0000-0002-4907-1024; e-mail: 79112231238@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.02.2025
Одобрено после рецензирования 24.02.2025
Принята к публикации 15.06.2025