

Optymalizacja badań *in situ* związanych z bunkrowaniem i przechowywaniem LNG na przykładzie ćwiczeń ratowniczo-gaśniczych przeprowadzonych przez PGNiG OD¹, Urząd Morski w Gdyni² i Zarząd Portu Morskiego Gdynia³

**Dr inż. Agnieszka Kalbarczyk-Jedynak, dr hab. inż. kpt. ż. w. Wojciech Ślącza, prof. nadzw. AM
Akademia Morska w Szczecinie**

Zapotrzebowanie na energię jest obecnie wyznacznikiem poziomu życia społeczeństwa, zaś ilość wyprodukowanej energii przypadającej na jednego mieszkańca jest ważnym wskaźnikiem rozwoju społeczno-gospodarczego każdego państwa. Produkcja energii oraz jej dystrybucja nie są obojętne dla stanu środowiska. Parlament Europejski i Rada wprowadziły 22 października 2014 roku dyrektywę w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, która dotyczy wszystkich gałęzi transportu, to jest: kolejowego, lotniczego, drogowego oraz żeglugi śródlądowej i morskiej. Konsekwencją wprowadzenia dyrektywy jest przyjęcie przez Komisję Europejską pakietu „Czysta energia dla transportu”, która nakłada między innymi obowiązek budowy stacji tankowania gazu LNG co 400 km wzdłuż szlaków tranzytowych Transeuropejskiej Sieci Transportowej TEN-T (*Trans-European Transport Networks*) oraz punktów bunkrowania gazu LNG dla statków morskich (do 2025 roku) i śródlądowych (do 2030 roku) w portach będących na liście szlaków transportowych TEN-T [7]. Oznacza to konieczność wprowadzenia i optymalizacji procedur związanych z bunkrowaniem statków gazem LNG w portach europejskich zlokalizowanych na szlakach TEN-T, uwzględniających specyficzne wymagania paliwa, jak i parametry techniczno-eksploatacyjne statków w określonych warunkach, w szczególności wystąpienia zagrożenia. W tym celu należy opracować metody działania mające na celu podniesienie poziomu bezpieczeństwa przy składowaniu, transporcie i bunkrowaniu gazu LNG. Wprowadzanie technologii związanej z wykorzystaniem gazu z zachowaniem akceptowalnego poziomu ryzyka jego eksploatacji oraz innowacyjnych koncepcji transportu, bunkrowania i magazynowania nie może obyć się bez badań doświadczalnych prowadzonych w makroskali. Takie badania umożliwiają opracowanie procedur bezpieczeństwa i algorytmów postępowania w eksploatacyjnych stanach awaryjnych. Wyniki dotyczące poszczególnych parametrów gazu oraz skutków jakie wyrządza palący się gaz mogą posłużyć jako wartości referencyjne do kalibracji modeli symulacyjnych. Modele symulacyjne mogą być wykorzystywane do szacowania skutków eksploatacji infrastruktury wykorzystywanej do transportu i magazynowania gazu bez potrzeby badań rzeczywistych.

¹ PGNiG OD – Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo Obrót Detaliczny, 01-248 Warszawa ul. Jana Kazimierza 3

² Urząd Morski w Gdyni, 81-338 Gdynia ul. Bernarda Chrzanowskiego 10

³ Zarząd Portu Morskiego Gdynia, 81-337 Gdynia ul. Rotterdamska 9

W artykule przedstawiono istotne aspekty prowadzenia badań *in situ* podczas rozlewu gazu LNG w warunkach rzeczywistych na poligonie doświadczalnym, jakim był teren portu. Mając na uwadze fakt, że badania prowadzone w makroskali trudno powtórzyć ze względu na ogromne koszty takiego przedsięwzięcia, należy przygotować wstępną symulację badanego zjawiska przy pomocy narzędzi komputerowych, w tym oprogramowania symulacyjnego zjawisk towarzyszących przemianom gazowym i ich skutkom. Efektem przeprowadzonych doświadczeń były pozytywne i negatywne aspekty badań prowadzonych w makroskali podczas procesu bunkrowania statku na przykładzie ćwiczeń ratowniczo-gaśniczych. Przedstawione badania przeprowadzono na terenie Portu Gdynia na Nabrzeżu Polskim pod nadzorem PGNiG OD, Urzędu Morskiego w Gdyni i Zarządu Portu Morskiego Gdynia we wrześniu 2018 roku. Ćwiczenia były prowadzone między innymi przez specjalistów z Ratowniczej Stacji Górnictwa Otworowego PGNiG oraz nadzorowany w zakresie bezpieczeństwa przeciwpożarowego przez Portową Straż Pożarną ZMPG S.A. Niezbędnym elementem poprzedzającym wdrażanie nowych procedur bezpieczeństwa w przemyśle są badania doświadczalne poprzedzające ich aplikację wraz z symulacjami komputerowymi występowania poszczególnych stanów zagrożenia bezpieczeństwa. Obecnie w gospodarce obserwuje się gwałtowny wzrost zapotrzebowania na energię. Pociąga to za sobą konieczność stosowania coraz szerszego spektrum substancji chemicznych, które pozwolą na wytworzenie energii, które można uznać za paliwo lub źródło energii. Zwiększenie różnorodności surowcowej i sposobów wytwarzania energii przyczynia się wprawdzie do wzmocnienia bezpieczeństwa energetycznego danego kraju – jednak wraz ze wzrostem rozpiętości stosowanych surowców energetycznych narasta problem ich dystrybucji, w szczególności transportu. Jednocześnie brak łatwo dostępnych informacji na temat ryzyka wykorzystywania nowych źródeł energii oraz ryzyka towarzyszącego ich transportowi, w szczególności w obszarach mocno zurbanizowanych, pociąga za sobą brak akceptacji społecznej. Dlatego istotne jest, aby informować społeczność lokalną o własnościach substancji, z których pozyskujemy energię. W tym świetle obiecującą alternatywą jest skroplony gaz ziemny (LNG).

Metan, jako główny składnik LNG, nie jest nową substancją, więc jego stosowanie nie budzi oporów społecznych, a jego

transport w formie skroplonej jest wprawdzie stosunkowo nową formą dystrybucji, jednak bezpieczną przy zachowaniu odpowiednich środków ostrożności [6]. LNG jest na tyle atrakcyjnym źródłem energii, że coraz częściej jest rozważany jako alternatywne paliwo żeglugowe. Ma na to wpływ między innymi udział czasu żegluga na obszarach kontroli emisji SECA (*Sulphur Emission Control Areas*) oraz koszt zaopatrzenia w LNG. Stosowanie LNG pozwala znacząco zmniejszyć emisję tlenków siarki (SO_x) i azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM – *particulate matter*), gdyż jest on praktycznie wolny od związków siarki i azotu. O ile samo zastosowanie LNG jako czystego źródła energii nie budzi wątpliwości, o tyle jego transport, w tym procesy przepompowywania, są obszarami, w których należy wyznaczyć poziom ryzyka towarzyszącego tym procesom. Podczas procesu bunkrowania statku istnieje możliwość rozszczelnienia złącz, co może skutkować rozlewem LNG. Wspomniana sytuacja może mieć miejsce zarówno w przypadku bunkrowania statku z cysterny samochodowej, z pływającej bunkierki, z instalacji lądowej czy przy pomocy zbiorników kontenerowych. Istotnym czynnikiem jest w takim przypadku zarówno temperatura wrzenia LNG, jak i rodzaj oraz temperatura podłoża, nad którym doszło do uwolnienia paliwa. Ważne są również warunki atmosferyczne oraz stabilność Pasquilla, nasłonecznienie i prędkość wiatru. W przypadku dużych rozlewów należy uwzględnić szorstkość podłoża oraz rodzaj zabudowy w okolicy rozlewu. Dodatkowo niezwykle istotnymi czynnikami są rozmiar i rodzaj szczeliny oraz jej umiejscowienie. Nie bez znaczenia jest również szybkość przepływu uwalnianej substancji, jej skład oraz możliwość zapłonu w wyniku dostarczenia energii pochodzącej od źródła promieniowania termicznego lub iskry. Uwolnienie LNG jest o tyle niebezpieczne, że niesie ze sobą prawdopodobieństwo zagrożenia odmrożeniem oraz w mniejszym stopniu wybuchem. Wybuch LNG jest możliwy jedynie w wąskim zakresie stężeń, to jest między 5 a 15 procent masowych mieszanki, której głównym składnikiem jest metan. W przypadku uwolnienia LNG należy szybko i sprawnie ocenić rozmiary stref zagrożonych wybuchem oraz stref niebezpiecznych, w których istnieje wysokie prawdopodobieństwo uszkodzenia ciała w wyniku działania niskich temperatur [1]. Ustalenie zasięgu strefy wybuchu wiąże się ze znajomością szeregu własności zarówno chemicznych, jak i fizycznych substancji uwalnianej, szybkości wypływu oraz sytuacji geometrycznej danego miejsca [2]. Pod pojęciem strefy zagrożenia wybuchem należy rozumieć przestrzeń, w której może występować mieszanina substancji palnej z powietrzem lub innym utleniaczem o stężeniu zawartym między dolną i górną granicą wybuchowości. Standardowa klasyfikacja stref zagrożonych wybuchem zgodnie z normą PN-EN 60079-10-1 [5] opiera się w głównej mierze na identyfikacji źródeł emisji, określeniu stopnia emisji na podstawie częstotliwości i czasu trwania emisji oraz na wyznaczeniu zasięgu strefy zagrożenia.

Podstawowym i niezbędnym elementem zarządzania ryzykiem, w szczególności określeniu jego poziomu akceptowalności, jest ustalenie rozmiarów strefy zagrożenia wybuchem, czyli obszaru, w którym istnieje zagrożenie życia lub zdrowia ludzkiego. W przypadku oceny stref zagrożenia wybuchem związanych z uwolnieniem gazu LNG wprowadza się, zgodnie z wytycznymi zaproponowanymi na przykład przez LNG ABSG Consulting Inc. [1] (a na gruncie prawa polskiego Dz. Ustaw 2010.138.931), trzy strefy o różnych stanach zagrożenia

i tym samym o różnym poziomie bezpieczeństwa. Strefy te wyznacza się między innymi na podstawie analizy termicznej.

Wytyczne dotyczące zarządzania ryzykiem różnią się w zależności od rodzaju i miejsca wycieku. W sytuacji gdy mamy do czynienia z transportem LNG wąskim kanałem, pod mostami lub powyżej tuneli mówi się o pierwszej strefie zagrożenia. Rozmiary stref są uzależnione od odległości od istotnych elementów infrastruktury, jakimi są obszary o dużym zagęszczeniu ludności, o dużym stopniu uprzemysłowienia lub obiekty militarne. W zależności od charakteru wycieku strefa ta dotyczy przypadków, gdy odległość od wspomnianej infrastruktury jest mniejsza od 250 m dla rozlewu nieumyślnego i 500 m dla pozostałych przypadków. Rozpiętość strefy drugiej zawiera się między 250 a 750 m dla wycieków nieumyślnych i między 500 a 1600 m w pozostałych sytuacjach. Ta strefa jest zarezerwowana dla jednostek pływających po szerszych kanałach. Skutki promieniowania termicznego są mniejsze niż w strefie pierwszej. Trzecia strefa dotyczy obszarów, gdzie transport LNG ma miejsce w odległości większej niż 750 m od terenów uprzemysłowionych dla wycieków nieumyślnych i powyżej 1600 m w pozostałych sytuacjach. W strefie tej konsekwencje awarii związanej z uwolnieniem LNG są niewielkie, zarówno dla ludzi, jak i dla obiektów budowlanych [8].

Ocena stref „niebezpiecznych” jest istotna z punktu widzenia podejmowania decyzji związanych z ewakuacją ludności. Zwymiarowanie takich stref pozwala również na zmniejszenie kosztów udziału specjalistycznych grup ratowniczych niezbędnych przy usuwaniu skutków uwalniania substancji niebezpiecznych. W celu właściwej oceny niebezpieczeństwa związanego z rozprzestrzenianiem się gazu LNG niezbędne są pomiary doświadczalne *in situ*. Pomiary wykonywane na małą skalę w laboratorium nie dają jednoznacznych i miarodajnych wyników niezbędnych do oceny ryzyka związanego z rozszczelnieniem, na przykład infrastruktury przy procesie bunkrowania, gdyż w warunkach laboratoryjnych trudno ocenić rozmiary stref niebezpiecznych [2]. Na wielkość strefy zagrożenia, w tym zarówno zagrożenia wybuchem, jak i skutkami termicznymi, mają wpływ między innymi: szybkość mieszania się substancji z powietrzem, szorstkość podłoża, prędkość wiatru, nasłonecznienie, wilgotność, stabilność Pasquilla, temperatura podłoża i powietrza itp. Wpływ tych czynników trudno oszacować w mikroskali.

POLIGON BADAWCZY ORAZ METODYKA PROWADZENIA BADAŃ

W Polsce obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na gaz LNG. Aby sprostać założeniom dywersyfikacji gazu, jak i potrzebom przemysłu, w październiku 2018 roku podpisano porozumienie między firmami Venture Global Calcasieu Pass LLC oraz Venture Global Plaquemines LNG LLC a PGNiG dotyczące długoterminowych dostaw gazu LNG do Polski ze Stanów Zjednoczonych. Jednym z efektów większego wolumenu gazu LNG będzie rozbudowa infrastruktury magazynującej i transportowej, a w szczególności możliwość redystrybucji gazu jako paliwa żeglugowego. Wpłynie to korzystnie na rozwój portów morskich, gdyż powstanie w nich infrastruktura wykorzystywana w procesie bunkrowania statków.



Rys. 1. Umiejscowienie stanowisk badawczych w Porcie Gdynia na Nabrzeżu Polskim [9]

Ta nowa funkcja portu będzie wymagała przeprowadzenia procedury Formalnej Analizy Ryzyka eksploatacji stanowiska bunkrowania i wdrażania nowych procedur bezpieczeństwa, które umożliwią jego eksploatację na założonym poziomie ryzyka. W szczególności niezbędne jest opracowanie standardów bezpieczeństwa w tym zakresie, co dostrzegają również podmioty gospodarcze zajmujące się transportem, przeładunkiem i składowaniem LNG.

We wrześniu 2018 roku PGNiG OD, Urząd Morski w Gdyni i Zarząd Portu Morskiego Gdynia zorganizowały ćwiczenia ratowniczo-gaśnicze, których celem było wsparcie w przygotowaniu technologicznej instrukcji bunkrowania statków. Ćwiczenia prowadzono na specjalnie do tego przygotowanym terenie znajdującym się na wydzielonym obszarze Portu Gdynia na Nabrzeżu Polskim (rys. 1).

Przeprowadzone ćwiczenia obejmowały:

- 1) podpalenie zbiornika wypełnionego gazem LNG (rys. 2),
- 2) rozłączanie szybkozłącza tankującej cysterny (rys. 3),
- 3) wylew 420 litrów LNG do basenu portowego (rys. 4),
- 4) gaszenie studni wypełnionej LNG (rys. 5),
- 5) działanie kriogeniczne na wybrane materiały.

Na każdym etapie ćwiczeń wykorzystano gaz LNG o składzie podanym w świadectwie jakości przez laboratorium współpracujące z terminalem regazyfikacyjnym LNG w Świnoujściu. Skład chemiczny używanego LNG zestawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Skład chemiczny LNG stosowanego podczas ćwiczeń ratowniczo-gaśniczych

Lp.	Składnik mieszaniny	Wzór chemiczny	Wartość	Jednostka
1	metan	CH_4	93,2485	% mol
2	etan	C_2H_6	6,5513	% mol
3	propan	C_3H_8	0,0326	% mol
4	n-butan + izo-butan	$\text{n-C}_4\text{H}_{10} + \text{i-C}_4\text{H}_{10}$	0,0000	% mol
5	azot	N_2	0,1676	% mol



Rys. 2. Ogrzewanie zbiornika z LNG [10]

Głównym celem ćwiczeń było zademonstrowanie, jak bezpieczne jest bunkrowanie i składowanie gazu LNG przy zachowaniu odpowiednich procedur eksploatacyjnych i bezpieczeństwa. Pierwsze ćwiczenie dotyczące podpalenia zbiornika kriogenicznego o pojemności 500 dm^3 z ciekłym LNG nie spowodowało efektu BLEVE⁴, pomimo ogrzewania go w płomieniach wcześniej przygotowanego paleniska przez 1,5 godziny. Po uzyskaniu ciśnienia 17 bar nastąpiło otwarcie zaworu ciśnieniowego i nadmiar gazu ze zbiornika został odprowadzony do atmosfery (rys. 2). W podwyższonej temperaturze można było spodziewać się rozszczelnienia zbiornika kriogenicznego, a w konsekwencji wybuchu chemicznego i fizycznego. Uszkodzenie powłoki zbiornika lub jego zaworów ciśnieniowych mogłoby doprowadzić do rozerwania zbiornika, co skutkuje wówczas gwałtowną przemianą fazową zgromadzonej w nim cieczy. Intensywne parowanie LNG prowadzi wówczas do powstania fali ciśnienia rozchodzącej się w atmosferze, powodując ogromne zniszczenia. Jest to typowy przykład zjawiska BLEVE. Jednakże trudno jest uszkodzić powłokę zbiornika kriogenicznego ze względu na jego dwupłaszczową konstrukcję. Taka budowa jest niezbędna ze względów bezpieczeństwa w chwili gdy dochodzi do kolizji cysterny lub innego zbiornika i towarzyszy jej

⁴ BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, wybuch rozszerzających się par wrzącej cieczy



Rys. 3. Rozerwanie szybkozłączca [10]



Rys. 4. Próba gaszenia LNG wodą (opracowanie własne)

otwarty ogień. Innym ewentualnym słabym punktem zbiornika kriogenicznego jest awaria zaworu ciśnieniowego wywołana temperaturą lub uszkodzeniem mechanicznym. Jednak podczas dwukrotnie przeprowadzonych doświadczeń nie zaobserwowano takiego problemu. W obu obserwowanych przypadkach zawór otworzył się po osiągnięciu odpowiedniego ciśnienia, odprowadzając nadmiar gazu tak, aby utrzymać ciśnienie wewnątrz zbiornika na zaprojektowanym poziomie pomimo wzrostu temperatury.

Podobnie nagłe rozłączenie szybkozłączca podczas przepompowania LNG z cysterny do cysterny również nie powoduje większego zagrożenia. W przypadku rozszczelnienia szybkozłączca na zakończeniu węża przeładunkowego wypływa jedynie niewielka objętość metanu zgromadzona wewnątrz węża przeładunkowego. Jest to spowodowane natychmiastowym odcięciem wypływu gazu na zaworze ciśnieniowym w zbiorniku LNG (rys. 3).

W przypadku gaszenia studni wypełnionej LNG na uwagę zasługuje fakt, że palący się gaz LNG nie może być gaszony wodą ani pianą – zwłaszcza pianą ciężką, która uważana jest za środek gaśniczy o lepszej zdolności gaśniczej w stosunku do pian lekkich, polecanej szczególnie przy gaszeniu cieczy palnych czy stałych materiałów tworzących żar. Woda i piany powodują wzmożenie spalania LNG (rys. 4).

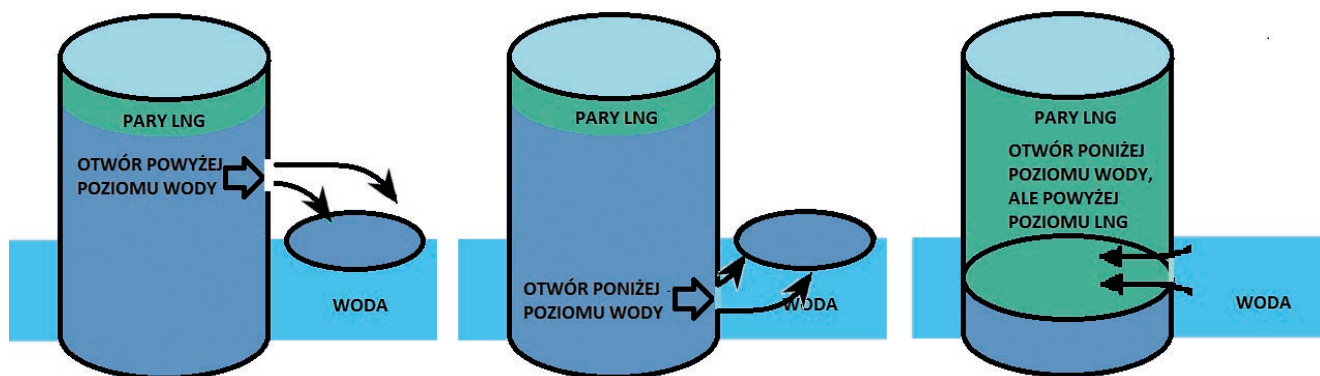
Przeprowadzone ćwiczenia potwierdzają, że materiałem odpowiednim do gaszenia płonącego LNG są proszki gaśnicze typu ABC i BC. Niewskazane są proszki typu D (np.: proszki węglanowe), z których pod wpływem wysokiej temperatury powstaje woda.

Zjawiskiem występującym sporadycznie jest rozlew gazu LNG nad powierzchnią wody, któremu towarzyszy proces gwałtownego przejścia fazowego zwanego RPT⁵. Przyczyną powstawania RPT przy wyciekach LNG z metanowców jest uwalnianie skroplonego gazu ziemnego nad lustrem wody przez duży otwór znajdujący się powyżej poziomu wody, który powstał wskutek przebicia kadłuba. Zjawisko to może również towarzyszyć wypływowi LNG do zbiornika wodnego z otworu znajdującego się poniżej poziomu wody. RPT może być również wywołane dopływem wody do częściowo wypełnionego zbiornika przez duży otwór znajdujący się poniżej lustra wody, ale powyżej poziomu napełnienia zbiornika (rys. 5). Ostatni przypadek powoduje, hipotetycznie wprawdzie, największe uszkodzenia, jednak zachodzi jedynie, gdy zbiorniki tankowca są praktycznie puste [4].

W przypadku omawianych ćwiczeń ratowniczo-gaśniczych przygotowano stanowisko do badań rozlewu typu RPT. W tym celu wykonano zbiornik (rys. 6) o pojemności 420 dm³ ze stali austenitycznej o wyższej wytrzymałości na niskie temperatury w porównaniu ze stalami ferrytycznymi. Tego rodzaju stal zawiera niewielki dodatek węgla (do 0,15%) i minimum 16% chromu oraz przynajmniej 6% niklu, co czyni ją niezwykle odporną na korozję. Zbiornik wykonany z tego rodzaju stali wykazuje podwyższoną odporność na agresywne środowisko, to jest skrajne temperatury, wysoką wilgotność, duże obciążenie mechaniczne. Po napełnieniu zbiornika LNG jego cieklą zawartość przelano z wysokości 2 m do basenu portowego (rys. 7), oczekując intensywnego odparowania w obrębie strefy rozplwy i w jej bezpośrednim sąsiedztwie.

Nagłe uwolnienie LNG może wywołać lokalną strefę nadciśnienia określaną jako eksplozja fizyczna. Podczas prowadzonych ćwiczeń, pomimo przyłożonych starań, nie zaobserwo-

⁵ RPT – Rapid Phase Transition, gwałtowne przejście fazowe



Rys. 5. Przykłady zjawiska RPT przy wyciekach LNG z metanowców (opracowanie własne)



Rys. 6. Zbiornik przeznaczony do RPT (opracowanie własne)



Rys. 7. Rozlew gazu LNG do basenu portowego[10]

wano tego rodzaju zjawiska. Przyczyną może być zbyt niska temperatura wody – jednak nie można tego stwierdzić ze stu-procentową pewnością, gdyż zjawisko to jest bardzo złożone i mało zbadane, a fizyczne mechanizmy uruchamiające szybkie przejścia fazowe LNG stanowią na chwilę obecną nierozwikłaną jeszcze zagadkę. W celu lepszego poznania procesów związanych ze zjawiskiem RPT należałoby wdrożyć sieć doświadczeń prowadzonych zarówno w mikro, jak i w makro skali. Badania prowadzone na małą skalę są podstawą do uzyskania danych statystycznych niezbędnych do określania procesów losowych i warunków, w jakich może nastąpić szybkie przejście fazowe. Natomiast makroskala pozwoli na weryfikację pomiarów uzyskanych w skali mikro, a w konsekwencji umożliwi wprowadzenie odpowiedniej korekty modelu teoretycznego. Tak przygotowana baza danych umożliwi stworzenie wytycznych dotyczących bezpieczeństwa, które mogą być wykorzystane przez przemysł czy transport, zwłaszcza w kontekście rosnącego zapotrzebowania na wykorzystanie LNG na świecie.

SYMULACJE KOMPUTEROWE ZJAWISK TOWARZYSZĄCYCH ĆWICZENIOM

Omawiane ćwiczenie związane z RPT ze względu na jego złożoność i obawy dotyczące gwałtownego rozprężania stabil-

nego układu o wysokim ciśnieniu do niższego ciśnienia otoczenia poprzedzono symulacją komputerową przy użyciu programu DNV Phast ver. 7.11⁶. Próbki otrzymanych wartości przedstawiono w tabl. 2 i 3.

Tabl. 2. Rozmiary stref zagrożonych wybuchem w temperaturze 278,0 K i 283,0 K w funkcji wilgotności powietrza

Stężenie	Zasięgi [m] w temperaturze 278,0 K w funkcji wilgotności powietrza			Zasięgi [m] w temperaturze 283,0 K w funkcji wilgotności powietrza		
	Wilgot-ność 50%	Wilgot-ność 70%	Wilgot-ność 90%	Wilgot-ność 50%	Wilgot-ność 70%	Wilgot-ność 90%
UFL ⁷	65	58	50	66	55	49
LFL ⁸	109	108	97	112	106	98
LFL-fraction ⁹	135	139	132	139	138	133

Tabl. 3. Rozmiary stref zagrożonych wybuchem w temperaturze 289,8 K i 293,0 K w funkcji wilgotności powietrza

Stężenie	Zasięgi [m] w temperaturze 289,8 K w funkcji wilgotności powietrza			Zasięgi [m] w temperaturze 293,0 K w funkcji wilgotności powietrza		
	Wilgot-ność 50%	Wilgot-ność 70%	Wilgot-ność 90%	Wilgot-ność 50%	Wilgot-ność 70%	Wilgot-ność 90%
UFL	57	50	45	55	48	43
LFL	109	99	100	107	98	100
LFL-fraction	140	135	135	139	134	138

Przedstawione dane uzyskane z procesu symulacji komputerowej uwzględniają prawdziwy kierunek i prędkość wiatru – 4 m/s oraz nasłonecznienie w dniu trwania ćwiczeń. Jednak ze względu na małą przewidywalność warunków pogodowych w czasie prowadzenia doświadczenia sporządzono znacznie więcej obliczeń dla różnych wariantów, w których zwymiarowano strefy niebezpieczne pod kątem wybuchu w funkcji prędkości wiatru i jego kierunku. Dane zestawiono dla stałej temperatury powietrza 22°C i zmiennych temperatur wody, nad którą planowano rozlew LNG. Rzeczywista temperatura powierzchni wody wynosiła w danym dniu 16,8°C.

Otrzymane dane sugerują, że wraz ze wzrostem wilgotności powietrza zmniejsza się prędkość przemieszczania chmury gazu LNG, co łatwo wytłumaczyć jej większym ciężarem po wysyceniu jej parą wodną z powietrza. Jednocześnie wzrost wilgotności powietrza pociąga za sobą zmniejszenie rozmiarów stref ograniczonych stężeniami odpowiadającymi górnej granicy wybuchowości (rys. 8, rys. 9).

Nadto wraz ze wzrostem temperatury maleje promień zasięgu strefy zagrożonej wybuchem, gdyż w tym samym momencie rośnie wysokość chmury gazu, co przekłada się na zmniejsze-

⁶ Phast – Process hazard analysis software, program do oceny zagrożeń firmy DNV GL

⁷ UFL – Upper flammability limit, górna granica palności

⁸ LFL – Lower flammability limit, dolna granica palności

⁹ LFL-fraction – Lower flammability limit – fraction, 50% dolnej granicy palności



Rys. 8. Strefy niebezpieczne odpowiadające poziomowi UFL po 10 s od uwolnienia LNG [11]



Rys. 9. Strefy niebezpieczne odpowiadające poziomowi UFL po 30 s od uwolnienia LNG [11]

nie rozmiarów przekroju poprzecznego chmury. Zjawisko to spowodowane jest przejmowaniem przez cząsteczki węglowodorów ciepła od powietrza, dzięki czemu zwiększa się energię potencjalną chmury gazów i rośnie jej wysokość. Wszystkie wspomniane zależności dotyczą stężenia odpowiadającego górnej granicy wybuchowości. Dla poziomów odpowiadających LFL i LFL-fraction wspomniane zależności nie są tak wyraźne. Przyczyną jest małe stężenie węglowodorów w powietrzu.

WNIOSKI

Prowadzenie badań dotyczących zjawisk towarzyszących uwalnianiu się gazu LNG podczas bunkrowania w dużej skali pociąga za sobą ogromne koszty związane zarówno z zakupem i transportem niezbędnej partii paliwa, jak i z zaangażowaniem odpowiednich służb zapewniających bezpieczeństwo. Ponadto wraz ze wzrostem skali badań *in situ* rosną wydatki związane z przygotowaniem odpowiednich stanowisk do doświadczenia i wydłuża się czas prowadzenia samego doświadczenia. Nie bez znaczenia są również koszty użycia środków gaśniczych. Należy również nadmienić, że sprzęt służący do badań musi spełniać surowe kryteria wytrzymałościowe, gdyż musi być odporny na niesprzyjające warunki atmosferyczne przy zachowaniu wysokich parametrów związanych z dokładnością pomiarową. Istnieje problem związany z nieprzyjawnymi warunkami meteorologicznymi, które mogą zaburzyć wstępne rozplanowanie mierników. Ponadto stosowane środki bezpieczeństwa, takie jak kurtyny wodne, dodatkowo uniemożliwiają rozlokowanie mierników w dowolnych miejscach. Kolejną niedogodnością jest

brak możliwości przeprowadzenia doświadczenia w dowolnych warunkach – niemożliwa jest na przykład zmiana temperatury wody w basenie portowym. Nieodpowiednia temperatura jest najbardziej prawdopodobną przyczyną, z powodu której nie zaobserwowano zjawiska RPT podczas prowadzonych ćwiczeń. Badania prowadzone w mikroskali przez Enger i Hartman [3] sugerują, że do omawianego zjawiska RPT dochodzi po przekroczeniu 17°C dla powierzchni wody, nad którą dochodzi do rozlewu. Ze względu na trudności w odtwarzalności i powtarzalności pomiarów *in situ* nie jest łatwo określić przyczynę, dla której dochodzi do zgola innych obserwacji niż zakładano. Efekt końcowy prowadzonych doświadczeń jest funkcją zarówno składu chemicznego, temperatury LNG oraz temperatury powierzchni wody, nad którą dochodzi do rozszczelnienia zbiornika, jak i głębokości penetracji LNG, wilgotności powietrza, prędkości wiatru i szybkości wypływu LNG. To wszystko przyczynia się do tego, że trudno jest przełożyć badania wykonane w mikroskali na warunki rzeczywiste, na co zwraca uwagę Luketa-Halnin [3]. Często dane otrzymane w mikro i makroskali wykluczają się. Przykładem mogą być pomiary prowadzone przez Enger i Hartman (w mikroskali), które zaprzeczają danym otrzymanym w makrotestach Coyote'a. Również badania prowadzone w makroskali często odbiegają od siebie. Jest to efekt tego, że badania wykonywały różne zespoły – brakuje odtwarzalności wyników, gdyż pomiary prowadzone były w nieco innych warunkach i przy różnych stężeniach poszczególnych składników wchodzących w skład LNG.

O ile zachowanie podobnego składu chemicznego wydaje się być stosunkowo proste, to odtworzenie podobnych warunków doświadczenia *in situ* jest niezwykle trudne ze względu na różne warunki pogodowe i stabilność Pasquilla panujące na danym terenie. W takich przypadkach warto wykorzystać modelowanie matematyczne danego zjawiska oraz metody symulacji komputerowej do predykcji zjawisk. Metody te istotnie wspomogą proces badań *in situ*, jednak ich nie zastąpią. Niezwykle ważne jest to, aby rozwijać badania w skali rzeczywistej pomimo problemów, jakie one niosą, gdyż jest to jedyne wiarygodne źródło danych związanych z wyciekami LNG. Tylko dzięki doświadczeniom w makroskali można uzyskać dane, które mogą posłużyć do weryfikacji zarówno modeli matematycznych, jak i symulacyjnych. Po takiej kalibracji modele te mogą być w przyszłości wykorzystywane do prognozowania skutków niekontrolowanego uwalniania LNG. Dodatkowo dane doświadczalne można implikować na nowe zagadnienia związane na przykład z wirtualnym rurociągiem. Nadto tego rodzaju badania są niezbędne w przypadku oceny stref niebezpiecznych w przypadku rozszczelnień rurociągów biegnących na dnie zbiorników wodnych, na przykład planowana nitka Baltic Pipe łącząca Danię i Polskę.

LITERATURA

1. ABSG Consulting Inc., Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers, numer referencyjny FERC04C40196.
2. Koopman R. P., Ermak D. L.: Lessons learned from LNG safety research, Journal of Hazardous Materials, 2007, 412-428.

3. Luketa-Hanlin A.: A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling, *Journal of Hazardous Materials*, 2006, A132, 119-140.
4. Łaciak M., Nagy S.: Problemy bezpieczeństwa technicznego i charakterystyka zagrożeń związanych z terminalem rozładunkowym LNG, *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 2010, tom 27, zeszyt 4.
5. Norma PN-EN 60079-10-1:2016-02 Atmosfery wybuchowe – Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni – Gazowe atmosfery wybuchowe.
6. Paltrinieri N., Tugnoli A., Cozzani V.: Hazard identification for innovative LNG regasification technologies, *Reliability Engineering and System Safety*, 137, 2015, 18-28.
7. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1315/2013 z dnia 11 grudnia 2013 r. w sprawie unijnych wytycznych dotyczących rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej (Dz.U. L 348 z 20.12.2013, str. 1-128).
8. Ślęczka W.: Estimation of the consequences of LNG vessel tank leakage in the port of Świnoujście, *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, 2011, 25(97), 70-76.
9. Plan portu Świnoujście [online]. <https://www.google.com/maps/place/Polska+2,+81-001+Gdynia>, [dostęp: 12-12-2018].
10. Ćwiczenia przed bunkrowaniem LNG w Porcie Gdynia [online]. <https://www.youtube.com/watch?v=q0jLp9u5rk0>, [dostęp: 12-12-2018].
11. Rysunek wygenerowany w programie DNV Phast ver. 7.11.