

Научная статья

УДК 622.276; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-63-76

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ЗОН ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА ПРИ РАЗЛИВЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Романов Николай Николаевич.

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

Шарапов Сергей Владимирович.

Санкт-Петербургский пожарно-спасательный колледж, Санкт-Петербург, Россия

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Представлены основные этапы развития аварийной ситуации при разливе сжиженного природного газа. Сформирована последовательность событий, описывающая последовательность развития пожароопасных ситуаций, инициированных разрушением резервуара или технологического трубопровода со сжиженным природным газом. Выявлены возможные режимы процесса растекания сжиженного природного газа на гладкую подстилающую поверхность с формированием источника паров переменной мощности. Исследованы модели испарения сжиженного природного газа применительно к составу и возможной толщине слоя разлива. Показано, что в предположении, что две фазы находятся в термодинамическом равновесии, плотность паровой фазы сжиженного природного газа можно получить путем решения уравнения Пенга-Робинсона с использованием метода Клозека-Маккинли для заданного давления и температуры, который основан на эмпирической корреляции для молярного объема смеси сжиженного природного газа. Сформированы модель быстрого фазового перехода на основе решения уравнения Ван-ден-Берга и алгоритм, позволяющий автоматизировать процедуру оценки зон воздействия опасных факторов пожара при проливе сжиженного природного газа.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, опасные факторы пожара, газовоздушная смесь, пролив сжиженного природного газа, разрушение резервуара сжиженного природного газа

Для цитирования: Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Шарапов С.В. Автоматизированная оценка зон воздействия опасных факторов пожара при разливе сжиженного природного газа в условиях чрезвычайной ситуации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 63–76. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-63-76.

Scientific article

AUTOMATED ASSESSMENT OF ZONES OF EXPOSURE TO FIRE HAZARDS DURING THE BOTTLING OF LIQUEFIED NATURAL GAS IN AN EMERGENCY SITUATION

✉ Kuzmin Anatoly A.;

Romanov Nikolay N.

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

Sharapov Sergey V.

Saint-Petersburg fire and rescue college, Saint-Petersburg, Russia

✉ kaa47@mail.ru

Abstract. The main stages of the development of an emergency situation during the bottling of liquefied natural gas are presented. A tree of events has been formed in the event of the occurrence and development of a fire hazardous situation associated with the destruction

of a tank or process pipeline with liquefied natural gas. Possible regimes of liquefied natural gas spreading on a smooth underlying surface and the formation of a variable power vapor source are identified. Models of liquefied natural gas evaporation are studied in relation to the composition and possible thickness of the filling layer. It is shown that under the assumption that the two phases are in thermodynamic equilibrium. The vapor phase density of liquefied natural gas can be obtained by solving the Peng-Robinson equation using the Klosek-McKinley method for a given pressure and temperature, which is based on an empirical correlation for the molar volume of the liquefied natural gas mixture. A model of a fast phase transition is formed based on the solution of the Van den Berg equation and an algorithm that automates the procedure for assessing the zones of influence of dangerous fire factors during an liquefied natural gas spill.

Keywords: liquefied natural gas, fire hazards, gas-air mixture, liquefied natural gas strait, destruction of the liquefied natural gas tank

For citation: Kuzmin A.A., Romanov N.N., Sharapov S.V. Automated assessment of zones of exposure to fire hazards during the bottling of liquefied natural gas in an emergency situation // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 4 (68). P. 63–76. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-63-76.

Введение

В настоящее время в нашей стране происходит широкое освоение и крупнотоннажное применение криогенных технологий в получении, транспортировке и промышленно-энергетическом применении сжиженного природного газа (СПГ). Обеспечение пожарной безопасности предполагает учет специфической особенности этой субстанции, поскольку хранение СПГ в жидком состоянии происходит при относительно небольшом избыточном давлении (порядка 20 кПа), но при достаточно низкой температуре (111 К), что создает множество технологических, прочностных, теплофизических, других инженерных и организационных проблем в обеспечении его безопасной транспортировки и хранения.

Нормативные документы, например, СП 240.1311500.2015 «Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности» предполагают для хранения СПГ использовать изотермические резервуары закрытого типа с двумя оболочками и полной герметизацией. Резервуары с СПГ можно не оборудовать специальными устройствами обвалования, а периметры площадок, на которых располагаются резервуары, можно не ограждать специальными стенками.

Изотермические резервуары для хранения СПГ в совокупности с трубопроводными коммуникациями должны выполнять следующие коммуникационные функции: направление СПГ из внешних трубопроводов на изотермическое хранение или его дальнейшую перегрузку в другой резервуар или внешнюю трубопроводную систему; отбор вытесняемых паров СПГ в процессе заполнения резервуара; компенсацию возникающего разряжения в резервуаре за счет подвода топливного газа или паров СПГ из внешних источников; сброс избыточного давления паров СПГ через систему предохранительных клапанов в атмосферу с их последующим рассеиванием; продувку рабочего и межстенного пространства резервуара азотом; работу воздушных магистралей, обеспечивающих функционирование управляющей арматуры и контрольно-измерительных приборов, измеряющих основные параметры хранимого СПГ. При разгерметизации изотермических резервуаров или/и их трубопроводной обвязки и последующем проливом СПГ эти функции не реализуются.

Простейшие расчеты, приведенные в работе [1], показывают, что при испарении пролива СПГ с 1 м^2 образуется более 600 м^3 газообразного метана плотностью $1,86 \text{ кг/м}^3$, то есть более $6\,000 \text{ м}^3$ газозвушной смеси (ГВС) стехиометрической концентрации, то есть около $12\,000 \text{ м}^3$ пожаровзрывоопасной газовой смеси, что, безусловно, создает аварийную ситуацию. Предварительный анализ ее развития позволил выделить несколько стадий (рис. 1).

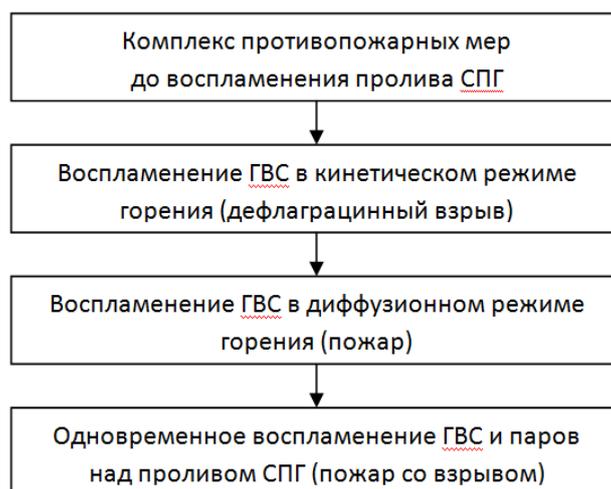


Рис. 1. Основные этапы развития аварийной ситуации при разливе СПГ

Сформированные последовательности в развитии аварийной ситуации (рис. 2) дают возможность оценить размер зон воздействия опасных факторов пожара (ОФП) и справедливы при определенных допущениях: если разгерметизация резервуара не сопровождается мгновенной вспышкой паров, наступает процесс испарения СПГ со свободной поверхности пролива; если процесс истечения СПГ ограничен отверстием эквивалентным диаметром 100 мм и менее, при наличии источника зажигания пожар на поверхности пролива отсутствует, а развивается факельное горение истекающего СПГ, что соответствует Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [2].

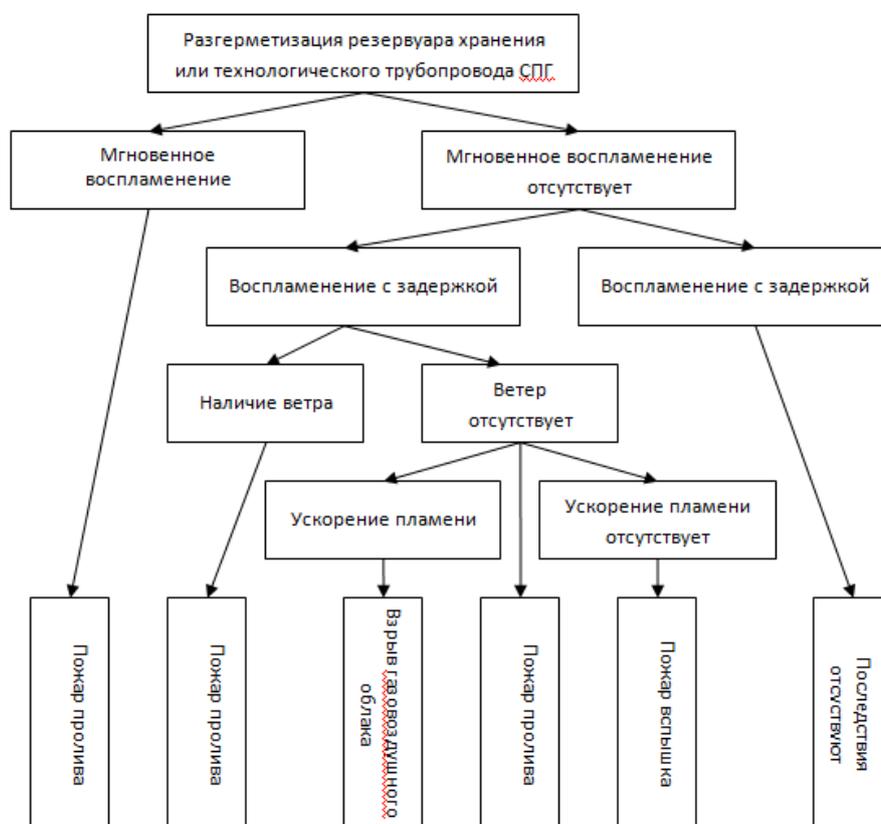


Рис. 2. Последовательность событий при возникновении и развитии пожароопасной ситуации, обусловленной разрушением резервуара или технологического трубопровода с СПГ

Содержание основных этапов развития аварийной ситуации делает востребованным создание специализированного инструментария, позволяющего оценить величину зон воздействия ОФП, возникающего при разливе СПГ.

Методы исследования

В ходе изучения процессов, сопровождающих аварийное разрушение резервуаров с СПГ и последующим его проливом, целесообразно базироваться на термодинамических параметрах состояния веществ, составляющих СПГ как механическую смесь предельных и непредельных углеводородов и химически не взаимодействующих между собой. Для этого удобно использовать диаграмму состояния, отображающую связи основных термодинамических параметров.

На рис. 3 представлена диаграмма состояния метана, который является доминирующим компонентом СПГ, в координатах T-S.

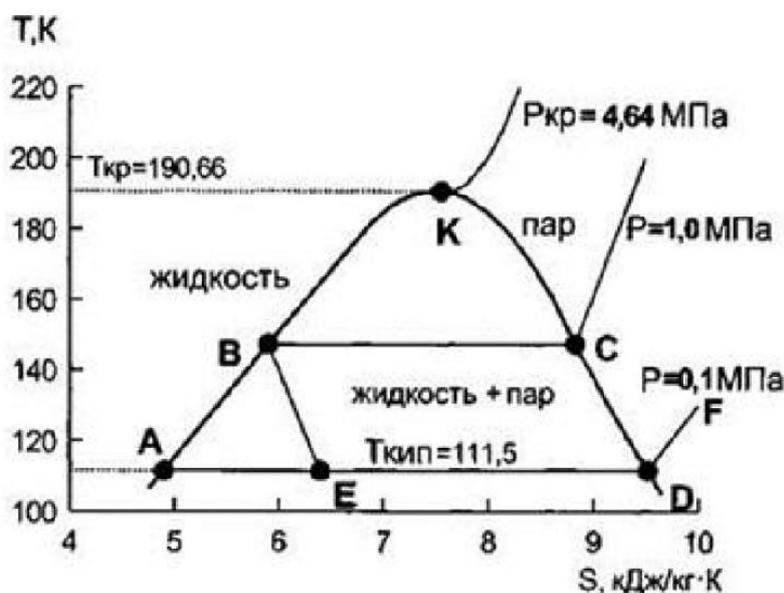


Рис. 3. Диаграмма состояния метана в координатах T-S

В ходе разрушения резервуара жидкая фракция СПГ образует пятно пролива, на внешней поверхности которого будет происходить процесс испарения, обусловленный тепловым воздействием подстилающей поверхности и окружающего воздуха. В реальных условиях поток испарения имеет сложную структуру и состоит как из парового облака, так и захваченного потока жидкой фракции СПГ, находящейся в аэрозольном состоянии, причем по величине эти потоки соизмеримы. Таким образом, для степени сухости потока испаряющегося СПГ $X > 0,5$ можно предположить, что вся жидкая фракция СПГ после ее пролива трансформируется в облако пароаэрозолей. В работе [3] утверждается, что полное превращение жидкой фракции СПГ в пароаэрозольное облако возможно так же и при степени сухости испаряющегося потока СПГ $X > 0,35$.

Процесс пролива СПГ на гладкую подстилающую поверхность сопровождается формированием источника паров переменной мощности, а сам процесс может развиваться по трем возможным режимам растекания:

1. Гравитационно-инерционный режим растекания СПГ, при котором соблюдается относительное равенство гравитационных и инерционных сил.

2. Чисто гравитационный режим растекания СПГ, обусловленный примерным равенством сил гравитационных сил и сил вязкостного сопротивления жидкой фракции пролива СПГ.

3. Тонкопленочный режим растекания СПГ, когда силы вязкостного сопротивления и силы поверхностного натяжения преобладают над гравитационными и инерционными силами [4].

Наиболее употребительные модели растекания СПГ на горизонтальной поверхности, описанные в отечественных и зарубежных источниках [4–6], предполагают, что режим растекания носит гравитационно-инерционный характер. Соображения общего характера позволяют сформировать уравнение, связывающее скорость растекания и физические свойства СПГ:

$$\frac{dR}{d\tau} = k_s \cdot \sqrt{\frac{g \cdot V_R}{\pi \cdot R^2}} = \frac{k_s}{R} \cdot \sqrt{\frac{M_R \cdot g}{\pi \cdot \rho}},$$

где R – текущий радиус пятна пролива СПГ; M_R , V_R , ρ – масса, объем и плотность СПГ в пятне пролива; g – ускорение свободного падения; τ – продолжительность процесса растекания; k_s – коэффициент сопротивления (в работе [7] приведено экспериментально обоснованное значение $k_s=1,41$).

При наличии препятствий, ограничивающих пятно разлива, толщина слоя СПГ определяется их расположением, а при растекании на неограниченной поверхности специалисты Gaz de France по результатам натуральных экспериментов предлагают принимать среднюю толщину слоя пятна пролива СПГ: по поверхности воды – 3 мм; по бетонной поверхности – 10 мм; по «среднему грунту» – 30 мм; по гравию – 50 мм [5].

В работе [4] представлена эмпирическая модель гравитационно-инерционного режима растекания жидкой фракции СПГ в условиях стационарного режима его истечения:

$$R(\tau) = 1,24 \cdot \sqrt[4]{g \cdot G(\tau) \cdot \tau^3},$$

где $G(\tau)$ – временная зависимость интенсивности (массового расхода) истечения СПГ из хранилища или технологического трубопровода.

Модели испарения сжиженных углеводородных газов (СУГ) исследованы в работе [8] и применительно к составу СПГ, и возможной толщине слоя разлива наиболее подходящей представляется модель, основанная на следующих допущениях: процесс испарения ограничен диффузионным отводом паров СПГ; испаряющиеся газообразные фракции СПГ и жидкие фракции СПГ по своим физическим свойствам однородны и изотропны; испаряющиеся газообразные фракции СПГ описываются законами идеальных газов; толщина слоя разлива жидкой фракции СПГ меньше высоты местных предметов (например, обвалования).

Более реалистичную модель испарения пролива СПГ можно получить, если предположить, что две фазы находятся в термодинамическом равновесии. Плотность паровой фазы СПГ получается путем решения уравнения Пенга-Робинсона с использованием метода Клозека-Маккинли для заданного давления и температуры, который основан на эмпирической корреляции для молярного объема смеси СПГ:

$$\left[P + \frac{a}{v \cdot (v+b) + b(v-b)} \right] \cdot (v-b) = R^* \cdot T,$$

где a , b – эффективные параметры; v – молярный объем паровой фазы СПГ; R^* – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура паров СПГ.

При условии, что содержание азота или бугана в СПГ не превышает 4 %, величина молярного объема в уравнении Пенга-Робинсона определяется эмпирической корреляцией [9]:

$$v = \sum_{i=1}^n v_i \cdot x_i - \left[k_1 - (k_2 - k_1) \cdot \left(\frac{x_{N_2}}{0,0425} \right) \right] \cdot x_c,$$

где k_1 и k_2 – поправочные коэффициенты, зависящие от температуры; v_i – молярный объем i -го компонента; x_{N_2} и x_c – молярная доля азота и тяжелых углеродных составляющих в СПГ соответственно.

Кроме того, проведенный в работе [9] анализ влияния азота на величину скрытой теплоты парообразования и температуру кипения СПГ позволил сделать вывод, что наблюдаемый минимум является следствием увеличения молярной массы образующегося пара. По мере увеличения доли азота в исходном проливе СПГ температура кипения будет снижаться, а молярная скрытая теплота парообразования будет увеличиваться.

Рассмотрим процессы в жидкой фракции пролива СПГ с учетом доминирования теплового потока от поверхности на начальной стадии аварии. Уравнение теплового баланса при этом принимает вид:

$$r_{cnz} \cdot \Delta M(\tau) = c_{cnz} \cdot \left[\frac{M_R}{S} - \Delta M(\tau) \cdot (T_K - T_{жс}(\tau)) \right] + q_w(\tau),$$

где r_{cnz} – удельная теплота парообразования СПГ; $\Delta M(\tau)$ – масса испарившегося СПГ на момент времени τ ; c_{cnz} – удельная теплоемкость жидкой фракции СПГ; S – площадь пятна пролива; T_K – температура кипения СПГ; $T_{жс}(\tau)$ – температура жидкой фракции СПГ на момент времени τ ; $q_w(\tau)$ – плотность теплового потока от подстилающей поверхности на момент времени τ .

Отсюда получена интегро-дифференциальная временная зависимость температуры на внешней поверхности испаряющейся жидкой фракции СПГ:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{r_{cnz} \cdot \Delta M(\tau) - q_w(\tau)}{c_{cnz} \cdot \left[\frac{M_R}{S} - \int_0^{\tau} \Delta M(\tau) \cdot d\tau \right]}.$$

В работе [10] предложена эмпирическая зависимость, позволяющая оценить интенсивность испарения:

$$\Delta M(\tau) = 10^{-6} \cdot \eta \cdot P_n(\tau) \cdot \sqrt{\mu},$$

где η – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние скорости воздушного потока; μ – молярная масса; $P_n(\tau)$ – временная зависимость давления насыщенных паров получена из уравнения Клапейрона-Клаузиуса:

$$P_n(\tau) = P_n \cdot \exp \left[\frac{r_{cnz} \cdot \mu}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_K} - \frac{1}{T(\tau)} \right) \right].$$

Значение η для случая разлива СПГ в условиях, характерных для пространства производственного помещения, представлены в табл. 1.

Значения коэффициента η , учитывающего влияние скорости воздушного потока на интенсивность испарения СПГ

Скорость воздушного потока в помещении W, м/с	Значение коэффициента η при температуре t, °C, воздуха в помещении				
	10	15	20	30	35
0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

На интенсивность испарения СПГ с пятна его пролива оказывает так же влияние состав СПГ. Так, в работе [9] представлена временная зависимость скорости испарения для различных составов СПГ:

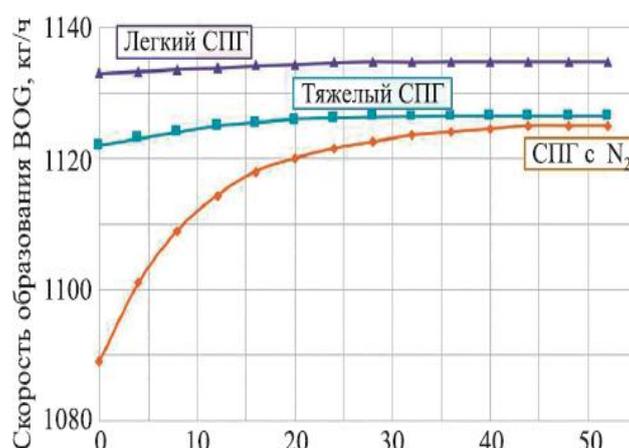


Рис. 4. Зависимость скорости испарения СПГ от его состава

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости скорости испарения жидкого метана как доминирующего компонента СПГ от влажности подстилающей поверхности в виде песчаного грунта:

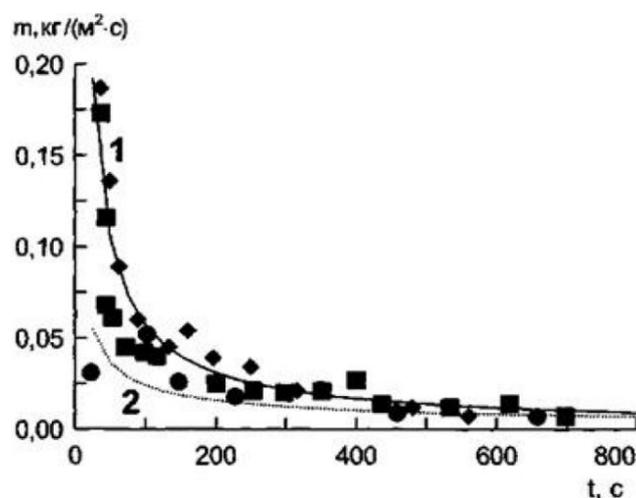


Рис. 5. Зависимость скорости испарения жидкого метана от влажности песчаного грунта:
 1 – проницаемый (рыхлый грунт); 2 – непроницаемый (плотный грунт);
 ■ – сухой грунт; ● – влажный (3,4 %) грунт

Опытные данные, представленные в работах [11], дают основание полагать, что процесс диффузии СПГ вглубь песчаного грунта интенсивно развивается при его недостаточной уплотненности. Влияние проницаемости грунта на скорость испарения СПГ наблюдается только на начальной стадии процесса, продолжительность которого оценивается в 500 с. В качестве интегрального компонента влияния проницаемости грунта на скорость испарения ее величину для случая песчаного грунта увеличивают в два раза. Влияние влажности грунта на значение скорости испарения СПГ учитывается ее увеличением на 20÷30 %.

Влияние теплового воздействия воздушного потока на процессы испарения СПГ с поверхности пятна пролива становится существенным при достижении разницы температур на внешней поверхности пролива и температуры слоев, примыкающих к подстилающей поверхности менее 4÷5 °С. При этом основным компонентом в притоке тепла становится тепловой поток от омывающего воздуха, который можно численно оценить, используя критериальную зависимость при обтекании горизонтальной плиты жидкостным потоком.

$$Nu_f = 0,035 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr_f^{0,35},$$

где $Nu_f = \alpha_k \cdot l_o / \lambda_f$ – число Нуссельта; α_k – коэффициент теплообмена между поверхностью пролива СПГ и омывающим воздухом; $l_o = R$ – характерный линейный размер пятна пролива; λ_f – коэффициент теплопроводности воздуха; $Re_f = w \cdot l_o / \nu_f$ – число Рейнольдса; ν_f – коэффициент кинематической вязкости воздуха; $Pr_f = \nu_f / a_f$ – число Прандтля; a_f – коэффициент температуропроводности воздуха.

Упомянутые соображения позволяют произвести оценку влияния омывающего пятно пролива потока воздуха на интенсивность испарения в процессе решения системы дифференциальных уравнений в частных производных. Величину плотности теплового потока от грунта в работе [12] предложено оценивать согласно эмпирической зависимости:

$$q_w(\tau) = \sqrt{\frac{\rho_w \cdot c_w \cdot \lambda_w}{\pi} \cdot \frac{T_w - T_k}{\sqrt{\tau}}},$$

где ρ_w , c_w , λ_w – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности материала грунта соответственно; T_w – температура на поверхности грунта.

Плотность паров, испаряющихся с поверхности пролива, превышает плотность окружающего воздуха, хотя молярная масса основного компонента СПГ метана (16 кг/кмоль) почти в два раза меньше молярной массы воздуха (29 кг/кмоль). Это может быть объяснено достаточно низкой температурой паровой фазы СПГ по сравнению с температурой воздуха, по крайней мере, на начальной фазе процесса. В дальнейшем, в процессе нагревания жидкой фазы, образующей зеркало пролива, плотность паровой фазы испаряющегося СПГ будет уменьшаться и по мере прогрева приближаться по своему значению к плотности окружающего воздуха, что обуславливает образование полусферической области воздушно-метановой смеси, располагающейся над зеркалом пролива. Решение системы уравнений Навье-Стокса позволяет определить размеры этой области. Однако в работе [13] предлагается более простая зависимость, позволяющая вычислить размеры зоны распространения метана:

$$L = 7,8 \cdot M_R^{0,4}.$$

В работе [14] показана адекватность результатов использования этого уравнения в сравнении с данными натурального и численного экспериментов.

Избыточное давление ΔP , развиваемое при сгорании газозвоздушной смеси в открытом пространстве, рассчитывается с использованием методики, приведенной в работе [15]:

$$\Delta P = P_o \cdot \left(\frac{0,8}{L} \cdot \Delta M^{0,33} + \frac{3}{L^2} \cdot \Delta M^{0,66} + \frac{5}{L^3} \cdot \Delta M \right),$$

где P_o – атмосферное давление; L – расстояние от центра облака ГВС.

Однако если подложкой пятна пролива СПГ является водная поверхность, процесс испарения СПГ может носить достаточно быстрый, почти взрывной характер, сопровождающийся так называемым «быстрым фазовым переходом» (БФЛ) и протекающий без наружного горения и других химических реакций. Такое явление наблюдалось в процессе экспериментов, связанных с образованием пятна разлива СПГ на воде, условия которых описаны в работе [15].

Процесс развития БФП был исследован в работах [16, 17], однако условия, обуславливающие возникновение БФП как явления, определены недостаточно, а параметры ударной волны и прогнозировать достаточно сложно. Это обусловлено значительным числом факторов, определяющих процесс утечки СПГ, прежде всего его расхода, характера подложки пятна разлива и его температуры, термодинамических параметров окружающей среды и др.

В работе [16] показано, что колебания поля сферической волны может быть представлено как скачок давления газовой среды. Это позволило сформировать модель БПФ на основе решения уравнения Ван-ден-Берга, характеризующего избыточное давление ΔP при взрыве быстро расширяющихся паров вскипающего сжиженного пропана:

$$\Delta P = \frac{P_o \cdot g \cdot V \cdot F \cdot \sigma}{\pi \cdot L \cdot C_o^2 \cdot \Delta \tau^2},$$

где V – объемный расход СПГ при проливе; F – коэффициент участия жидкости; $\sigma=600$ – степень расширения паров; C_o – скорость звука в данной среде; $\Delta \tau$ – продолжительность взрыва.

Сложность использования представленной модели БПФ заключается в определении $\Delta \tau$. При этом данный параметр зависит от температуры на поверхности воды, степень смешения СПГ и воды, коэффициент теплопередачи от водной поверхности к СПГ и т.д. Поэтому для разработанной модели в работе [17] значение $\Delta \tau$ предлагается принимать произвольно в пределах $0,1 \div 0,7$ мс для более качественной корреляции расчетных и экспериментальных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Изложенные выше основные теоретические положения, а так же данные натурных экспериментов дали возможность сформировать алгоритм, позволяющий автоматизировать процедуру оценки зон воздействия ОФП при проливе СПГ.

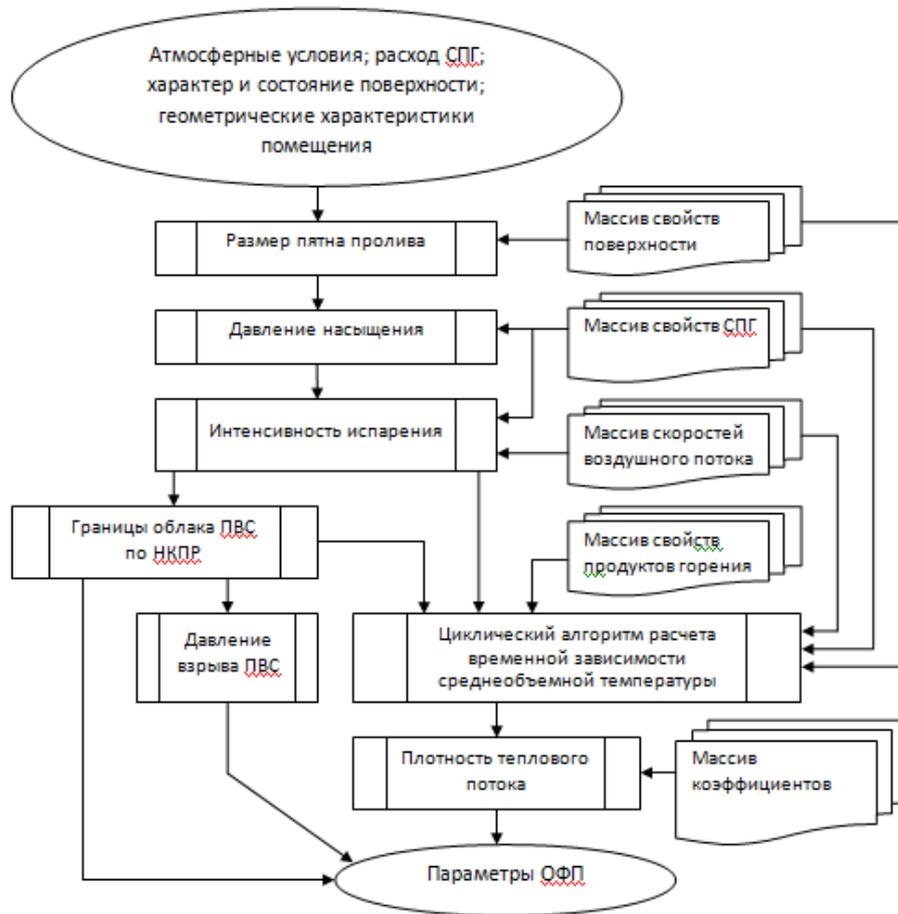


Рис. 6. Алгоритм оценки зон воздействия ОФП при проливе СПГ: НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени

Алгоритм, представленный на рис. 6, был реализован в форме ансамбля макросов, выполненных с использованием Visual Basic и дополняющих вычислительные возможности табличного процессора MS Excel.

На рис. 7 представлен интерфейс ввода начальных условий задачи по расчету параметров зон воздействия ОФП при проливе СПГ в помещении.

Параметры ограждающей конструкции		Объемно-планировочные параметры помещения			
Тип конструкции	Пол	Геометрические параметры помещения			
Строительный материал	Бетон на гранитном заполнителе	Длина	20 м	Ширина	10 м
Свойства материала		Высота	5 м		
Кoeffициент теплопроводности, Вт/(м·К) $\lambda = \lambda_0 + \beta \cdot t$		Геометрические параметры проемов			
λ_0 1,20	β -0,00035	Вид	Ширина, м	Высота, м	Кол-во
Толщина, мм		Оконные	2	1	1
200		Дверные	2	2	1
Теплоемкость, кДж/(кг·К) $c = c_0 + \beta_c \cdot t$		Параметры пожарной нагрузки			
c_0 0,71	β_c 0,00083	Горючая жидкость		СПГ	
Плотность, кг/м³		Масса, кг	Q _ж , МДж/кг	M _ж , кг/(м³·с)	V _ж , м³/кг
2350		1000	41,87	0,050	11,6
Температура окружающей среды		Конечно-разностная схема решения задачи			
25,0 °C		Расчетный шаг по времени Δt		Расчетный шаг по координате Δx	
		30,0 сек.		20,0 мм	
Вывод результатов расчета через 30 мин. в 6 интервалах времени для 20 точек по координате					
Расчет					

Рис. 7. Интерфейс ввода начальных условий задачи

Для верификации программного продукта были использованы результаты натуральных экспериментов, проведенных «Lawrence Livermore National Laboratory» [18], в которых были зафиксированы эффект БФП. Отклонения расчетных показателей от результатов эксперимента в контрольных точках не превысили 20 %.

Таблица 2

Максимальные расстояния достижения НКПР и избыточные давления в ударной волне

№ опыта	Объем пролива СПГ, м ³	Скорость ветра, м/с	Макс. расстояние до НКПР, м	Избыточное давление, кПа		
				11,4 м	24,3 м	35,5 м
Э-1	28,4	1,8	420	6	5	2
Расчет 1	28,4	1,8	390	7	6,1	1,5
Э-2	24,2	5,7	325	17	8,5	3,4
Расчет 2	24,2	5,7	290	19	8,1	2,8

В качестве модельной была выбрана задача расчета величин зон воздействия пожара, возникающего при проливе СПГ с массовым расходом 2 кг/с на грунт средней проницаемости при нормальных технических условиях и скорости внешнего воздушного потока в 0,1 м/с.

Безопасные расстояния определялись применительно к работе ствольщика в боевой одежде и теплоотражательном костюме. Избыточное давление, развиваемое при сгорании газозвушной смеси, рассчитывалось для безопасных расстояний на текущий момент времени. Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета зон ОФП при проливе СПГ

Текущее время	с	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
Текущий радиус пролива	м	1,68	2,38	2,91	3,37	3,76	4,12	4,45	4,76	5,05	5,32
Расстояние до НКПР	м	53	70	82	92	101	108	115	122	127	1,33
Температура пролива СПГ	°С	-142	-134	-128	-124	-119	-116	-112	-109	-106	-103
Интенсивность испарения	кг/с	0,032	0,064	0,095	0,127	0,159	0,191	0,222	0,254	0,286	0,318
Высота факела	м	5,31	10,3	15,2	20	24,8	29,5	34,2	38,9	43,5	48
Безопасное расстояние	м	12	20	26	32	37	43	48	53	57	62
Избыточное давление	кПа	2,26	1,74	1,51	1,34	1,25	1,13	1,06	1,005	0,97	0,92

Заключение

Опыт освоения β-версии программного комплекса «Зоны ОФП при разливе СПГ» преподавателями профильных кафедр, а так же слушателями института развития Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы (ГПС) МЧС России дает основание полагать, что специалисты, хорошо владеющие предметной областью, начинают эффективно использовать операционные возможности комплекса даже на начальной стадии знакомства с ней.

Опрос действующих специалистов ГПС показал, что их основные ожидания от широкого использования предлагаемого программного продукта в основном связаны с уменьшением трудоемкости проведения вычислительных операций и сокращением временных затрат на поиск необходимой информации в процессе анализа последствий пожара при проливе СПГ.

Список источников

1. Абдурагимов И.М., Куприн Г.Н. Нерешенные проблемы пожаровзрывобезопасности энергоресурсов (СУГ и СПГ) как оборотная сторона успехов энергетической стратегии Российской Федерации // *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 4. С. 42–50.
2. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 (зарег. в Минюсте России 17 авг. 2009 г. № 14541 (в ред. приказа МЧС России от 14 дек. 2010 г. № 649). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 671 с.
4. Revision and experimental verification of the hazard assessment computer system models for spreading, movement, dissolution and dissipation of soluble chemicals spilled onto water: report / K.T. Dodge [et al.]. Springfield, VA: U.S. Coast Guard, 1983. CG–D-35-83.
5. Сафонов В.С. Обоснование возможных сценариев и оценка последствий утечки СПГ при аварийных нарушениях герметичности грузовых емкостей танкеров // *Вести газовой науки: Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности*. 2018. № 2 (34). С. 166–176.
6. May M.G., McQueen W., Whipp R.H. Dispersion of LNG spills // *Hydrocarbon Processing*. 1973. № 52 (5). С. 105–109.
7. Conrado C., Vesovic V. The influence of chemical composition on vaporization of LNG and LPG on unconfined water surfaces // *Chem. Eng. Sci.* 2000. № 55. С. 4549–4562.
8. Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А. Модели испарения сжиженных углеводородных газов в расчете избыточного давления взрыва // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. уни-та ГПС МЧС России»*. 2019. № 3. С. 42–48.
9. Сердеенко Е.С., Пахомов О.В., Баранов А.Ю. Математическая модель испарения сжиженного природного газа и анализ влияния исходного состава на скорость испарения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 4. С. 603–610.
10. Danesh A. PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids. The Netherlands: Elsevier Science, 1998. 388 p. DOI: 10.1016/s0376-7361(98)x8021-0.
11. *Пожаровзрывоопасность сжиженных и газообразных горючих: сб. науч. трудов* М.: ВНИИПО МЧС России, 1990. 82 с.
12. Кочетов Н.М., Кочетов А.Н. Математическая модель процесса парообразования сжиженного газа из пролива // *Моделирование риска. Проблемы анализа риска*. 2018. Т. 15. № 1. С. 74–81.
13. *Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Процессы испарения и формирования пожаровзрывоопасных облаков при проливе жидкого метана. Методики оценки параметров / И.А. Болодьян [и др.] // *Пожарная безопасность*. 2000. № 4. С. 108–121.*
14. Шебеко А.Ю. Численное моделирование распространения паров сжиженного природного газа при проливе на твердую поверхность // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2019. № 1. С. 36–41.
15. Ermak D.L. Results of 40m³LNG spills onto water // *Heavy Gas and Risk Assessment*. II. Battelle-Institute; Frankfurt am Main, Germany, 1983. P. 163–179.
16. Atallah S. Rapid phase transition // *Topical report of gas research institute, GRI-92/0533* 1997.
17. Havens J.A., Hazard J. Assessment of predictability of LNG vapor dispersion from catastrophic spills onto water // *Mater.* 1980. Vol. 3. P. 267–278.
18. Koopman R.P. Analysis of Burro series 40 m³ LNG spill experiments // *Journal of Hazardous Materials*. 1981. A52. P. 119–140.

References

1. Abduragimov I.M., Kuprin G.N. Nereshennye problemy pozharovzryvobezопасnosti energoresursov (SUG i SPG) kak oborotnaya storona uspekhov energeticheskoy strategii Rossijskoj Federacii // *Pozharovzryvobezопасnost'*. 2014. T. 23. № 4. S. 42–50.
2. Metodika opredeleniya raschetnyh velichin pozhnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah, utv. prikazom MCHS Rossii ot 10 iyulya 2009 g. № 404 (zareg. v Minyuste Rossii 17 avg. 2009 g. № 14541 (v red. prikaza MCHS Rossii ot 14 dek. 2010 g. № 649). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
3. Marshall V. Osnovnye opasnosti himicheskikh proizvodstv. M.: Mir, 1989. 671 s.
4. Revision and experimental verification of the hazard assessment computer system models for spreading, movement, dissolution and dissipation of soluble chemicals spilled onto water: report / K.T. Dodge [et al.]. Springfield, VA: U.S. Coast Guard, 1983. CG–D-35-83.
5. Safonov V.S. Obosnovanie vozmozhnyh scenarijev i ocenka posledstvij utechki SPG pri avarijnyh narusheniyah germetichnosti gruzovyh emkostej tankerov // *Vesti gazovoj nauki: Povyshenie nadezhnosti i bezопасnosti ob"ektov gazovoj promyshlennosti*. 2018. № 2 (34). S. 166–176.
6. May M.G., McQueen W., Whipp R.H. Dispersion of LNG spills // *Hydrocarbon Processing*. 1973. № 52 (5). S. 105–109.
7. Conrado C., Vesovic V. The influence of chemical composition on vaporization of LNG and LPG on unconfined water surfaces // *Chem. Eng. Sci.* 2000. № 55. S. 4549–4562.
8. Kuz'min A.A., Romanov N.N., Permyakov A.A. Modeli ispareniya szhizhennyh uglevodorodnyh gazov v raschete izbytochnogo davleniya vzryva // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. uni-ta GPS MCHS Rossii»*. 2019. № 3. S. 42–48.
9. Serdeenko E.S., Pahomov O.V., Baranov A.Yu. Matematicheskaya model' ispareniya szhizhennogo prirodnogo gaza i analiz vliyaniya iskhodnogo sostava na skorost' ispareniya // *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2020. T. 20. № 4. S. 603–610.
10. Danesh A. PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids. The Netherlands: Elsevier Science, 1998. 388 p. DOI: 10.1016/s0376-7361(98)x8021-0.
11. *Pozharovzryvobezопасnost' szhizhennyh i gazoobraznyh goryuchih: sb. nauch. trudov* M.: VNIPO MCHS Rossii, 1990. 82 s.
12. Kochetov N.M., Kochetov A.N. Matematicheskaya model' processa paroobrazovaniya szhizhennogo gaza iz proлива // *Modelirovanie riska. Problemy analiza riska*. 2018. T. 15. № 1. S. 74–81.
13. *Pozharovzryvobezопасnost' ob"ektov hraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza. Processy ispareniya i formirovaniya pozharovzryvobezопасnyh oblakov pri prolive zhidkogo metana. Metodiki ocenki parametrov* / I.A. Bolod'yan [i dr.] // *Pozhnaya bezопасnost'*. 2000. № 4. S. 108–121.
14. Shebeko A.Yu. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya parov szhizhennogo prirodnogo gaza pri prolive na tverduyu poverhnost' // *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2019. № 1. S. 36–41.
15. Ermak D.L. Results of 40m³LNG spills onto water // *Heavy Gas and Risk Assessment. II*. Battelle-Institute; Frankfurt am Main, Germany, 1983. P. 163–179.
16. Atallah S. Rapid phase transition // *Topical report of gas research institute, GRI-92/0533* 1997.
17. Havens J.A., Hazard J. Assessment of predictability of LNG vapor dispersion from catastrophic spills onto water // *Mater.* 1980. Vol. 3. P. 267–278.
18. Kooptan R.P. Analysis of Burro series 40 m³ LNG spill experiments // *Journal of Hazardous Materials*. 1981. A52. P. 119–140.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.10.2023; одобрена после рецензирования: 30.11.2023;
принята к публикации: 01.11.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.10.2023; approved after review: 30.11.2023;
accepted for publication: 01.11.2023

Сведения об авторах:

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN-код: 3604-7853

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313

Шарапов Сергей Владимирович, директор Санкт-Петербургского пожарно-технического колледжа (193315, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 52, к. 1, лит. К), доктор технических наук, профессор, e-mail: shcsv@mail.ru, SPIN-код: 7386-9524

Information about the authors:

Kuzmin Anatoly A., associate professor of the department of physical and technical fundamentals of fire safety of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN: 3604-7853

Romanov Nikolay N., associate professor at the department of physical and technical fundamentals of fire safety of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of sciences in technology, docent, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN: 4828-4313

Sharapov Sergey V., director of the Saint-Petersburg fire technical college (193315, Saint-Petersburg, Bolshevnikov ave., 52, room 1, lit. K), doctor of technical sciences, professor, e-mail: shcsv@mail.ru, SPIN: 7386-9524