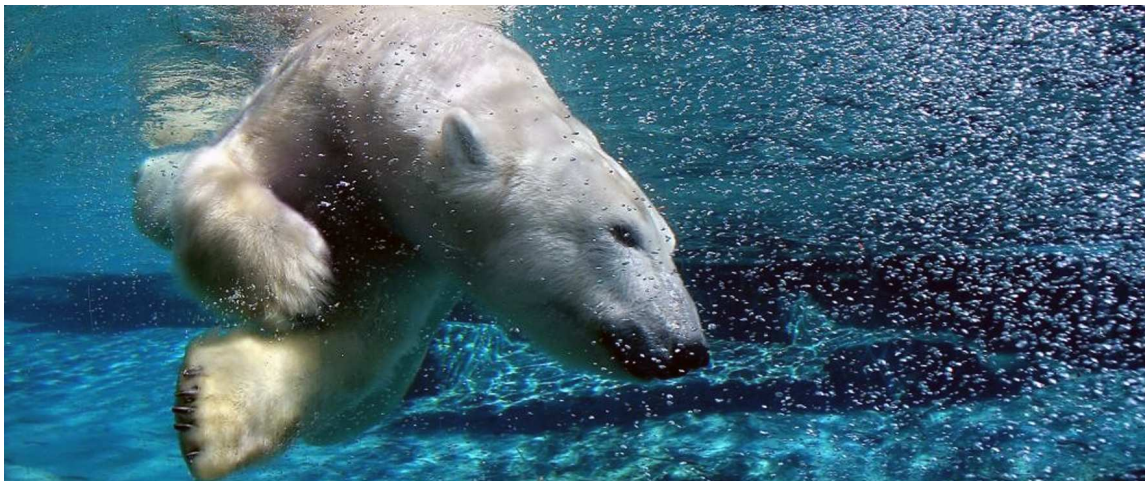




БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.12 + 627.355.4 + 665.725
EDN YZMAKE

НАЗНАЧЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОХРАНЯЕМОЙ ЗОНЫ В ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ БУНКЕРОВКИ СПГ МЕТОДОМ «АВТОЦИСТЕРНА — СУДНО»

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

В.А. Павловский, д-р физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., 3, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Работа посвящена вопросу назначения размеров охраняемой зоны (security area) в ходе выполнения бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно». Были предложены исходные данные для сценария выполнения расчета (место утечки, оборудование, подверженное повреждениям, давление и параметры СПГ внутри шланга, размеры шланга для передачи бункерного СПГ), полученные в ходе выполнения оценки рисков проведения данной операции.

В статье обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильных руководящих документов. При решении задачи определения размера охраняемой зоны при бункеровке судна СПГ при помощи автоцистерны скорость истечения СПГ определялась двумя способами: по оригинальной методике проф. д.ф.-м.н. В.А. Павловского и по приближенной аппроксимирующей зависимости из стандарта IEC 60079-10-1:2021, показавшим в значительной степени близкие результаты. Описанный здесь расчетный алгоритм может быть использован при назначении размеров опасной зоны при планировании бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно».

Ключевые слова: охраняемая зона, СПГ, сжиженный природный газ, оценка рисков, утечка, TTS, метод «автоцистерна — судно».

Для цитирования: Реуцкий А.С. Назначение размеров охраняемой зоны в ходе выполнения бункеровки методом «автоцистерна — судно» / А.С. Реуцкий, В.А. Павловский // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 4 — 15. — EDN YZMAKE.

ASSIGNING THE SIZE OF THE PROTECTED AREA DURING THE TTS LNG BUNKERING OPERATION

A.S. Reutskii, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

V.A. Pavlovsky, DSc in Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

The work is devoted to the issue of assigning the size of a security area during the TTS LNG bunkering using the tanker-ship method. The initial data for the calculation scenario (leak location, equipment susceptible to damage, pressure and parameters of LNG inside the bunkering hose for liquid phase of LNG, dimensions of the hose for transferring bunker LNG) obtained during the risk assessment of this operation were proposed. When solving this problem, the LNG expiration rate was determined in two ways — according to the original methodology of Prof. V.A. Pavlovsky and the approximation from the IEC 60079-10-1:2021, which showed the same results.

The results of the study can be used to determine the size of the security area when planning LNG bunkering using the tanker-ship method. The research materials of domestic and foreign scientists, as well as relevant guidance documents, are summarized and analyzed.

Keywords: security area, LNG, liquefied natural gas, risk assessment, leakage, TTS, tanker-ship method.

For citation: Reutskii A.S., Pavlovsky V.A. Assigning the size of the protected area during the TTS LNG bunkering operation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 4 — 15. EDN YZMAKE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Международным кодексом по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки [1], риск-ориентированные методы [2] применяются для решения некоторых конструкционных задач: определения сценария аварийных нагрузок на емкость со сжиженным природным газом (далее — СПГ); определения объема емкостей для сбора утечек СПГ; выбора конструктивного исполнения бункеровочной станции СПГ; определения требуемых параметров вентиляции и определения дополнительных сценариев аварий.

В соответствии с имеющейся нормативной базой бункеровки судов СПГ — национальными стандартами [3] и [4], представляющими собой глубокую переработку международного стандарта ISO 20519:2021 NEQ [5] для отечественных реалий, перед проведением бункеровки СПГ [6] поставщик услуг обязан выполнить идентификацию и оценку рисков, учитывающую пожарные, криогенные и другие опасности, которые потенциально несет передача СПГ. Исследуемыми опасными событиями в соответствии с [3] являются: пожар, охрупчивание конструкций, обморожение и т.д. Для всех опасных событий могут быть применены известные решения. Так, для предотвращения охрупчивания корпусных конструкций применяются специальной формы и необходимого объема поддоны для сбора разлившегося СПГ, водяная завеса для смывания его брызг с палубы и борта судна в воду и т.п. В этой части целью оценки рисков является ужесточение проверки соблюдения всех этих мер ответственными за проведение бункеровки лицами и другими задействованными членами экипажа. С главным риском — утечкой и последующим образованием пожароопасной смеси метана с воздухом — все обстоит сложнее.

При выполнении риск-ориентированного исследования одним из обязательных к рассмотрению опасных сценариев развития событий является утечка СПГ или его паров с последующим образованием взрывоопасной смеси с воздухом. Обращение с горючими газозоодушными смесями на открытых пространствах регулируется назначением специальных зон, в пределах которых запрещено находиться незанятому в проведении операции персоналу, регулируется размещение невзрывозащищенного оборудования, способного вызвать возгорание местной атмосферы, запрещается проведение огневых работ, курение и т.п. Рекомендации Lloyd's Register (далее — LR) [7] по проведению бункеровки СПГ в порту, ссылаясь на соответствующие документы по стандартизации [8, 9], определяют эти зоны как взрывоопасные (hazardous zones), зоны безопасности (safety zones), зоны мониторинга и охраны (monitoring and security area). Помимо этого, в [7] вводится понятие морской запретной зоны (marine zone или marine exclusion zone), впервые упоминающееся в докладах Европейского агентства по безопасности морских перевозок EMSA [8] и Международного общества бункеровщиков СПГ SGMF [9].

В соответствии с определением из Части XI ПКПС Регистра [10], взрывоопасные зоны подразделяются на зону 0, где постоянно или в течение длительного периода времени присутствует взрывоопасная смесь воздуха и газа; зону 1, где при нормальных условиях работы возможно присутствие взрывоопасной смеси воздуха и газа; зону 2, в которой маловероятно появление взрывоопасной смеси воздуха и газа, а в случае появления эта смесь присутствует в течение непродолжительного периода времени. Требования, которые Регистр предъявляет к расположению и размерам взрывоопасных зон на судне, представлены в п. 19.2.3 Части XI ПКПС [10]. Размеры эти частично коррелируются с размерами, указанными в требованиях LR [7].

Несмотря на обязательное (в соответствии с п. 3.2.10.1 [11]) наличие в составе ТП и ПДСП газотопливного судна чертежа взрывоопасных помещений и пространств, назначаемые им размеры пожароопасных зон не могут быть применимы к операции бункеровки, так как учитывают режимы работы только судовой топливной системы СПГ и не учитывают условно произвольное расположение шлангового бункеровочного оборудования, особенности конструкции бустерных бункеровочных модулей и оборудования передающей бункерное топливо техники (автоцистерны СПГ или судна-бункеровщика), а также характерные для этого оборудования опасности.

Основной проблемой и камнем преткновения для получения разрешения на проведение bunkеровки СПГ в любом порту является назначение размера зоны безопасности (safety zone), которая физически ограждает площадку для выполнения bunkеровочной операции, включающую в себя газотопливное судно и источник СПГ (автоцистерна, судно-бункеровщик СПГ), от окружающего пространства (рис. 1).



Рис. 1. Ограждение зоны безопасности (safety zone), отмеченное стрелками

Несмотря на то, что зона безопасности должна быть физически ограждена, как это показано на рис. 1, в практике европейских bunkеровочных компаний эта мера зачастую не соблюдается. На рис. 2 представлена операция bunkеровки СПГ, при которой отсутствует какое-либо ограждение; более того, в непосредственной близости находится ричстакер, оборудованный двигателем внутреннего сгорания, на бетонном покрытии стоят контейнеры, а у расположившегося вблизи парома опущена аппарель. Все эти потенциальные источники искрообразования находятся в непосредственной близости к источнику потенциально горючей газозвоздушной смеси.



Рис. 2. Отсутствие ограждения зоны безопасности (safety zone)

LR [7] приводит следующие предварительные расстояния зон безопасности, рассчитанные на основе детерминированного подхода, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Предварительные расстояния зон безопасности по версии LR

Способ бункеровки	«Автоцистерна — судно»	«Судно — судно»		«Порт — судно»	
Тип танка СПГ		Тип «С»	Мембранный/ призматический	Сосуд под давлением	Плоскостенная емкость
Предварительные расстояния, м	60	30	50	25	25

Как видно из табл. 1, размер зоны безопасности для выполнения бункеровки способом «автоцистерна — судно» составляет наибольшее значение в 60 м. Конечно, данное значение соблюдается далеко не всегда. Зачастую зона безопасности едва ли составляет 5 м (рис. 3).



Рис. 3. Зона безопасности (safety zone)

Одним из способов обоснованного уменьшения зоны безопасности является выполнение риск-ориентированного исследования, которое требуется в соответствии с [3]. Частью этого исследования может являться исследование размера зоны безопасности, особенно если причальные сооружения стеснены находящимися рядом строениями или транспортно-логистическими объектами, грузовыми устройствами и другими источниками искрообразования.

1. ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определим, насколько размер зоны безопасности, назначаемый по рекомендации LR [7], может отличаться от размеров, устанавливаемых расчетным способом применительно к бункеровке методом «автоцистерна — судно». Выполним определение размера и протяженности зоны безопасности в соответствии с методикой, изложенной в актуальной версии IEC 60079-10-1 [12].

В ходе идентификации опасных ситуаций было определено, что утечка СПГ чаще всего происходит в шланговом соединении (рис. 4) [13].

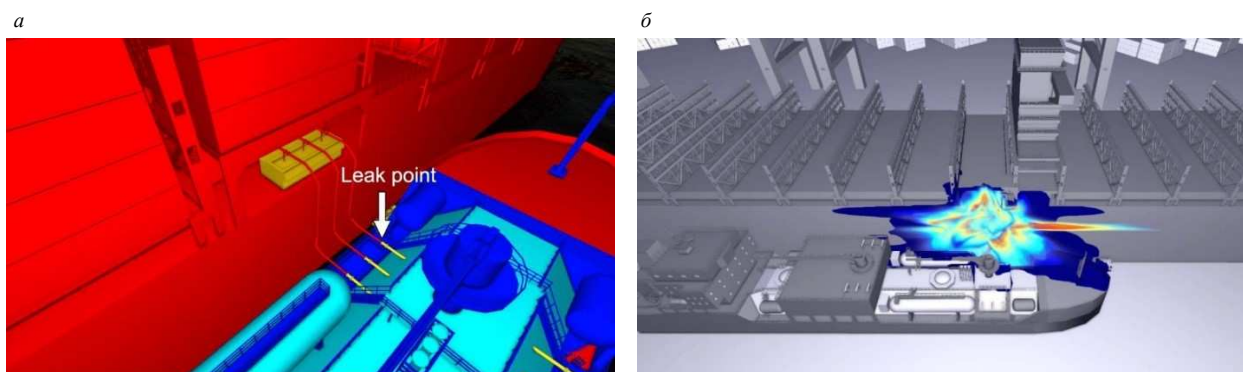


Рис. 4. а — место утечки СПГ на фланце манифольда судна-бункеровщика СПГ;
б — пример CFD-расчета распространения пожароопасной концентрации газозавоздушной смеси

В заметке [14] указывается, что после длительной работы у фланца из криогенной аустенитной нержавеющей стали 304L в зоне термического воздействия СПГ была обнаружена утечка, вызванная коррозией. Учитывая, что это разъемное соединение, которое постоянно разбирается и собирается, а методы оценки состояния прилегающих поверхностей фланцевого соединения и прокладки перед бункеровкой СПГ с автоцистерны сводятся к их визуальному осмотру, в ходе оценки рисков может быть сделан вывод о том, что именно прокладка фланцевого соединения может послужить источником утечки СПГ при ее повреждении.

Таким образом, целью исследования является анализ размера зоны для расстановки заграждений при проведении бункеровки СПГ с автоцистерны. В качестве исследуемого аварийного случая рассматривается выброс (утечка) СПГ из отверстия, образовавшегося во фланцевом соединении из-за повреждения прокладки фланца во время тестирования шлангового оборудования внутренним давлением 2 бара перед бункеровкой, при этом шланг наполнен СПГ. При срабатывании аварийной сигнализации активируется функция аварийного останова ESD, и утечка происходит только из внутреннего объема криогенного шланга.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ДЛЯ РАССТАНОВКИ ЗАГРАЖДЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БУНКЕРОВКИ СПГ МЕТОДОМ «АВТОЦИСТЕРНА — СУДНО»

2.1. Сценарий утечки.

В ходе исследования необходимо определить наихудший сценарий утечки, поэтому рассматривается жидкостная линия передачи СПГ: в ходе бункеровки происходит повреждение прокладки фланцевого соединения 6-дюймового шланга длиной 18 м (рис. 5), работающего под давлением 2 бара, расположенного горизонтально; из образовавшегося отверстия в атмосферу попадает СПГ, равный внутреннему объему шланга.

2.2. Вид утечки.

В соответствии с пунктом В.2.4 (b) стандарта IEC 60079-10-1 [12], «фланцы, соединения и трубопроводная арматура, из которых при нормальной эксплуатации не ожидается выброс горючих веществ», дают вторичную утечку.



б

Composite hose LNG	
Description	: Flexible hose assembly built in compliance to Directive EN ISO 13766
Diameter	: 6"
Length	: 18 meter
End 1	: 6" WN fixed flange ANSI 150# SS316
End 2	: 6" WN fixed flange ANSI 150# SS316

Рис. 5. Внешний вид (а) и параметры (б) шланга СПГ

2.3. Размер отверстия утечки.

В соответствии со сценарием утечки и таблицей В.1 Приложения В [12] определим размер отверстия утечки по следующей логической цепочке: тип оборудования > уплотнительные элементы на неподвижных деталях > фланцы > типичные значения для условий, при которых выпускное отверстие может увеличиваться вплоть до серьезного повреждения > размер отверстия равен произведению сектора между двумя болтами фланца и толщины прокладки.

Таким образом, определим длину сектора между двумя болтами фланцевого соединения:

$$L = \pi D_1 / n = 3,14 \cdot 241,3 / 8 = 94,75 \text{ мм},$$

где D_1 — диаметр центровки отверстий болтов фланца (рис. 6а);
 n — количество болтов.

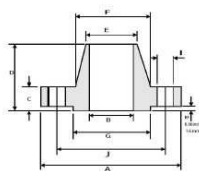
Определим площадь отверстия утечки:

$$S = L \cdot h \approx 284 \text{ мм}^2,$$

где h — толщина прокладки фланца, принятая равной 3 мм (рис. 6б).

а

Weld Neck Flanges - ANSI B16.5

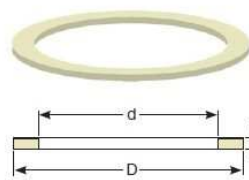


Weld neck flange dimensions class 150 (ASME B16.5)

Pipe	Flange Data				Hub Data		Drilling Data				Weight
Nominal Pipe Size in	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	kg/ piece
	Outside Diameter	Inside Diameter	Flange Thickness	Overall Length	Diameter at Weld Bevel	Hub Diameter	Face Diameter	Number of Holes	Bolt Hole Diameter	Diameter of Circle of Holes	
in	in	in	in	in	in	in	in		in	in	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
6	11.00	6.074	1.000	3.500	6.630	7.560	8.500	8	0.880	6.500	10.6
	279.4	154.2	25.40	88.90	168.4	192.0	215.9		22.40	165.1	

б

Thermopac



Weight ≈ kg	Thread BSP	Materials / Application	Dimensions ≈ mm			Mann Tek Code No.
0,016	BSP 6"		D	d	s	
			164	150	3	1963-25

Рис. 6. а — параметры фланцевого соединения; б — параметры прокладки

2.4. Тип и форма утечки.

В соответствии с методикой определения типа и формы утечки, изложенной в [12], рассматриваемый здесь случай является тяжелой формой утечки, включающей в себя протяженные зоны. Формат подобного рода утечки представлен на рис. 7а и имеет следующее определение: струя жидкости, вытекающая, частично испаряется, попадая на поверхность — кипит. Таким образом, нужно оценивать два источника отпарного газа — струю жидкости и пятно.

2.5. Определение скорости истечения жидкой фазы СПГ.

При повреждении прокладки фланцевого соединения и под действием внутреннего давления $p = 2$ бара (200 000 Па) в трубопроводе СПГ начнет струйно вытекать из образовавшегося отверстия (рис. 7а, б). При помощи методики, предложенной проф. д.ф.-м.н. В.А. Павловским [15 — 17], определим скорость утечки жидкости.

В качестве допущения принято, что процесс изотермический, а давление внутри шланга не меняется в процессе истечения. Скорость истечения w (м/с) и объемный расход Q (м³/с) можно получить из уравнения Бернулли, записанного для 1 и 2 линии тока, приведенного к скорости:

$$w = \sqrt{2g \cdot \left(z + \frac{p - p_a}{\rho_{\text{СПГ}} \cdot g} \right)}, \text{ м/с},$$

где g — ускорение свободного падения;
 p — давление в трубопроводе, Па;
 p_a — атмосферное давление, Па;
 $\rho_{\text{СПГ}}$ — давление в трубопроводе СПГ в момент времени $t = 0$;
 z — уровень жидкости в шланге.

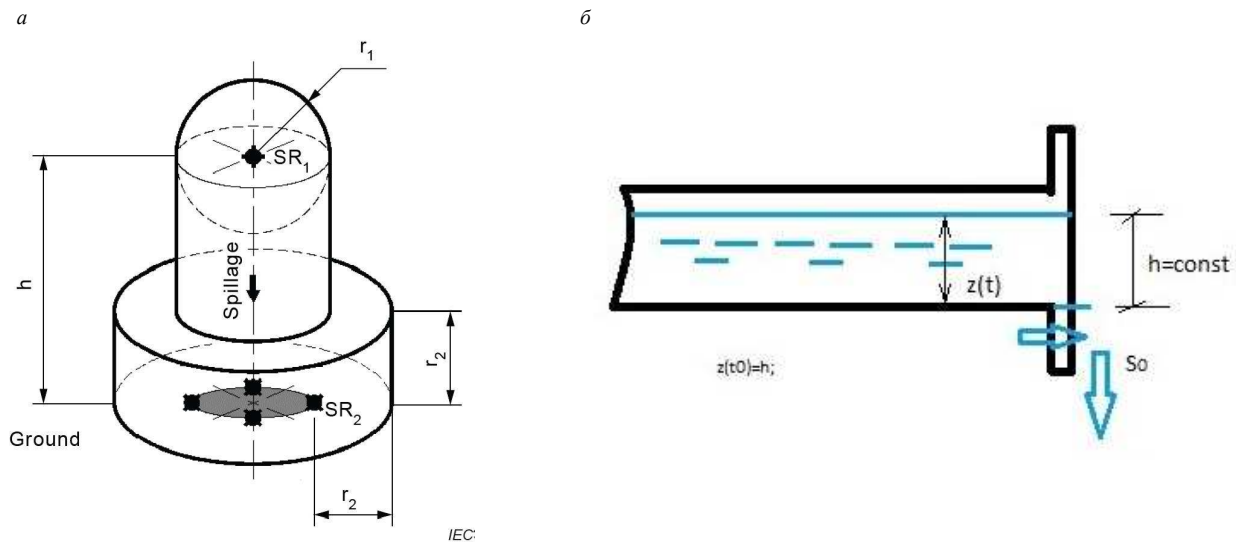


Рис. 7. а — формат криогенной утечки, где S_R — источник утечки, r — основная протяженность опасной зоны, подлежащая определению с учетом расчетного опасного расстояния;
 r' , r'' — вторичные границы опасной зоны, которые должны быть определены с учетом характера выбросов;
 h — расстояние между источником выброса и уровнем земли или поверхностью ниже места выброса;
 б — схема повреждения фланцевого соединения

Расход жидкости через отверстие площадью S , м^2 , с учетом коэффициента расхода, который можно принять равным $\mu_p = 0,64$, выразится формулой:

$$Q = \mu_p \cdot S \cdot w, \text{ м}^3/\text{с},$$

где S — площадь сечения отверстия, м^2 ;
 w — скорость истечения, $\text{м}/\text{с}$.

Для каждого значения z (рис. 5б) своя скорость истечения w и свой расход Q . Уравнение баланса массы заключается в том, что количество жидкости, связанное с понижением уровня, равно количеству жидкости, вышедшему из отверстия:

$$-Fdz = Qdt,$$

где F — площадь раздела фаз в трубе, м^2 .

Истечение заканчивается, когда скорость истечения становится равной нулю: $w = 0$.

Произведем пример расчета 1-й итерации истечения СПГ. В начальный момент времени в шланге с внутренним диаметром $D = 0,1542$ м, длиной $L = 18$ м и внутренним объемом $V = 0,336$ м^3 находится $0,335$ м^3 жидкой фазы СПГ плотностью $\rho_{\text{СПГ}} = 425$ $\text{кг}/\text{м}^3$ и $0,00057$ м^3 его паров плотностью $\rho_{\text{пар}} = 1,7$ $\text{кг}/\text{м}^3$. При прорыве прокладки фланцевого соединения между радиально расположенными относительно оси фланца болтами образуется отверстие площадью $S = 0,0002843$ м^2 . Шаг итерации по времени $\Delta t = 1$ с.

В начальный момент времени $t = 0$ уровень в трубе соответствует $z = 0,1542$ м, найдем площадь раздела фаз F , м^2 :

$$F = c \cdot L, \text{ м}^2,$$

где c — длина боковой проекции раздела фаз в трубе (рис. 8), м.

$$c = 2\sqrt{R^2 - l^2}, \text{ м},$$

где R — радиус трубы, м;

l — расстояние от оси вращения сечения до верхнего уровня СПГ в шланге (рис. 8), м.

$$z > R \rightarrow l = z - R, \text{ м},$$

$$z < R \rightarrow l = R - z, \text{ м}.$$

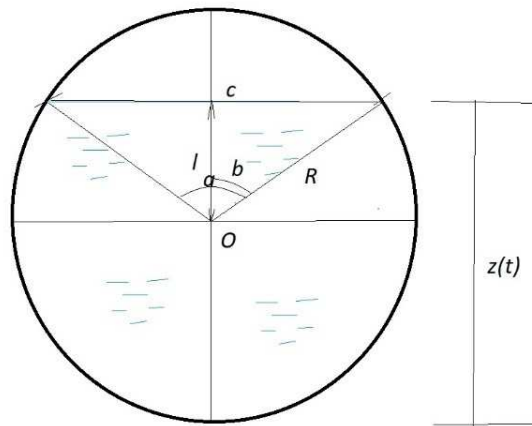


Рис. 8. Сечение трубопровода с СПГ

Определим количество жидкой фазы в шланге:

$$V_{\text{СПГ}} = V - V_{\text{ОГ}}, \text{ м}^3,$$

где $V_{\text{ОГ}}$ — объем паровой фазы, м^3 .

$$V_{\text{ОГ}} = S_{\text{пр}} - S_{\text{ОГ}} \cdot L, \text{ м}^3,$$

где $S_{\text{пр}}$ — площадь сечения шланга, м^2 ;

$S_{\text{ОГ}}$ — площадь сечения паровой фазы, м^2 .

$$z > R \rightarrow S_{\text{ОГ}} = S_{\text{пр}} - \frac{(\alpha - \sin \alpha) \cdot R^2}{2}, \text{ м}^2,$$

$$z < R \rightarrow S_{\text{пр}} = \frac{(\alpha - \sin \alpha) \cdot R^2}{2}, \text{ м}^2,$$

где $\alpha = 2 \cdot \arcsin(\sin b)$, рад.

$$\sin b = 0,5c/R,$$

где c — длина боковой проекции раздела фаз в трубе (рис. 5), м.

Находим понижение уровня Δz за время Δt :

$$\Delta z = \frac{Q}{F} \Delta t, \text{ м.}$$

Уровень СПГ понизится за счет уменьшения величины z , которая станет равной:

$$z_{t+1} = z_t - \Delta z, \text{ м.}$$

Далее вычисляем скорость v уже для этого нового значения z , находим $Q(z)$ и новое Δz и т.д.

Для приведенных входных данных время истечения (количество итераций) составило $85 \text{ с} \approx 1,4 \text{ мин}$, средняя скорость истечения $w = 21,58 \text{ м/с}$, средний объемный расход $Q = 0,0039 \text{ м}^3/\text{с}$, средний массовый расход $W_g = Q \cdot \rho_{\text{СПГ}} = 1,66 \text{ кг/с}$.

Необходимо отметить, что результат среднего массового расхода, являющийся ключевым в данном расчете, полученный с помощью данной методики, полностью коррелируется со значением массового расхода, полученным при помощи формулы В.1 стандарта [12]:

$$W_{g\text{liq}} = C_d S \sqrt{2\rho \Delta p} = 0,64 \cdot 0,0002843 \sqrt{2 \cdot 425 \cdot (200000 - 101325)} = 1,66 \text{ кг/с},$$

где C_d — коэффициент расхода, который можно принять равным 0,64;

S — площадь отверстия утечки, м^2 ;

ρ — плотность СПГ, кг/м^3 ;

Δp — перепад давления, Па.

2.6. Определение скорости истечения паровой фазы СПГ.

Струя жидкого СПГ, попадающая на поверхность (палубу, воду или покрытие причала) образует пятно, с поверхности которого происходит активное испарение СПГ в виде поверхностного или пузырькового кипения. В ходе итерации длительностью $\Delta t = 1$ с вылилось $V = 0,0039$ м³ жидкости, образовав пятно радиусом R :

$$R = (\pi V / \delta)^{0,5} = (\pi \cdot 0,0039 / 0,001)^{0,5} = 3,512 \text{ м},$$

где $\delta = 0,001$ м, толщина пятна.

Тогда площадь пятна составляет:

$$A_p = \pi R^2 = 38,75 \text{ м}^2.$$

Скорость объемного испарения СПГ из этого пятна по ИЕС 60079 [12] составит

$$Q_g = \frac{18,15 \cdot 10^{-8} \cdot u_w^{0,78} \cdot A_p \cdot p_v}{M^{0,333}} \times \frac{T_a}{T} = 0,38 \text{ м}^3/\text{с}.$$

где u_w — скорость ветра, м/с;
 M — молярная масса паров СПГ = 16,04 кг/кмоль;
 T_a — температура окружающей среды = 293 К;
 T — температура СПГ = 110 К;
 p_v — давление насыщенных паров СПГ при $T = 87\,900$ Па.

$$W_{gas} = Q_g \cdot \rho_g = 0,38 \cdot 425 = 205 \text{ кг/с}.$$

Величина u_w в соответствии с [12] определяется по таблице С.1 и для источника утечки, находящегося на высоте до 2 м, составляет 0,5 м/с.

Таким образом, за одну секунду с пятна испарится 0,38 м³ пара, или 205 кг, в то время как нальется $Q = 0,0039$ м³, или 1,66 кг. Значит, пятно или не будет существовать в принципе, или время его существования будет менее шага итерационного процесса. Это является важным этапом расчета и показывает, что СПГ будет испаряться и превращаться в газ до того, как достигнет поверхности (палубы или воды), поэтому примем $Q_g = Q = 0,0039$ м³/с, $W_g = W_{glq}$.

2.7. Определение степени разбавления.

Определим степень разбавления, как показано в п. С.3.5 ИЕС 60079 [12]. Для этого определим плотность паров СПГ:

$$\rho_g = \frac{p_a \cdot M}{T_a \cdot R} = 0,667 \text{ кг/м}^3,$$

где $p_a = 101\,325$ — атмосферное давление, Па;
 M — молярная масса паров СПГ = 16,04 кг/кмоль;
 T_a — температура окружающей среды = 293 К;
 $R = 8314,15$ — газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

Определим объемную характеристику утечки:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot LFL} = \frac{1,67}{0,667 \cdot 0,05} = 50 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $LFL = 0,05$ — нижний предел воспламенения по воздуху.

Таким образом, степень разбавления характеризуется как низкая (рис. 9а).

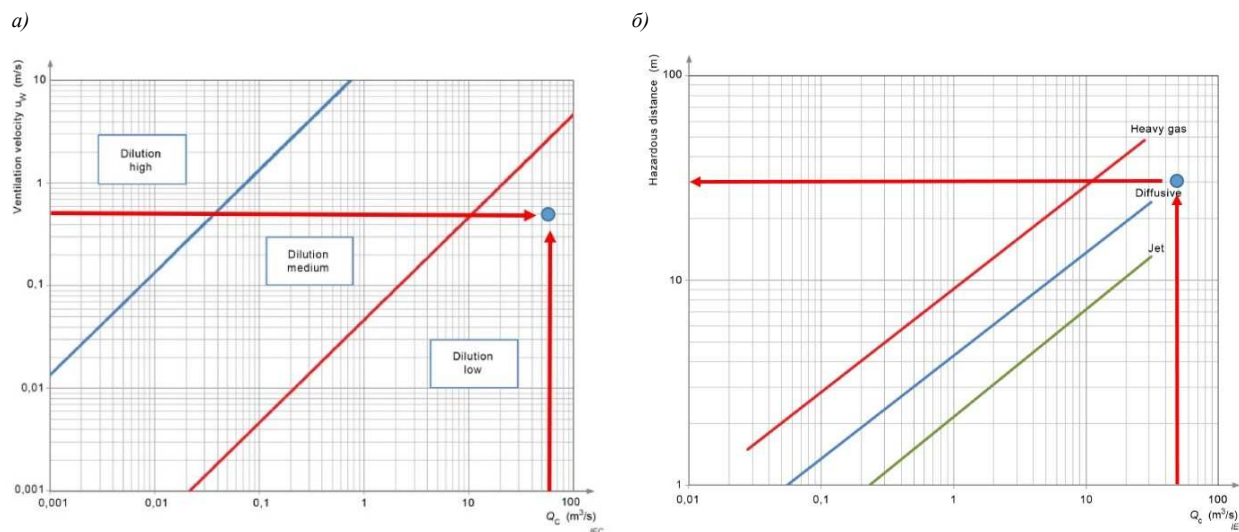


Рис. 9. а — степень разбавления; б — размер опасной зоны

2.8. Определение типа опасной зоны.

Тип опасной зоны определен как Zone 1 в соответствии с таблицей D.1 стандарта IEC 60079 [12] и с учетом вида утечки (вторичная) и степени разбавления (низкая).

2.9. Определение размера опасной зоны.

Таким образом, безопасная дистанция во все стороны для рассматриваемой утечки (Diffusive) (рис. 9б) составит 30 м. Представим результаты исследования в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования

Условия: криогенный шланг диаметром 6', перекачивающий СПГ, установленный выше уровня открытой палубы. В результате повреждения прокладки фланцевого соединения происходит утечка СПГ.		
Характеристика утечки:		
Вещество	Кипящий СПГ, превращающийся в ОГ	
Молярная масса, кг/кмоль	16,04	*в критической точке
Нижний предел воспламенения, LFL, vol/vol	0,05	
Температура самовоспламенения, С	537,8	
Плотность паров СПГ, ρ_g , кг/м ³	0,667	
Источник утечки	Фланцевое соединение	
Вид утечки	Вторичная	
Скорость утечки жидкости, W_{gliq} , кг/с	1,67	определяется с учетом коэффициента расхода $C_d=0,64$, размера отверстия $S=284 \text{ мм}^2$, плотности жидкости $\rho=0,425 \text{ кг/м}^3$ и перепада давления $\Delta p=2 \text{ бара}$
Скорость утечки газа, W_{ggas} , кг/с	205	скорость испарения СПГ из пятна больше скорости утечки СПГ из трубопровода ($205 > 1,67$), принимаем $W_g = W_{gliq}$
Характеристика места утечки:		
Местоположение	Открытая местность	
Атмосферное давление, p_a , Па	101 325	
Температура окружающего воздуха, T , °C (K)	20 °C (293 K)	
Скорость вентилирования, $u_{вв}$, м/с	0,5	
Характеристика вентиляции	Хорошая	
Параметры утечки:		
Степень разбавления	Низкая	
Тип зоны	Zone 1	
Радиус зоны (шар)	30 м	

ВЫВОДЫ

В представленном исследовании предпринята попытка создания расчетного алгоритма назначения размеров охраняемой зоны (security area) в ходе выполнения бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно». Были предложены исходные данные для сценария выполнения расчета (место утечки, оборудование, подверженное повреждениям, давление и параметры СПГ внутри шланга, размеры шланга для передачи бункерного СПГ), полученные в ходе выполнения оценки рисков. В ходе решения данной задачи скорость истечения СПГ определялась двумя способами: по оригинальной методике проф. д.ф.-м.н. В.А. Павловского и по приближенной аппроксимирующей зависимости из стандарта IEC 60079-10-1:2021 [12], показавшим предельно схожие результаты. Результаты исследования могут быть использованы при назначении размеров опасной зоны в ходе планирования бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно» как расчетный алгоритм, а в случае использования аналогичного принятому в данной статье шланговому и другому бункеровочному оборудованию радиус охраняемой зоны может быть принят равным 30 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный Кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ). Резолюция MSC.391(95) (принята 11 июня 2015 года).
2. Шурпак В.К. Использование формализованной оценки безопасности для судовых аммиачных холодильных установок / В.К. Шурпак, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 14 — 23. — EDN EBEQMS.
3. ГОСТ Р 59021-2020. Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2020.
4. ГОСТ Р 70618-2022 (ISO 20519). Суда и морские технологии. Бункеровка судов, работающих на сжиженном природном газе. Требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
5. ISO 20519:2021. Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels. Ed. 2. 2021.
6. Чеснокова И. Г. Мировой флот судов-бункеровщиков СПГ / И.Г. Чеснокова, А.А. Зыкова, А.В. Варламова // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2024. — № 3(11). — С. 84 — 99. — EDN XCCRQA.
7. Common Guidelines for LNG Bunkering Operations at Spanish Ports. Book I: Technical Guide. EU Core LNGas hive Project (ET1) Oct 2021 / Lloyd's Register.
8. Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations. EMSA. 2018.
9. SGMF FP02-01 Recommendations of Controlled Zones during LNG Bunkering. Version 1.0, May 2018.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Электрическое оборудование / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I. Классификация / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.
12. IEC 60079-10-1:2021 Explosive atmospheres. Part 10-1: Classification of areas — Explosive gas atmospheres.
13. Kong X. Quantitative analysis of leakage consequences of LNG ship-to-ship bunkering based on CFD / X. Kong, W. Jiao, W. Xiang, Q. Wang et al. // Energies. — 2023. — Vol. 16, Issue 12. — P. 4631. — DOI 10.3390/en16124631.
14. Inspection of stainless steel flanges of LNG gasification stations // Landee Flange. — March 15, 2023. [Электронный ресурс] URL: <https://www.landeeflange.com/inspection-of-stainless-steel-flanges-of-lng-gasification-stations.html> (дата обращения 24.02.2025).
15. Павловский В.А. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа / В.А. Павловский, А.С. Реуцкий. — СПб.: КГНЦ, 2019. — 88 с. — EDN EZHRNH.
16. Реуцкий А.С. Определение потерь СПГ при выполнении бункеровки и сопутствующих технологических операций / А.С. Реуцкий, О.В. Таровик, В.А. Павловский // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Специальный выпуск 1. — С. 122 — 130. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-122-130. — EDN TFMMJP.
17. Павловский В.А. Обоснование характеристик грузовой системы бункеровщиков сжиженного природного газа / В.А. Павловский, А.С. Реуцкий // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Специальный выпуск 2. — С. 191 — 199. — DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199. — EDN VOWLGK.

REFERENCES

1. International Code of Safety for Ships Using Gases of Other Low — Flashpoint Fuels (IGF Code). Resolution MSC. 391(95) (adopted on 11 June 2015).
2. Shurpyak V.K., Semionichev D.S., Reutskii A.S., Mikheeva A.A. The use of a formalized safety assessment for marine ammonia refrigeration units. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 14 — 23. EDN EBEQMS. (In Russ.)
3. GOST P 59021-2020. Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Gruzovye operatsii i bunkerovka szhizhennym prirodnyim gazom. Obshchie trebovaniya [State Standard P 59021-2020. Petroleum and natural gas industries. Cargo operations and LNG bunkering. General requirements]. Moscow: Standartinform, 2020.
4. GOST P 70618-2022. (ISO 20519). Suda i morskoe tekhnologii. Bunkerovka sudov, rabotayushchikh na szhizhennom prirodnom gaze. Trebovaniya. [State Standard P 70618-2022 (ISO 20519). Ships and marine technology. Bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels. Requirements]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2023.
5. ISO 20519:2021. Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels. Ed. 2. 2021.
6. Chesnokova I.G., Zykova A.A., Varlamova A.V. The global fleet of LNG bunkering vessels. *Transactions of State Marine Technical University*. 2024. No. 3(11). P. 84 — 99. EDN XCCRQA. (In Russ.)
7. Common Guidelines for LNG Bunkering Operations at Spanish Ports. Book I: Technical Guide. EU Core LNGas hive Project (ET1) Oct 2021 / Lloyd's Register.
8. Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations. EMSA. 2018.
9. SGMF FP02-01 Recommendations of Controlled Zones during LNG Bunkering. Version 1.0, May 2018.
10. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XI. Electrical equipment / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.
11. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.
12. IEC 60079-10-1:2021 Explosive atmospheres. Part 10-1: Classification of areas — Explosive gas atmospheres.
13. Kong X., Jiao W., Xiang W., Wang Q. et al. Quantitative analysis of leakage consequences of LNG ship-to-ship bunkering based on CFD. *Energies*. 2023. Vol. 16, Issue 12. P. 4631. DOI 10.3390/en16124631.
14. Inspection of stainless steel flanges of LNG gasification stations. *Landee Flange*. March 15, 2023. URL: <https://www.landee-flange.com/inspection-of-stainless-steel-flanges-of-lng-gasification-stations.html> (accessed 24.02.2025).
15. Pavlovskii V.A., Reutskii A.S. Teplofizicheskie osnovy morskoi transportirovki i bunkerovki szhizhennogo prirodnogo gaza [Thermophysical basis of marine transportation and bunkering of liquefied natural gas]. St. Petersburg: KGNTs, 2019. 88 p. EDN EZHRNH.
16. Reutsky A., Tarovik O., Pavlovsky V. Evaluation of liquefied natural gas losses during bunkering and accompanying working operations. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Edition No. 1. P. 122 — 130. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-122-130. EDN TFMMJP. (In Russ.)
17. Pavlovsky V., Reutsky A. LNG bunker handling system verification. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018. Special Edition No. 2. P. 191 — 199. DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199. EDN VOWLGK. (In Russ.)