

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 31–41

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):31-41

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ/REVIEW-ANALYTICA PAPER

УДК 614.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.31-41>

Особенности поведения резервуаров со сжиженным природным газом (СПГ) в очаге пожара

Юрий Николаевич Шебеко ✉

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведено обоснование важности исследований поведения резервуаров с СПГ в очаге пожара. Отмечен наиболее опасный режим разрушения таких резервуаров — BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion — взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости). Актуальность статьи обусловлена необходимостью анализа явления BLEVE с целью его предотвращения и снижения последствий. Целью работы является изложение основ феноменологии этого явления и анализ современных исследований в указанном направлении, включая анализ имевших место инцидентов. При этом основное внимание уделяется сжиженному природному газу.

Общие закономерности возникновения и протекания BLEVE. На основе анализа p – V и p – T диаграмм (p — давление; V — объем; T — температура) рассмотрена феноменология явления BLEVE. Отмечено наличие предельной температуры перегрева жидкой фазы, выше которой ее кипение происходит в режиме гомогенной нуклеации с дальнейшим возникновением BLEVE.

Краткий анализ аварий с возникновением BLEVE на резервуарах СПГ. Рассмотрены имевшие место наиболее крупные аварии с взрывом резервуаров СПГ в очаге пожара. В их числе проанализированы инциденты в г. Тивисса (Испания, 2002 г.), г. Зарзалико (Испания, 2011 г.) и провинции Шанси (Китайская народная республика, 2019 г.) на автоцистернах для перевозки СПГ. Отмечено, что размеры зон поражения опасными факторами таких аварий (тепловое излучение огненных шаров, давление в ударной волне, разлетающиеся фрагменты резервуаров) могут достигать величин 100–200 м.

Экспериментальные и теоретические исследования явления BLEVE и образующихся при этом огненных шаров. Проанализированы исследования, в которых изучены параметры огненного шара (диаметр, длительность существования, высота подъема, интенсивность теплового излучения) на резервуарах СПГ объемом до 5 м³. Отмечено также крупномасштабное исследование параметров огненного шара, образующегося в результате истечения СПГ из трубопровода и сгорания образующегося переобогащенного облака.

Выводы. Основные закономерности аварий на резервуарах СПГ, протекающих в режиме BLEVE с образованием огненных шаров, во многом аналогичны имеющим место в случае резервуаров со сжиженными углеводородными газами (СУГ), но при этом поверхностная плотность теплового потока огненного шара СПГ (около 500 кВт/м²) существенно выше, чем для СУГ.

Ключевые слова: перегретая жидкость; предельная температура перегрева; взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости; огненный шар; зоны поражения опасными факторами

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Особенности поведения резервуаров со сжиженным природным газом (СПГ) в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 31–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.31-41

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Behavior of liquefied natural gas tanks in a point of fire origin

Yury N. Shebeko ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the importance of investigations of LNG tanks behaviour during fires. The most dangerous mode of their destruction (BLEVE, boiling liquid expanding vapour explosion), is mentioned. The relevance of the article is conditioned by the need to analyze the BLEVE phenomenon to prevent it and to mitigate its consequences. The purpose of the paper is to present fundamentals of this phenomenon and to analyze advanced relevant research findings, including the analysis of recent accidents. The main focus is on liquefied natural gas.

General regularities of BLEVE. The BLEVE phenomenon was analyzed using p – V and p – T diagrams (p is pressure, V is volume, and T is temperature). Liquid boils at critical overheat temperature in the mode of homogeneous nucle-

ation followed by BLEVE. Experimental data on critical overheat temperatures are presented for some liquefied gases and flammable liquids.

Brief analysis of BLEVE accidents involving LNG tanks. Major BLEVE accidents, involving LNG tanks, are considered. These events occurred in Tivissa (Spain, 2002), Zarzalico (Spain, 2011), and Shansi (China, 2019), and each involved road tanks for LNG transportation. Dimensions of hazardous thermal radiation zones, that emerged as a consequence of fireballs, blast waves and vessel fragments, reached 100–200 m.

Experimental and theoretical investigations of BLEVE and fireballs that emerged at LNG tanks. The most interesting experimental studies in this area are analyzed. Hazardous factors (the fireball diameter, time frame, height of elevation, and thermal radiation intensity) were determined using a 5 m³ tank. The empirical correlation, connecting the above mentioned parameters with the LNG mass in the tank, were obtained. Large-scale experiments were carried out to determine characteristics of fireballs that emerged when LNG was flowing out of the pipeline and when the resulting oversaturated cloud was on fire.

Conclusions. The main patterns of BLEVE and fireball accidents, involving LNG tanks, were analyzed. Their patterns are similar to those typical for LPG tanks. However, the surface radiation from LNG tank fireballs (nearly 500 kW/m²) is much higher than the surface radiation from LPG tanks (nearly 350 kW/m²).

Keywords: overheated liquid; critical overheating temperature; boiling liquid expanding vapour explosion; fireball; hazardous zones

For citation: Shebeko Yu.N. Behavior of liquefied natural gas tanks in a point of fire origin. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):31–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.31-41 (rus).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Введение

При попадании резервуара с жидкостью или сжиженным газом в очаг пожара возможен взрыв паров вскипающей жидкой фазы хранящегося продукта. Такое явление названо в литературе BLEVE — boiling liquid expanding vapor explosion [1, 2]. Если содержимое резервуара является горючим веществом, то в результате BLEVE образуется огненный шар — крупномасштабное диффузионное пламя с интенсивным тепловым излучением. Кроме того, взрыв резервуара сопровождается возникновением ударных волн и разлетом фрагментов оболочки резервуара (например, инциденты в Фейсене (Франция, 1966 г., Мехико (Мексика, 1984 г.)) [1, 2], Алма-Ате (Казахстан, 1989 г.) [3], а также аварии, описанные в работах [4–6]). Следует отметить, что инциденты [4–6] имели место на резервуарах со сжиженным природным газом (СПГ), опасность которых в недалеком прошлом недооценивалась. Разрушительные последствия явления BLEVE с образованием огненных шаров вызвали интерес к нему со стороны специалистов разных стран. В результате проведенных исследований выявлены особенности возникновения и протекания аварий в режиме BLEVE. Настоящая работа посвящена изложению основ феноменологии этого явления и анализу современных исследований в указанном направлении, включая анализ имевших место инцидентов. При этом основное внимание уделяется сжиженному природному газу.

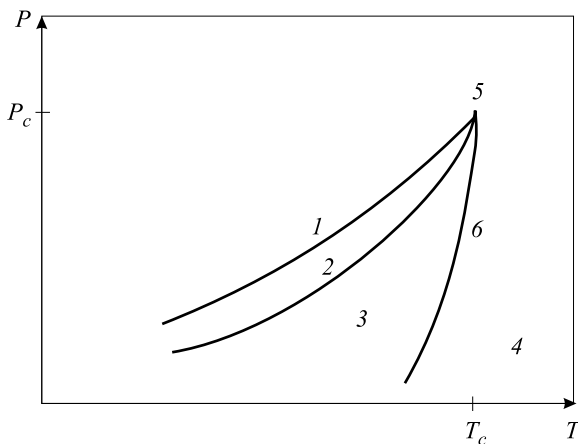
Общие закономерности возникновения и протекания BLEVE

Нагрев замкнутого сосуда с жидкостью или сжиженным газом (далее по тексту — жидкостью) приводит к повышению температуры последней до значений, существенно превышающих нор-

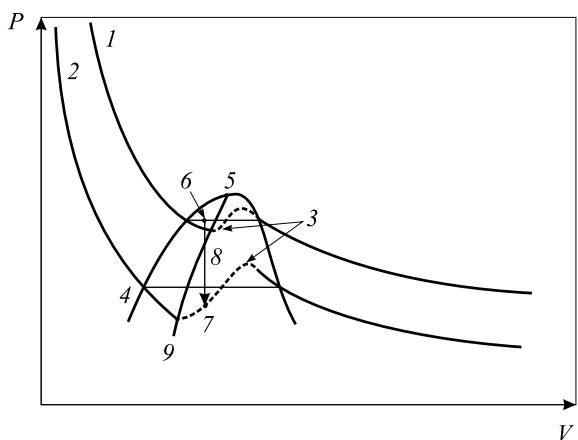
мальную температуру кипения с соответствующим возрастанием давления насыщенных паров. Вследствие нагрева несмоченных стенок снижается предел прочности их материала, в результате чего может произойти разгерметизация резервуара. Реализующее при этом внезапное резкое снижение давления вызывает распространяющуюся вглубь жидкости волну разрежения, за которой следует волна вскипания, дающая начало быстрому росту давления до величины, превышающей предельно допустимое для резервуара давление. Процесс разрушения резервуара ускоряется и переходит во взрывной режим, вызывая ударные волны в окружающем пространстве, огненный шар с интенсивным тепловым излучением и разлетающиеся фрагменты резервуара [1, 2, 7–9].

Для понимания процесса возникновения BLEVE, следуя [10–12], рассмотрим особенности вскипания перегретых жидкостей. В отсутствии центров инициирования испарения жидкость может нагреваться до температур, существенно превышающих нормальную температуру кипения, но не выше определенного предела, называемого пределом перегрева. Как показывают экспериментальные данные, предел перегрева не более чем на 10 % ниже критической температуры жидкости. Геометрическое место точек на p – V диаграмме состояния, отвечающих условию $(dp/dV)_T = 0$, называется спиноподальной кривой. Типичная диаграмма состояния в координатах p – T и p – V приведена на рисунке. Как показывают данные [10–12], пределы перегрева близки к значениям, соответствующим спиноподальной кривой.

За волной разрежения давление близко к атмосферному, а температура значительно превышает нормальную температуру кипения. В результате внутри жидкости, если ее температура выше пре-



a



b

Типичные диаграммы состояния систем *жидкость – пар* (p_c и T_c — критические давление и температура): *a* — диаграмма p – T (1 — стабильная жидкость; 2 — метастабильный пар; 3 — метастабильная жидкость; 4 — стабильный пар; 5 — критическое состояние; 6 — спинодальная кривая); *b* — диаграмма p – V (1 — изотерма начального состояния; 2 — изотерма конечного состояния; 3 — участки изотерм Ван-дер-Ваальса, отвечающие метастабильным состояниям вещества; 4 — линия, ограничивающая область существования двухфазной среды; 5 — критическое состояние; 6 — начальное состояние; 7 — конечное состояние; 8 — линия перехода из начального состояния в конечное; 9 — спинодальная кривая)

Standard diagrams of liquid – vapour systems (p_c and T_c are critical pressure and temperature): *a* — p – T diagram (1 is stable liquid; 2 is metastable vapour; 3 is metastable liquid; 4 is stable vapour; 5 is critical state; 6 is a spinodal curve); *b* is the p – V diagram (1 is the isotherm of the initial state; 2 is the isotherm of the final state; 3 are parts of Van der Waals isotherms responding to metastable states of a substance; 4 is the line restricting the area of the two-phase medium; 5 is the critical state; 6 is the initial state; 7 is the final state; 8 is the line of transition from the initial to the final state; 9 is the spinodal curve)

дела перегрева, возникают ядра гомогенной нуклеации с дальнейшим быстрым вскипанием жидкости и образованием ударной волны, приводящей к взрывному разрушению резервуара и выбросу его содержимого в атмосферу. Если процесс разрушения резервуара инициирован нагревом от очага пожара, то образуется огненный шар (табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные значения предельных температур перегрева жидкостей

Table 1. Experimental values of limiting superheating temperatures of liquids

Вещество Substance	Предельная температура перегрева, К Ultimate superheating temperature, K
Метан Methane	26–30
Пропан Propane	326
н-Бутан n-Butane	362
н-Пентан n-Pentane	421
Изопентан Isopentane	412
Диэтиловый эфир Diethyl ether	420
Аммиак Ammonia	347
Хлор Chlorine	247

Краткий анализ аварий с возникновением BLEVE на резервуарах СПГ

В литературе большое число публикаций посвящено анализу аварий с возникновением BLEVE и образованию огненных шаров на резервуарах сжиженных углеводородных газов (СУГ). В то же время количество подобных аварий на резервуарах СПГ существенно более низкое, что связано, вероятно, со значительно меньшим количеством эксплуатируемых резервуаров такого вида. При этом указанные аварии как в случае СУГ, так и в случае СПГ имели место в основном для транспортных резервуаров. В настоящем разделе статьи проанализированы наиболее крупные из таких аварий на резервуарах СПГ [4–6].

Инцидент со взрывом резервуара СПГ на АЦ при воздействии очага пожара произошел 22.06.2002 г. вблизи г. Тивисса (Испания, провинция Каталония) [4]. Автоцистерна, перевозившая СПГ, перевернулась из-за превышения допустимой скорости. Возник факел пламени, под воздействием которого загорелись шины автомобиля. Через 2 мин размеры пламени значительно возросли (вероятно, за счет истечения продукта из предохранительных клапанов). Через 20 мин после начала аварии резервуар СПГ взорвался с образованием огненного шара. Погиб водитель автоцистерны, 2 человека на расстоянии 200 м от места аварии получили ожоги.

Резервуар СПГ имел диаметр 2,33 м и длину 13,5 м и был изготовлен из нержавеющей стали. Оболочка резервуара имела толщину 4 мм (днище —

6 мм). Теплоизоляция резервуара из пенополистирола и с покрытием из алюминия. Объем автоцистерны 56 м³, рабочее давление 0,7 МПа. Резервуар содержал 47,6 м³ продукта. Имелось 5 предохранительных клапанов различного диаметра.

Имели место два взрыва: первый, относительно слабый, связанный с возникновением трещины в месте перегрева оболочки резервуара, и второй, связанный с его катастрофическим разрушением. Резервуар разрушился с образованием нескольких фрагментов. В здании на расстоянии 125 м от места аварии разрушения остекления не наблюдалось, т.е. давление в ударной волне не превышало 0,3 кПа. Среди фрагментов наибольший имел длину 5 м и улетел на расстояние 80 м. Другой фрагмент длиной 4 м улетел на расстояние 125 м и попал в здание. Мотор и кабина водителя перенеслись на расстояние 257 м. Некоторые фрагменты были найдены на расстоянии до 1000 м от места аварии. В автоцистерне находилось около 19 тонн СПГ. Исходя из этого, оценки диаметра огненного шара дали величину 150 м, высота подъема — 113 м, длительность — 12 с.

В октябре 2011 г. вблизи г. Зарзалико (Испания, провинция Мурсия) произошла авария с автоцистерной, содержащей 19,6 тонн СПГ [5]. Отмечено, что аварии с такого рода цистернами нередки. Так, за последние 15 лет в Испании имели место 15 инцидентов, в 7 из которых произошло их переворачивание. Авария началась со столкновения автоцистерны с неподвижным автомобилем, груженым бетонными конструкциями. Возник пожар, приведший к гибели водителя автоцистерны. Прибывшие пожарные организовали зону безопасности радиусом 60 м, при этом пожарный автомобиль расположили на расстоянии 150 м от места пожара. Все люди из зоны безопасности были эвакуированы. В определенный момент в зоне пожара возник сильный шум, связанный с горением СПГ, и пожарный автомобиль на расстоянии 200 м. Через примерно 40 с после этого резервуар автоцистерны взорвался.

Автоцистерна имела следующие характеристики:

- длина — 14,04 м;
- внутренний диаметр — 2,34 м;
- объем — 56,5 м³;
- максимальная масса СПГ — 21 000 кг;
- максимально допустимое давление — 0,7 МПа;
- материал оболочки — нержавеющая сталь;
- толщина стенок оболочки — 4 мм (днища — 6 мм);
- тепловая изоляция — пенополиуретан, покрытый алюминиевым листом толщиной 2 мм;
- наличие 3 предохранительных клапанов (2 — на давление 0,7 МПа и 1 — на давление 0,91 МПа).

Столкновение автомобилей произошло в 8:20, после чего начался пожар с черным дымом (горели

шины, дизельное топливо и/или пенополиуретановая теплоизоляция). В 8:35 масштаб и внешний вид очага пожара существенно изменились — появилось более яркое пламя и дым стал менее черным, что, вероятно, было связано с горением СПГ. В 8:40 прибыли пожарные, и в этот момент уже вся автоцистерна была охвачена пламенем. В 9:32 произошел взрыв резервуара. Длительность существования образовавшегося огненного шара, по показаниям свидетелей, составила около 10 с.

Последствия инцидента были зафиксированы на расстоянии до 200 м от места аварии. На расстоянии до 50 м растительность выгорела, на расстоянии 90 м наблюдали пиролиз сосновых иголок, листья деревьев высохли. По расчетным оценкам это соответствует интенсивности теплового излучения 55 кВт/м² в течение 10 с. На близлежащей АЗС, расположенной на расстоянии 125 м, из оконных проемов вылетели стеклопакеты, что соответствует давлению в ударной волне 2–3 кПа. Резервуар развалился на 3 основных фрагмента, локализованных вблизи места аварии, и множество более мелких, которые были найдены в радиусе 200 м. На основании оценок интенсивности теплового излучения 55 кВт/м² на расстоянии 90 м и длительности огненного шара 10 с было найдено, что огненный шар имел диаметр 133 м.

На основании результатов расследования аварии сделаны следующие выводы. Столкновение автоцистерны с автомобилем с дальнейшим горением пенополиуретановой тепловой изоляции обусловило начало теплового воздействия на резервуар СПГ. Поэтому в будущем следует отказаться от использования такого вида автоцистерн в пользу автоцистерн с вакуумной тепловой изоляцией. Даже при эффективной работе предохранительных клапанов нагрев несмоченной стенки резервуара может привести к ее нагреву до недопустимых температур с дальнейшим разрушением. Оценки воздействия теплового излучения огненного шара на окружающие объекты показали, что доза излучения на расстоянии 170 м отвечает летальности для незащищенного человека с вероятностью 1 % и ожогу 1-й степени на расстоянии 295 м. Ударная волна может вызвать заметные разрушения зданий на расстоянии 125 м, фрагменты резервуара могут разлетаться на расстояния до 200 м. В аварии погиб только 1 человек (водитель автоцистерны) благодаря своевременной эвакуацией людей в безопасную зону.

В работе [6] проанализирована авария на автоцистерне для перевозки СПГ, произошедшая 23.04.2019 г. в провинции Шанси (Китайская Народная Республика). Инцидент имел место на стоянке автомобилей. В результате пожара произошел разрыв резервуара СПГ с образованием огненного шара с повреждением

Таблица 2. Теоретические оценки параметров огненного шара
Table 2. Theoretically evaluated fireball parameters

Параметр огненного шара Fireball parameter	Величина параметра Parameter value	
	наблюдение observation	расчет calculation
Максимальный диаметр, м Maximum diameter, m	170	157,7
Максимальная высота, м Maximum height, m	250	235,4
Время существования, с Time of existence, s	10,8	10,7

окружающих объектов. В ликвидации пожара участвовали 120 пожарных с использованием 21 пожарного автомобиля. В резервуаре содержалось 22 680 кг СПГ при давлении 0,483 МПа. Автоцистерна имела длину 16,2 м и диаметр резервуара 2,6 м. Авария с разрывом резервуара была инициирована пожаром соседней автоцистерны для перевозки н-пентана в результате ошибочных действий персонала. Представлена кинограмма возникновения и развития огненного шара, заснятая камерой, расположенной на соседнем объекте, с расстояния 1220 м. На ее основе определены такие параметры, как максимальный диаметр огненного шара, максимальная высота его центра и время существования (табл. 2). Проведены также теоретические оценки указанных параметров. Результаты приведены ниже.

Предложены мероприятия по предотвращению такого рода аварий.

Экспериментальные и теоретические исследования BLEVE и огненных шаров на резервуарах СПГ

Исследованию явления BLEVE посвящен целый ряд работ (см., например, [13–24]). Однако эти работы не касаются случая резервуаров с СПГ. Поэтому ниже мы рассмотрим исследования, посвященные резервуарам СПГ, и кратко коснемся резервуаров со сжиженным водородом, являющимся, наряду со сжиженным природным газом, перспективным видом топлива.

В работе [25] представлены результаты оценки параметров огненного шара (радиуса, высоты, времени существования) на резервуарах СПГ при реализации BLEVE. Отмечено, что до четверти энергии, выделяющейся при горении, переходит в тепловое излучение. На основе анализа литературных данных выявлены 3 стадии эволюции огненного шара:

1) рост диаметра в течение 2 с, вначале до половины максимального диаметра с бело-желтым пламенем. Затем происходит рост диаметра до максимального значения. При этом приблизительно 10 %

поверхности является темной за счет образующейся сажи, остальная поверхность белая, желто-оранжевая или красная;

2) стационарное горение (длительность около 10 с). Вначале пламя имеет приблизительно сферическую форму, которая переходит в грибовидную;

3) догорание, продолжающееся приблизительно в течение 5 с, за это время пламя практически не меняет своего размера.

На основе расчетных формул, представленных в «желтой» книге TNO [26], вычислены указанные выше параметры огненного шара. Для резервуаров, содержащих 9500–19 000 кг СПГ, найдено, что при допустимой плотности теплового потока 5 кВт/м² (предельно допустимая величина для воздействия на человека) безопасное расстояние должно быть не менее 400 м.

В работе [27] описан эксперимент по определению параметров огненного шара при возникновении BLEVE на резервуарах СПГ объемом 5 м³. Проведено 4 опыта на одностенных резервуарах при искусственном инициировании их разрушения с помощью взрывчатых веществ. Условия эксперимента приведены в табл. 3.

Базовым считался эксперимент № 4, в котором ожидали возникновения огненного шара с максимальным поражающим воздействием. При этом эксперимент № 1 должен был моделировать инцидент с топливным баком автомобиля. Этот эксперимент был не вполне удачным вследствие частичного разрушения резервуара, в результате чего получено вытянутое, а не полусферическое пароаэрозольное облако. При формулировке выводов по работе авторы [15] не учитывали этот эксперимент.

На основании полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы.

1. Измеренный диаметр огненного шара был несколько меньше, чем для эквивалентной массы СУГ (данные по СУГ из работы [28]). Предложена следующая корреляция для диаметра D , м, огненного шара:

$$D = a \cdot M^b, \quad (1)$$

где M — масса продукта, вовлеченного в огненный шар, кг;

a , b — коэффициенты, равные 4,8 и 0,333 соответственно.

Согласно [28] для СУГ имеет место аналогичная формула, но коэффициент a составляет 5,8. С учетом возможной погрешности в определении диаметра огненного шара данное различие можно считать небольшим.

2. Время существования огненного шара находится в интервале $(0,45–0,90)M^{0,333}$, что близко к данным [28] для СУГ.

Таблица 3. Условия проведения экспериментов на резервуарах СПГ
Table 3. Initial conditions at LNG tanks

Номер Number	Объем резервуара, м ³ Tank volume, m ³	Начальное давление в резервуаре, МПа (избыточное) Initial pressure in a tank, MPa (overpressure)	Начальная температура СПГ, °С Initial LNG temperature, °C	Степень заполнения резервуара жидкой фазой, % Extent of tank filling by the liquid phase, %	Масса СПГ в резервуаре, кг LNG mass in a tank, kg
1	0,935	1,292	–120	66	247
2	5,055	1,301	–115	37	681
3	5,055	0,607	–131	67	1306
4	5,055	1,362	–115	69	1251

3. Максимальная высота подъема центра огненного шара составляет $(1,0–1,2)D$, что близко к случаю СУГ.

4. Поверхностная плотность теплового излучения SEP в опытах № 2 и 4 (высокое начальное давление продукта) составила около 500 и 300 кВт/м² (низкое давление продукта в опыте № 3). Для опытов № 2 и 4 SEP была существенно выше, чем для СУГ. Авторы объясняют различие данных экспериментов № 2 и 4, с одной стороны, и опыта № 3, с другой, тем обстоятельством, что в опыте № 3 давление в резервуаре при его разрыве существенно ниже, чем в опытах № 2 и 4. Вследствие этого в опыте № 3 при разрыве резервуара турбулентное смешение паров и аэрозоля СПГ с воздухом ниже, поэтому скорость и полнота сгорания также ниже.

5. Интенсивность теплового излучения огненного шара на расстоянии 100 м составила 17–26 кВт/м², что близко к случаю огненного шара СУГ [28].

6. В эксперименте № 3 было обнаружено горение СПГ на поверхности земли, продолжавшееся 4 с. Это говорит о том, что даже в этом случае большая часть продукта была вовлечена в огненный шар. В опытах № 2 и 4 горения СПГ на поверхности земли не было зафиксировано. Причина этого состоит, вероятно, в том, что масса продукта, вовлеченного в огненный шар, зависит от доли f мгновенно испарившейся жидкой фазы при разрушении резервуара [8, 29–31]. Согласно этим работам, если величина f превышает 35 %, то вся масса продукта вовлекается в огненный шар в виде паров и жидкого аэрозоля, капли которого быстро испаряются в адиабатическом режиме. В опытах № 2 и 4 величина f превышала 35 %, в то время как в опыте № 3 значение f составляло 22 %, что согласуется с предложенным в работах [8, 29–31] критерием.

Огненный шар может иметь место не только как результат BLEVE, но и в случае сгорания переобогащенной (концентрация горючего газа выше верхнего концентрационного предела распространения пламени) смеси горючего газа или пара с воздухом. Крупномасштабные эксперименты по изучению

таких огненных шаров выполнены в пустыне Гоби в Китайской Народной Республике [32, 33].

В работе [32] экспериментально изучена опасность огненного шара, образующегося при сгорании облака паров СПГ в результате истечения продукта из трубопровода. Измерены такие параметры, как диаметр огненного шара, высота его подъема, время существования, интенсивность теплового излучения с оценкой его поражающего воздействия. Трубопровод имел диаметр 1422 мм, длину 430 м и располагался на глубине 1,5 м. В трубопровод закачивали 800 м³ СПГ при давлении до 20 МПа. В центре трубопровода имелось щелевое отверстие длиной 0,5 м и шириной 0,01 м для моделирования утечки из щелевого отверстия. Интенсивность теплового излучения измеряли 35 датчиками, расположенными на различных расстояниях от места истечения.

Зажигание газа производили одновременно с началом его выхода из трубопровода. Образовывался огненный шар, центр которого достигал высоты 260–300 м через 5 с после начала истечения газа. Максимальный диаметр огненного шара составлял 400 м, его форма была близка к сферической в промежутке времени от 5 до 20 с. Эффективная температура его поверхности составляла около 2200 °С. Далее огненный шар принимал грибовидную форму, а пламя увеличивало свою яркость. После этого горение продолжалось еще около 30 с. Пламя имело желтый цвет с небольшим количеством черного дыма. В месте расположения трубопровода образовалась щель в земле длиной около 50 м.

Работа [33] представляет собой продолжение исследований [32], посвященных главным образом полумпирической оценке параметров огненного шара. Проанализирован ряд публикаций, посвященных такой оценке для случая углеводородных топлив. Для оценки диаметра огненного шара использовали формулу (1), а для его времени существования t_s — формулу:

$$t_s = c \cdot M^d. \quad (2)$$

Величины a и b по данным различных источников находятся в диапазонах 3,86–6,14 и 0,277–0,333 соответственно. Для коэффициентов c и d имеют место интервалы 0,31–1,10 и 0,097–0,349 соответственно. При этом указанные коэффициенты взаимосвязаны между собой в рамках того или иного исследования.

В работе [34] проведен обзор экспериментов, связанных с горением проливов СПГ. В этой работе описаны в том числе опыты, проведенные Gaz de France по горению переобогащенного газового облака в режиме огненного шара. СПГ проливали в приямок диаметром 1,8 и глубиной 1,7 м. Массовая скорость истечения СПГ составляла 2,6–5,6 кг/с. При зажигании газового облака образовывался огненный шар диаметром 5–30 м с высотой подъема его центра 17–26 м. На расстоянии 20 м от места пролива интенсивность теплового излучения составляла 50 кВт/м².

Нельзя не коснуться вопросов возникновения огненных шаров на резервуарах с газообразным и жидким водородом, которым посвящены работы [35, 36]. В работе [35] экспериментально изучены взрывы автомобильных топливных резервуаров со сжатым водородом при воздействии на них очага пожара. Рассмотрены также вопросы, связанные с безопасностью использования жидкого водорода.

В работе [36] методом CFD проведено моделирование процесса разрыва резервуара с жидким водородом при инициировании разрыва с помощью взрывчатых веществ (ВВ) с целью определения параметров образующихся ударных волн. Отмечено, что жидкий водород может перевозиться в автоцистернах с резервуарами объемом 60 м³ и более. При попадании такого резервуара в очаг пожара возможен BLEVE с образованием ударной волны, огненного шара и разлетом его фрагментов. Описана авария с резервуаром жидкого водорода (LH₂) объемом 76 м³. Авария началась с истечением продукта через сбросную трубу с образованием факела. Вызванные пожарные попытались потушить факел путем подачи воды, которая замерзла в отверстии сбросной трубы и прекратила истечение газа. Спустя некоторое время резервуар взорвался. Даны ссылки на работы [37, 38], в которых теоретически показана возможность BLEVE на резервуарах с LH₂ с использованием критерия предельной температуры перегрева. Отмечено, что для LH₂ BLEVE может иметь место при температуре 29,7 К и давлении 0,77 МПа [37] или 26,2 К и 0,42 МПа [38].

Со ссылкой на работу [39] описаны эксперименты, проведенные компанией BMW по определению давления в ударной волне и плотности теплового потока при разрыве резервуаров с LH₂. Опыты проведены с одностенными цилиндрическими резервуарами с тепловой изоляцией в виде твердой пены. Объем резерву-

аров составлял 120 л. Масса водорода в резервуарах варьировалась в диапазоне 1,8–5,4 кг.

В работе [36] на основе моделирования найдено, что структура ударной волны характеризуется тремя пиками давления. Первый пик давления обусловлен взрывом ВВ. Второй пик вызван выходом газовой фазы в атмосферу при разгерметизации резервуара, смешением ее с воздухом и сгоранием образующейся газозооной смеси. Третий пик обусловлен BLEVE, в результате которого образуется огненный шар. При этом второй пик характеризуется более высоким давлением, чем третий, который, как раньше считалось, представляет наибольшую опасность. Отмечено, что величина второго пика обусловлена особенностями сгорания водородозооных смесей в связи с высокой нормальной скоростью горения водорода. Вероятно, для газов, имеющих более низкие нормальные скорости горения (например, для большинства углеводородных газов), такого эффекта не будет.

В работе [40] проведены эксперименты по изучению поведения резервуаров с LH₂ объемом 1 м³ при огневом воздействии пламени пропана, локализованного на горелках, размещенных под резервуарами. Интенсивность огневого воздействия составляла 100–150 кВт/м². Проведено 3 опыта, два из которых с двустенными резервуарами с вакуумной теплоизоляцией, и один с двустенным резервуаром с многослойной теплоизоляцией. Резервуары с вакуумной теплоизоляцией выдержали 80 мин и 4 ч огневого воздействия без разгерметизации внутренней оболочки (опыты были прекращены), а резервуар с многослойной теплоизоляцией — 40 мин, после чего произошел его взрыв с образованием огненного шара, ударной волны и разлетающихся фрагментов.

Выводы

В настоящей работе проанализированы общие закономерности возникновения и протекания аварий при реализации явления BLEVE. Выполнен краткий анализ имевших место в мировой практике такого рода инцидентов с резервуарами СПГ. Отмечено, данные аварии характеризуются обширными зонами поражения (до 1000 м) тепловым излучением огненных шаров, ударной волной и фрагментами от разрыва резервуаров. Проанализированы результаты экспериментальных и теоретических исследований явления BLEVE и параметров образующихся при этом огненных шаров. Рассмотрены полуэмпирические соотношения, описывающие зависимости диаметра огненного шара и его длительности от массы СПГ, содержащейся в резервуаре. Отмечено, указанные соотношения близки к полученным ранее для случая СУГ. Поверхностная плотность теплового потока от огненных шаров СПГ составляет около

500 кВт/м², что заметно выше, чем для случая СУГ (350 кВт/м²). Высота подъема центра огненного шара над поверхностью земли близка к его диаметру. Отмечены работы по изучению явления BLEVE на резервуарах с жидким водородом. На основе про-

веденного анализа сделан вывод о возможности возникновения BLEVE на резервуарах СПГ и жидкого водорода и высокой опасности этого явления, характеризующегося обширными зонами поражения опасными факторами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маршал В. Основные опасности химических производств. М. : Мир, 1989. 671 с.
2. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. Взрывные явления: оценка и последствия. М. : Мир, 1986. Т. 1, 2.
3. Шевчук А.П., Симонов О.А., Шебеко Ю.Н., Фахрисламов Р.З. Закономерности протекания аварий на резервуарах со сжиженными углеводородными газами с образованием огненных шаров // Химическая промышленность. 1991. № 6. С. 338–340.
4. Planas-Cuchi E., Gassula N., Ventosa A., Casal J. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2004. Vol. 17. Pp. 315–321. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.05.005
5. Planas E., Pastor E., Casal J., Bonilla J.M. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 34. Pp. 127–138. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.026
6. Wang K., Quin X., He Y., Shi T., Zhang X. Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 108. P. 104350. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104350
7. McDevitt C.A., Chan C.K., Steward F.R., Tennankore K.N. Initiation step of boiling liquid expanding vapor explosions // Journal of Hazardous Materials. 1990. Vol. 25. Issue 1–3. Pp. 169–180.
8. Abbasi T., Abbasi S.A. The boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): Mechanism, consequences assessment, management // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 141. Issue 3. Pp. 489–519. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056
9. Шебеко Ю.Н. Критерий возможности возникновения взрыва резервуара с перегретой жидкостью // Химическая промышленность. 1994. № 5. С. 302–305.
10. Frost D.L. Dynamics of explosive boiling of a droplet // Physics of Fluids. 1988. Vol. 31. Issue 9. Pp. 2554–2561. DOI: 10.1063/1.866608
11. Frost D., Sturtevant B. Effects of ambient pressure on the instability of a liquid boiling explosively at the superheat limit // Journal of Heat Transfer. 1986. Vol. 108. Issue 2. Pp. 418–424.
12. Shepherd J.E., Sturtevant B. Rapid evaporation at the superheat limit // Journal of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 121. Pp. 379–402.
13. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. On the mechanism of a BLEVE occurrence due to fire engulfment of tanks with overheated liquids // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 36. Pp. 167–170. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.06.006
14. Jingde Li, Hong Hao. Numerical simulation of medium to large scale bleve and the prediction of BLEVE's blast wave in obstructed environment // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 145. Pp. 94–109.
15. Li Q., Wang Y., Li L., Hao H., Wang R., Li J. Prediction of BLEVE loads on structures using machine learning and CFD // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 171. Pp. 914–925.
16. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Early moments of Bleve: From vessel opening to liquid flashing release // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 132. Pp. 35–46. DOI: 10.1016/j.psep.2019.09.028
17. Hemmatian B., Casal J., Planas E. A new procedure to estimate BLEVE overpressure // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 111. Pp. 320–325. DOI: 10.1016/j.psep.2017.07.016
18. Hemmatian B., Planas E., Casal J. Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 106. Issue 3. Pp. 138–149. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.007
19. Ustolin F., Toliass I.C., Giannissi S.G., Venetsanos A.G., Paltrinieri N. A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 159. Pp. 61–75. DOI: 10.1016/j.psep.2021.12.048
20. Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C. Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 40. Pp. 449–460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020
21. Kohout A., Jain P., Dick W. Review, identification and analysis of local impact of projectile hazard in the LNG industry: A LNG storage tanks case study // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 57. Pp. 304–319. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.018

22. Hemmatian B., Casal J., Planas E., Rashtchian D. BLEVE: The case of water and a historical survey // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 57. Pp. 231–238. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.001
23. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S., Zhou W. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. Issue 3. P. 104919. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
24. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Analysis of BLEVE overpressure using spherical shock theory // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 134. Pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.023
25. Zhang Q.-X., Liang D. Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 52. Pp. 602–606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
26. Methods for the calculation of physical effects (“Yellow Book”). CPR 14E (parts 1 and 2). The Hague, Committee for the Prevention of Disasters. 3rd Ed. 1997.
27. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments // *Symposium series No. 160. Hazards 25. Shell*, 2015.
28. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage // *Fire Safety Journal*. 1982. Vol. 4. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
29. Hasegawa K., Saito K. Study on the fireball following steam of n-pentane // *Proceedings of the Second International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Heidelberg, 1977. Pp. 297–304.
30. Roberts A.F. The effect of conditions prior to loss of containment of fireball behavior // *International Chemical Engineering Symposium*. Series No. 71. Oxford, Pergamon Press, 1982.
31. Birk A.M., Andersson R.J., Coppens A.J. A computer simulation of a derailment accident: Part I: Model basis // *Journal of Hazardous Materials*. 1990. Vol. 25. Issue 1–2. Pp. 121–147.
32. Wang K., Lui Z., Qian X., Huang P. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. Vol. 46. Pp. 13–22. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.001
33. Wang K., He Y., Lui Z., Qian X. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 366. Pp. 282–292. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.087
34. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 140. Issue 3. Pp. 444–464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
35. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure // *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008. Pp. 149–158.
36. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Issue 23. Pp. 8716–8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114
37. Hansen O.R. Liquid hydrogen releases show dense gas behavior // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 1343–1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
38. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. P. 104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
39. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passenger cars // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996. Vol. 21. Issue 5. Pp. 387–395. DOI: 10.1016/0360-3199(95)00092-5
40. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen // *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 90. Pp. 547–552. DOI: 10.3303/CET2290092

REFERENCES

1. Marshall V.C. *Major chemical hazards*. New York, Ellis Horwood Limited, 1987; 671.
2. Baker W.E., Cox P.A., Westline P.S., Kulesz J.J., Strelow R.A. *Explosion hazards and evaluation*. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983; 1, 2.
3. Shevchuck A.P., Simonov O.A., Shebeko Yu.N., Fakhrislamov R.Z. The regularities of accidents on LPG tanks with a fireballs occurrence. *Chemical Industry*. 1991; 6:338–340. (rus).
4. Planas-Cuchi E., Gassula N., Ventosa A., Casal J. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2004; 17:315–321. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.05.005
5. Planas E., Pastor E., Casal J., Bonilla J.M. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 34:127–138. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.026

6. Wang K., Quin X., He Y., Shi T., Zhang X. Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 108:104350.
7. McDevitt C.A., Chan C.K., Steward F.R., Tennankore K.N. Initiation step of boiling liquid expanding vapor explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1990; 25(1-3):169-180.
8. Abbasi T., Abbasi S.A. The boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): Mechanism, consequences assessment, management. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 141(3):489-519. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056
9. Shebeko Yu.N. The criteria of possibility of BLEVE occurrence. *Chemical Industry*. 1994; 5:302-305. (rus).
10. Frost D.L. Dynamics of explosive boiling of a droplet. *Physics of Fluids*. 1988; 31(9):2554-2561. DOI: 10.1063/1.866608
11. Frost D., Sturtevant B. Effects of ambient pressure on the instability of a liquid boiling explosively at the superheat limit. *Journal of Heat Transfer*. 1986; 108(2):418-424.
12. Shepherd J.E., Sturtevant B. Rapid evaporation at the superheat limit. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982; 121:379-402.
13. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. On the mechanism of a BLEVE occurrence due to fire engulfment of tanks with overheated liquids. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 36:167-170. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.06.006
14. Jingde Li, Hong Hao. Numerical simulation of medium to large scale bleve and the prediction of BLEVE's blast wave in obstructed environment. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 145:94-109.
15. Li Q., Wang Y., Li L., Hao H., Wang R., Li J. Prediction of BLEVE loads on structures using machine learning and CFD. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023; 171:914-925.
16. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Early moments of Bleve: From vessel opening to liquid flashing release. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 132:35-46. DOI: 10.1016/j.psep.2019.09.028
17. Hemmatian B., Casal J., Planas E. A new procedure to estimate BLEVE overpressure. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 111:320-325. DOI: 10.1016/j.psep.2017.07.016
18. Hemmatian B., Planas E., Casal J. Comparative analysis of BLEVE mechanical energy and overpressure modelling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 106(3):138-149. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.007
19. Ustolin F., Tolia I.C., Giannissi S.G., Venetsanos A.G., Paltrinieri N. A CFD analysis of liquefied gas vessel explosions. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 159:61-75. DOI: 10.1016/j.psep.2021.12.048
20. Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C. Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 40:449-460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020
21. Kohout A., Jain P., Dick W. Review, identification and analysis of local impact of projectile hazard in the LNG industry: A LNG storage tanks case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:304-319. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.018
22. Hemmatian B., Casal J., Planas E., Rashtchian D. BLEVE: The case of water and a historical survey. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:231-238. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.001
23. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S., Zhou W. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68(3):104919. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
24. Birk A.M., Eyssette R., Heymes F. Analysis of BLEVE overpressure using spherical shock theory. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 134:108-120. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.023
25. Zhang Q.-X., Liang D. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. *Procedia Engineering*. 2013; 52:602-606. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.192
26. Methods for the calculation of physical effects ("Yellow Book"). CPR 14E (parts 1 and 2). The Hague, Committee for the Prevention of Disasters. 3rd Ed. 1997.
27. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments. *Symposium series no.160. Hazards 25. Shell*, 2015.
28. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from released LPG from pressurized storage. *Fire Safety Journal*. 1982; 4:197-212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
29. Hasegawa K., Saito K. Study on the fireball following steam of n-pentane. *Proceedings of the Second International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Heidelberg, 1977; 297-304.
30. Roberts A.F. The effect of conditions prior to loss of containment of fireball behavior. *International Chemical Engineering Symposium. Series. No. 71*. Oxford, Pergamon Press, 1982.
31. Birk A.M., Andersson R.J., Coppens A.J. A computer simulation of a derailment accident: Part I — Model basis. *Journal of Hazardous Materials*. 1990; 25(1-2):121-147.
32. Wang K., Lui Z., Qian X., Huang P. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 46:13-22. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.001

33. Wang K., He Y., Lui Z., Qian X. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry. *Journal of Hazardous Materials*. 2019; 366:282-292. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.087
34. Raj P.K. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 140(3):444-464. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.029
35. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008; 149-158.
36. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(23):8716-8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114
37. Hansen O.R. Liquid hydrogen releases show dense gas behavior. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:1343-1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
38. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
39. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passenger cars. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996; 21(5):387-395. DOI: 10.1016/0360-3199(95)00092-5
40. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen. *Chemical Engineering Transactions*. 2022; 90:547-552. DOI: 10.3303/CET2290092

Поступила 08.05.2023, после доработки 28.05.2023;

принята к публикации 06.06.2023

Received May 8, 2023; Received in revised form May 28, 2023;

Accepted June 6, 2023

Информация об авторе

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the authors

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547, e-mail: yn_shebeko@mail.ru