

dr inż. Agata Krystosik-Gromadzińska

Wydział Techniki Morskiej i Transportu

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Analiza problemów bezpieczeństwa pożarowego siłowni statków handlowych

Abstrakt

Siłownia okrętowa to takie miejsce statku, w którym na małej powierzchni zgromadzonych zostało wiele materiałów palnych, takich jak np. paliwa, oleje smarne czy rozpuszczalniki. Podczas eksploatacji, w wyniku sytuacji awaryjnych, może dochodzić do ich niekontrolowanego uwolnienia. Najczęściej występującym scenariuszem zdarzeń jest wyciek paliwa z nieszczelności w instalacji paliwowej. W siłowni występują także inne liczne potencjalne źródła zapłonu. Są to m.in. gorące powierzchnie. Kontakt paliwa z takimi powierzchniami jest najczęstszym zdarzeniem inicjującym zapłon, a w konsekwencji rozwój pożaru.

Bezpieczeństwo pożarowe siłowni zależy od rodzaju zastosowanego napędu, paliwa, wyposażenia, zabezpieczeń czynnych (takich jak np. przegrody pożarowe) i biernych (jak np. instalacje gaśnicze, wykrywające pożar, gaśnicze, sprzęt gaśniczy), a także od działań załogi, armatora i inspektorów.

Identyfikacja (np. z wykorzystaniem termowizji) i zabezpieczanie gorących powierzchni oraz przeciwdziałanie występowaniu wycieków paliwa, a także niezwłoczne ich usuwanie, to jedne z ważniejszych działań, które powinny być podejmowane przez załogę podczas codziennej eksploatacji.

Przewidywanie możliwości wystąpienia zagrożeń, definiowanie potencjalnych scenariuszy powstania i rozwoju pożaru oraz właściwe zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym, to działania prewencyjne, które w znaczący sposób również mogą przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej.

Słowa kluczowe: siłownia okrętowa, zagrożenie pożarowe, analiza bezpieczeństwa pożarowego, źródła zapłonu, termowizja

Fire Safety Problems Analysis for Merchant Ship Engine Room

Abstract

The engine room is one of ship's spaces in which a lot of combustible materials are accumulated on a small area, such as for example fuels, lubricating oils and solvents. During operation, uncontrolled leakage may occur as a result of emergency situations. The most common scenario of fire origin is the leakage of fuel from leaks in the fuel system. There are also numerous sources of ignition in the engine room. These are, for example, hot surfaces, the fuel has contact with. It is the most frequent ignition initiating event and, consequently, the fire occurrence.

The fire safety of the engine room depends on the type of propulsion, fuel, equipment, applied protection methods such as passive (fire resisting bulkheads) and active ones (extinguishing, detection and fire-fighting installations, extinguishing equipment), as well as crew, ship owners and inspectors activities. The Identification and protection of hot surfaces (for example with the use of the thermal imaging camera) as well as preventing the occurrence of fuel leaks and their immediate removal, are one of the most important tasks undertaken by the crew in everyday operations, which can significantly reduce the number of fires.

Anticipating the possibility of the hazards occurrence, examining the potential scenarios of fires are the preventive activities, and the fire safety management, which can significantly contribute to the fire safety of the engine room.

Keywords: engine room, fire risk, fire safety analysis, ignition sources, thermography

Wstęp

W artykule przedstawiono problem bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej oraz wybranych wyników badań gorących powierzchni, prowadzonych na statku podczas rejsu morskiego w 2016 i 2017 r., z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Scharakteryzowano zagrożenia pożarowe, filozofię bezpieczeństwa pożarowego zawartą w przepisach międzynarodowych oraz wybrane metody zwiększenia poziomu bezpieczeństwa pożarowego, ze szczególnym uwzględnieniem działań załogi, w tym możliwość wykorzystania nowych narzędzi diagnostycznych.

Požary na statkach stanowią jedno z największych zagrożeń dla załogi i samej jednostki. Miejscem, w którym ma swój początek większość z nich, jest siłownia okrętowa, a kontakt paliwa z rozgrzaną powierzchnią jest najczęściej spotykanym scenariuszem. Zabezpieczenia konstrukcyjne oraz eksploatacyjne, a także właściwe zarządzanie bezpieczeństwem oraz postępowanie załogi zarówno podczas codziennej eksploatacji, jak i w sytuacjach awaryjnych (np. podczas pożaru), stanowi o bezpieczeństwie pożarowym danej jednostki.

Bezpieczeństwo statku to zdolność systemu składającego się z obiektu technicznego, jakim jest statek oraz człowieka, działającego w określonym otoczeniu (warunkach geograficznych i hydrometeorologicznych) i określonym stanie eksploatacji do zapewnienia w przewidzianych granicach (przy akceptacji możliwości wystąpienia nieistotnych dla rejsu incydentów, które nie powodują jego przerwania i nie stanowią zagrożenia), a także w określonym czasie, nieistnienia zagrożenia dla ludzi i środowiska (dla pasażerów, członków załogi oraz środowiska morskiego).

Jest to interdyscyplinarne zagadnienie, którego prawidłowe zdefiniowanie wymaga wiedzy technicznej o bezpieczeństwie eksploatacji statku jako obiektu technicznego, znajomości zagadnień związanych ze sztuką nawigacji, ergonomii stanowiska pracy, psychologii pracy, zagadnień polityki międzynarodowej i prawa, czy dotyczących terroryzmu, a także cyberterroryzmu.

Bezpieczeństwo pożarowe statku, będące tematyką niniejszego artykułu, może być opisywane jako stan, w którym wystąpienie pożaru i jego rozprzestrzenianie jest mało prawdopodobne, a w przypadku wystąpienia nie zaistnieje konieczność przerwania żeglugi, potencjalne skutki nie stanowią zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi, zaś ewentualne straty materialne będą małe w stosunku do wartości jednostki.

Według Kaplana i Garricka nie ma bowiem możliwości uniknięcia wystąpienia ryzyka, w tym ryzyka wystąpienia pożaru, a jedynie jest wybór pomiędzy ryzykami [1]. Niezbędne jest udzielenie odpowiedzi na trzy pytania: Co może się wydarzyć? Jakie jest prawdopodobieństwo wystąpienia danej sytuacji, jeżeli dojdzie do zdarzenia? Jakie są przewidywane konsekwencje?

1. Zagrożenie pożarowe na statku

Straty materialne poniesione w wyniku pożarów ugaszonych w zarodku są niewielkie, ale rosną gwałtownie wraz z rozwojem pożaru. Pożary mogą

powodować zniszczenie wybranego miejsca na statku lub utratę całej jednostki wraz z ładunkiem, a także znajdujących się w pobliżu innych statków, obiektów portowych czy stoczniowych.

Zagrożenie pożarem w siłowni na wszystkich typach statków jest zbliżone i zależy od rodzaju paliwa, konstrukcji siłowni oraz głównych maszyn napędowych. Na poziom bezpieczeństwa pożarowego siłowni ma wpływ także projekt siłowni i jej wykonanie, zastosowane zabezpieczenia konstrukcyjne, instalacje wykrywania pożaru i gaśnicze oraz czynności wykonywane przez załogę podczas codziennej eksploatacji i kontroli. Należą do nich m.in.:

- regularne kontrole instalacji paliwowych,
- kontrole innych instalacji,
- kontrole elementów maszyn stwarzających zagrożenie pożarowe,
- utrzymanie wysokich standardów czystości (zauważenie wycieku),
- jak najszybsza likwidacja każdego wycieku paliwa, oleju czy innego łatwopalnego materiału,
- regularne kontrole materiałów izolacji gorących powierzchni (wzrokowe oraz pomiary temperatur).

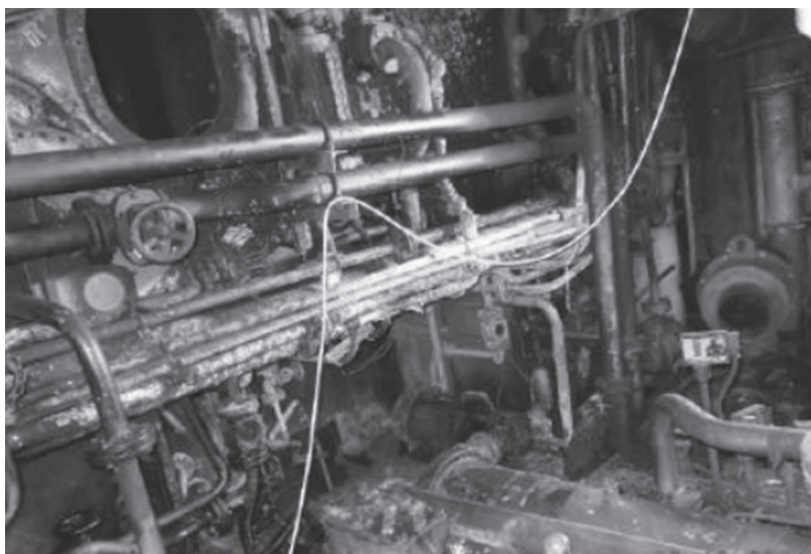
Kontrole prowadzone są także przez zewnętrznych inspektorów. Towarzystwa klasyfikacyjne zwracają uwagę na konieczność regularnego wykonywania inspekcji mających na celu wczesne wykrycie nieprawidłowości [2].

Koniecznym jest także prowadzenie alarmów próbnych dla różnych scenariuszy zdarzeń w siłowni oraz szkolenia w ośrodkach lądowych.

Podczas prowadzenia prac remontowych wymaga się zachowania szczególnej ostrożności. Należy zakładać, że czasowo wyłączone mogą być z eksploatacji instalacje wykrywające pożar i gaśnicze, co w sytuacji wystąpienia pożaru znacznie utrudnia jego ugaszenie. Konieczny jest zatem dodatkowy nadzór i kontrole. Także podręczny sprzęt gaśniczy może być poddawany kontrolom czy wymianie i jego użycie może być niemożliwe. Ponadto w stoczniach mogą być prowadzone prace pożarowo niebezpieczne bądź inne, w wyniku wykonywania których czasowo mogą pojawić się w siłowni dodatkowe materiały palne czy źródła zapłonu. Niezwykle istotnym jest także, aby po zakończeniu prac remontowych zapewnić nadzór miejsc, w których były wykonywane.

Przykładem pożaru statku znajdującego w stoczni jest pożar jednostki, który miał miejsce w stoczni rumuńskiej. Był on konsekwencją tzw. prac gorących (cięcia stali), które prowadzone były w zbiorniku żelowym. Do

rozwoju i rozprzestrzenienia pożaru doszło w wyniku zapłonu elementów instalacji wentylacyjnej wykonanej z plastiku. Widok siłowni po pożarze przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Zniszczenia po pożarze siłowni statku będącego w trakcie remontu stocznioowego

Źródło: [3]

Jednym z ważniejszych czynników wpływających pośrednio na bezpieczeństwo żeglugi są uregulowania prawne. Do ich przestrzegania zobowiązani są projektanci, konstruktorzy, wykonawcy, armatorzy i eksploatorzy.

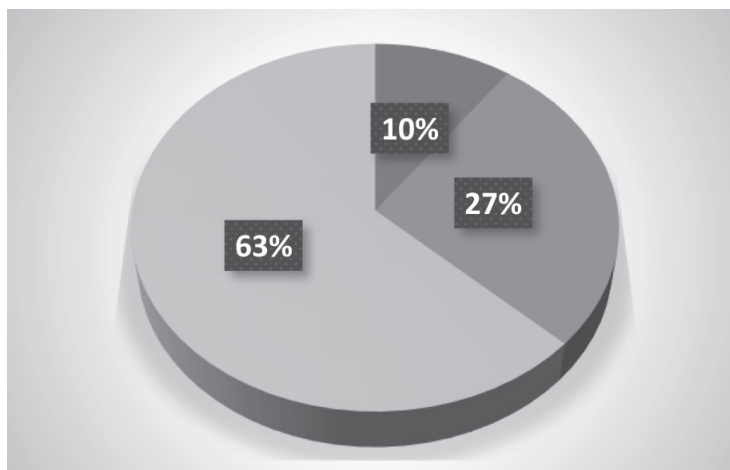
Podstawowym aktem prawnym obowiązującym w żegludze jest Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (konwencja SOLAS) [4]. Zgodnie z jej zaleceniami, można wyróżnić trzy grupy metod, według których prowadzone są działania mające na celu zapobieganie rozprzestrzenianiu się pożarów. Są to: zastosowanie zabezpieczeń konstrukcyjnych, zabezpieczeń eksploatacyjnych oraz zarządzanie bezpieczeństwem [4]. Dla każdej z metod istnieją ponadto szczegółowe wymagania zawarte w odrębnych przepisach.

Istotą filozofii bezpieczeństwa opisaną w wymaganiach konwencji SOLAS jest niedopuszczenie do powstania pożaru, a jeżeli jest to niemożliwe, niedopuszczenie do rozprzestrzeniania się pożaru poza miejsce, w którym powstał. Podstawowe wymagania funkcjonalne konwencji to:

- podział statku na główne strefy pionowe i strefy poziome za pomocą przegród termicznych i konstrukcyjnych;
- oddzielenie pomieszczeń mieszkalnych od reszty statku za pomocą przegród termicznych i konstrukcyjnych;
- ograniczone stosowanie materiałów palnych;
- wykrycie każdego pożaru w strefie jego powstania; ograniczenie i ugaszenie pożaru w przestrzeni, w której powstał;
- ochrona dróg ewakuacji i dróg dostępu do prowadzenia akcji gaśniczej; stała gotowość urządzeń i wyposażenia przeciwpożarowego;
- zredukowanie do minimum możliwości zapłonu palnych oparów ładunku [4].

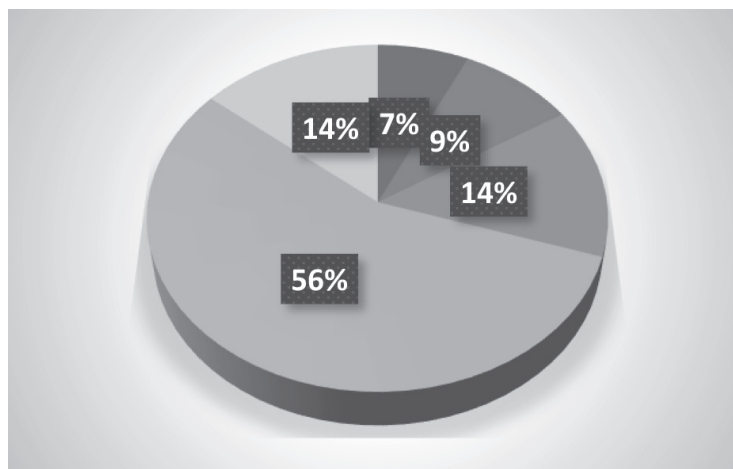
W siłowni okrętowej bardzo ważnym jest również właściwy dobór instalacji wykrywania pożaru, gaśniczej bądź kombinacji instalacji gaśniczych i przenośnego sprzętu gaśniczego oraz właściwe rozplanowanie potencjalnych obiektów ryzyka, jak np. rurociągi paliwa pod ciśnieniem i gorące powierzchnie.

Ze statystyk prowadzonych przez Towarzystwo Klasyfikacyjne Det Norske Veritas wynika, że ponad połowa pożarów ma swoje źródło w siłowni okrętowej (rys. 2), a główną przyczyną ich powstania jest wyciek paliwa na gorącą powierzchnię (rys. 3).



Rys. 2. Miejsce powstania pożaru wg DNV: pomieszczenia mieszkalne: 10%; przestrzeń ładunkowa: 27%; siłownia okrętowa: 63%

Źródło: opracowanie na podstawie [5]



Rys. 3. Przyczyna powstania pożaru wg DNV: prace gorące: 7%; elektryczność: 9%; awarie kotła: 14%; wyciek paliwa na gorącą powierzchnię: 56%; awarie części: 14%
 Źródło: Opracowanie na podstawie [5]

Zgodnie z danymi zawartymi w statystykach towarzystwa DNV, kontakt paliwa z rozgrzaną powierzchnią stanowi źródło (z wyłączeniem prac stoczniowych) 56% pożarów w siłowniach.

2. Czynniki zagrożenia pożarowego w siłowni

2.1. Identyfikacja czynników zagrożenia pożarowego w siłowni

W siłowni okrętowej występują wszystkie czynniki zagrożenia pożarowego, tzn. materiał palny, źródło zapłonu i utleniacz. Paliwo i olej smarny znajdują się w zbiornikach, przewodach paliwowych, zęzach maszynowych, na stanowiskach prób wtryskiwaczy, w wirówkach, w skrzyniach korbowych silników, pompach paliwa i oleju, palnikach kotłów. Zapas paliwa na statku może wynosić kilka tysięcy ton. Do tej wartości należy dodać także zapas olejów smarnych. Oznacza to dużą koncentrację znacznych ilości łatwopalnych materiałów w miejscu najwyższego prawdopodobieństwa powstania pożaru.

Wiele pożarów w siłowniach powstaje w wyniku uwolnienia: wycieku czy wtrysku paliwa oraz oleju smarnego. Jednym z najczęściej pojawiających się miejsc wycieków są elastyczne węże. Prawdopodobieństwo powstania pęknięcia takiego przewodu, szczególnie gdy jest mocno wygięty, jest duże.

Elastyczne, wygięte przewody paliwowe powinny więc być wykorzystywane tylko tam, gdzie jest to konieczne. W obrębie ich zastosowania należy ograniczyć wibracje. Należy również unikać ich nadmiernego wygięcia.

Źródła zapłonu w siłowni to przede wszystkim gorące powierzchnie elementów maszyn, kolektory i rury wydechowe, ale także miejsca możliwego iskrzenia generatorów i silników elektrycznych, uszkodzonych przewodów elektrycznych. Dużym zagrożeniem są także obszary prowadzenia prac remontowych, otwarty ogień i inne. Obszerne opracowanie na temat źródeł zapłonu zawarte jest w dokumencie DNV [5].

W siłowni trudno wyeliminować wszystkie potencjalne źródła wycieków paliwa, a tym bardziej wykluczyć możliwość ich kontaktu z gorącymi powierzchniami. W celu ograniczenia możliwości zapłonu, łatwiej jest te powierzchnie ograniczyć, a najlepiej we właściwy sposób odizolować [5].

Do potencjalnie niebezpiecznych gorących powierzchni w siłowni okrętowej należą: korpus silnika, zawory indykatorowe, kolektory wydechowe, kołnierze kolektorów wydechowych, kompensatory kolektorów wydechowych, turbosprężarka, kołnierze kompensatorów, kołnierze łączące korpusy turbosprężarki i odcinki kolektorów wydechowych, króćce montażowe czujników temperatury na kolektorach wydechowych, korpusy pomp wtryskowych paliwa, rurociągi dolotu i przelewu paliwa pomp wtryskowych oraz powierzchnie reflektorów nad silnikiem. Z uwagi zagrożenia z nimi związane zaleca się ich regularne i dokładne kontrole.

W siłowniach poważne zagrożenie stanowią same silniki. Ich konstrukcja powoduje, że pożar może powstać w karterze, w przestrzeniach podtłokowych oraz w kolektorze wydechowym. Pożar w karterze może powstać na skutek np. zacierania się łożysk. Powoduje ono podniesienie się temperatury, co doprowadzić może do odparowania i powstania mgły olejowej i eksplozji.

W przestrzeniach podtłokowych może zapalić się nagromadzony osad (nagar). Przyczynami zapalenia nagaru mogą być przedmuch palącej się mieszanki przez uszkodzone pierścienie tłoka, niewłaściwa regulacja zapłonu silnika, tarcie itp.

Podczas spalania paliwa, zwłaszcza przy niedoborze tlenu (niewłaściwa regulacja silnika, przeciążenia), powstaje sadza, która osadza się na urządzeniach wydechowych. Przy jej nadmiernej ilości oraz w konsekwencji niewłaściwego postępowania podczas użycia zdmuchiwalcy, może dojść

do powstania pożaru (temperatura rośnie do 1000°C, występuje dużo iskiei) [6–10].

W normalnych warunkach pracy statku zapalenie paliwa płynnego w nieuszkodzonym i pełnym zbiorniku paliwa jest niemożliwe. W zbiornikach takich paliwo płynne i jego pary cięższe od powietrza wypierają je. Zbiorniki częściowo wypełnione są znacznie bardziej niebezpieczne. Znajdują się w nich pary paliwa wymieszane z powietrzem.

Pożar w siłowni okrętowej wiąże się z podwyższeniem temperatury, czego następstwem może stać się wykipienie zbiornika. Cząsteczki wody występujące w paliwie zaczynają wrzeć; dalsze podgrzewanie zbiornika prowadzi do nagrzania paliwa do temperatury wrzenia, czego następstwem jest wykipienie zbiornika.

Pożar w zbiorniku w pierwszych minutach jest stosunkowo łatwy do ugaszenia. Konstrukcja nie jest jeszcze rozgrzana. Utrata szczelności przez zbiornik znacznie komplikuje sprawę. W takiej sytuacji właściwym jest uruchomienie instalacji gaszenia, która doprowadzona jest do zbiorników, zwłaszcza głębokich. Ze względu na możliwość rozprzestrzeniania się pożaru paliwa obojętna nie jest także lokalizacja zbiorników. Utrata szczelności zbiornika stwarza poważne ryzyko.

Obszarami zagrożonymi powstaniem pożaru są również pomieszczenie agregatów prądotwórczych, pomieszczenie wirówek paliwa i oleju, warsztat, a także kotły, spalarki i inne.

2.2. Badania temperatur gorących powierzchni w siłowni

Identyfikacja gorących powierzchni oraz sprawdzenie możliwości wykorzystania termowizji do szybkiej diagnostyki zagrożeń pożarowych w siłowni to cel badań prowadzonych na wybranym statku handlowych. Była to jednostka polskiego armatora, a badania przeprowadzono w grudniu 2016 i styczniu 2017 r. Wymiary główne statku: długość – L – 149,47 m, szerokość – B – 22,99 m, nośność – 17 059 DWT.

W badaniach wykorzystano kamerę termowizyjną marki FLIR wbudowaną do smartfonu CAT S60. Szacowano jej przydatność do wykorzystania przez załogę podczas codziennych inspekcji, których celem ma być wczesne wykrywanie powierzchni o podwyższonych temperaturach, traktowanych jako miejsc potencjalnego zapłonu paliwa.

Listę punktów pomiarowych wybrano w oparciu o dane statystyczne scenariuszy zaistniałych pożarów opracowywane przez towarzystwa klasyfikacyjne oraz doświadczenia załogi zatrudnionej na statkach polskiego armatora.

Podczas badań zidentyfikowano powierzchnie o podwyższonych temperaturach. Za zagrażające bezpieczeństwu uznano, zgodnie z wymaganiami przepisów (IMO), powierzchnie o temperaturze przekraczające 220°C.

Pomiary prowadzono podczas rejsu morskiego w siłowni w normalnych warunkach eksploatacji. Zastosowaną metodę bezdotykową z wykorzystaniem termografii na podczerwień oraz uzupełniająco (dla powierzchni o temperaturach wyższych niż 150°C, ze względu na ograniczony zakres pomiarowy kamery termowizyjnej) wykorzystano zdalny termometr laserowy, którego zakres pomiarowy mieścił się w granicach od minus 35°C do plus 800°C (błąd pomiarowy deklarowany przez producenta to 2°C).

Obecnie wykorzystanie termografii na statkach rekomendowane jest przez towarzystwa klasyfikacyjne jako efektywny, prosty i szybki sposób na wczesne wykrycie nieprawidłowości pracy urządzeń. Termografia nie jest jednak wykorzystywana przez załogi, chociaż na wybranych łodziach motorowych można spotkać system ciągłego nadzoru kamerami termowizyjnymi siłowni okrętowej.

Prowadząc pomiary z wykorzystaniem termografii, należy zwracać uwagę na błędy, które mogą się pojawić w pomiarach, szczególnie dotyczące materiałów o nietypowej, np. niskiej emisywności. Chociaż oprogramowanie FLIR posiada funkcję ustawienia szacowanej emisywności oglądanych obiektów, należy mieć świadomość, iż pomiar temperatury może okazać się jedynie dobrym szacunkiem rzeczywistej wartości. W codziennej eksploatacji jest to jednak wystarczająca informacja, która pomaga we wczesnym wykryciu potencjalnych źródeł pożaru. Błędy pomiarowe mogą pojawiać się także w odniesieniu do cienkich barier, materiałów przepuszczających podczerwień [11].

Pomiar z wykorzystaniem termowizji odbywa się bezkontaktowym urządzeniem kontrolno-pomiarowym, które może wyświetlać i przechowywać zmierzone dokładne wartości temperatury, jak również wizualne dowody pomiarów. Oszczędność czasu oraz spełnienie wymagania prowadzenia kontroli w szybkim tempie, to zalety, które dla żeglugi są bardzo istotne.

Ponadto statki handlowe są bardzo dobrymi obiektami do inspekcji termograficznych, gdyż mają bardzo duże siłownie okrętowe, w których jest wiele trudnodostępnych miejsc, rozległe instalacje elektryczne, rozbudowane

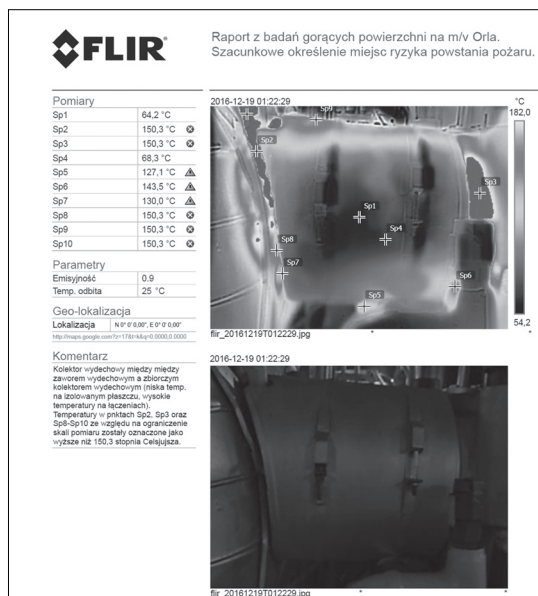
systemy elektroniczne, które trudno jest badać wizualnie czy wykonywać pomiary zdalnym termometrem laserowym. Z wykorzystaniem termografii na podczerwień łatwo można mierzyć temperatury, wykrywać obszary nieizolowane bądź nadzorować powierzchnie w sposób ciągły. Inspekcje termowizyjne z kamerą na podczerwień natychmiast pokażą także stan obwodów elektrycznych, układów elektronicznych oraz innych instalacji i urządzeń na statku. W okrętownictwie wciąż do pomiarów wykorzystuje się zdalne termometry laserowe, pomimo faktu iż używanie kamer termowizyjnych na podczerwień daje większe możliwości i jest bezpieczniejsze.

Badania na wybranej jednostce prowadzone były z wykorzystaniem smartfona CAT S60 z wbudowaną kamerą termowizyjną FLIR Lepton drugiej generacji o rozdzielczości 640×480 pix. Rozdzielczość wbudowanego detektora podczerwieni wynosiła 320×240 pix. Do obsługi kamery podczerwieni wykorzystano zainstalowaną fabrycznie aplikację FLIR. Zakres pomiaru temperatur w urządzeniu wynosił od minus 60°C do plus 150°C , co jest wadą utrudniającą dokładny pomiar powierzchni gorących. Mimo to daje on możliwość szybkiego wykrycia najgorętszych miejsc wybranego fragmentu obiektu lub powierzchni. Urządzenie wyposażone zostało w procesor: Qualcomm Snapdragon 617 (4 rdzenie, 1.50 GHz, A53 + 4 rdzenie, 1.2 GHz, A53); układ graficzny: Adreno 405 oraz system operacyjny: Android 6.0 Marshmallow. Urządzenie jest łatwo dostępne i w stosunku do kamer termowizyjnych tańsze, a więc może być rekomendowane jako wyposażenie załogi.

Smartfon CAT S60 z wbudowaną kamerą termowizyjną FLIR wyposażony był w funkcję obrazowania dwuwidmowego. Umożliwiała ona nakładanie obrazu w paśmie widzialnym na obraz w paśmie podczerwonym. Obraz ze zwykłej kamery był przetwarzany na czarno-białe kontury i nakładany na kolorowy obraz z kamery podczerwieni. Ułatwiała to analizę obrazu przez człowieka. Urządzenie umożliwiało także zapisywanie podwójnych zdjęć zawierających jednocześnie obraz widzialny i podczerwony. Do każdego zdjęcia dodawana była skala temperatury. Możliwa była identyfikacja temperatur we wszystkich punktach obiektu, także po zapisaniu zdjęcia [12, 13].

Podczas prowadzonych pomiarów zlokalizowano gorące powierzchnie na silniku głównym, zespołach prądotwórczych oraz kotłach. Zmierzone wartości temperatur znacznie przekraczały 220°C .

Przykładowe wyniki pomiarów podczas identyfikacji jednego z obiektów ryzyka przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Punkty pomiarów temperatury: kolektor wydechowy (po lewej), kołnierz śrubowy – łącznie kolektora wydechowego ze zbiorczym kolektorem wydechowym (po prawej). Opracowanie wyników pomiarów z wykorzystaniem oprogramowania FLIR Tools

Źródło: opracowanie własne

Pomiar z wykorzystaniem kamery termowizyjnej wykazał, że najbardziej gorące miejsca to łączenia kolektorów – kołnierze śrubowe. Dokładne pomiary z wykorzystaniem zdalnego termometru laserowego, dla miejsca łączenia – kolektora wydechowego z zaworem wydechowym i zbiorczym kolektorem wydechowym przedstawiono na rys. 5. Łączenie – kołnierz śrubowy – zostało sklasyfikowane jako obiekt o znaczącym zagrożeniu pożarowym. Zmierzona temperatura przekroczyła 320°C.



Rys. 5. Łączenie – kołnierz śrubowy – kolektor wydechowy między zaworem wydechowym a zbiorczym kolektorem wydechowym – pomiar temperatury zdalnym termometrem laserowym

Źródło: opracowanie własne

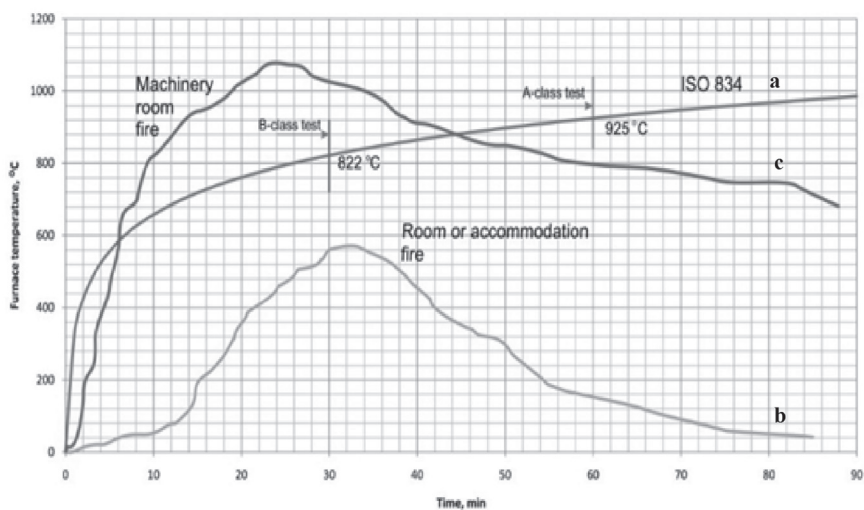
W siłowni, w której prowadzono badania, zidentyfikowano na silniku głównym siedem miejsc, w których temperatura przekraczała przyjęty próg bezpieczeństwa 220°C, na silniku pomocniczym było ich pięć, zaś na kotle parowym utylizacyjnym – jedno takie miejsce. Załoga podjęła czynności w celu eliminacji źródeł zagrożenia. Najczęściej polegały one na naprawie bądź uzupełnieniu izolacji.

Lokalizacja i dokładna charakterystyka wymienionych obiektów, charakteryzowanych przez wysokie prawdopodobieństwo powstania pożaru w siłowni, jest tematem odrębnej publikacji autora.

Siłownia okrętowa jest miejscem, z którego, podczas pożaru, nie da się całkowicie wyeliminować utleniacza, którym jest powietrze. Ze względu na znaczne rozmiary siłowni, nawet po odcięciu wentylacji, pozostanie w niej ilość powietrza zdolna do podtrzymywania pożaru. W siłowni występują ponadto intensywne ruchy powietrza będące wynikiem działania wentylacji, a w czasie pożaru wywołane konwekcją ciepłą.

3. Rozprzestrzenianie pożarów w siłowni okrętowej

Czas trwania pożaru siłowni waha się od kilku, kilkudziesięciu minut do ponad doby. Osiągane temperatury mogą przekraczać 1000°C. Pożary siłowni okrętowych mają gwałtowny charakter, co pokazano za pomocą krzywej c na rys. 6. Szybki wzrost temperatury do wartości znacznie przewyższających pożary standardowe oraz pożary innych pomieszczeń statku sprawia, że siłownia okrętowa jest szczególnie niebezpiecznym obiektem.



Rys. 6. Porównanie zmian temperatury w czasie dla pożaru opisanego standardową krzywą temperatura – czas (krzywa a), zgodnie z ISO 834 oraz dla pożarów pomieszczeń mieszkalnych na statku (z ograniczoną ilością materiałów palnych (krzywa b)) i pomieszczenia kategorii A siłowni na statku (krzywa c)

Źródło: opracowanie na podstawie [14]

Spośród dróg rozprzestrzenienia się pożaru w siłowni wymienia się niewłaściwe dla danych warunków przegrody, przegrody z uszkodzoną izolacją

(np. w wyniku oddziaływania drgań – obsunięcie izolacji lub po remontach), źle izolowane rurociągi, otwarte drzwi, kanały i szyby wentylacyjne, a także tory kablowe.

Požary powstałe w siłowniach okrętowych mogą rozprzestrzeniać się w samej siłowni oraz na inne części statku. Zależy to głównie od dopływu i ciągu powietrza, a także od skupienia materiałów palnych, geometrii siłowni oraz rodzaju i ilości dróg rozprzestrzeniania się pożaru. Problemy rozprzestrzeniania pożaru i scenariusze zostały opisane w publikacji [15].

Na rys.7 przedstawiono zniszczenia widoczne w wyniku rozprzestrzeniania pożaru siłowni statku typu ro-ro MV Fernanda (2013 r.) na inne rejony statku [16].



Rys. 7. Zniszczenia popożarowe na statku typu ro-ro MV Fernanda

Źródło: [16]

Pożar rozwija się zawsze w kierunku ciągu powietrza, ponieważ na skutek różnicy ciśnienia gazów dym i płomień dążą do wydostania się na zewnątrz, do atmosfery.

Pożar powstały w siłowni okrętowej rozprzestrzenia się na poziome platformy. W zęzach znajdują się resztki paliwa dostarczające materiału palnego. Pozostałości paliwa i olejów pływają na powierzchni wody, osiadają na ściankach. Dodatkowo powietrze dostarczane przez wentylację opada na dół i poprawia warunki spalania.

Ogień rozprzestrzenia się także wzdłuż burt w górę, w kierunku górnej części szybu maszynowego. Urządzenia, instalacje, zbiorniki, materiały palne, w obszarze oddziaływania pożaru ulegają nagrzewaniu, opaleniu, zniszczeniu albo zapalają się, podsycając palenie. Na drodze płomieni mogą znaleźć się np. zbiorniki rozchodowe paliwa, umieszczone zwykle w szybie świetlnym.

Istotnym, z punktu widzenia możliwości rozprzestrzeniania się pożaru, jest także zagadnienie usytuowania szybu siłowni. Rozwiązania stosowane obecnie przewidują oddzielenie szybu od nadbudówki, zmniejszając tym samym ryzyko przedostawania się pożaru pomiędzy przedziałami. Odległości dzielące siłownię i nadbudówkę zazwyczaj nie są jednak duże. Zdarza się także, że okna kabin skierowane są na szyb siłowni. Ponadto oddziaływanie cieplne poprzez przegrodę może uniemożliwić przebywanie w jej sąsiedztwie, w granicznym przypadku może wystąpić zapalenie przegrody nadbudówki bądź przedostanie się pożaru przez tę przegrodę do pomieszczeń mieszkalnych czy korytarzy. Pożar, chociaż jest to rzadko spotykane, może przedostać się poprzez przegrody również na drodze promieniowania. Mogą zapalić się składowane czasowo na pokładzie w sąsiedztwie szybu środki ratunkowe.

Grodzie mogą stać się drogą, przez którą będzie rozprzestrzeniał się pożar, wtedy, gdy ich izolacja będzie niedopasowana do warunków, w których została umieszczona gródź lub gdy mocowanie izolacji zostanie nieprawidłowo wykonane. W wyniku eksploatacji, oddziaływania drgań, może dojść do obluźwienia izolacji mocowanej za pomocą szpilek, co prowadzi do powstania przestrzeni, które nie są izolowane (utrata integralności izolacji). Zaistnienie takiego zdarzenia wykazały badania przeprowadzone po pożarze na m/s Syn Pułku.

Rozprzestrzenianie pożaru między siłownią a nadbudówką może także mieć miejsce przez korytarze, otwarte drzwi, tory kablowe i wentylacyjne, niewłaściwie izolowane rurociągi.

Tory kablowe mogą stać się potencjalną drogą rozprzestrzeniania pożaru, zwłaszcza gdy kable i przejścia kablowe są niewłaściwie wykonane. Powinny być one co najmniej typu nierozprzestrzeniającego płomienia i tak ułożone, aby nie utraciły swoich pierwotnych właściwości nierozprzestrzeniania płomienia. Należy prowadzić je w dużych wiązkach. Przerwy pomiędzy wiązkami powinny być większe od 6 cm, a wiązek nie powinno być więcej niż dwie. Ponadto horyzontalne prowadzenie kabli uważa się za bezpieczniejsze.

Kanały wentylacyjne mogą stać się drogą rozprzestrzeniania pożaru, zwłaszcza gdy nie posiadają odpowiednich zamknięć – klap pożarowych.

Bardziej prawdopodobny jest scenariusz, w którym pożar przedostaje się z siłowni do nadbudówki, jednakże zdarzają się też wypadki przeniesienia pożaru do siłowni z pokładu czy nadbudówki. Ciekawym i niespotykanym jest zdarzenie, w którym w wyniku nagrzania się ścian nadbudówki, w której rozprzestrzenił się pożar, zapalił się ponton przechowywany na pokładzie. Umieszczony był on w pobliżu świetlika siłowni, przez który szczątki palącego się pontonu spadały do siłowni.

4. Analiza możliwości powstania i rozprzestrzeniania pożaru jako metoda poprawy bezpieczeństwa w siłowni

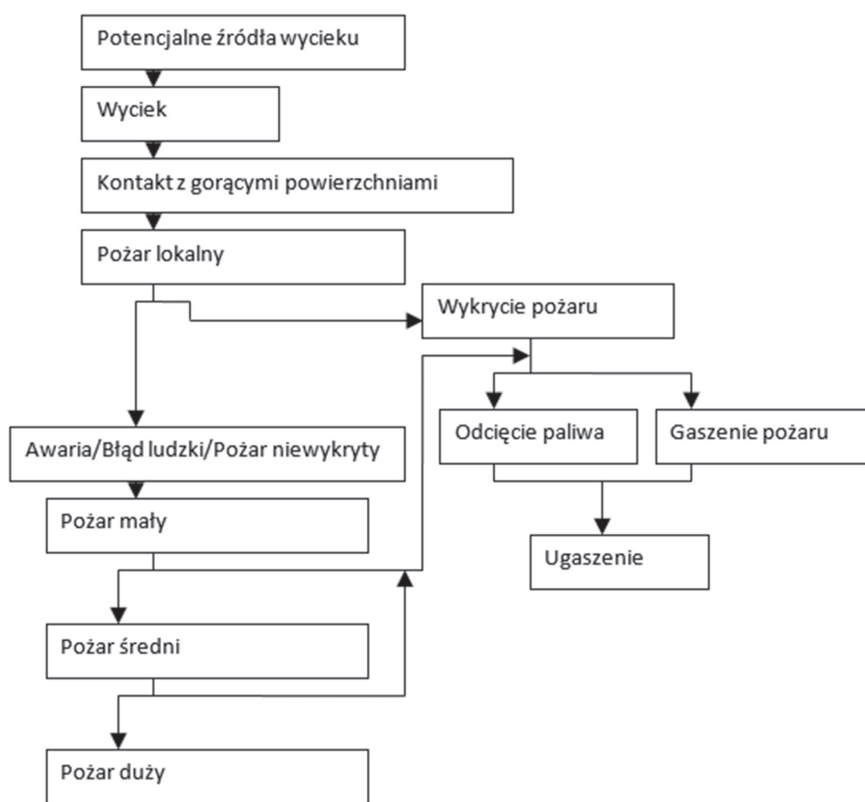
Ważnym elementem działań na rzecz poprawy bezpieczeństwa pożarowego, obok stosowania zabezpieczeń konstrukcyjnych, instalacji wykrywających pożar i gaśniczych oraz zarządzania bezpieczeństwem, jest także analiza możliwości powstania i rozprzestrzeniania pożaru.

Ważnym jej elementem jest budowa scenariusza pożarowego, która powinna być poprzedzona opisem sytuacji pożarowej. Ten zaś powinien składać się z następujących kroków [17]:

1. Opis sytuacji poprzedzającej pożar:
 - opis obiektu, w którym powstał pożar,
 - opis warunków środowiskowych.
2. Identyfikacja źródła zapłonu, temperatury, czasu i powierzchni styku z potencjalnymi paliwami.
3. Opis paliw inicjujących:
 - rodzaj,
 - stan skupienia,
 - powierzchnia wymiany ciepła i masy.
4. Opis paliw wtórnych, podtrzymujących spalanie:
 - rodzaj,
 - bliskość do paliw inicjujących,
 - ilość,
 - możliwość dostarczenia,
 - potencjalny zasięg.
5. Lokalizacja obiektu.

6. Istotne czynniki wpływające na powstanie i rozwój pożaru.
7. Właściwe dane statystyczne. Dane z przeszłości, prawdopodobieństwo uszkodzeń, inne wskaźniki.

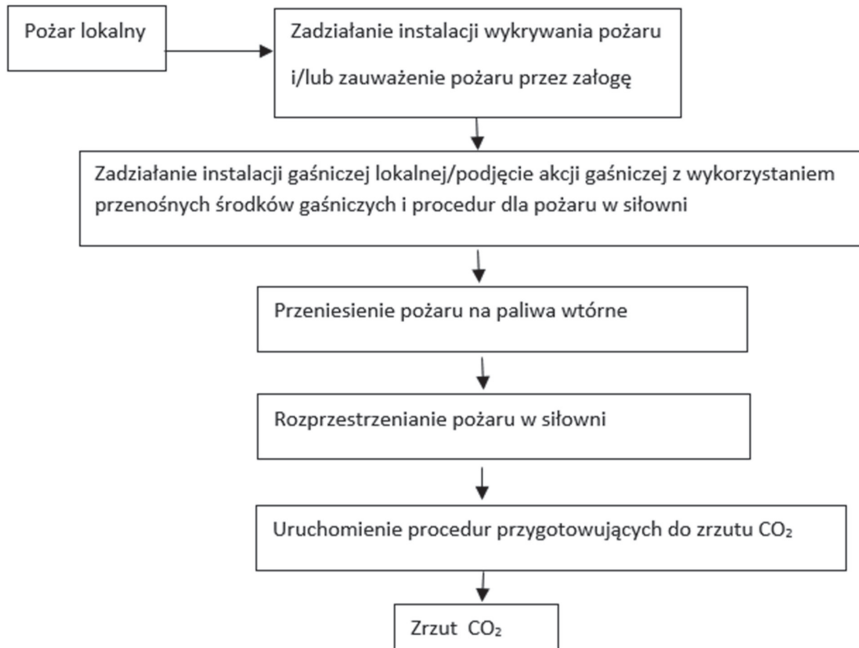
W zależności od warunków pożar może zostać ugaszony zaraz po wykryciu bądź rozwijać się aż do pożaru obejmującego całą siłownię czy też rozprzestrzeniającego się do innych pomieszczeń statku. Poglądowy schemat najczęściej spotykanego scenariusza pożaru i możliwych jego skutków przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Poglądowy schemat rozwoju pożaru siłowni

Źródło: opracowanie własne

Jedną z najczęściej wykorzystywanych obecnie do gaszenia pożaru siłowni instalacji jest instalacja na CO₂. Na rys. 9 przedstawiono uproszczony schemat walki z pożarem z wykorzystaniem wspomnianej instalacji.



Rys. 9. Uproszczony schemat walki z pożarem siłowni

Źródło: opracowanie własne

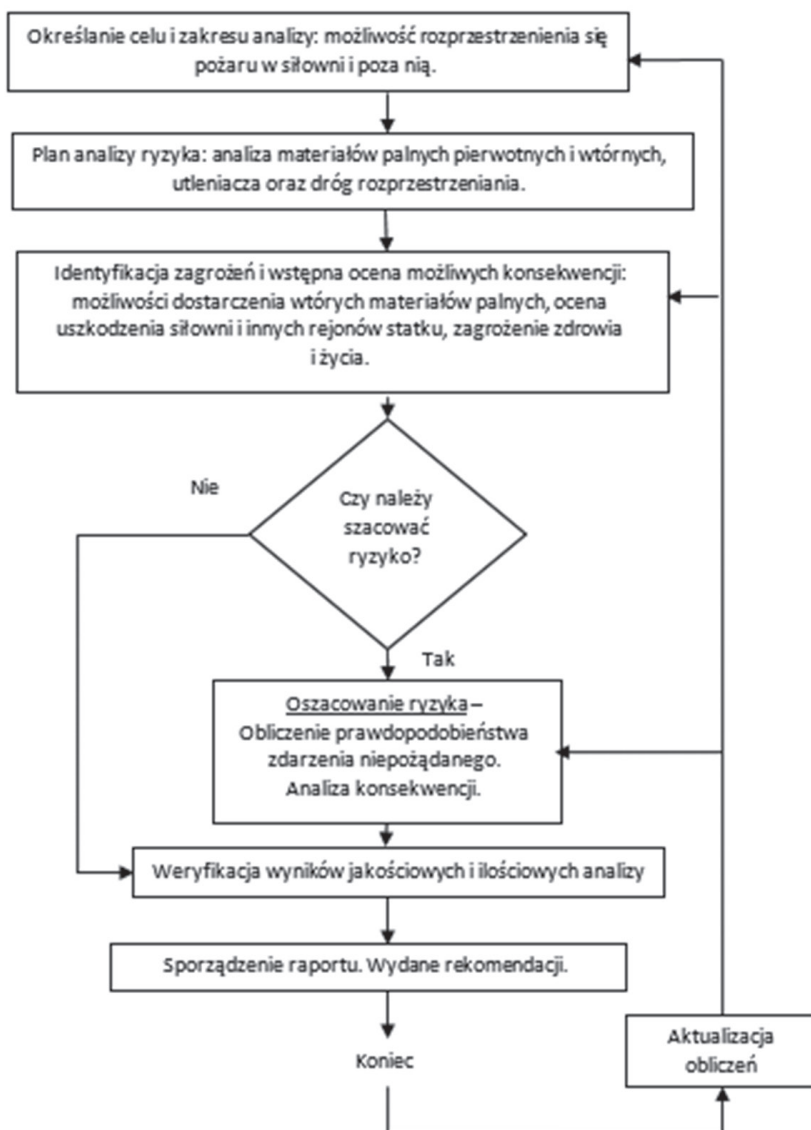
Na każdym etapie rozprzestrzeniania pożaru mogą wystąpić zdarzenia niepożądane, które będą miały wpływ na przebieg zdarzeń.

Aby w sposób możliwie dokładny przewidzieć rozwój sytuacji pożarowej, należy rozpoznać wszystkie czynniki mające wpływ na możliwość rozprzestrzeniania pożaru. Należy również ocenić ryzyko ich wystąpienia. Oceniając ryzyko rozprzestrzeniania się pożaru w siłowni okrętowej i poza nią, można posłużyć się algorytmem przedstawionym na rys. 10.

Kolejnym krokiem analizy czynników mających wpływ na rozprzestrzenianie pożaru siłowni może być analiza uwzględniająca czynniki niezbędne do rozwoju pożaru oraz te, które rozprzestrzenianiu sprzyjają, a także czynniki ograniczające proces.

Prowadzone w sposób systematyczny i dokładny analizy możliwości powstania i rozprzestrzeniania pożarów w siłowniach okrętowych oraz wykorzystanie wniosków do szkolenia załóg i prowadzenia alarmów próbnych, daje możliwość zwiększenia efektywności zarządzania bezpieczeństwem.

Dobra znajomość zjawiska, scenariuszy jego przebiegu, daje zaś szansę na odpowiednie przygotowanie procedur oraz ćwiczenie ich po to, by w sytuacji realnego zagrożenia załoga wykonywała sprawnie i szybko swoje zadania, ograniczając jego skutki.



Rys. 10. Algorytm analizy ryzyka pożaru w siłowni okrętowej
Źródło: opracowanie własne na podstawie [18]

5. Ocena bezpieczeństwa pożarowego siłowni oraz kierunki badań

Każdy armator opracowuje procedury inspekcji w oparciu o wymagania przepisów. Ocena bezpieczeństwa pożarowego siłowni prowadzona jest zarówno przez załogę, jak i inspektorów. Kontrole powinny być planowane podczas każdej wachty, przed zdaniem i po przejściu obowiązków oraz zgodnie z harmonogramem przewidzianym przepisami. Podczas kontroli należy zwracać uwagę na stan izolacji przegród, maszyn, rurociągów. Przejmowania powinny obejmować także miejsca potencjalnych wycieków paliwa oraz innych materiałów palnych. Podczas oceny bezpieczeństwa pożarowego siłowni powinny być analizowane parametry pracy maszyn oraz listy występujących alarmów.

W celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa pożarowego należy rekomendować takie rozwiązania, jak wykorzystanie kamer termowizyjnych do codziennych inspekcji siłowni. Pozwalają one na szybsze i łatwiejsze, niż z wykorzystaniem narzędzi konwencjonalnych, wykrywanie potencjalnych źródeł zapłonu oraz tworzenie map termicznych siłowni i ich analizę.

Podczas oceny bezpieczeństwa pożarowego siłowni powinna być sprawdzana sprawność instalacji wykrywających pożar, instalacji gaśniczych oraz przenośnego sprzętu gaśniczego.

Należy dążyć do eliminacji błędów ludzkich bądź przynajmniej zmniejszenia ich ilości, wdrażając odpowiednie procedury zarządzania bezpieczeństwem.

Istotnym ich elementem, obok instrukcji postępowania w warunkach normalnej eksploatacji, jest również weryfikacja znajomości przez załogę zakresów obowiązków w sytuacjach awaryjnych.

Reasumując, poprawa bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej jest zagadnieniem, którego realizacja wymaga podjęcia szeregu różnorodnych działań. W celu usystematyzowania można klasyfikować je według kryteriów przedstawionych w tabeli 1.

W celu osiągnięcia optymalnego poziomu bezpieczeństwa, należy dążyć do stanu, w którym będą wypełniane wszystkie wymienione zalecenia dotyczące bezpiecznej eksploatacji.

Kierunki dalszych badań nad bezpieczeństwem pożarowych siłowni powinny być prowadzone wielotorowo. Należy rozwijać badania nad izolacjami. Stosowane w siłowni nie powinny ulegać uszkodzeniom w wyniku

eksploatacji. W przypadku ich wystąpienia, powinna być możliwa efektywna naprawa izolacji przez załogę. Izolacje powinny być lepsze i zapewniać tę samą efektywność przy zastosowaniu mniejszych grubości.

Tabela 1. Kierunki działań prewencyjnych prowadzonych w siłowni celem osiągnięcia akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego

Lp.	Kryterium	Rodzaj działań
1.	Poprawa zarządzania bezpieczeństwem	<p>Tworzenie i przestrzeganie procedur kontroli i obsługiwanie maszyn</p> <p>Znajomość zakresu obowiązków w sytuacjach awaryjnych i codziennej eksploatacji (czynności podczas wacht i przekazywania obowiązków)</p> <p>Odpowiedzialne wykonywanie obowiązków</p> <p>Dobra organizacja czasu pracy</p> <p>Ograniczenie przeciążeń fizycznych i psychicznych</p> <p>Nadzór</p> <p>Procedury raportowania</p> <p>Organizowanie alarmów próbnych</p> <p>Szkolenia</p>
2.	Inspekcje	<p>Kontrole stanu izolacji</p> <p>Identyfikacja miejsc nieizolowanych</p> <p>Kontrole gorących powierzchni</p> <p>Kontrole przewodów elastycznych</p> <p>Kontrole miejsc potencjalnych wycieków materiałów palnych</p> <p>Kontrole pracy urządzeń i analiza parametrów ich pracy</p> <p>Wprowadzenie spisu czynności do wykonania podczas inspekcji, tzw. <i>check - list</i></p> <p>Wprowadzenie termowizji do codziennych inspekcji</p> <p>Wykonywanie map termicznych i ich analiza</p> <p>Obowiązek raportowania wszystkich nieprawidłowości i zdarzeń</p>
3.	Utrzymanie czystości	<p>Obserwacja miejsc potencjalnych wycieków</p> <p>Porządek w magazynkach</p> <p>Nieskładowanie zaolejonych szmat i innych materiałów palnych</p> <p>Porządek podczas prac remontowych i po ich zakończeniu</p>

cd. Tabela 1.

Lp.	Kryterium	Rodzaj działań
4.	Utrzymanie stanu technicznego	Właściwe obsługiwanie i konserwacja maszyn Niewłóczne usuwanie usterek i awarii Nadzór i zabezpieczenie prac pożarowo niebezpiecznych Niewłóczne usuwanie przecieków Niewłóczne naprawy izolacji

Źródło: opracowanie własne

Należy także prowadzić badania nad instalacjami wykrywającymi i gaśniczymi, by w sytuacji zaistnienia pożaru nie dopuścić do jego rozwoju i rozprzestrzeniania. Instalacje powinny zapewnić szybkie gaszenie, przy małych zniszczeniach w siłowni, a wykorzystywane środki powinny być bezpieczne dla ludzi i środowiska naturalnego.

W planowanych przez autora badaniach realizowane będą pomiary temperatur gorących powierzchni wybranych siłowni okrętowych. Zebranie danych w postaci map termicznych posłuży do stworzenia zbioru scenariuszy pożarów. Ich szczegółowe opracowanie pozwoli na stworzenie modeli pożarów i ich wizualizację. Modele będą mogły być wykorzystane do szacowania efektywności izolacji pożarowych, instalacji wykrywania i gaszenia pożarów oraz podczas szkoleń załóg.

Wnioski

Siłownia okrętowa jest miejscem na statku, w którym ma swoje źródło większość pożarów. Nagromadzenie dużej ilości materiałów palnych na ograniczonej przestrzeni, takich jak np. paliwa i oleje smarne mnogość potencjalnych źródeł zapłonu oraz ciągła obecność utleniacza, przyczyniają się do wysokiego poziomu zagrożenia. Najczęściej występującym scenariuszem pożaru w siłowni jest kontakt paliwa pochodzącego z nieszczelności w instalacji paliwowej z gorącą powierzchnią.

Pożary siłowni charakteryzują się dużą dynamiką oraz wysokimi temperaturami. Mogą rozprzestrzeniać się w siłowni bądź na inne rejony statku.

W celu zapewnienia optymalnego stopnia bezpieczeństwa pożarowego należy:

1. Stosować zabezpieczenia czynne i bierne siłowni, takie jak przegrody termiczne oraz instalacje wykrywające pożar i gaśnicze, które mają na celu niedopuszczenie do rozprzestrzeniania się pożaru, a w przypadku wystąpienia, ugaszenie go w jak najkrótszym czasie, w miejscu, w którym powstał.
2. Rozpatrywać bezpieczeństwo pożarowe siłowni okrętowej jako problemem, na który składają się stan maszyn i instalacji, stan zabezpieczeń czynnych i biernych, ale również zarządzanie bezpieczeństwem.
3. Nadzorować postępowanie załóg statków, mając na uwadze, że prowadzone przez dobrze wyszkoloną załogę systematyczne inspekcje, skutkujące stwierdzeniem nieprawidłowości, pozwalają na szybką naprawę ubytków lub zniszczeń izolacji gorących powierzchni i usunięcie najmniejszych nawet przecieków z instalacji paliwowej.
4. Szukać możliwości wykorzystywania w codziennej eksploatacji nowych narzędzi diagnostycznych, jak np. kamery termowizyjne, które stwarzają możliwość szybkiej inspekcji dużych, a także trudnodostępnych powierzchni, a wbudowane w smartfony są łatwo dostępne, obsługiwane intuicyjnie i dają wystarczająco dokładne wyniki pomiarów, by poprawnie szacować potencjalne zagrożenia.
5. Wykorzystywać oprogramowanie, które pozwala na analizę wartości temperatur gorących powierzchni w dowolnym punkcie zapisanego obrazu, nawet po wykonaniu zdjęcia.
6. Tworzyć, w oparciu o dane z badań oraz analiz scenariuszy pożarowych, modele, które będą opisywać rozwój pożaru w siłowni okrętowej. Pozwoli to na tworzenie lepszych procedur zarządzania w sytuacjach kryzysowych, a przewidywanie zagrożeń ułatwi dobór metod zabezpieczeń.
7. Prowadzić badania nad nowymi środkami gaśniczymi bezpiecznymi dla ludzi i środowiska naturalnego.
8. Szukać nowych rozwiązań izolacji przegród, które przy mniejszym ciężarze i mniejszej grubości zapewnią odpowiedni poziom zabezpieczenia.
9. Tworzyć i ulepszać procedury postępowania dla załogi, dotyczące zarówno czynności wykonywanych podczas codziennej eksploatacji, jak i w podczas pożaru.
10. Prowadzić regularnie alarmy próbne i szkolenia dla załóg oraz wykorzystywać podczas kursów wizualizacje pożarów i symulatory pozwalające na zrozumienie zjawiska oraz ćwiczenie procedur postępowania w sytuacji zagrożenia.

Požary na statkach są zagrożeniem, którego nie da się całkowicie wyeliminować, szczególnie w siłowni okrętowej. Można jednak ograniczyć potencjalnych źródeł zapłonu i materiałów palnych oraz podnieść świadomość ryzyka wśród członków załóg poprzez właściwe zarządzanie zasobami ludzkimi.

Literatura:

- [1] Kaplan S., Garrick J.B., On the quantitative definition of risk, *Risk Analysis* 1981 no 1, s.11–27.
- [2] www.gard.no (dostęp: 15.04.2016).
- [3] <http://mfame.guru/be-cautious-while-doing-hot-works-near-the-engine-room/> (dostęp: 15.10.2017).
- [4] Międzynarodowa Organizacja Morska, Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu 1974 (konwencja SOLAS), Tekst jednolity, 2015, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2015.
- [5] http://www.dnv.pl/Binaries/Engine%20Rooms%20Fires_tcm144-9834.pdf (dostęp: 15.09.2017).
- [6] Charchalis A., Czyż S., Analysis of fire hazard and safety requirements of a sea vessel engine room, *Journal of Kones* 2011 no 18, 2, s. 49–56.
- [7] Kukuła T., Getka R., Żyłkowski O., Techniczne zabezpieczenia przeciwpożarowe i przeciwybuchowe statków, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1981.
- [8] Balcerski A., Siłownie okrętowe, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1990.
- [9] Wojnowski W., Okrętowe siłownie spalinowe, część III., Politechnika Gdańska, Gdańsk 1991.
- [10] Urbański P., Instalacje spalinowych siłowni okrętowych, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1984.
- [11] <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=42602> (dostęp: 10.05.2017).
- [12] <http://www.komputerswiat.pl/testy/sprzet/smartfony/2016/07/cat-s-60-test.aspx> (dostęp: 10.05.2017).
- [13] http://www.gsmarena.com/cat_s60-7928.php (dostęp: 16.10.2017).
- [14] International Organization for Standardization: ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements, Geneva 1999.

- [15] Krystosik-Gromadzińska A., Bezpieczeństwo pożarowe podczas eksploatacji siłowni okrętowej – rozprzestrzenianie pożaru. Wybrane problemy eksploatacji siłowni Okrętowych, red. Matuszak Z., Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2016.
- [16] <https://www.vesselfinder.com/news/1594-UPDATE-Photos-reveal-the-Fire-onboard-MV-Fernanda-near-Iceland> (dostęp: 12.09.2017).
- [17] American Bureau of Shipping: Alternative design and arrangements for fire safety, Houston 2004.
- [18] Radkowski S., Podstawy Bezpiecznej Techniki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.