

Adrian Bralewski^{a)*}, Jerzy Wolanin^{a)}

^{a)} The Main School of Fire Service / Szkoła Główna Służby Pożarniczej

* Corresponding author / Autor korespondencyjny: abralewski@sgsp.edu.pl

Analysis of Threats Involving Liquefied Natural Gas (LNG) – Review of Literature Sources

Analiza zagrożeń z udziałem skroplonego gazu ziemnego (LNG) – przegląd źródeł literaturowych

ABSTRACT

Aim: The purpose of this article is to review the literature on the risks associated with the transport, storage and processing of liquefied natural gas, and to lay a foundation for developing an LNG risk assessment methodology and the related State Fire Service response procedures. The authors focused on analysing the risks associated with the physicochemical properties of LNG. The reviewed publications explored scenarios related to the operation of LNG terminals.

Introduction: The construction of the LNG terminal in Świnoujście, the constantly growing global LNG industry, and the increasingly widespread use of LNG-fuelled vehicles increase the associated risks. Therefore, it is extremely important to recognise these risks. All preventive and corrective measures require a thorough knowledge of the issues they designed to address. This article is the first step towards the development of fire department procedures to manage LNG risks. It includes a summary of the main risks faced by emergency services and scenarios that could be useful for developing a methodology for LNG risk assessment.

Methodology: The analysis presented in the article is based on a review of selected Polish and foreign literature. We provide a general discussion of the global LNG industry and its history, and of the physicochemical properties of liquefied gas. Furthermore, we identify the risks associated with the physicochemical properties of LNG, and discuss scenarios involving LNG risks in the supply chain, as provided in the reviewed literature.

Conclusions: Based on a synthetic review of the literature, it can be concluded that the risks associated with the use of LNG have been thoroughly described in international literature. Polish publications on the subject are scarce. Awareness of LNG-related risks is crucial for the work of State Fire Service officers, as it is the basis for any preventive measures. Risk identification is the first step in the assessment. Existing literature offers few descriptions of "micro-scale" risks, involving, for instance, the use of LNG-powered vehicles. Macro-scale risks, on the other hand – those involving the transport and storage of large quantities of LNG – have been described in great detail.

Keywords: LNG, risks, hazards, risk assessment

Type of article: review article

Received: 17.09.2019; **Reviewed:** 21.10.2019; **Accepted:** 28.10.2019;

Authors' ORCID IDs: A. Bralewski – 0000-0001-9411-8736; J. Wolanin – 0000-0001-5915-6905;

The authors contributed equally to this article;

Please cite as: SFT Vol. 54 Issue 2, 2019, pp. 32–53, <https://doi.org/10.12845/sft.54.2.2019.3>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest przegląd literatury dotyczącej zagrożeń towarzyszących transportowi, magazynowaniu i przetwórstwu skroplonego gazu ziemnego (LNG) oraz stworzenie podstaw do opracowania metodyki oceny ryzyka niebezpiecznych zdarzeń z udziałem LNG, a także procedur reagowania na nie przez Państwową Straż Pożarną. W artykule autorzy skupili się na przeglądzie zagrożeń wynikających z właściwości fizykochemicznych LNG. W publikacji przywołano także pojawiające się w literaturze scenariusze zdarzeń związanych z obsługą terminali LNG.

Wprowadzenie: Budowa terminala LNG w Świnoujściu, stale rozwijający się światowy przemysł LNG oraz coraz powszechniejsze wykorzystanie pojazdów zasilanych tym paliwem powodują, że prawdopodobieństwo pojawienia się związanych z nim zagrożeń nieustannie rośnie. Aby zapobiegać tym zagrożeniom i podejmować wobec nich działania naprawcze, należy najpierw dokładnie je poznać. Niniejszy artykuł stanowi pierwszy etap prac ukierunkowanych na przeciwdziałanie niekorzystnym zdarzeniom związanym z LNG przez straż pożarną w ramach tworzenia procedur LNG. Autorzy zebrali główne zagrożenia, z jakimi mogą mieć do czynienia służby ratownicze, oraz scenariusze, które można wykorzystać do budowy metodyki oceny ryzyka zdarzeń z udziałem LNG.

Metodologia: Prezentowana w artykule analiza została przygotowana na podstawie przeglądu wybranej literatury polskiej i zagranicznej. Poruszono główne zagadnienia związane ze światowym przemysłem LNG i jego historią, a także właściwościami fizykochemicznymi skroplonego gazu ziemnego. Wskazano zagrożenia wynikające z właściwości fizykochemicznych LNG. Omówiono również pojawiające się w materiałach źródłowych scenariusze zagrożeń łańcucha dostaw LNG.

Wnioski: Na podstawie syntetycznego przeglądu piśmiennictwa można stwierdzić, że zagrożenia związane z wykorzystaniem LNG zostały bardzo dokładnie opisane w literaturze międzynarodowej. Na polskim rynku wydawniczym temat pozostaje omówiony w nielicznych publikacjach. Świadomość zagrożeń, jakie wiążą się z wykorzystaniem LNG, jest kluczowa dla pracy funkcjonariuszy Państwowej Straży Pożarnej, gdyż stanowi podstawę do podejmowania wszelkich środków zaradczych. Jednocześnie identyfikacja zagrożeń jest pierwszym punktem w ocenie ryzyka zagrożeń związanych z LNG.

W literaturze (zarówno polskiej, jak i zagranicznej) występują nieliczne opisy zagrożeń w tzw. skali mikro, czyli zagrożeń wynikających np. z używania pojazdów zasilanych LNG. Bardzo dokładnie zaś zostały opisane zagrożenia w skali makro, tj. te związane z transportem i magazynowaniem dużych ilości LNG.

Słowa kluczowe: LNG, zagrożenia, właściwości fizykochemiczne, ocena ryzyka

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

Przyjęty: 17.09.2019; **Zrecenzowany:** 21.10.2019; **Zatwierdzony:** 28.10.2019;

Identyfikatory ORCID autorów: A. Bralewski – 0000-0001-9411-8736; J. Wolanin - 0000-0001-5915-6905;

Proszę cytować: SFT Vol. 54 Issue 2, 2019, pp. 32–53, <https://doi.org/10.12845/sft.54.2.2019.3>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Introduction

With the construction of the LNG terminal in Świnoujście, Poland now has the capability to receive gas from various parts of the world. This has created opportunities for LNG imports comparable to those of Portugal and Belgium. Also, the use of LNG has increased across the country, as it became an alternative to LPG and conventional natural gas. It is mainly used as fuel for various types of vehicles, including public buses, which have proven successful in Warsaw, Olsztyn and Gdańsk, among other cities). Lorry manufacturers also provide LNG-powered vehicles. And Russia has undertaken a project involving LNG-powered trains. It is reasonable to expect that the growth of the LNG market in Poland will prompt the development of LNG-vehicle infrastructure – filling stations and mobile LNG stations. Therefore, we believe it is extremely important to know the risks associated with the transport, storage and use of this fuel.

In this article we review Polish and international literature on the subject in an attempt to identify and assess the risks associated with LNG use. We consider it to be the first step towards developing a methodology for LNG risk assessment. Below, we provide a brief outline of the global LNG market, followed by an analysis of the physicochemical properties of LNG, and a discussion of various scenarios involving LNG incidents and related risks. We should note here, however, that the aim of this article was not to explore in detail the methods for modelling specific LNG risks. Rather, we intended to facilitate a general understanding of the processes and problems underlying the use of this substance. In addition, we consider this article to be the first step towards defining procedures for emergency services to respond to LNG spill incidents. The discussion below has been prepared as part of the project called „Innowacyjne stanowisko badawczo-treningowe *Trenażer LNG* służące do opracowania tak-

Wstęp

Wraz z budową terminala LNG w Świnoujściu Polska otworzyła się na przyjmowanie gazu pochodzącego z różnych stron świata. Stworzyło to możliwości importowe skroplonego gazu ziemnego porównywalne do tych, którymi dysponują kraje takie jak Portugalia czy Belgia. Powstanie terminala LNG w Polsce przyczyniło się również do zwiększenia powszechności stosowania tego paliwa w kraju. Zaczęło być ono używane zamiennie z LPG i tradycyjnym gazem ziemnym. LNG znajduje tu zastosowanie jako paliwo zasilające wszelkiego rodzaju pojazdy. Z powodzeniem użytkowane są autobusy miejskie zasilane LNG (m.in. w Warszawie, Olsztynie, Gdańsku). Także producenci samochodów ciężarowych posiadają w swojej ofercie ciągniki zasilane tym paliwem. W Rosji natomiast powstał projekt pociągu zasilanego skroplonym gazem ziemnym. Spodziewać się można, że wraz z rozwojem rynku LNG w Polsce, w niedługim czasie rozwinię się także infrastruktura związana z obsługą pojazdów zasilanych LNG – np. stacje paliw, mobilne stacje LNG. W związku z powyższym niezwykle ważne zdaniem autorów jest poznanie zagrożeń, z jakimi wiąże się transport, magazynowanie i wykorzystanie tego rodzaju paliwa.

W artykule dokonano przeglądu literatury polskiej i międzynarodowej w kierunku próby identyfikacji i oceny zagrożeń związanych z użytkowaniem LNG. Praca ta stanowi pierwszy krok w procesie tworzenia metodyki oceny ryzyka zagrożeń związanych z LNG. Autorzy przedstawili ogólne informacje o rynku LNG na świecie, przeanalizowali właściwości fizykochemiczne LNG, scenariusze zdarzeń z udziałem LNG oraz związane z nimi zagrożenia. Jednocześnie autorzy pragną zaznaczyć, że celem artykułu nie było dokładne przybliżenie sposobów modelowania konkretnych zagrożeń LNG, a jedynie ogólne zrozumienie procesów i problemów związanych z wykorzystaniem omawianej substancji. Artykuł stanowi jednocześnie wprowadzenie do prac mających na celu określenie

tyki działań z wykorzystaniem sprzętu będącego na wyposażeniu PSP podczas zdarzeń LNG” (*“Trenażer LNG – a set of innovative training and research equipment designed to help develop operational tactics using State Fire Service equipment for LNG incidents”*) (Agreement No. DOB-BIO9/15/02/2018).

LNG history and market

Liquefied natural gas is commonly known as LNG. According to the main distributor of LNG in Poland, the history of this fuel goes back to the 19th century, when British chemist Michael Faraday (1791–1867) became the first man to have liquefied this gas [1]. In 1883 Jagiellonian University scientists Zygmunt Wróblewski and Karol Olszewski liquefied oxygen and nitrogen from air. However, it was not until 1896 that the cooling and liquefaction technology was patented by German engineer Karl Paul Gottfried von Linde. The first LNG liquefaction plant came into operation in 1917 in the US state of West Virginia, and the first commercial liquefaction facility was built in 1941 in Cleveland. Liquefied natural gas was transported for the first time after World War II. In January 1959 an LNG carrier, converted from a military freighter, set out from Lake Charles in the US state of Louisiana to Canvey Island in the UK [1]. This marked the emergence of the international industry of liquefied natural gas extraction and processing. It prompted efforts to find LNG suppliers from outside the US and South America. Later on, following the discovery of large natural gas deposits in Libya and Algeria, these two countries became the leading exporters of LNG [2].

Below are some of the key LNG-industry facts [3]:

- **258 MT (million tonnes)** – the volume of internationally traded LNG in 2016. There has been a clear and continuous upward trend in LNG trade (244.8 MT in 2014, 244.9 MT in 2015). The primary factors for this development include the increased demand in the Pacific basin, mainly Australia; the US starting to import LNG from the Mexican Bay; and the increased demand in Asia.
- **72.3 MT (million tonnes)** – the volume of LNG supplied under short- and mid-term LNG contracts in 2016, representing about 28% of the global trade volume, an approx. 4% decrease relative to 2015. This was caused by the need to bridge the energy gap caused by the Fukushima earthquake, and the increased capability of the US to extract shale gas. Faced with such a dynamic environment, the LNG market was forced to become more flexible.
- **\$5.52/MMBtu** – the average price per one million British thermal units (MMBtu) in northern Asia. This seems to be a high price compared to the one Poland paid for its first LNG transport to the Świnoujście terminal (\$4.1/MMBtu). Suspended gas supplies and low temperatures in 2016 in Asia were the primary causes.
- **340 MTPA (million tonnes per annum) – global LNG liquefaction capacity (2016)** – the global LNG liquefaction capacity increased by about 35 MTPA relative to 2015. This was caused by the continuous development of the

procedur reagowania ratowników na zdarzenia związane z wyciekami LNG. Prezentowane rozważania są wynikiem prac prowadzonych w ramach projektu „Innowacyjne stanowisko badawczo-treningowe *Trenażer LNG* służące do opracowania taktyki działań z wykorzystaniem sprzętu będącego na wyposażeniu PSP podczas zdarzeń LNG” (nr umowy DOB-BIO9/15/02/2018).

Historia i ogólne informacje o światowym rynku LNG

Skroplony gaz ziemny jest powszechnie znany jako LNG (Liquefied Natural Gas). Według głównego dystrybutora LNG na rynku polskim historia tego paliwa ma swój początek w XIX wieku, kiedy to brytyjski chemik Michael Faraday (1791–1867) jako pierwszy dokonał skroplenia gazu [1]. W 1883 roku przedstawiciele Uniwersytetu Jagiellońskiego – Zygmunt Wróblewski i Karol Olszewski – skroplili tlen i azot pochodzące z powietrza atmosferycznego. Jednak dopiero w 1896 roku technologię schładzania i skraplania opatentował niemiecki inżynier Karl Paul Gottfried von Linde. Pierwsza instalacja do skraplania LNG rozpoczęła działanie w Zachodniej Wirginii w Stanach Zjednoczonych w 1917 roku, a pierwsza komercyjna instalacja skraplająca została zbudowana w Cleveland w 1941 roku. Pierwszy transport skroplonego gazu ziemnego miał miejsce po II Wojnie Światowej. W styczniu 1959 roku przekształcony z wojskowego transportowca statek z ładunkiem LNG wypłynął z Lake Charles w Luizjanie (USA) i przybył do Canvey Island w Wielkiej Brytanii [1]. Wydarzenie to zapoczątkowało międzynarodowy przemysł związany z wydobyciem i przetwórstwem skroplonego gazu ziemnego. Przyczyniło się również do poszukiwania innych niż USA i Ameryka Południowa dostawców LNG. Po odkryciu złóż gazu ziemnego w Libii i Algierii, te właśnie kraje stały się głównymi eksporterami skroplonego gazu ziemnego [2].

O obecnym stanie i rozmiarze przemysłu związanego z obsługą LNG świadczyć mogą fakty pochodzące z roku 2016 [3]:

- **258 MT (milion ton) LNG** w światowym handlu w 2016 roku. Zauważalna jest ciągła tendencja wzrostowa w obrocie LNG (244,8 MT w 2014 roku, 244,9 MT w 2015 roku) spowodowana w głównej mierze zwiększoną podażą w basenie Pacyfiku, głównie w Australii; rozpoczęciem eksportu przez Stany Zjednoczone z Zatoki Meksykańskiej; zwiększonym popytem w Azji.
- **72,3 MT (milion ton)** osiągnął krótko i średniookresowy handel LNG w 2016 roku, co stanowi około 28% całego światowego obrotu i w stosunku do roku 2015 oznacza spadek o około 4% wartości. Było to spowodowane koniecznością uzupełnienia luki energetycznej wywołanej wstrząsami w Fukushima oraz wzrostem możliwości USA wynikających z pozyskiwania gazu łupkowego. Tak zmienne środowisko wymusiło potrzebę większej elastyczności rynku LNG.
- **\$5,52/MMBtu** – średnia cena za milion brytyjskich jednostek termicznych (MMBtu) w północnej Azji. W stosunku do ceny jaką zapłaciła Polska za pierwszy transport LNG do gazoportu w Świnoujściu (\$4,1/MMBtu), wydaje się być to cena wysoka. Wynika z przerw w dostawach gazu oraz niskich temperatur panujących w roku 2016 na kontynencie azjatyckim.

LNG processing industry. The year 2016 saw the emergence of a number of new projects such as Gorgon LNG, Australia Pacific LNG and Sabine Pass LNG, and additional production runs at Gladstone LNG (GLNG), Queensland Curtis LNG (QCLNG) and Malaysia LNG (MLNG). Global LNG liquefaction capacities are expected to grow in the years to come, as major projects are underway at Tangguh LNG (with a planned liquefaction capacity of 3.8 MPTA) and Elba Island LNG (2.5 MTPA).

- **795 MTPA – the global LNG regasification capacity** – the global LNG regasification capacity increased from 766.8 MPTA at the end of 2016 to 794.6 MTPA at the end of January 2017, mainly due to the availability of additional capacities in China, Japan, France, India, Turkey and South Korea. It is expected that the Philippines, Bahrain and Russia (Kaliningrad) will complete their LNG regasification projects in the coming years.
- **A 10% share of global gas trade in 2015** – natural gas contributes to approx. a fourth of global energy demand, and LNG accounts for 9.8% of this contribution.
- **439 LNG carriers** – the global LNG fleet, including conventional ships and floating storage regasification units (FRSU). A total of 31 new carriers were put into service in 2016, and 2 were decommissioned and scrapped.

As at 2016, LNG was exported by 18 countries. Leading global exporters of LNG include Qatar, accounting for about 30% of global LNG supplies, and Australia (about 17%). However, in terms of the regional distribution of LNG exports, it should be borne in mind that Asia-Pacific countries lead in global LNG exports – with a share of 38.6%, they are slightly ahead of Middle Eastern exporters (35.3%). Figure 1 shows individual countries' percentage share of global LNG exports.

- **340 MTPA (miliony ton rocznie)** – światowe zdolności w upłynnianiu LNG (2016). Globalna zdolność upłynniania LNG wzrosła o ok. 35 MTPA w stosunku do roku 2015. Wynika to z ciągłego rozwoju przemysłu związanego z przetwórstwem LNG. W roku 2016 powstały nowe projekty, takie jak Gorgon LNG, Australia Pacific LNG i Sabine Pass LNG, a także dodatkowe ciągi produkcyjne w Gladstone LNG (GLNG), Queensland Curtis LNG (QCLNG) i Malaysia LNG (MLNG). Przewiduje się, że w najbliższych latach światowe możliwości w skraplaniu LNG będą rosły za sprawą rozpoczętych inwestycji w Tangguh LNG (planowane możliwości skraplania rzędu 3,8 MPTA) oraz Elba Island LNG (2,5 MTPA).
- **795 MTPA – światowe zdolności w regazyfikacji LNG** Globalna zdolność regazyfikacji wzrosła do 766,8 MTPA do końca 2016 r. i do 794,6 MTPA do końca stycznia 2017 r., głównie za sprawą dodatkowej przepustowości dostępnej rynkach Chin, Japonii, Francji, Indii, Turcji i Korei Południowej. Przewiduje się, że w najbliższych latach projekty związane z regazyfikacją LNG zakończą Filipiny, Bahrajn i Rosja (Kaliningrad).
- **10% udziałów LNG w globalnych obrotach gazem w 2015 r.** – gaz ziemny stanowi około ¼ światowego zapotrzebowania na energię, z czego 9,8% jest dostarczane jako LNG.
- **439 statków stanowiących globalną flotę LNG** – w tym statki konwencjonalne i działające jako FRSU (Floating Storage Regasification Unit). W 2016 roku do użytku zostało oddanych 31 nowych statków, zaś 2 zostały wycofane z użytkowania i oddane na złom.

W 2016 roku LNG był eksportowany przez 18 krajów. Największymi światowymi eksporterami są Katar, z którego pochodzi ok. 30% światowego LNG, oraz Australia (ok. 17%). Uwzględniając rejonizację eksportu LNG, należy pamiętać, że dominujące znaczenie w światowym przemyśle LNG mają kraje Azji i Pacyfiku, których udział w światowym eksporcie surowca stanowił ok. 38,6%, nieznacznie wyprzedzając kraje Bliskiego Wschodu (35,3%). Procentowy udział poszczególnych krajów w światowym eksporcie LNG zaprezentowano na rycinie 1.

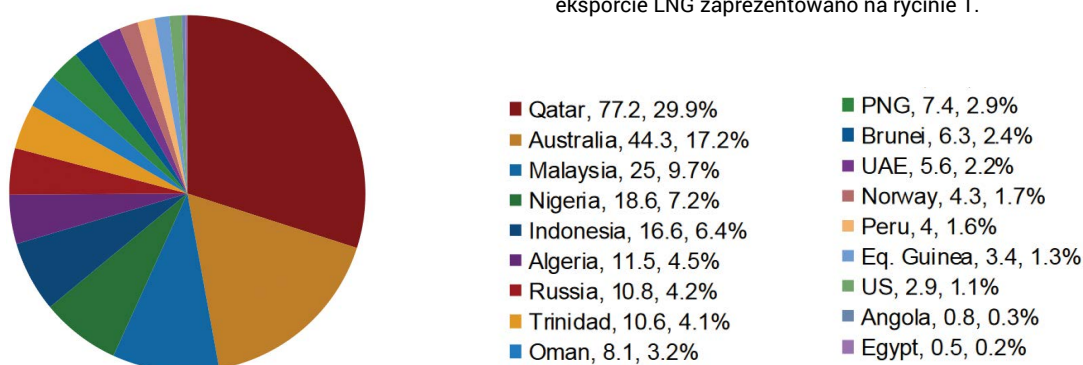


Figure 1. LNG exports (million tonnes per annum) and share of global LNG exports by country in 2016 (%)

Rycina 1. Eksport LNG (w milionach ton rocznie) i udział w eksporcie poszczególnych krajów w 2016 r. (w procentach)

Source/Źródło: International Gas Union, 2017 World LNG Report, Barcelona 2017, [3].

Leading LNG importers include Japan (32.3%), South Korea (13.1%), and China (10.4%). Accordingly, the Asia-Pacific region has had the largest demand for LNG, accounting for 53.6% of global LNG imports in 2016. Europe was the second largest importer in 2016 (see Figure 2). It is important to note that in the figure below Poland is included under the OTHER section, with imports of less than 2.5 MT, next to such countries as Singapore, Portugal, Belgium, Malaysia, Brazil, Lithuania, the Dominican Republic, Greece, the Netherlands, Israel, Canada, Jamaica and Columbia.

Z kolei do największych importerów LNG zaliczają się: Japonia (32,3%), Korea Południowa (13,1%) oraz Chiny (10,4%). Zatem wśród obszarów o największym zapotrzebowaniu na LNG wskazać należy rejon Azji/Pacyfiku, który w 2016 r. pochłaniał 53,6% światowego importu LNG. Drugie miejsce wśród największych importerów zajęła Europa (zob. ryc. 2). Warty zaznaczenia jest fakt, że na poniższym wykresie Polska została ujęta w części INNE, z importem poniżej 2,5 MT, obok takich krajów jak: Singapur, Portugalia, Belgia, Malezja, Brazylia, Litwa, Dominikana, Grecja, Holandia, Izrael, Kanada, Jamajka i Kolumbia.

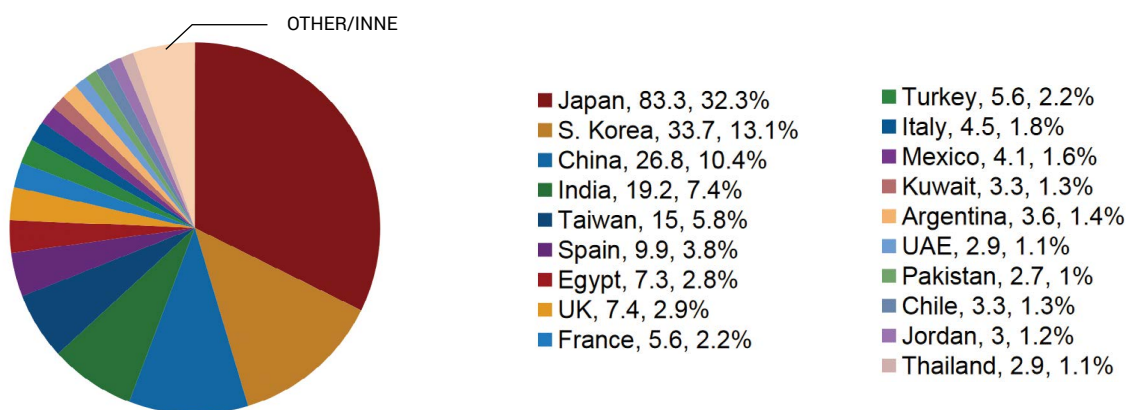


Figure 2. LNG imports (million tonnes per annum) and share of global LNG imports by country in 2016 (%)

Rycina 2. Import LNG (w milionach ton rocznie) i udział w rynku poszczególnych krajów w 2016 r. (w procentach)

Source/Źródło: International Gas Union, 2017 World LNG Report, Barcelona 2017, [3].

As LNG grows in popularity and continues to expand globally, the number of end users increases as well. This is attributable to the ever-growing number of low-emission cars. According to Natural Gas Vehicle Global, there has been a global upward trend in the number of natural-gas powered cars (Figure 3). Statistics show that as at the end of 2018 a total of 26,455,793 natural-gas powered cars were in use, and that 31,246 natural-gas filling stations were in operation.

Globalny obrót LNG i jego rosnąca popularność przekładają się również na większą powszechność stosowania gazu przez bezpośrednich użytkowników. Wiąże się to z ciągle rosnącą liczbą aut zasilanych paliwami niskoemisyjnymi. Według Natural Gas Vehicle Global w skali świata zaobserwować można tendencję wzrostową co do liczby samochodów zasilanych gazem naturalnym (ryc. 3). Jak pokazują statystyki, na koniec 2018 roku na świecie używanych było 26 455 793 aut zasilanych gazem oraz funkcjonowało 31,246 stacji, w których można zatankować tego rodzaju pojazdy.

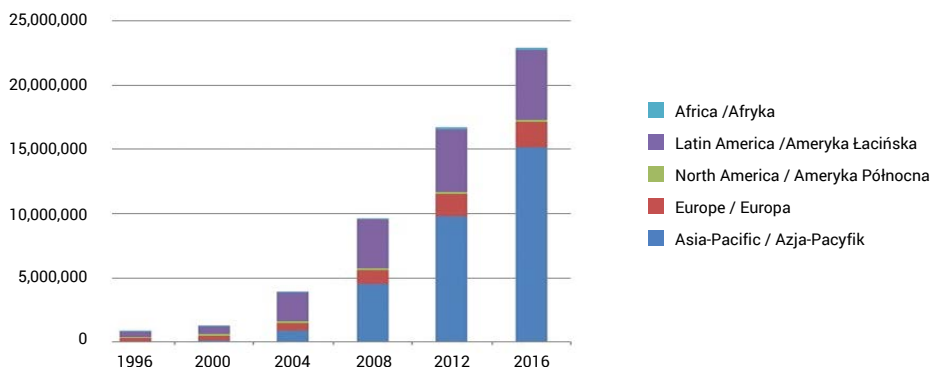


Figure 3. Number of natural-gas powered cars in 1996–2016

Rycina 3. Liczba samochodów zasilanych gazem naturalnym w latach 1996–2016

Source/Źródło: Natural Gas Vehicle Knowledge Base, Current Natural Gas Vehicle Statistics, www.iangv.org/current-ngv-stats/, [4].

The popularity of natural gas as a vehicle fuel varies globally. Asia has the most vehicles registered as natural-gas powered. It should be noted, however, that the statistics consider natural-gas powered vehicles as vehicles fuelled with CNG, LNG or biomethane (RNG).

Popularność gazu naturalnego jako paliwa napędzającego pojazdy uzależniona jest od regionu świata. Najwięcej pojazdów zasilanych gazem jest zarejestrowanych w Azji. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przedstawianych statystykach, jako pojazdy zasilane gazem naturalnym należy rozumieć pojazdy zasilane CNG, LNG i biometanem (RNG).

Table 1. Number of natural-gas powered vehicles by region
Tabela 1. Liczba pojazdów zasilanych gazem naturalnym w zależności od regionu świata

	Number of vehicles Liczba pojazdów	Number of stations Liczba stacji
Asia-Pacific / Azja-Pacyfik	18,509,677	18,735
Europe / Europa	1,863,167	4,893
North America / Ameryka Północna	205,000	1930
Latin America / Ameryka Łacińska	5,621,350	5480
Africa / Afryka	256,599	208

Source/Źródło: Natural Gas Vehicle Knowledge Base, *Current Natural Gas Vehicle Statistics*, www.iangv.org/current-ngv-stats/, [4].

Recently, there has been a tendency among municipal companies to replace their existing fleets with zero- or low-emission buses. This development has been often driven by environmentally friendly policies and efforts to improve air quality in cities. For instance, April 2018 data show that Miejskie Zakłady Autobusowe w Warszawie (MZA), a Warsaw bus company, had 60 zero- or low-emission buses (20 electric, 35 LNG-powered and 5 hybrid vehicles). In addition, the company invited tenders for the delivery of 80 CNG-powered buses [5].

The globalised LNG and, more generally, natural gas market, as well as the rising popularity of LNG in Poland due to the construction of the Świnoujście terminal, and the emergence of emission reduction policies, have all contributed to the growth of the low-emission vehicle market. Nevertheless, as observed by Dziechciarz, Lesiak and Bąk [6] – the transport of flammable gases involves a high risk of failure incidents related to the physical characteristics of gases, such as the low boiling point, flammability, and the fact that they can rapidly create flammable mixtures with air. Between 1994 and 2014, a total of 1,238 such incidents were recorded in the United States alone (an average of 62 incidents a year). The associated damages and losses amounted to \$1,719,312,622, an average of \$85,965,631 a year. A total of 41 people died and 195 were injured as a result [6]. These data prove that the use of LNG involves certain risks, such as those related to accidents of LNG-powered vehicles and infrastructural failures. Therefore, there is a need for risk assessment, as well as for procedures to be followed by rescue services during LNG-related incidents. To give the reader an idea of the scale of danger involved in LNG tank truck accidents, it is worth referring to the analysis by E. Planas, E. Pastor, J. Casal and J.M. Bonilla, in which they provide statistics on these kinds of incidents in Spain for the period of 1999–2017 [7].

W ostatnim czasie na rynku polskim zauważalna jest tendencja wymiany floty autobusów wykorzystywanych przez miejskie przedsiębiorstwa na autobusy niskoemisyjne lub nieemisyjne. Wynika to często z proekologicznej polityki oraz próby poprawy jakości powietrza w centrach miast. Dla przykładu, według danych z kwietnia 2018 r., Miejskie Zakłady Autobusowe (MZA) w Warszawie dysponowały 60 autobusami nisko lub nieemisyjnymi (20 pojazdów elektrycznych, 35 gazowych LNG i 5 hybryd). Jednocześnie MZA w Warszawie otworzyło przetarg na dostawę 80 autobusów zasilanych gazem ziemnym CNG [5].

Światowy rynek obrotu LNG i ogólnie gazem ziemnym, jak również rosnąca popularność LNG w Polsce wynikająca z budowy portu w Świnoujściu oraz polityki mającej na celu ograniczenie emisji spalin, sprzyjają rozwojowi rynku pojazdów niskoemisyjnych. Niemniej jednak – jak piszą Dziechciarz, Lesiak i Bąk [6] – transport gazów palnych wiąże się z dużym ryzykiem awarii z uwagi na właściwości fizyczne transportowanego medium, takie jak np. niska temperatura wrzenia, palność, tworzenie mieszanin palnych z powietrzem w krótkim czasie. W samych Stanach Zjednoczonych w latach 1994–2014 odnotowano 1238 takich wypadków (czyli średnio 62 wypadki rocznie). Łączna wartość zniszczeń i strat związanych z awariami wyniosła 1 719 312 622 USD, co daje średnio rocznie 85 965 631 USD. W sumie w wyniku tych wypadków zginęło 41 osób, a 195 zostało rannych [6]. Dane te potwierdzają ryzyko wystąpienia potencjalnych zdarzeń z udziałem LNG, takich jak wypadki pojazdów zasilanych LNG czy awarie związanej z tym gazem infrastruktury. Wiąże się z tym zatem potrzeba analizy ryzyka oraz konieczność opracowania procedur, które mogłyby być wykorzystane przez ratowników w czasie zdarzeń z udziałem LNG. Aby uzmysłowić sobie skalę zagrożenia związanego z wypadkami cystern przewożących LNG, warto przywołać analizę dokonaną przez E. Planas, E. Pastor, J. Casal oraz J. M. Bonilla, w której autorzy przytaczają liczbę tego typu zdarzeń, do których doszło w Hiszpanii w latach 1999–2012 [7].

Table 2. Road accidents involving LNG tank trucks in Spain in 1999–2017
Tabela 2. Wypadki drogowe z cysternami LNG, które miały miejsce w Hiszpanii w latach 1999–2017

Date Data	Place Miejsce	Outcome Efekt	Consequences Konsekwencje
27/01/1999	Sevilla	Tank truck's tyre fire / Pożar opony cysterny	–
10/10/2000	Jabugo (Huelva)	Tank truck tipover / Przewrócenie cysterny	–
12/06/2002	Beas (Huelva)	Tank truck tipover / Przewrócenie cysterny	–
22/06/2002	Tivissa (Tarragona)	Tank truck fire and explosion Pożar i eksplozja tankowca	Driver dead, several injured, serious house damage / Śmierć kierowcy, część osób została rannych, poważnie uszkodzony dom
04/12/2002	Huelva	Tank truck tipover Przewrócenie cysterny	Driver sustained minor injuries Lekko ranny kierowca
24/03/2004	Jabugo (Huelva)	Fire in driver's cabin / Pożar w kabinie pojazdu	-
11/10/2007	Algodonales (Cadiz)	Tank truck tipover and leakage Przewrócenie cysterny i wyciek	Driver dead Śmierć kierowcy
19/08/2008	Reolid (Albacete)	Tank truck tipover and leakage Przewrócenie cysterny i wyciek	Driver dead Śmierć kierowcy
25/10/2010	Sanlucar la Mayor (Huelva)	Valve leakage / Wyciek przez zawory	–
20/10/2011	Zarzalico (Murcia)	Tank truck fire and explosion Pożar i eksplozja tankowca	Driver dead, damaged house and filling station Śmierć kierowcy, uszkodzenie domu i stacji benzynowej
27/10/2011	Ribarroja (Valencia)	Tank truck tipover / Przewrócenie cysterny	-
21/11/2011	Palos (Huelva)	Damage to the rear part of an empty tank truck / Zniszczenie tylnej części pustej cysterny	Driver sustained serious injuries Poważnie ranny kierowca
14/01/2012	Puerto Lumbreras (Murcia)	Empty tank truck tipover Przewrócenie pustej cysterny	Driver sustained serious injuries Poważnie ranny kierowca
17/01/2012	Puerto Lumbreras (Murcia)	Empty tank truck tipover Przewrócenie pustej cysterny	–
24/01/2012	Huelva	Tank truck tipover / Przewrócenie cysterny	–

Source/Źródło: 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, [7].

Physicochemical properties of LNG

Liquefied natural gas (LNG) is used for regasification as a gas fuel (distributed via gas networks to individual consumers, used by gas-fired power plants, or as an alternative motor fuel) or chemical material. The volume of liquefied gas is about 600 times smaller than that of regasified gas, which makes it easier to transport and store [8]. LNG liquefies at temperatures of -166°C to -157°C (depending on LNG composition) at atmospheric pressure. Liquefied natural gas (liquid) is lighter than water, and has a density of 430–470 kg/m³. At low temperatures, close to liquefaction temperature, methane (gas) density is about 1,751 kg/m³ – higher than air density. When spreading, the gas may accumulate close to the ground. As its temperature increases to about -110°C, methane becomes lighter than air and easy to ventilate [9]. LNG composition depends on the source-gas composition and the liquefaction method used, and as such may slightly vary by origin. Table 3 presents the qualitative composition – depending on the place of extraction and loading.

Właściwości fizykochemiczne LNG

Gaz ziemny skroplony – LNG jest gazem stosowanym po regazyfikacji jako paliwo gazowe (rozprowadzane siecią gazową do odbiorców, stosowane w elektrowniach gazowych oraz jako alternatywne paliwo w silnikach) lub surowiec chemiczny. Skroplony gaz zajmuje objętość ok. 600 razy mniejszą niż gaz po regazyfikacji, a więc jest łatwiejszy do transportowania i magazynowania [8]. Skroplenie LNG następuje w temperaturze od -166°C do -157°C (temperatura uzależniona jest od składu LNG) przy ciśnieniu atmosferycznym. Skroplony gaz ziemny (ciecz) jest lżejszy od wody, a jego gęstość wynosi 430–470 kg/m³. Gęstość metanu (gazu) w niskiej temperaturze, bliskiej skraplaniu to ok. 1,751 kg/m³, a więc jest to gęstość większa od gęstości powietrza. Podczas rozprzestrzeniania się gaz ten może kumulować się tuż nad ziemią. Metan wraz ze wzrostem temperatury do wartości ok. -110°C staje się lżejszy od powietrza i łatwo poddaje się procesom wentylacyjnym [9]. Skład LNG uzależniony jest od składu gazu źródłowego oraz zastosowanej metody skraplania, co za tym idzie może się nieznacznie różnić w zależności od pochodzenia. Skład jakościowy – uzależniony od miejsca wydobycia i załadunku – został przedstawiony w tabeli 3.

Table 3. LNG characteristics by origin
Tabela 3. Charakterystyka LNG w zależności od źródeł

Origin	Nitrogen N2 %	Methane C1 %	Ethane C2 %	Propane C3 %	C4+%	TOTAL	LNG Density ⁽¹⁾ kg/irP	Gas Density ⁽²⁾ kg/rr ³ fn)	Expan- sion ratio m ³ (n)/ m ³ liq	GasGCV ⁽²⁾ MJ/m ³ (n)	Wobbe Index ⁽²⁾ NU/m ³ (n)
Australia – NWS	0.04	87.33	8.33	3.33	0.97	100	467.35	0.83	562.46	45.32	56.53
Australia – Darwin	0.10	87.64	9.97	1.96	0.33	100	461.05	0.81	567.73	44.39	56.01
Algeria-Skikda	0.63	91.40	7.35	0.57	0.05	100	446.65	0.78	575.95	42.30	54.62
Algeria-Bethioua	0.64	89.55	8.20	1.30	0.31	100	454.50	0.80	571.70	43.22	55.12
Algeria-Arzpw	0.71	88.93	8.42	1.59	0.37	100	457.10	0.80	570.37	43.48	55.23
Brunei	0.04	90.12	5.34	3.02	1.48	100	461.63	0.82	564.48	44.68	56.18
Egypt – Idku	0.02	95.31	3.58	0.74	0.34	100	437.38	0.76	578.47	41.76	54.61
Egypt – Damiella	0.02	97.25	2.49	0.12	0.12	100	429.35	0.74	582.24	40.87	54.12
Equatorial Guinea	0.00	93.41	6.52	0.07	0.00	100	439.64	0.76	578.85	41.95	54.73
Indonesia – Arun	0.08	91.86	5.66	1.60	0.79	100	450.96	0.79	571.49	43.29	55.42
Indonesia – Badak	0.01	90.14	5.46	2.98	1.40	100	461.07	0.82	564.89	44.63	56.17
Indonesia – Tangguh	0.13	96.91	2.37	0.44	0.15	100	431.22	0.74	581.47	41.00	54.14
Malaysia – Bintulu	0.14	91.69	4.64	2.60	0.93	100	454.19	0.80	569.15	43.67	55.59
Nigeria	0.03	91.70	5.52	2.17	0.58	100	451.66	0.79	571.14	43.41	55.50
Norway	0.46	92.03	5.75	1.31	0.45	100	448.39	0.78	573.75	42.69	54.91
Oman	0.20	90.68	5.75	2.12	1.24	100	457.27	0.81	567.76	43.99	55.73
Peru	0.57	89.07	10.26	0.10	0.01	100	451.80	0.79	574.30	42.90	55.00
Qatar	0.27	90.91	6.43	1.66	0.74	100	453.46	0.79	570.68	43.43	55.40
Russia – Sakhalin	0.07	92.53	4.47	1.97	0.95	100	450.67	0.79	571.05	43.30	55.43
Trinidad	0.01	96.78	2.78	0.37	0.06	100	431.03	0.74	581.77	41.05	54.23
USA – Alaska	0.17	99.71	0.09	0.03	0.01	100	421.39	0.72	585.75	39.91	53.51
Yemen	0.02	93.17	5.93	0.77	0.12	100	442.42	0.77	576.90	42.29	54.91

Last updated in 2012

¹ Calculated according to ISO 6578 [T = -160°C]

² Calculated according to ISO 6976 (0°C/0°C, 1.01325 bar)

Source/Źródło: GIIGNL, *The LNG industry GIIGNL ANNUAL REPORT 2018*, International Group of Liquefied Natural Gas Importers, 2019, [10].

Liquefied natural gas is a liquid that easily changes into gas (often seen as vapour). The physicochemical properties of LNG depend on its chemical composition [2]. Table 4 shows the basic physicochemical properties of LNG.

Skoплony gaz ziemny jest cieczą, która łatwo przechodzi w stan gazowy (często w formie widocznej pary). Właściwości fizykochemiczne LNG zależą od jego składu chemicznego [2]. Podstawowe właściwości fizykochemiczne LNG zaprezentowano w tabeli 4.

Table 4. Basic physicochemical properties of LNG
Tabela 4. Podstawowe właściwości fizykochemiczne LNG

Properties / Właściwości	
Molecular mass [Da] / Masa cząsteczkowa [a.j.m.]	16.4
Liquefaction temperature [°C] (at p = 1 bar) / Temperatura skraplania [°C] (przy p = 1 bar)	-161
Density [kg/m ³] (applies to liquids) / Gęstość [kg/m ³] (dotyczy cieczy)	410÷470
Odour / Zapach	odourless / bezwonny
Colour / Kolor	colourless / bezbarwny
Cloud-point temperature [°C] (at p = 1 bar) / Temperatura zmętnienia [°C] (przy p = 1 bar)	-187
Spontaneous ignition temperature [°C] (at p = 1 bar) / Temperatura samozapłonu [°C] (przy p = 1 bar)	540÷580
Toxicity / Toksyczność	non-toxic / nietoksyczny
Oxidising capability / Korozyjność	non-oxidising / niekorozyjny
Carcinogenicity / Kancerogenność	no proven carcinogenicity / nie stwierdzono
Flammability limit when vapourised in air [% vol.] / Granice palności par w powietrzu [% obj.]	5÷15
Water solubility / Rozpuszczalność w wodzie	very poor / bardzo słaba

Source/Źródło: Rosłonek G., *Skroplony gaz ziemny – LNG. Część I – Zagadnienia ogólne i podstawy procesu rozliczeniowego*, „Nafta-Gaz” 2016, [2].

LNG's properties related to the very low transport and storage temperatures make it necessary to use special cryogenic or insulated tanks.

Właściwości LNG, związane z bardzo niską temperaturą jego składowania i transportowania, wymagają użycia specjalnych zbiorników kriogenicznych lub izolowanych cieplnie.

Risks associated with the physicochemical properties of LNG

Potential LNG-related risks in the supply chain are attributable to this fuel's properties. R. Sedlaczek has identified three types of risks directly attributable to LNG's physicochemical properties, and associated with the storage and transport of this substance. These are: fire and explosion, rollover, and rapid phase transition (RPT) [11]. Other authors also mention such risks as: pool fire, jet fire, boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE) [12–13], flash fire, and vapour cloud fire [14–15].

Zagrożenia wynikające z właściwości fizykochemicznych LNG

Zagrożenia, które mogą pojawić się w łańcuchu dostaw LNG, wiążą się właściwościami tego paliwa. R. Sedlaczek wskazuje na trzy typy zagrożeń, które wynikają bezpośrednio z właściwości fizykochemicznych LNG oraz wiążą się z magazynowaniem i transportowaniem tej substancji. Są to: zagrożenia pożarowo-wybuchowe; *rollover* oraz zjawisko *Rapid Phase Transition* (RPT) [11]. Inni autorzy wskazują dodatkowo na możliwość wystąpienia takich zjawisk jak: pożar powierzchniowy (*pool fire*), pożar strumieniowy (*jet fire*), wybuch rozszerzających się par cieczy wrzącej (BLEVE) [12–13], pożar błyskawiczny (*flash fire*) oraz wybuch chmury parowej (*vapour cloud fire*) [14–15].

LNG-related fire and explosion risks

LNG vapours are extremely flammable. When released, they have a low temperature and density higher than air. Floating near the ground, they produce mist and cause sudden cooling (freezing) of the surroundings. Natural gas can form explosive mixtures. It is lighter than air, and accumulates in upper sections of enclosed spaces. Ignition or explosion can be caused by flame, sparks or static electricity [8]. It should be noted, however, that LNG becomes lighter than air by absorbing heat

Zagrożenia pożarowo-wybuchowe LNG

Pary LNG są skrajnie łatwopalne. W chwili uwolnienia mają niską temperaturę i gęstość większą od powietrza. Utrzymują się przy podłożu, wywołują powstanie mgły i gwałtowne schłodzenie (zmrożenie) otoczenia. Gaz ziemny tworzy mieszaniny wybuchowe. Jest lżejszy od powietrza, gromadzi się w górnej części pomieszczeń. Zapłon lub wybuch mogą być spowodowane przez: płomień, iskry lub wyładowania elektryczności statycznej [8]. Warto jednak zwrócić uwagę, że LNG staje się lżejszy od powietrza wsku-

from the surroundings. This happens once it reaches a temperature of about -110 C° .

The air-gas mixture can ignite when the air gas concentration is between the lower (LEL) and upper explosive limits (UEL). It is assumed that the LEL and UEL for LNG is 5% and 15%, respectively. This means that if the gas concentration is lower than 5%, LNG will be too diluted to ignite. Conversely, when the concentration exceeds 15%, there is not enough oxygen in the air for the gas to combust [11]. However, flash fire and vapour cloud explosion can occur in such conditions.

The main risk associated with the storage of LNG involves its cryogenic release and subsequent combustion [16]. This release can be the effect of a physicochemical change, failure, or accident. Pool fires and jet fires are considered main LNG-related fire hazards. Explosion hazards include BLEVE and VCE.

Pool fire

A pool fire is a fire burning above a horizontal pool of flammable liquid. It cannot be extinguished as long as flammable material is available. A pool fire develops when a pool of LNG near the ignition source has been evaporating to the point that it becomes flammable. And once this limit has been reached, ignition occurs. The resulting fire spreads from the ignition source and causes further LNG evaporation. Due to the thermal effect, pool fires on water are more dangerous than those on land, as water accumulates heat better than the ground. Thermal radiation from a pool fire may injure unprotected individuals and damage property – even at a large distance from the source of fire [17].

An interesting approach to assessing the impact of LNG pool fires was proposed by A. Markowski and D. Siuta [18]. Their uncertainty-adjusted assessment procedure is based on fuzzy logic and Monte Carlo methods. It allows a precise determination of the range of impact, thus facilitating a more realistic management of potential risks, as compared to commonly applied single-point models. These same authors took a similar approach to analysing uncertainty for the computation of LNG dispersion. The main sources of uncertainty in the LNG dispersion model that they identified include the rate of release, the LNG pool radius, the surface thermal flux, wind speed, surface roughness, and the average time [18].

Jet fire

A jet fire is a narrow, long and turbulent fire resembling a burner flame. LNG-related jet fires occur when the liquid is released under pressure through an opening or a crack in the tank. These types of fires can compromise the structural integrity

tek pobierania ciepła z otoczenia. W chwili gdy osiągnięto na temperaturę ok. -110 C° , staje się lżejszy od powietrza.

Zapłon mieszaniny powietrzno-gazowej jest możliwy wówczas, gdy stężenie gazu w powietrzu będzie mieściło się pomiędzy dolną (DGW) a górną (GGW) granicą wybuchowości. Przyjmuje się, że dla LNG DGW wynosi 5%, zaś GGW – 15%. Oznacza to, że jeśli stężenie gazu będzie mniejsze niż 5%, wówczas gaz będzie zbyt rozcieńczony, aby mógł ulec zapłonowi. Gdy z kolei wartość stężenia przekracza 15%, w środowisku takim nie ma wystarczającej ilości tlenu do spalania gazu [11]. Jednocześnie są to warunki do zaistnienia pożaru błyskawicznego (*flash fire*) oraz wybuchu chmury parowej (VCE).

Główne zagrożenie związane z magazynowaniem LNG dotyczy uwolnienia kriogenicznej substancji, a następnie jej zapłonu [16]. Uwolnienie można traktować jako wynik przemiany fizykochemicznej, awarii lub wypadku. Jako główne zagrożenia pożarowe LNG wymienia się pożar powierzchniowy (*pool fire*), pożar strumieniowy (*jet fire*). Z kolei jako zagrożenia wybuchowe wskazać można BLEVE oraz VCE.

Pożar powierzchniowy (*pool fire*)

Mianem pożaru powierzchniowego (*pool fire*) określane jest pożar ponad rozlewiskiem cieczy palnej. Pożaru powierzchniowego nie można ugasić do czasu wyczerpania się materiału palnego. Mechanizm powstawania *pool fire* występuje, gdy rozlewisko LNG w okolicy źródła zapłonu paruje do granicy, w której osiągnięto palność. Po osiągnięciu tej granicy ulega zapłonowi. Powstały w wyniku zapłonu pożar rozprzestrzenia się od źródła zapłonu i powoduje dalsze parowanie cieczy LNG. Ze względu na efekt termiczny, *pool fire* na powierzchni wody jest jeszcze bardziej niebezpieczny niż pożar tego samego typu na lądzie (woda lepiej kumuluje ciepło niż ziemia). Promieniowanie cieplne pochodzące z *pool fire* może zranić niezabezpieczone osoby i uszkodzić mienie – nawet w znacznej odległości od źródła pożaru [17].

Ciekawe podejście do oceny skutków pożaru powierzchniowego LNG prezentują A. Markowski i D. Siuta [18]. Proponowane przez autorów postępowanie w przypadku oceny skutków z uwzględnieniem niepewności bazuje na systemie logiki rozmytej (*fuzzy logic*) oraz metodzie Monte Carlo. Zastosowana przez autorów technika pozwala na precyzyjne określenie zasięgu skutków, co w przeciwieństwie do stosowanych modeli jednopunktowych, daje możliwość bardziej realnego zarządzania potencjalnym zagrożeniem. Ci sami autorzy w podobny sposób analizują niepewność w obliczeniach dyspersji LNG. Wskazują, że głównymi źródłami niepewności w modelu dyspersji LNG są: szybkość uwalniania, promień rozlewiska LNG, strumień ciepła z powierzchni, prędkość wiatru, chropowatość powierzchni i średni czas [19].

Pożar strumieniowy (*jet fire*)

Mianem pożaru strumieniowego określa się wąski, długi i turbulentny pożar, przypominający płomień z palnika. *Jet fire* w przypadku LNG występuje, gdy ciecz jest uwalniana pod ciśnieniem przez otwór bądź pęknięcie w zbiorniku. Pożary tego typu mogą naruszać

of buildings, equipment and infrastructure, acting virtually like a burner. They generate very large fluxes of heat and can burn through most materials if given sufficient exposure time. However, jet fires have a very narrow range, especially when caused by the combustion of a flammable liquid, and are usually not larger than 50 m. Consequently, jet fires pose a potential risk primarily for LNG terminals, pumping stations and filling stations [20]. Nevertheless, it is possible that the increasing popularity of mobile LNG filling stations and the growing transport of LNG using tank trucks will generate jet fire risks associated with station failures and truck accidents.

Jet fire impact analyses should give special consideration to the radiation coming from the flux of heat, and to the direct flame impact on the exposed object. From a human impact perspective, modelling the former is more relevant, since the latter always results in the death of all people within the fire zone. When considering property damage and destruction, both aspects are equally relevant. The modelling in this case is largely based on experimental data instead of computational procedures. Since it is very difficult to model a direct fire impact, most authors focus on heat radiation [20].

Boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE)

BLEVE is defined by the Centre for Chemical Process Safety (CCPS) as a sudden release of a large mass of pressurised superheated liquid to the atmosphere. According to the CCPS, its primary causes include the absorption of large amounts of energy, impact by an object, corrosion, manufacturing defects of containers, and internal overheating [21].

The mechanism of BLEVE is as follows [20]:

1. A vessel with compressed liquid gas is exposed to heat load, or damaged due to impact, fatigue or corrosion.
2. The vessel fails.
3. Pressure drops immediately, and an explosion occurs.
4. The vessel is shattered.
5. A fireball or toxic gas dispersion results.

A team of researchers under E. Planas published a case study of an LNG tank truck accident involving BLEVE [7]. The accident took place on the A-91 motorway linking Puerto Lumbreras with Granada. On the site of the accident, the motorway was separated by a 10-metre fault. An occupied house was located 90 m north of the site. Near the opposite lane of the motorway, about 125 m from the explosion site, there was a service area with a filling station, a café, and a rest area for truck drivers. At around 8 a.m. a west-bound truck carrying two large precast concrete slabs broke down. The driver stopped on the shoulder, partly blocking the lane. More or less twenty minutes later an LNG tank truck hit the parked vehicle's back. The tank truck driver lost control over the vehicle due to the collision. The vehicle went past the parked truck, passed through the road barrier, and fell into a ditch on the opposite side of the road, 20 m from the parked truck. Several people in the service area witnessed the

konstrukcje budynków, urządzeń i działac dosłownie jak palnik. Wytwarzają one bardzo duże strumienie ciepła i – przy założeniu odpowiedniego czasu ekspozycji – są w stanie przepalić większość materiałów. Jednak zasięg *jet fire* jest bardzo zawężony, zwłaszcza w przypadku cieczy palnej i zwykle nie przekracza 50 m. Zatem zagrożenie związane z *jet fire* ogranicza się zwykle do terminali LNG oraz przepompowni i stacji tankowania [20]. Istnieje jednak prawdopodobieństwo, że wraz ze zwiększającą się popularnością mobilnych stacji ładowania LNG oraz rosnącym transportem LNG przy użyciu cystern, *jet fire* będzie mógł wystąpić w czasie awarii stacji czy wypadków z udziałem pojazdów przewożących LNG.

Analizy skutków *jet fire* powinny uwzględniać przede wszystkim promieniowanie pochodzące ze strumienia ognia oraz bezpośrednie uderzenie płomieni w narażony obiekt. Z punktu widzenia skutków pożaru dla ludzi ważniejsze jest zamodelowanie pierwszego przypadku, ponieważ drugi zawsze kończy się śmiercią wszystkich osób znajdujących się strefie pożaru. Z kolei w analizie zagrożenia w aspekcie uszkodzeń i zniszczeń obiektów obie kwestie są równie ważne. Modelowanie opiera się w tym przypadku w głównej mierze na danych doświadczalnych, a nie na obliczeniach. Z racji tego, że bezpośrednie uderzenie strumienia ognia jest bardzo trudne do zamodelowania, większość autorów skupia się na promieniowaniu cieplnym [20].

Wybuch rozszerzających się par cieczy wrzącej (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, BLEVE)

Zjawisko BLEVE zostało zdefiniowane przez Centre for Chemical Process Safety jako nagłe uwolnienie do atmosfery dużej masy przegrzanej cieczy pod ciśnieniem. Jako główne przyczyny tego zjawiska podawane są: absorpcja dużej ilości energii, trafienie pocisku, korozja, wady produkcyjne zbiorników, w których przechowywana jest ciecz czy przegrzanie na skutek zewnętrznego podgrzewania [21].

Mechanizm przebiegu zjawiska BLEVE [20]:

1. Zbiornik zawierający sprężony gaz płynny przyjmuje obciążenie cieplne lub ulega uszkodzeniu ze względu na uderzenie, zmęczenie materiału lub korozję.
2. Zbiornik ulega uszkodzeniu.
3. Występuje natychmiastowe obniżenie ciśnienia i eksplozja.
4. Zbiornik ulega rozerwaniu.
5. Występuje zjawisko kuli ognia lub toksycznej dyspersji.

Zespół E. Planas w swojej publikacji opisał przykład wypadku z cysterną przewożącą LNG, podczas którego doszło do BLEVE [7]. Wypadek ten miał miejsce na autostradzie A-91 łączącej Puerto Lumbreras z Granadą. W miejscu wypadku autostrada jest ograniczona przez 10-metrowy uskok skalny. W odległości 90 m na północ od miejsca wypadku znajduje się zamieszkały dom. Obok przeciwległego pasa autostrady, ok. 125 m od miejsca, w którym doszło do eksplozji, znajduje się strefa serwisowa ze stacją benzynową, kawiarnią i miejscem do odpoczynku dla kierowców samochodów ciężarowych. Około godziny 8 ciężarówka jadąca na zachód z dwiema dużymi prefabrykowanymi płytami betonowymi zepsuła się i zatrzymała na poboczu autostrady, częściowo blokując pas. Mniej więcej dwadzieścia minut później cysterna LNG uderzyła w tył zaparkowanego pojazdu. Z powodu kolizji kierowca cysterny stracił kontrolę nad pojazdem. Cysterna minęła zaparko-

accident. After coming to a halt, the LNG tank truck burst into flames. The fire rapidly expanded, making it impossible for the driver of the parked truck to save the man trapped inside the tanker. The emergency services in Lorca received the accident call at about 8:21. They were based at a distance of 31 km from the site. When firefighters arrived at the scene, the tanker had already lost much of its insulating layer. Heavy smoke emanating from the fire was visible from a large distance, indicating that the container contents were burning. The fire department decided to secure the fire area within a radius of 600 m, and to shut off traffic due to the risk of explosion. The fire engines were stationed in a distance of 150 m, and everyone in the service area, as well as several witnesses watching from a motorway bridge, were evacuated. Moments before the explosion a piercing whistling sound could be heard coming from the truck, and the fire intensified. This prompted a decision to withdraw to a distance of 200 m. Soon after the tanker exploded [7].

Based on this example, it is evident that case studies of BLEVE incidents could be helpful in modelling the fire behaviour of pressurised cryogenic-substance containers.

waną ciężarówkę, uszkodziła barierkę i wpadła do rowu po przeciwnej stronie drogi, 20 m przed ciężarówką. Świadcami zdarzenia było kilka osób, które znajdowały się w strefie serwisowej. Po zatrzymaniu się cysterna nagle stanęła w płomieniach. Ogień szybko przybrał bardzo duże rozmiary, które uniemożliwiły kierowcy zniszczonego pojazdu uratowanie uwięzionego w środku kolegi. Służby ratunkowe z miejscowości Lorca otrzymały telefon informujący o wypadku o godzinie 8:21. Ich siedziba oddalona była o 31 km od miejsca wypadku. Kiedy strażacy dotarli na miejsce, tankowiec stracił już znaczną część izolacji. W pożarze wydzielał się dym widoczny z dużej odległości. Świadczyło to o spalaniu zawartości zbiornika. Strażacy postanowili zabezpieczyć obszar o promieniu 600 m i całkowicie zredukować ruch na drodze ze względu na ryzyko wybuchu. Wozy strażackie zostały ustawione w odległości 150 m, a wszystkich ludzi ze strefy serwisowej oraz kilku świadków obserwujących scenę z mostu na autostradzie ewakuowano. Chwilę przed wybuchem słychać było przenikliwy gwizd cysterny, ogień nasilił się, a strażacy podjęli decyzję o wycofaniu się na odległość 200 m. Zaraz po tym nastąpiła eksplozja cysterny [7].

Przywołany przykład pokazuje, że studia przypadku dotyczące zjawiska BLEVE mogą być pomocne przy modelowaniu zbiorników ciśnieniowych przeznaczonych do przechowywania substancji kriogenicznych w warunkach pożaru.

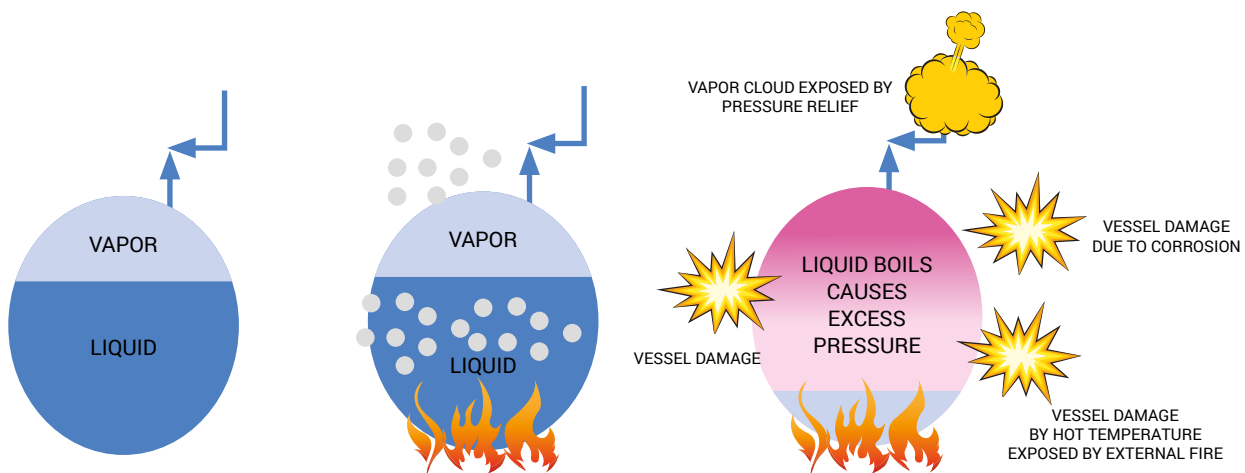


Figure 4. Illustrates the BLEVE mechanism

Rycina 4. Przebieg zjawiska BLEVE

Source/Źródło: Kaushik M., *What is Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) on Gas Carrier Ships?*,

<https://www.marineinsight.com/tech/what-is-boiling-liquid-expanding-vapour-explosion-bleve-on-gas-carrier-ships/>, [23].

Rapid phase transition (RPT)

Rapid phase transition is a very rapid evaporation of LNG caused by a large amount of heat coming from the water on which LNG has accidentally spilled, or the water with which LNG has come into contact in an insulated container [11]. D.S. Burgess, J.N. Murphy and M.G. Zabetakis discussed the behaviour of LNG spillage onto water in a 1970 report commissioned by the US Department of the Interior. At the time, explo-

Gwałtowne przejście fazowe (Rapid Phase Transition, RPT)

Zjawisko gwałtownego przejścia fazowego (Rapid Phase Transition, RPT) można opisać jako raptowne odparowanie LNG na skutek dostarczenia dużej ilości ciepła pochodzącego z wody, na którą wypływa LNG w czasie przypadkowego wycieku; bądź z którą kontaktuje się skroplony gaz ziemny w izolowanym zbiorniku [11]. O zjawisku zachowania się LNG w czasie wycieku na

sions caused by LNG leakage onto water were not referred to as RPT. However, already at that point the authors of the report recommended that “explosions caused by LNG spills onto water” be factored in when managing LNG transport. They also emphasised the uncertainty involved in scaling such explosions, especially in the case of minor spills [24]. RPT involves an uncontrolled spill of LNG onto water. As noted by J.A. Fay, such spills may be caused by accidental collisions involving LNG ships or targeted terrorist attacks, such as the one carried out in 2000 against the USS Cole [25]. The author also presented the computational procedure for a number of scenarios involving various tank and tank-liquid positions relative to the water surface. Similar assumptions were made by the authors of the “Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)” report.

powierzchnię wody pisali już D. S. Burgess, J. N. Murphy oraz M.G. Zabetakis w raporcie z 1970 r. sporządzonym na potrzeby Departamentu Spraw Wewnętrznych USA. Wówczas wybuchy związane z wyciekami LNG na powierzchnię wody nie były jeszcze określane mianem RPT. Już wtedy jednak autorzy raportu wskazywali na konieczność uwzględnienia „wybuchów powstałych w wyniku wycieku LNG na wodę” w zarządzaniu transportem LNG. Zwracali również uwagę na brak pewności w skalowaniu tych wybuchów, zwłaszcza w przypadku niewielkich wycieków [24]. RPT zawsze wiąże się z niekontrolowanym wyciekami LNG na powierzchnię wody. Jak wspomina J.A. Fay, wycieki te mogą powstać w efekcie przypadkowej kolizji statku transportującego LNG lub celowych działań terrorystycznych, które miały miejsce np. w 2000 r. na USS Cole [25]. Autor przedstawia jednocześnie proces obliczeniowy dla różnych scenariuszy usytuowania zbiornika i cieczy w zbiorniku względem powierzchni wody. Podobne założenia przyjęli autorzy raportu „Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)”.

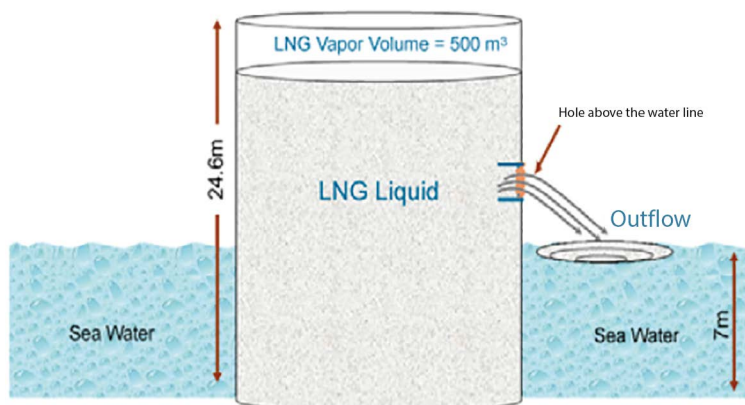


Figure 5. LNG spill from a hole above the water line

Rycina 5. Przypadek wycieku LNG, gdy otwór wycieku usytuowany jest powyżej poziomu wody

Source/Źródło: Melhem G., Saraf S., Ozog H., *Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)*, ioMosaic Corporation, 2006, [26].

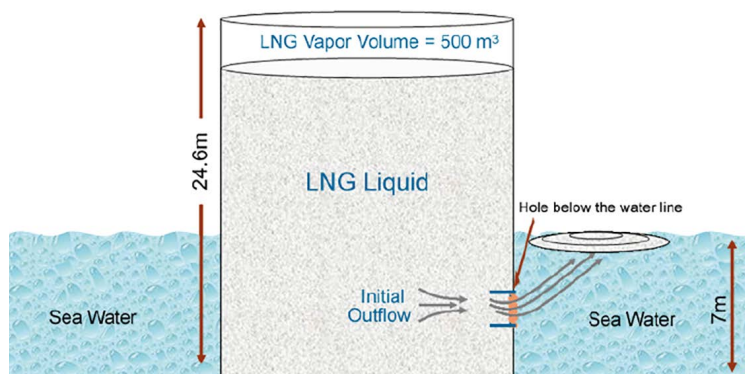


Figure 6. LNG spill from a hole below the water line and below the LNG liquid level

Rycina 6. Przypadek wycieku LNG, gdy otwór wycieku usytuowany jest poniżej poziomu wody oraz poniżej poziomu LNG

Source/Źródło: Melhem G., Saraf S., Ozog H., *Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)*, ioMosaic Corporation, 2006, [26].

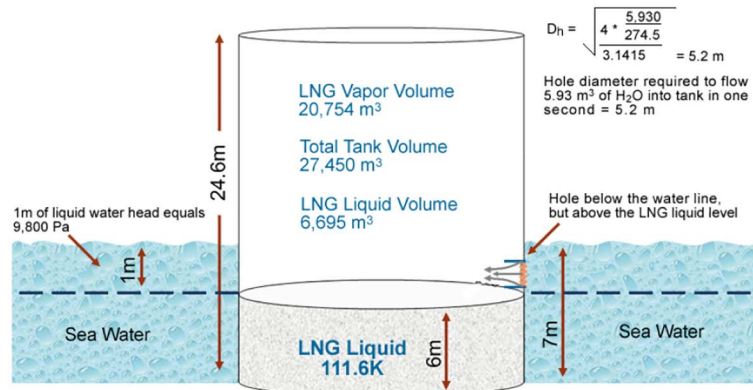


Figure 7. LNG spill from a hole below the water line and above the LNG liquid level

Rycina 7. Przypadek wycieku LNG, gdy otwór wycieku usytuowany jest poniżej poziomu wody oraz powyżej poziomu LNG

Source/Źródło: Melhem G., Saraf S., Ozog H., *Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)*, ioMosaic Corporation, 2006, [26].

They identified three situations in which RPT can occur [25]:

- when LNG spills from a hole above the water line,
- when LNG spills from a hole below the water line,
- when LNG spills from a hole below the water line but above the LNG liquid level in the cargo tank.

An abrupt evaporation of a cryogenic liquid caused by heat absorbed from water may lead to a sudden rise in pressure. In extreme cases this is considered a physical explosion. According to J. Woodward and R. Pitbalado, RPT can be described in four steps [20]:

1. The Premixing Phase – as soon as the two liquids (water and LNG) meet, a stable vapour mix allows large quantities to intermix because of density and velocity differences, as well as vapour production. The vapour film causes relative low heat transfer between the two liquids. The timescale is in the range of seconds and the length scale is in the range of centimetres.
2. The Triggering Phase – some events produce destabilisation of the vapour film, allowing liquid–liquid contact, causing enhanced heat transfer and pressurisation. The triggering mechanism may include pressure pulses from impact, coolant entrapment within the hot fluid and thermal film destabilisation.
3. The Propagation Phase – LNG, as a coolant, is rapidly heated and pressurised, and this may cause “thermal fragmentation” or “fine fragmentation” as the surrounding hot liquid is penetrated by cold to create a large surface area of contact between the two liquids.
4. The Expansion Phase – the resulting high-pressure mixture expands behind a propagation front against the inertial constraints imposed by the environment. The damage potential depends on how quickly the expansion can be relieved.

When looking at these descriptions of RPT, two interesting questions come to mind to which we have found no answers in

Wskazują oni trzy możliwości powstania RPT [25]:

- gdy otwór wycieku usytuowany jest powyżej poziomu wody,
- gdy otwór wypływu LNG znajduje się poniżej poziomu wody,
- gdy otwór znajduje się poniżej poziomu wody, ale powyżej poziomu LNG w zbiorniku.

Gwałtowne odparowanie cieczy kriogenicznej wywołane ciepłem dostarczanym z wody może być przyczyną nagłego wzrostu ciśnienia, co w ekstremalnych przypadkach może być uznane za wybuch fizyczny. Według J. Woodwarda i R. Pitbalado RPT opisać je można poprzez zastosowanie czterech kroków [20]:

1. Faza mieszania wstępnego – w momencie gdy dwie cieczki (woda i LNG) się spotkają, stabilna warstwa pary (tzw. film parowy) pozwala na ich mieszanie się w dużych ilościach. Jest to efekt różnicy gęstości i prędkości cieczy, jak również zjawiska wytwarzania pary. Film parowy powoduje relatywnie niski przepływ ciepła pomiędzy dwiema cieczkami. Czas trwania zjawiska mieści się w jednej sekundzie, zaś odległość między warstwami wynosi kilka centymetrów.
2. Faza wyzwolenia – niektóre zdarzenia powodują destabilizację warstwy filmu parowego. Stwarzają możliwość kontaktu obu cieczy, a tym samym zwiększoną wymianę ciepła i wzrost ciśnienia. Mechanizm wyzwalający może powodować impulsy ciśnienia będące skutkiem uwięzienia chłodnego LNG w ciepłej wodzie i destabilizację filmu parowego.
3. Faza propagacji – chłodziwo, jakim jest LNG, jest gwałtownie podgrzewane i poddawane działaniu ciśnienia, co może powodować „fragmentację termiczną” lub „drobną fragmentację”. Zimna ciecz (LNG) i otaczająca ją ciepła ciecz (woda) przenikają się wzajemnie. Tworzy się między nimi duża powierzchnia styku.
4. Faza rozprzestrzeniania się – wysokociśnieniowa mieszanina rozszerza się oraz postępuje w kierunku bezwładnościowych ograniczeń narzuconych przez środowisko. Zniszczenia zależą od tego, jak szybko możliwość rozprzestrzeniania się będzie możliwa.

the analysed literature, and which could provide some interesting insights. These are:

1. What is the minimum amount of LNG required for RPT to occur?
2. Is it possible to create conditions allowing RPT to occur on land?

LNG storage tank stratification (rollover)

A rollover (also known as LNG storage tank stratification) is a physical process whereby two or more LNG layers of different composition intermix. This typically produces massive and rapid evaporation of gas, and a surge in tank pressure, which is beyond the tank's capacity and cannot be controlled by operators. Hence, when designing LNG storage tanks, consideration should be given to the consequences of structural tank damage and the uncontrolled discharge of the flammable gas into the atmosphere [27]. It is common for LNG compositions to vary due to the global trend of diversification of supplies. In effect, short-term contracts are becoming more popular than long-term contracts. This means that terminals must handle LNG supplies from various parts of the world, with varying LNG compositions. Other factors contributing to this development may include [11]:

- long-term LNG storage – e.g. to offset seasonal variations in gas supplies (the “ageing” of LNG);
- changes in LNG quality;
- cyclical processes of pumping LNG in and out;
- a large nitrogen content in the stored LNG.

Traditionally, LNG is stored in heavily insulated tanks. Usually, offshore terminals are connected to above-ground cylindrical tanks which allow storage of up to 250,000 m³ of gas at a working pressure of up to 250 mbar. Spherical and prismatic tanks used on LNG carriers can hold up to 50,000 m³ of gas at the same working pressure as storage tanks. Smaller amounts of LNG, up to 10,000 m³, can be stored in vacuum insulated tanks (VIT) at a pressure of 5 bar. Heat penetrating into the tank through its insulation is, however, a regular occurrence. LNG heating, in turn, causes surface-layer stratification and evaporation. The rate of evaporation varies in the range of 0.02–0.2% of the tank's capacity per day, depending on the tank type [13]. To illustrate how real the risk of rollover is, it is worth mentioning the study undertaken by GIINGL (the International Group of Liquefied Natural Gas Importers) in 1981 to investigate rollover-associated incidents. The study identified 41 incidents which occurred in 22 plants between 1970 and 1982. Most of the incidents were found to have been caused by liquids of different densities intermixing in the tank. Four incidents were identified as resulting from nitrogen accumulation [28].

Rollover is essentially a thermodynamic process. Figure 8 on the left shows an LNG tank without stratification. As methane evaporates from the surface, which cools down due to heat from

Wśród informacji i opisów związanych z RPT interesujące wydają się dwa pytania, na które autorzy nie znaleźli do tej pory odpowiedzi w analizowanych materiałach, a które stanowiłyby interesujący wkład do prowadzonych badań:

1. Jaka jest minimalna wymagana ilość LNG do wystąpienia zjawiska RPT?
2. Czy możliwe jest stworzenie warunków na lądzie, które umożliwiłyby wystąpienie RPT?

Rozwarstwienie ciekłego LNG w zbiorniku (rollover)

Zjawisko Rollover (zwane również rozwarstwieniem ciekłego LNG w zbiorniku) jest procesem fizycznym mieszania się pomiędzy dwiema lub więcej warstwami LNG o różnych składach. Zazwyczaj wynikiem zjawiska rollover jest znaczne i szybkie odparowanie gazu oraz nagły wzrost ciśnienia w zbiorniku przekraczający techniczne możliwości zbiorników i umiejętności operatorów. W związku z tym na etapie projektowania zbiorników konieczne jest uwzględnienie konsekwencji wynikających z uszkodzenia konstrukcji zbiorników oraz niekontrolowanego odprowadzenia łatwopalnego gazu do atmosfery [27]. Różnica w składach LNG wynika z ogólnoświatowej tendencji do dywersyfikacji źródła dostaw. Co za tym idzie, słabnie popularność długoterminowych kontraktów dostaw na rzecz kontraktów krótkoterminowych. Oznacza to, że terminale LNG muszą radzić sobie z surowcem pochodzącym z różnych stron świata, a tym samym o różnym składzie chemicznym. Dodatkowo czynnikami wpływającymi na powstawanie omawianego zjawiska mogą być m.in. [11]:

- składowanie LNG przez długi czas, np. na potrzeby pokrywania sezonowych wahań w poborach gazu (tzw. „starzenie się” LNG);
- zmiany w jakości LNG;
- cykliczne procesy wpompowywania i odpompowywania skroplonego gazu;
- duża zawartość azotu w składowanym LNG.

Tradycyjnie LNG przechowywany jest w silnie izolowanych termicznie zbiornikach. Najczęściej z instalacjami brzegowymi połączone są zbiorniki cylindryczne naziemne, które umożliwiają przechowywanie do 250 tys. m³ gazu przy ciśnieniu roboczym do 250 mbar. Zbiorniki kuliste i przyrządkowe stosowane są w transportowcach LNG i mają pojemność do 50 tys. m³ przy takim samym ciśnieniu roboczym jak zbiorniki magazynowe. Mniejsze ilości LNG są najczęściej przechowywane w izolowanych zbiornikach próżniowych (VIT) przy ciśnieniu 5 bar i max. objętości 10 tys. m³. Zjawiskiem typowym jest dostawanie się ciepła do zbiornika przez izolację. Ogrzewanie się ładunku LNG z kolei prowadzi do rozwarstwienia warstwy powierzchniowej i odparowania. Szybkość odparowania zależy od typu zbiornika i waha się od 0,02% do 0,2% objętości zbiornika dziennie [13]. Aby uświadomić sobie realność zjawiska rollover, warto przytoczyć badania GIINGL rozpoczęte w 1981 r. dotyczące incydentów o symptomach rollover. W wyniku tych prac zidentyfikowano 41 zdarzeń, które miały miejsce w latach 1970–1982 w 22 zakładach przemysłowych. Jako przyczynę większości incydentów wskazano mieszanie się w jednym zbiorniku cieczy

the surroundings, the density of the surface layer increases and the liquid recedes. The heat penetrating into the tank through its bottom and insulated walls is enough to increase the temperature of side layers and cause the liquids to intermix due to the convection currents. An LNG rollover cannot happen in these conditions. In order for a rollover to occur, the fluid must be stratified in the tank, as shown by the tank to the right in Figure 8. Stratification happens primarily when:

- a “new” gas transferred into the tank has a greater density than the “old” portion of LNG remaining in the tank, and the tank is filled from the bottom up;
- a “new gas” transferred into the tank is lighter than the “old” LNG remaining in the tank, and the filling is done from the top down.

o różnych gęstościach. Cztery incydenty zostały oznaczone jako zdarzenia spowodowane zgromadzeniem się azotu [28].

Rollover jest procesem opartym na zjawiskach termodynamicznych. Na rycinie 8 po lewej stronie przedstawiono zbiornik LNG bez tzw. stratyfikacji, czyli rozwarstwienia. Metan odparowuje z powierzchni, która się wychładza z powodu dostarczania ciepła z otoczenia. Powoduje to wzrost gęstości warstwy powierzchniowej i opadanie cieczy. Ciepło, które przenika do zbiornika przez jego dno i izolowane ściany, wystarcza do ogrzania warstw bocznych i mieszania się cieczy na skutek prądów konwekcyjnych. W tym przypadku rollover LNG nie może wystąpić. Warunkiem koniecznym do wystąpienia zjawiska rollover jest rozwarstwienie cieczy w zbiorniku widoczne w prawym zbiorniku przedstawionym na rycinie 8. Do rozwarstwienia może dochodzić najczęściej, gdy:

- wprowadzany do zbiornika „nowy” gaz będzie bardziej gęsty niż pozostająca w zbiorniku „stara” część LNG, a napełnianie zbiornika odbywa się od dołu;
- wprowadzany do zbiornika „nowy” LNG będzie lżejszy od pozostającego w zbiorniku LNG, a napełnianie będzie odbywało się od góry.

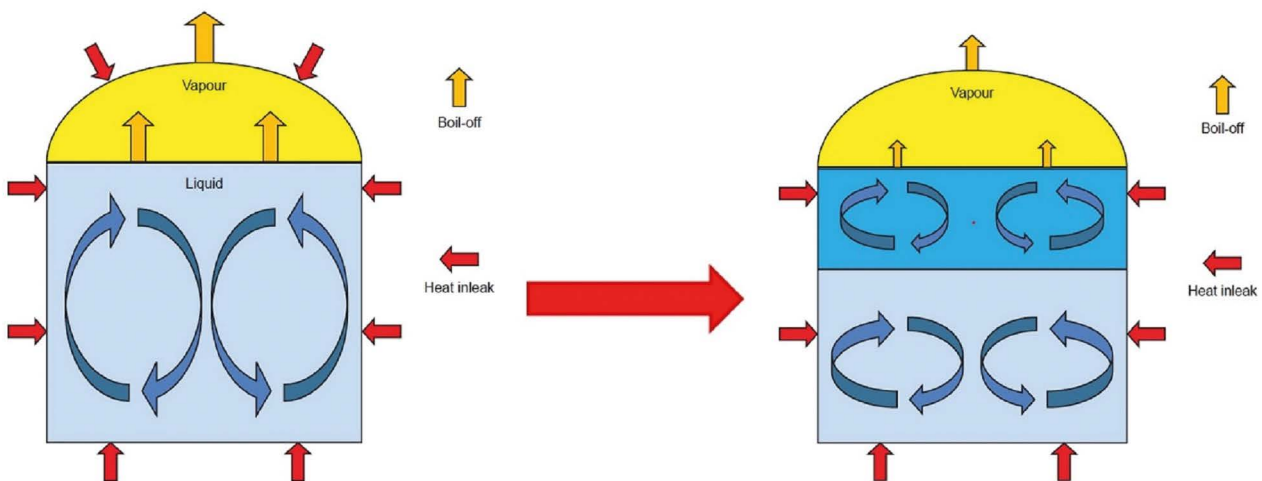


Figure 8. Stratification phenomena in LNG tanks

Rycina 8. Zjawiska obserwowane w zbiornikach z LNG wynikające z jego rozwarstwienia

Source/Źródło: SIGTTO, *Guidance for the Prevention of Rollover in LNG Ships*, Witherby Publishing Group Ltd, Edinburgh 2012, [13].

Various studies exist to show that a 1 kg/m^3 difference in density between the gas being transferred into the tank and the gas that is already in it is sufficient to produce stratification, provided that the filling process is very slow [13]. The key parameter and, at the same time, sign of stratification is a decrease in the rate at which the liquid evaporates.

The top layer of the liquid in the tank returns the heat absorbed during evaporation. However, the transfer of heat between the bottom and top layers of the liquid is limited. This is caused by LNG’s poor heat transfer capability and the difference in the liquid’s density. The result is heat absorption by the bottom layer of the liquid. As the liquid absorbs heat, the temperature of the bottom layer increases and its density decreases. Once both

Badania pokazują, że różnica między gęstością gazu wprowadzanego a tym już obecnym w zbiorniku rzędu 1 kg/m^3 może spowodować rozwarstwienie, tylko jeśli gaz będzie wprowadzany bardzo powoli [13]. W przypadku zjawiska rozwarstwienia kluczowym parametrem i jednocześnie symptomem jest zmniejszenie szybkości parowania cieczy.

Górna warstwa cieczy w zbiorniku oddaje pochłonięte ciepło przez parowanie. Ograniczona jest z kolei wymiana ciepła pomiędzy dolną i górną warstwami cieczy. Jest to spowodowane słabą wymianą cieplną LNG oraz różnicą w gęstości cieczy. Następstwem tego jest pochłanianie ciepła przez dolną warstwę cieczy. Gromadzone ciepło powoduje wzrost temperatury i zmniejszenie gęstości warstwy dolnej. Gdy gęstości obu warstw się zrównają,

layers have the same density, the bottom layer will move over the top layer, generating large volumes of vapours and energy in the process – i.e. causing a rollover [13].

M. Łaciak proposed a computational algorithm to predict rollover time as a tool to control the rollover risk. His model is based on matching the physicochemical parameters of LNG. The model can be solved iteratively by changing the composition and thermodynamics of the liquid's layers with each iteration, until the investigated parameters are equal (see Figure 9).

As mentioned above, there is a history of incidents proving that rollover is a real risk. The most serious incidents, often mentioned in literature, happened in:

- 1971 in the Laz Spezia terminal in Italy;
- 1993 in the LNG storage tank in Partington, UK;
- 2008 on the Moss Rosenberg carrier.

Risk scenarios for the LNG supply chain

In addition to risks associated with the physicochemical properties of LNG, some literature explores scenarios involving risks related to terminal failures, human errors and acts of terrorism. In essence, these risks are what T.N. Nicholas referred to as “black swans” – events with unpredictable consequences. “Black swans” are extremely rare events. Albeit on the very low end of the probability spectrum, their occurrence has immense impact on the environment and the world. Taleb, in turn, investigated the essence of volatility and risk estimation in times when automated future predictions are impossible [29]. Based on our review of literature, we have identified scenarios of risks related to:

- air attacks against LNG terminals [31];
- attacks using small ships/fast motorboats or conventional ships [31];
- underwater attacks involving scuba divers equipped with explosives [30].

The above scenarios have been constructed by a team of researchers led by K. Ślącza, and by K. Prill and K. Cieszyńska. They relate to events to which the LNG terminal in Świnoujście may be exposed. In regard to Scenario 1, the authors noted that “a terrorist takeover of an aircraft is highly unlikely but possible. Although unlikely, it is possible for commercial and private aircrafts to reach the area in the vicinity of the Świnoujście LNG terminal. Hence, one could imagine a scenario in which commercial or private aircrafts are used as a weapon to launch an air attack against the LNG terminal and the vessels stationed there. (...) There are two airfields within 50 km from the Świnoujście terminal – the military airfield in Dziwnów and the landing field in Pasewalk. A hijacked aircraft could easily take off from there, and given the short distance, it would probably reach the target undetected” [31].

warstwa dolna przemieści się ponad warstwę górną, generując przy tym duże objętości oparów oraz energii – rollover [13].

M. Łaciak jako narzędzie do przeciwdziałania zjawisku rollover proponuje algorytm obliczeniowy służący do przewidywania czasu do wystąpienia zjawiska. Zaproponowany model bazuje na dopasowaniu parametrów fizykochemicznych LNG. Model można rozwiązywać iteracyjnie, zmieniając przy każdej iteracji skład i termodynamikę warstw cieczy aż do momentu zrównania parametrów (zob. ryc. 9).

Jak wspomniano wyżej, o realności zjawiska rollover świadczą incydenty, które miały miejsce w przeszłości. Do najbardziej dotkliwych zdarzeń, które są często przywoływane w różnych źródłach literaturowych, doszło:

- w 1971 r. w terminalu La Spezia we Włoszech,
- w 1993 r. w zbiorniku do przechowywania LNG, w Partington w Wielkiej Brytanii,
- w 2008 r. na tankowcu Moss Rosenberg.

Scenariusze zagrożeń łańcucha dostaw LNG

Oprócz zagrożeń wynikających z właściwości fizykochemicznych LNG w literaturze spotkać można pozycje literaturowe, które bazują na scenariuszach działań uwzględniających zagrożenia wynikające z awarii terminali, błędów ludzkich czy umyślnych działań o charakterze terrorystycznym. Otwiera to pole do badań zagrożeń, które – idąc za T.N. Nicholasem – nazwać można „czarnymi łabędziami” (*black swans*). Są to zdarzenia o nieprzewidywalnych skutkach. „Czarne łabędzie” to wydarzenia niezwykle rzadkie, znajdujące się na samym krańcu ogona rozkładu prawdopodobieństwa, ale wywierające olbrzymi wpływ na otoczenie i świat. Istotą zmienności i szacowaniem ryzyka w czasach, w których nie można w sposób automatyczny przewidywać przyszłości, zajmuje się Taleb [29]. Wśród prowadzonego przeglądu literatury autorzy doszukanali się scenariuszy zagrożeń związanych m.in. z:

- atakiem na terminal LNG z powietrza [31];
- atakiem przy pomocy małego statku/szybkiej łodzi motorowej lub statku konwencjonalnego [31];
- atakiem podwodnym z udziałem nurka uzbrojonego w materiały wybuchowe [30].

Wymienione powyżej scenariusze zostały stworzone przez zespół W. Ślącza, K. Prill oraz K. Cieszyńską i dotyczą zdarzeń, na które narażony może być terminal LNG w Świnoujściu. Odnośnie scenariusza 1 autorzy wskazują, że „zajęcie statku powietrznego przez terrorystów jest bardzo mało prawdopodobne, ale możliwe. Dostępność jednostek powietrznych o przeznaczeniu komercyjnym i prywatnym w pobliżu terminala LNG w Świnoujściu jest mała, ale zarazem możliwa. Dlatego też scenariusz ataku z powietrza na terminal LNG i znajdujące się na nim jednostki można rozważyć z perspektywy możliwości użycia statku powietrznego o charakterze komercyjnym lub prywatnym jako broni. (...) W obrębie 50 km od lokalizacji terminala Świnoujście znajdują się dwa lotniska. Lotnisko wojskowe w Dziwnowie oraz lądowisko w Pasewalku. Są to miejsca, z których uprowadzona jednostka powietrzna mogłaby bez większych problemów wystartować, a z których odległość do celu redukuje prawdopodobieństwo wykrycia” [31].

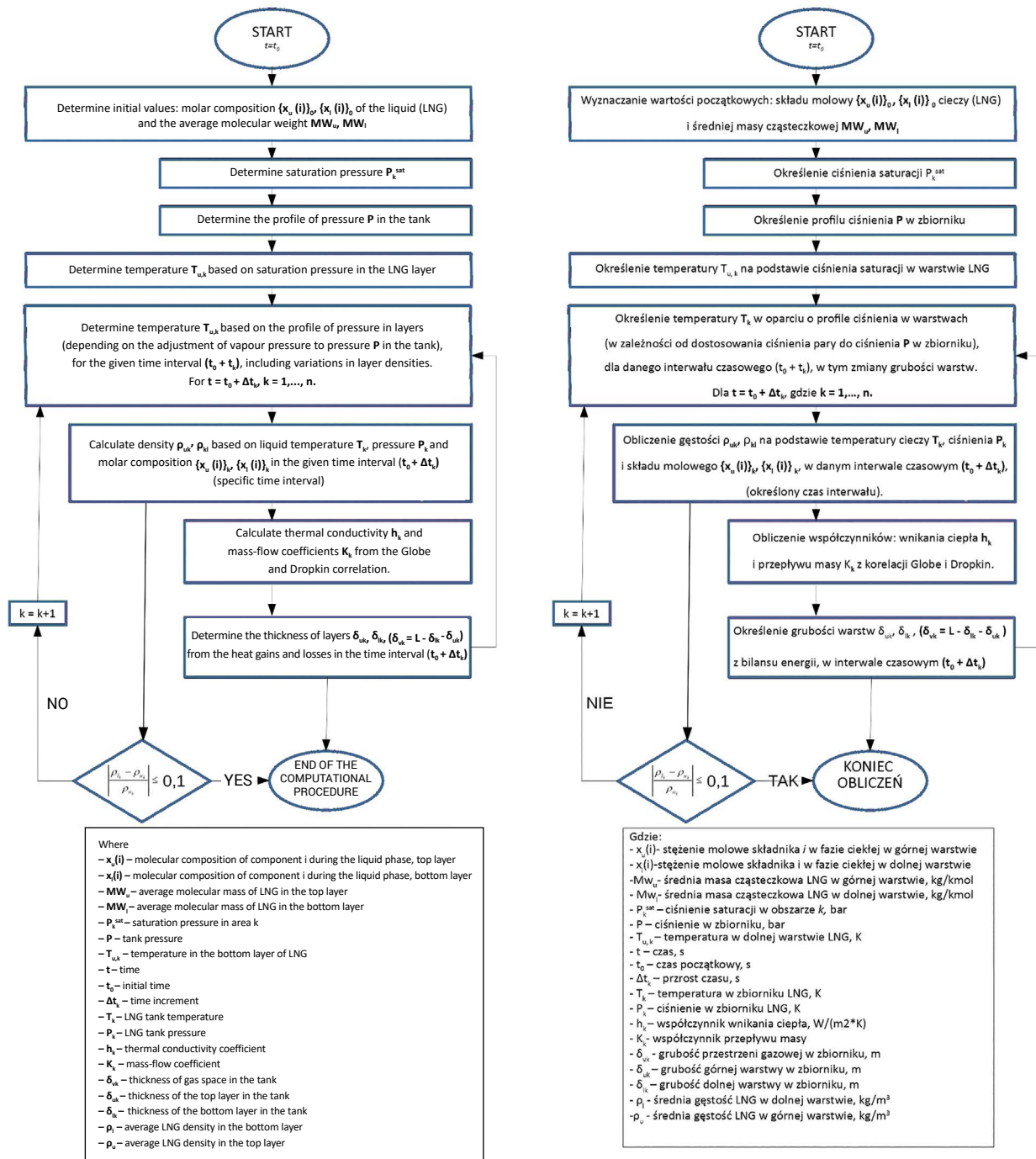


Figure 9. Algorithm for computing changes in density to determine rollover time

Rycina 9. Algorytm obliczania zmian gęstości cieczy w zbiorniku, w celu określenia czasu do wystąpienia zjawiska rollover

Source/Źródło: Łaciak M., *Liquefied Natural Gas storage of variable composition*, "Archives of Mining Sciences" 2015, [29].

Scenario 2 (attacks using small ships/fast motorboats or conventional ships) assumes the following [31]:

- an attack on the LNG terminal in Świnoujście could be carried out using a civilian motorboat laden with explosives;
- instead of attacking directly the terminal infrastructure, a fast motorboat could be used to carry out an attack against an LNG carrier directly in the outer harbour, or when the carrier is approaching the terminal;
- a fast motorboat could be laden with a sufficient amount of explosives to damage the inner-hull shell and cause cargo to explode;
- the attack could happen at night or at dusk/dawn. Despite poor visibility, boat drivers are able to positively identify the target and use the optical navigation system. The attack is also much less likely to be detected.

Scenario 3 involves a scuba diver equipped with explosives. In order for this scenario to happen, however, the vessel would have to stand still. What is more, the underwater operation would involve time constraints; the scuba diver would have to carry a small amount of powerful explosives, and the attack would need to be carried out in summer at night or at dawn, since the waves and water currents are weaker at that time [31].

The above-described examples prove that it is reasonable to construct such scenarios. Furthermore, as noted by the authors of *Metodyka oceny ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego RP* ("A risk assessment methodology for crisis management in Poland"), such scenarios are constructed to [32]:

- collect risk assessment data all in one place;
- describe the sequence of events resulting from the spread of dynamic risk, including the related consequences.

In addition, such scenarios allow those involved in risk assessment to recognise specific threats and their consequences, make connections between event consequences, detect a domino effect and identify the quantities required for computations [32]. This could be particularly important for LNG-related risks due to their nature. Table 5 shows data on LNG-related accidents gathered by E. Vanema's team [33]. They may serve as an interesting indication of which scenarios should be prioritised, and how to make connections between select risks.

The LNG-related scenarios provided above should necessarily be included in the planned LNG risk assessment methodology.

Założenia autorów do scenariusza 2 (atak przy pomocy małego statku/szybkiej łodzi motorowej lub statku konwencjonalnego) to [31]:

- jednostką użytą do ataku na terminal LNG w Świnoujściu może być szybka łódź motorowa o przeznaczeniu cywilnym wypełniona materiałami wybuchowymi;
- szybka łódź motorowa może być wykorzystana do ataku na gazowiec LNG, znajdując się bezpośrednio w porcie zewnętrznym lub będąc w trakcie manewrów podejścia do terminala, a nie bezpośrednio w infrastrukturę terminala;
- szybka łódź motorowa może być wypełniona odpowiednią ilością materiału wybuchowego pozwalającego na dokonanie uszkodzeń powłoki wewnętrznego kadłuba i wybuchu przewożonego ładunku;
- do ataku może dojść w porze nocnej lub zmierzchu/światła. Pomimo słabej widoczności osoby prowadzące łódź są w stanie dokonać pozytywnej identyfikacji celu oraz prowadzić nawigację optyczną. Natomiast prawdopodobieństwo wykrycia ataku będzie zdecydowanie obniżone.

Scenariusz 3 z kolei wiąże się z wykorzystaniem nurka uzbrojonego w materiały wybuchowe. Przeprowadzenie ataku w sposób opisany przez autorów w scenariuszu wymaga jednak, aby jednostka nie znajdowała się w ruchu. Dodatkowo operacja pod wodą musiałaby być ograniczona w czasie; nurek musiałby posiadać niewielką ilość materiału wybuchowego o dużej sile rażenia, zaś atak musiałby być przeprowadzony latem w porze nocnej lub o zmierzchu ze względu na małe falowanie i słaby prąd wodny w tym okresie [31].

Przytoczone powyżej przykłady świadczą o słuszności podjęcia trudu związanego z budową scenariuszy. Dodatkowo, jak piszą autorzy *Metodyki oceny ryzyka na potrzeby zarządzania kryzysowego RP*, scenariusze tworzy się po to, aby [32]:

- zebrać dane do szacowania ryzyka w jednym miejscu;
- opisać ciąg zdarzeń wynikających z rozprzestrzeniania się zagrożenia dynamicznego wraz ze skutkami jakie niesie za sobą.

Oprócz tego scenariusz pozwala szacującemu ryzyko na uzmysłowienie sobie obrazu zagrożenia wraz z jego skutkami, powiązanie następstw zdarzeń, wykrycie zjawiska domina i identyfikacji tych wielkości, które są niezbędne do ewentualnych obliczeń [32]. Szczególnie znaczenie może mieć to w przypadku zagrożeń związanych z LNG, ze względu na charakter możliwych zagrożeń. W tabeli 5 zostały wskazane dane o wypadkach z udziałem LNG zebrane przez zespół E. Vanema [33]. Stanowiąc mogą interesujące wskazanie tego, jakie scenariusze zdarzeń powinny być rozpatrywane w największym stopniu oraz jak powiązać wybrane zagrożenia ze sobą.

Przywołane przykłady scenariuszy zdarzeń z LNG świadczą o konieczności ich uwzględnienia w planowanej metodyce oceny ryzyka zdarzeń z LNG.

Table 5. LNG-related accidents by category
Tabela 5. Wypadki z udziałem LNG z podziałem na kategorie

Event category Kategoria zdarzenia	Number of events Liczba zdarzeń	Frequency (per year) Częstość (na rok)
Collision/Kolizja	19	6.7×10^{-3}
Running aground/Utknięcie na mieliźnie	8	2.8×10^{-3}
Ships coming into contact/Kontakt/zetknięcie się statków	8	2.8×10^{-3}
Fire and explosion/Pożar i wybuch	10	3.5×10^{-3}
Failure of equipment and machinery/Awaria sprzętu i maszyn	55	1.9×10^{-2}
Difficult weather conditions/Trudne warunki pogodowe	9	3.2×10^{-3}
Loading/unloading events/Zdarzenia podczas załadunku / rozładunku	22	7.8×10^{-3}
Failure of the cargo storage system/Awaria systemu przechowywania ładunku	27	9.5×10^{-3}
TOTAL/ ŁĄCZNIE	158	5.6×10^{-2}

Source/Źródło: Vanem E., Antao P., Østvik I., Del Castillo de Comas F., *Analysing the risk of LNG carrier operations*, "Reliability Engineering and System Safety" 2008, [33].

Summary and findings

1. There is extensive literature on the global LNG market. However, this is not the case for the Polish LNG market, as detailed studies on this subject are hard to come by.
2. With the expansion of the LNG market, new risks are emerging in the transportation and storage of liquefied natural gas. Most literature on the subject investigates explosion risks, and the risks of rollover and rapid phase transition – two phenomena specific to LNG. These risks are associated with the physicochemical properties of LNG.
3. Furthermore, there is a body of works dealing with risks analysis based on the scenario method in which the authors analyse problems and risks according to certain scenarios.
4. We found numerous in-depth investigations of the phenomena and risks occurring on the macroscale, i.e. involving the LNG supply chain and the storage of large amounts of LNG. Conversely, it is difficult to find studies into the microscale LNG risks – that is, risks associated with the use of LNG at filling stations, vehicular transport of LNG, and accidents involving LNG-powered vehicles.
5. The future challenge is to develop a method to assess microscale LNG-related risks for the purposes of supporting and planning the operations of emergency services, including their management.
6. Our review of LNG-related risks may serve as a useful reference, as well as providing an impulse to develop procedures for rescue operations involving LNG incidents.

Podsumowanie i wnioski

1. W aktualnie funkcjonującej literaturze występują liczne pozycje, które opisują rynek LNG w skali światowej. Bardzo trudno doszukać się szczegółowego opisu rynku polskiego LNG.
2. Rozwój rynku LNG staje się przyczynkiem do powstawania zagrożeń związanych z procesem transportowania i magazynowania LNG. W literaturze przedmiotu najczęściej pojawiają się opisy dotyczące zagrożeń wybuchowych oraz charakterystycznych dla LNG, tj.: rollover czy Rapid Phase Transition. Zagrożenia te wynikają z właściwości fizykochemicznych LNG.
3. W literaturze spotkać można również analizy zagrożeń z użyciem tzw. metod scenariuszowych, gdzie autorzy analizują problemy i zagrożenia przy założeniu pewnego scenariusza zdarzenia.
4. W literaturze bardzo dokładnie opisane są zjawiska i zagrożenia występujące w skali makro, czyli dotyczące łańcucha dostaw i magazynowania dużych ilości LNG. Bardzo trudno doszukać się zagrożeń odnoszących się do skali mikro obrotu LNG, czyli zagrożeń wynikających z użytkowania LNG na stacjach tankowania, przewozu LNG pojazdami samochodowymi czy wypadków z udziałem pojazdów zasilanych LNG.
5. Wyzwaniem na przyszłość jest opracowanie metody oceny ryzyka zagrożeń związanych z wyciekami LNG w skali mikro, która będzie mogła być wykorzystana na potrzeby działania służb oraz planowania pracy służb, w tym ustalania procesów zarządzania służbami.
6. Dokonany przegląd zagrożeń LNG stanowić może wartościowy punkt odniesienia oraz impuls do opracowania procedur, jakimi kierować muszą się ratownicy w przypadku obsługi zdarzeń z LNG.

Literature / Literatura

- [1] *Historia*, Strona internetowa polskielng.pl, <http://www.polskielng.pl/terminal-Ing/Ing-w-pigulce/historia-Ing/>, [dostęp: 13.03.2019].
- [2] Rosłonek G., *Skroplony gaz ziemny – LNG. Część I – Zagadnienia ogólne i podstawy procesu rozliczeniowego*, „Nafta-Gaz” 2016, 2, 87–94.
- [3] International Gas Union, *2017 World LNG Report*, Barcelona 2017.
- [4] Natural Gas Vehicle Knowledge Base, *Current Natural Gas Vehicle Statistics*, www.iangv.org/current-ngv-stats/ [dostęp: 18.03.2019].
- [5] <https://www.mza.waw.pl/spolka-mza/aktualnosci/685-man-i-solaris=chca-dostarczyc-autobusy-gazowe-dla-stolicy?highlight=WyJsbmciXQ==> [dostęp: 18.03.2019].
- [6] Dziechciarz A., Lesiak P., Bąk D., *Analiza możliwości wykorzystania programu RizEx-2 w symulacji przebiegu zdarzenia awaryjnego na przykładzie wybuchu gazu w Port Hudson*, BiTP Vol. 38 Issue 2, 2015, 143–155, <https://doi.org/10.12845/bitp.38.2.2015.13>.
- [7] 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, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.026>.
- [8] PGNiG, *Karta Charakterystyki. Gaz ziemny skroplony – LNG*, 2017.
- [9] Łaciak M., *Techniczne i technologiczne problemy eksploatacji terminali rozładunkowych LNG*, „Wiertnictwo. Nafta, Gaz” 2011, 28, 3, 507–520.
- [10] GIIGNL, *The LNG industry GIIGNL ANNUAL REPORT 2018*, International Group of Liquefied Natural Gas Importers, 2019.
- [11] Sedlaczek R., *Charakterystyka zagrożeń związanych z transportowaniem i magazynowaniem skroplonego gazu ziemnego – LNG*, „Wiertnictwo. Nafta. Gaz.” 2010, 27, 3, 601–615.
- [12] Pitblado R.M., Woodward J.L., *Highlights of LNG risk technology*, “Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2011, 24, 827–836, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.06.009>.
- [13] SIGTTO, *Guidance for the Prevention of Rollover in LNG Ships*, Witherby Publishing Group Ltd, Edinburgh 2012.
- [14] Dalaklis D., *Effective Fire-fighting Strategies for LNG During Bunkering*, 2015.
- [15] Havens J., Spicer T., *United States Regulations for Siting LNG Terminals: Problems and Potential*, “Journal of Hazardous Materials” 2007, 140, 3, 439–443, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.020>.
- [16] Schneider A.L., *Liquefied Natural Gas Safety Research Overview*, U.S. Department of Transportation, Springfield, Virginia 1979.
- [17] Nwaoha T Ch., *Advanced risk and maintenance modelling in LNG carrier operations*, Liverpool John Moores University, 2011.
- [18] Markowski A.S., Siuta D., *Fuzzy Logic Approach to Calculation of Thermal Hazard Distances in Process Industries*, “Process Safety and Environmental Protection” 2014, 92, 338–345, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.005>.
- [19] Siuta D., Markowski A.S., Mannan M.S., *Uncertainty Techniques in Liquefied Natural Gas (LNG) Dispersion Calculations*, “Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2013, 26, 418–426, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.07.020>.
- [20] Woodward J.L., Pitblado R. M., *LNG RISK BASED SAFETY. Modeling and Consequence Analysis*, John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey 2010.
- [21] *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases*, Centre for Chemical Process Safety, New York 1999.
- [22] Abbasi T., Abbasi S.A., *The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE): Mechanism, Consequence Assessment, Management*, “Journal of Hazardous Materials” 2007, 141(3):489–519, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.056>.
- [23] Kaushik M., *What is Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) on Gas Carrier Ships?*, <https://www.marineinsight.com/tech/what-is-boiling-liquid-expanding-vapour-explosion-bleve-on-gas-carrier-ships/> [dostęp: 25.04.2019].
- [24] Burgess D.S., Murphy J.N., Zabetakis M.G., *Report of Investigations 7448. Hazards Associated with the Spillage of Liquefied Natural Gas on Water*, United States Department of the Interior, Washington D.C. 1970.
- [25] Fay J., *Model of spills and fires from LNG and oil tankers*, “Journal of Hazardous Materials” 2002, 1–18, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00197-8).
- [26] Melhem G., Saraf S., Ozog H., *Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)*, ioMosaic Corporation, 2006.
- [27] Kulista M., Wood D.A., *LNG rollover challenges and their mitigation on Floating Storage and Regasification Units: New perspectives in assessing rollover consequences*, “Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2018, 54, 352–272, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.007>.
- [28] GIIGNL, *Rollover in LNG Storage – An Industry View: A Acton and RC Van Meerbeke – LNG*, 1986.
- [29] Łaciak M., *Liquefied Natural Gas storage of variable composition*, “Archives of Mining Sciences” 2015, 60, 1, 225–238, <https://doi.org/10.1515/amsc-2015-0015>.
- [30] Nicholas T. N., *Czarny łabędź. O skutkach nieprzewidywalnych zdarzeń*, Kurhaus Publishing, Nowy Jork 2015.
- [31] Ślęczka W., Prill K., Cieszyńska K., *Określenie potencjalnych zagrożeń dla terminali LNG na przykładzie terminala LNG w Świnoujściu*, „Logistyka” 2010, 4.
- [32] Skomra W. (red.), *Metodyka oceny ryzyka na potrzeby systemu zarządzania kryzysowego RP*, BEL Studio Sp. z o.o, Warszawa 2015.
- [33] Vanem E., Antao P., Østvik I., Del Castillo de Comas F., *Analyzing the risk of LNG carrier operations*, “Reliability Engineering and System Safety” 2008, 93, 1328–1344, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.07.007>.

ADRIAN BRALEWSKI, PH.D. ENG. – faculty member at the Main School of Fire Service. In May 2019, he obtained the degree of Doctor of Safety Science from the War Studies University. His research interests include risk assessment, risk analysis, risk modelling, systemic and supplemental factors, and crisis management.

PROF. JERZY WOLANIN, D.SC. – faculty member at the Department of Civil Safety Engineering, the Main School of Fire Service. He is an expert in risk analysis, management and modelling, and civil protection.

DR INŻ. ADRIAN BRALEWSKI – pracownik Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Uzyskał tytuł doktora w dziedzinie nauk o bezpieczeństwie obroniony w maju 2019 r. w Akademii Sztuki Wojennej. Zainteresowania naukowe autora: ocena ryzyka, analiza ryzyka, modelowanie zagrożeń, czynniki systemowe i suplementowe, zarządzanie kryzysowe.

PROF. DR HAB. JERZY WOLANIN – zatrudniony w SGSP w Katedrze Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego. Ekspert w zakresie analizy ryzyka, zarządzania ryzykiem, modelowania zagrożeń, a także w obszarze ochrony ludności.