

Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie



Agata Krystosik-Gromadzińska

Wybrane problemy kształtowania bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej

Szczecin 2020

Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie

Agata Krystosik-Gromadzińska

**Wybrane problemy kształtowania
bezpieczeństwa pożarowego
siłowni okrętowej**

Szczecin 2020

Recenzenci

Andrzej Adamkiewicz

Marek Dzida

Opracowanie redakcyjne

Alicja Berner

Projekt okładki

Marek Szukało

Skład komputerowy

Marek Szukało

Wydano za zgodą

Rektora Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

ISBN 978-83-7663-306-0

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
w Szczecinie

al. Piastów 48, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

Druk PPH „Zapół” Sobczyk Sp.j., al. Piastów 42, 71-062 Szczecin

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
WSTĘP	13
1. WPROWADZENIE DO BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO STATKU	15
1.1. Aktualny stan wiedzy	15
1.2. Systematyzacja pojęć związanych z zagrożeniem pożarowym	21
1.3. Ryzyko wystąpienia zagrożenia pożarem jako problem eksploatacyjny i sposoby zapobiegania zagrożeniu	24
1.4. Zagrożenie pożarowe w siłowni okrętowej	29
1.4.1. Definicje i klasyfikacja pożarów	29
1.4.2. Parametry i miary oceny rozwoju pożarów siłowni okrętowych ...	30
1.4.3. Przyczyny i identyfikacja zagrożeń pożarem w siłowni okrętowej ..	37
1.5. Podsumowanie	41
2. MOŻLIWOŚCI I SPOSOBY ZWIĘKSZANIA BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO SIŁOWNI OKRĘTOWEJ	43
2.1. Interpretacja bezpieczeństwa pożarowego w aspekcie prawnym	43
2.2. Przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym w siłowni okrętowej	48
2.2.1. Zabezpieczenia projektowo-konstrukcyjne (bierne)	48
2.2.2. Zabezpieczenia eksploatacyjne (czynne)	53
2.3. Podsumowanie	56
3. GENEZA, CEL I ZAKRES PRACY	59
4. IDENTYFIKACJA OBIEKTÓW ZAGROŻENIA POŻAROWEGO W SIŁOWNI OKRĘTOWEJ	61
4.1. Metody badawcze stosowane w ocenie pożarów	61
4.2. Narzędzia pomiarowe stosowane w badaniach	62
4.3. Mapy termiczne wybranych obiektów ryzyka pożarowego	63
4.3.1. Identyfikacja gorących powierzchni silnika głównego	63
4.3.2. Wyniki badań obiektów zwiększonego ryzyka	69
4.4. Scenariusze pożarowe	70

4.5. Scenariusz pożaru jako narzędzie oceny ryzyka pożarowego	77
4.6. Podsumowanie	83
5. MODELOWANIE POŻARU I BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO SIŁOWNI OKRĘTOWEJ	85
5.1. Szacowanie ryzyka powstania pożaru w siłowni okrętowej	85
5.2. Model matematyczny pożaru	91
5.2.1. Założenia metodyczne modelu	91
5.2.2. Pożar kałuży paliwa	97
5.3. Modelowanie pożaru w siłowni okrętowej	100
5.3.1. Cel modelowania pożaru	100
5.3.2. Istota i metody modelowania pożaru przy określonych założeniach ..	101
5.3.3. Narzędzia komputerowe do badań symulacyjnych	102
5.3.4. Miary i kryteria szkodliwości pożaru dla człowieka	103
5.3.5. Przykładowe parametry pożaru kałuży paliwa	105
5.4. Badania symulacyjne pożaru	107
5.4.1. Obiekt badań	107
5.4.2. Narzędzie zastosowane w eksperymencie symulacyjnym	109
5.4.3. Dekompozycja przestrzeni pożaru siłowni okrętowej	110
5.4.4. Program badań symulacyjnych	111
5.4.5. Dyskusja wyników badań	114
5.5. Ocena możliwości ograniczenia rozprzestrzeniania się pożaru z wykorzystaniem barier konstrukcyjnych	115
5.6. Podsumowanie	123
6. ROLA CZYNNIKA LUDZKIEGO W ZAGROŻENIU POŻAROWYM SIŁOWNI OKRĘTOWEJ	125
6.1. Ergonomiczne determinanty bezpieczeństwa pożarowego	125
6.2. Diagnoza ergonomiczna obciążeń operatorów siłowni okrętowych	126
6.3. Ocena poziomu stresu jako czynnika wpływającego na bezpieczeństwo pożarowe	131
6.4. Zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym w siłowni okrętowej	132
6.4.1. Funkcyjne i formalnoprawne aspekty zarządzania bezpieczeństwem pożarowym w siłowni okrętowej	132
6.4.2. Błąd ludzki jako czynnik determinujący zagrożenie pożarowe	138

6.4.3. Kultura bezpieczeństwa w siłowni jako sposób ograniczenia zagrożenia pożarowego	139
6.5. Podsumowanie	140
7. METODY SZACOWANIA BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO SIŁOWNI OKRĘTOWEJ	143
7.1. Bezpieczeństwo pożarowe siłowni okrętowej jako rezultat oddziaływań w systemie człowiek–statek	143
7.2. Niezawodność obiektów technicznych i człowieka jako miara bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej	145
7.3. Zarządzanie ryzykiem powstania pożaru w siłowni okrętowej	148
7.4. Koszty bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej	150
7.5. Podsumowanie	152
WNIOSKI	153
LITERATURA	157
Abstract	175
Zusammenfassung	177

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTOWCÓW I OZNACZEŃ

Skrótownce

ABS	– American Bureau of Shipping
ALARP	– As Low As Reasonable Practicable – poziom tak niski jak jest to uzasadnione praktycznie
CCTV	– Circuit TeleVision – telewizyjne systemy dozоровe
Class NKK	– Nippon Kaiji Kokai
CMK	– centrala manewrowo-kontrolna
DNV	– Det Norske Veritas
DNV-GL	– Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd
DWT	– <i>deadweight tonnage</i> – nośność statku
EMSA	– European Maritime Safety Agency – Europejska Agencja Bezpieczeństwa Morskiego
F-N	– Frequency-Number of Fatalities – krzywe przedstawiające zależność między częstotliwością a dotkliwością wypadków pod względem ich dopuszczalności
FDS	– Fire Dynamics Simulation – symulacja dynamiki rozwoju pożaru
FMEA	– Failure Mode and Effects Analysis – metoda analizy ryzyka
FRP	– Fiber Reinforce Polymer – polimer wzmocniony włóknem
FSA	– Formal Safety Assessment – formalna ocena bezpieczeństwa
FSE	– Fire Safety Engineering – inżynieria bezpieczeństwa pożarowego
FSS	– <i>Fire Safety Systems</i> – Międzynarodowy kodeks systemów bezpieczeństwa pożarowego
FTA	– Fault Tree Analysis – drzewo uszkodzeń
FTP	– <i>Fire Test Procedures</i> – Międzynarodowy kodeks stosowania procedur prób ogniowych
GRP	– żywice poliestrowe wzmocniane włóknem szklanym
GTR	– miejsce sterowania i kontroli parametrów pracy siłowni
HAZOP	– Hazard and Operability Study – metoda analizy ryzyka
HFO	– Heavy Fuel Oil – rodzaj paliwa
HI-FOG	– mgła wodna
HRR	– Heat Release Rate – moc pożaru
IALA	– International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities – Międzynarodowe Stowarzyszenie Zarządu Latarni Morskich i Oznakowania Nawigacyjnego
ILO	– International Labour Organization – Międzynarodowa Organizacja Pracy

IMO	– International Maritime Organization – Międzynarodowa Organizacja Morska
ISM	– <i>The International Safety Management</i> – Międzynarodowy kodeks zarządzania bezpieczną eksploatacją statków i zapobieganiem zanieczyszczaniu
IWRAP	– IALA Waterway Risk Assessment Programme – program oceny ryzyk na drogach morskich
LR	– Lloyd Register
LY3	– <i>The code of safe practice for large commercial yachts</i> – Kod bezpiecznej eksploatacji dużych komercyjnych jachtów
MEPC	– Marine Environment Protection Committee – Komitet Ochrony Środowiska Morskiego
MGO	– Marine Gas Oil – rodzaj paliwa
MSC	– Marine Safety Committee – Komitet Bezpieczeństwa Morskiego
OPA	– obrona przeciwwaryjna okrętu
PAWSA	– Ports and Water – Ways Safety Assessment – metoda oceny bezpieczeństwa portów i dróg morskich
PRS	– Polski Rejestr Statków
QRA	– Quantitive Risk Assesment – metoda szacowania ryzyka
RID	– Regulatory Impact Diagram – diagram czynników wpływu
SOLAS	– <i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i> – Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu
SSE	– The Sub-Committee on Ship Systems and Equipment – Podkomitet ds. Systemów i Urządzeń Okrętowych
STCW	– <i>International Convention on Standards of Training-Certification and Watchkeeping</i> – Międzynarodowa konwencja o wymaganiach w zakresie wyszkolenia marynarzy wydawania im świadectw oraz pełnienia wacht
THERP	– Technique for Human Error-Rate Prediction – technika przewidywania błędów człowieka
ZTL	– zdalny termometr laserowy

Oznaczenia

A	– powierzchnia pożaru (kałuży paliwa) [m^2]
A_w	– powierzchnia okna [m^2]
b_p	– stan bezpieczeństwa
b_z	– stan zagrożenia bezpieczeństwa
b_{zt}	– stan zawodności technicznej
b_{zb}	– zawodność bezpieczeństwa
B	– szerokość statku [m]

c	– ciepło właściwe [kJ/(kg·K)]
c_c	– ciepło spalania [kJ/kg]
c_e	– ciepło parowania [kJ/kg]
C_d	– współczynnik charakteryzujący okno
C_i	– stężenie i -tego składnika toksycznego w produktach pożaru [g/m ³]
Circ.	– cyrkularz
C_{ki}	– stężenie krytyczne i -tego składnika toksycznego w produktach pożaru [g/m ³]
D	– średnica [m]
D_{dym}	– gęstość optyczna dymu na 1 m odcinka drogi [dB/m]
D_m	– masowa gęstość optyczna [m ² /s]
$\mathcal{E}$	– emisyjność
E	– odległość [m]
F	– współczynnik konfiguracji geometrycznej
f_i	– możliwość wystąpienia i -tego zdarzenia niepożądanego
g	– grubość przegrody [mm]
GOP	– gęstość optyczna
Gr	– liczba kryterialna Grashofa
H	– wysokość [m]
H_n	– wysokość strugi wypływającej z pomieszczenia [m]
H_o	– wysokość drzwi [m]
H_{pl}	– wysokość płomienia [m]
H_{pl1}	– wysokość płomienia wg Heskestada [m]
H_{pl2}	– wysokość płomienia wg Thomasa [m]
H_w	– wysokość okna [m]
i	– entalpia
k	– współczynnik charakterystyki ścian
K_{Btech}	– sumaryczne koszty bezpieczeństwa technicznego
K_{Ztech}	– koszty zagrożenia technicznego
K_{ewak}	– koszty ewakuacji
L	– długość [m]
l_m	– maksymalna odległość, w której może się znaleźć człowiek w czasie pożaru od wyjścia z zagrożonego obszaru [m]
m	– masa [kg]
m'	– masowa szybkość spalania [kg/m ² ·s]
m_f	– szybkość ubytku masy paliwa [kg/s]
$\dot{m}_a$	– strumień masy wpływający do pomieszczenia [kg/s]
$\dot{m}_b$	– strumień masy spalonego paliwa [kg/s]
$\dot{m}_g$	– strumień masy gazów wpływających z pomieszczenia [kg/s]

$\dot{m}_v$	– strumień masy odparowującego paliwa [kg/s]
M	– szybkość wytwarzania warstwy dymu [kW/m]
n	– liczba ankietowanych
N	– liczność uszkodzeń
p	– ciśnienie [N·m ⁻²]
P	– prawdopodobieństwo
P_1	– prawdopodobieństwo znajdowania się obiektu w stanie S1
P_2	– prawdopodobieństwo znajdowania się obiektu w stanie S2
P_3	– prawdopodobieństwo znajdowania się obiektu w stanie S3
$t_{\text{par,pal}}$	– temperatura parowania paliwa
P_i	– częstość występowania i -tego czynnika
Pr	– liczba Prandtla
q	– ilość ciepła wyzwalanego w danej chwili [kW/s]
$\dot{q}$	– strumień ciepła [kW/m ²]
$\dot{Q}$	– moc pożaru [kW]
$\dot{Q}_c$	– całkowita moc pożaru [kW]
r	– promień [m]
R	– niezawodność
Ra	– liczba kryterialna Rayleigha
R_z	– ryzyko
$R_{yz_{zi}}$	– indeks ryzyka
$\overline{R_{yz_{zi}}}$	– średnia indeksu ryzyka
s	– strata
S_1	– stan zdatności pełnej
S_2	– stan zdatności ograniczonej
S_3	– stan niezdatności
S_i	– stopień negatywnego oddziaływania i -tego czynnika
Sp	– oznaczenia punktów pomiarowych temperatury na powierzchniach obiektów podwyższonego ryzyka
t	– temperatura [°C]
t_a	– temperatura otoczenia [°C]
V	– objętość [m ³]
V_t	– całkowita objętość dymu [m ³]
W	– szerokość [m]
x	– odległość [m]
z	– wysokość warstwy dymu nad źródłem pożaru [m]
z_i	– scenariusz i -tego zdarzenia niepożądanego od zagrożenia do straty
ρ_a	– gęstość powietrza otoczenia [kg/m ³]

α	– współczynnik wzrostu pożaru [kW/s^2]
α_s	– współczynnik przejmowania ciepła [$\text{m}^2\cdot\text{K}$]
δ	– intensywność przejścia między stanami
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
ρ	– gęstość [kg/m^3]
φ	– współczynnik niecałkowitości spalania
$\kappa\beta$	– stała empiryczna [m^{-1}]
ξ	– wskaźnik regresji paliwa [m/s]
τ	– czas [s]
ϕ	– iloraz powierzchni i masy paliwa [m^2/kg]

WSTĘP

Eksploatacja statków wiąże się z ryzykiem wypadków, których skutkiem może być utrata życia ludzkiego i jednostki, przy czym ponoszone straty finansowe są wysokie. Pożary na statkach najczęściej mają swoje źródło w siłowni okrętowej.

Celem niniejszej publikacji jest studium działań, które mogą przyczynić się do zmniejszenia liczby pożarów. Rozpatrywane są w niej problemy związane z bezpieczną eksploatacją siłowni okrętowych oraz z modelowaniem pożaru. W centrum zainteresowania są działania, które mogą przyczynić się do zmniejszenia liczby pożarów w siłowni statku morskiego.

Praca składa się z trzech części. Pierwsza część (rozdz. 1 i rozdz. 2) jest rzetelną analizą stanu wiedzy i wskazaniem kierunków badań. Proponowane są w niej definicje, systematyzacja rodzajów pożarów i klasyfikacja determinantów bezpieczeństwa pożarowego. Przedstawiona jest także egemplifikacja przyczyn i identyfikacja zagrożeń pożarowych w siłowni. Możliwości zwiększenia zakresu bezpieczeństwa określa się poprzez analizę zabezpieczeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, ze wskazaniem kierunków badań dotyczących nowych rozwiązań konstrukcji przegród pożarowych oraz środków gaśniczych.

W drugiej części pracy (rozdz. 4 i rozdz. 5) przedstawiono zastosowane metody i wyniki prac badawczych prowadzonych na statku podczas rejsu morskiego jako podstawę wiedzy do zbudowania modeli pożarów, ich walidacji i możliwości zwiększenia bezpieczeństwa pożarowego. Celem prowadzonych analiz była identyfikacja gorących powierzchni jako potencjalnych miejsc powstania pożaru w siłowni, przy jednoczesnym określeniu możliwości wykorzystania do tego celu przez załogi maszynowe kamer termowizyjnych wbudowanych do smartfonów.

Oryginalnym wkładem autorki jest propozycja narzędzia do budowania scenariuszy pożarowych na statkach, usystematyzowanie przyczyny powstawania pożarów, z opisem matematycznym ryzyka zagrożenia pożarowego (rozdz. 4).

Dla pożaru kałuży paliwa w siłowni zaproponowano (rozdz. 5) model pożaru wraz z jego walidacją na przykładzie przydatności zintegrowanych modeli pożaru Pyrosim i SmokeView dla wybranego scenariusza. Zbudowano model określania dyslokacji i skuteczności barier konstrukcyjnych przeciw rozprzestrzenianiu się pożaru.

Trzecia część pracy dotyczy holistycznego szacowania bezpieczeństwa pożarowego personelu maszynowego i siłowni okrętowej.

Wpływ czynnika ludzkiego na poziom bezpieczeństwa pożarowego w siłowni okrętowej przedstawiono na podstawie wyników przeprowadzonej diagnozy

ergonomicznej załogi statku towarowego (rozdz. 6), wskazując rolę ergonomicznych determinantów bezpieczeństwa pożarowego. Poszukując możliwości zwiększenia bezpieczeństwa pożarowego siłowni, opracowano moduły wspomagania zarządzania bezpieczeństwem, wskazano rolę i zadania symulatorów w przygotowaniu załóg statków do walki z pożarem.

Dorobkiem naukowym autorki o szczególnym charakterze są zagadnienia, przedstawione w rozdz. 4, 5 i 6, dotyczące zastosowania oryginalnych metod badawczych umożliwiających budowę modeli bezpieczeństwa pożarowego.

Podejmując temat ważny dla zdrowia i życia personelu statków morskich, autorka niniejszej publikacji dziękuje załogom statków za umożliwienie jej przeprowadzenia badań i procesu diagnozowania.

1. WPROWADZENIE DO BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO STATKU

1.1. Aktualny stan wiedzy

Warunkiem utrzymania akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego siłowni jest holistyczne podejście do problemu. Konieczne jest równoczesne rozpatrywanie zagrożeń związanych z wystąpieniem podczas eksploatacji uszkodzeń, awarii lub katastrofalnych zdarzeń, które mogą doprowadzić do pożaru oraz ryzyka popełnienia błędu przez operatora. Analiza zawsze powinna być prowadzona dla systemu, który stanowią obiekt techniczny i człowiek [1], przy uwzględnieniu wpływu relacji między nimi.

Literaturę dotyczącą problemów bezpieczeństwa pożarowego siłowni stanowią publikacje tworzone w ośrodkach naukowych i badawczych, noty techniczne autorstwa towarzystw klasyfikacyjnych, przepisy, ich interpretacje oraz zalecenia międzynarodowych organizacji.

W ujęciu statystycznym bezpieczeństwo pożarowe statków monitorowane jest przez międzynarodowe organizacje, takie jak Międzynarodowa Organizacja Morska (International Maritime Organization, IMO), Europejska Agencja Bezpieczeństwa Morskiego (Europien Maritime Safety Agency, EMSA), towarzystwa klasyfikacyjne, np. Lloyd Register (LR), Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd (DNV-Gl), Gard, Nippon Kaiji Kokai (Class NKK), a także przez armatorów, administracje państwowe, komisje dochodzeń powypadkowych, towarzystwa ubezpieczeniowe oraz przez ośrodki akademickie [2, 3]. Wydawane corocznie przez te organizacje i klasyfikatorów raporty wykazują, iż wypadki na morzu wciąż stanowią istotny problem i że od lat ich liczba pozostaje na podobnym poziomie; również ich rodzaj jest podobny pomimo stosowania coraz bardziej zaawansowanych technicznych zabezpieczeń i procedur zarządzania bezpieczeństwem. Wzrasta niezawodność maszyn i urządzeń, jednak rośnie także liczba błędów ludzkich. W latach 2001–2016, zgodnie z ostatnim dostępnym raportem EMSA [3] o wypadkach morskich, operatorzy odpowiedzialni byli za ponad 70% wypadków na statkach [3], większość wypadków (49,6%) związana była ze zdarzeniami nawigacyjnymi, a pożary stanowiły kilkanaście procent.

Analizy przyczyn i konsekwencji wypadków oraz pożarów na statkach prowadzone były przez Kwiecińską [4] i Bogalecką [5]. Bogalecka [5] analizowała statystyki pożarów jako przyczyny wypadków. Badania statystyczne prowadzone były

także przez Eliopoulou i Papanikolaou [6, 7]. Logistyka bezpieczeństwa pożarowego okrętów wojennych analizowana była przez Kopczewskiego [8]. Analizy statystyk wypadków, w tym pożarów na statkach, są również corocznie wykonywane przez Główny Urząd Statystyczny w Szczecinie. Ostatnie publikowane dane wskazują na znaczny (o 30%) wzrost liczby wypadków, także pożarów na statkach [9].

Budowanie kultury bezpieczeństwa w transporcie morskim, wcześniej pomijane, staje się coraz bardziej rozumianym i docenianym problemem. Toczy się wokół niego dyskusja wśród armatorów, w gremiach międzynarodowych, które odpowiedzialne są za stanowienie i egzekwowanie prawa, oraz w środowiskach akademickich. Berg, Storgård i Lappalainen [10] wykazali w obszernym opracowaniu, jak duży jest wpływ zachowywania się załóg na bezpieczeństwo żeglugi. Problem kultury bezpieczeństwa w żegludze został podjęty także przez Veiga [11], a zagadnieniem czynnika ludzkiego w zarządzaniu bezpieczeństwem w transporcie wodnym zajmowali się m.in. Berg i Ek [12, 13]. Kultura bezpieczeństwa pracy na statku była badana na różnego rodzaju jednostkach [14], jednostkach *offshore* operujących na Morzu Norweskim (w kontekście błędów popełnianych przez załogi) [15] oraz na statkach greckiej żeglugi przybrzeżnej [16]. Problem kultury bezpieczeństwa został przedstawiony również w publikacjach autorki [17, 18].

Analizy wskazują na fakt, iż ze względu na liczbę błędów popełnianych przez załogi należy więcej uwagi poświęcić wpływowi czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo eksploatacji i podejmować działania zmierzające do eliminacji jego wpływu poprzez tworzenie kultury bezpieczeństwa. Wnioski z badań wygenerowały także nowe kierunki badań nad wpływem czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo jednostek autonomicznych [19].

W działania te angażują się towarzystwa klasyfikacyjne, ukierunkowując postępowanie załogi, tak by wpłynąć na poprawę jakości obsługi urządzeń. Class NK, American Bureau of Shipping (ABS) wydają publikacje poświęcone zasadom właściwego obsługiwanie urządzeń na statkach [20, 21, 22]. Zawierają one m.in. tabelaryczne zastawienia, listy kontrolne, tzw. check-listy, które opisują procedury, sekwencje czynności do wykonania oraz wymagania przepisów. Badaniem ich formalnej poprawności oraz preferencji załóg w tym zakresie zajmowała się Bogalecka [5].

DNV-GL [23, 24] oraz Gard [25] poświęcają swoje publikacje zapobieganiu pożarom w siłowni, wskazując najczęstsze przyczyny i miejsca ich powstawania oraz rekomendując działania, które powinny być podejmowane przez załogi. DNV [26] w obszernym raporcie opisuje gorące powierzchnie jako miejsca, w których powstaje większość pożarów. Wiele analiz, zaleceń postępowania powstało także

w wyniku prac podkomitetów IMO, m.in. The Sub-Committee on Ship Systems and Equipment (SSE) [27, 28].

Nieszczęśliwe zdarzenia i wypadki na statkach są jednak wpisane w ich eksploatację – zarówno powodowane przez człowieka, jak i związane z czynnikami technicznymi. Można jedynie zastanawiać się nad stopniem akceptowalności ryzyka w żegludze [29] oraz sposobami jego nadzorowania [30]. Zgodnie z wymaganiami przepisów [31, 32, 33] zaleca się stosowanie w okrętownictwie do oceny ryzyka metody FSA (Formal Safety Assessment) [34, 35].

Współcześnie projektowanie statków opiera się na analizie ryzyka [36–38]; coraz częściej podąża się nie za preskrybcyjnym, jak dotychczas, modelem projektowania – zamiast projektowania obiektów jedynie w celu spełnienia określonych wymagań prowadzi się analizy ryzyka i proponuje rozwiązania alternatywne. Określanie bezpieczeństwa eksploatacji, w tym bezpieczeństwa pożarowego siłowni, jest również ukierunkowane na ocenę ryzyka [39]. Wykorzystuje się drzewa zdarzeń [40], analizy ALARP (As Low As Reasonable Practicable) [41]. W procesie projektowania szacuje się także ryzyko bezpiecznej ewakuacji podczas pożarów [42].

Do przeprowadzenia rzetelnej oceny ryzyka powstania pożaru potrzebne są: dogłębna analiza problemu, bardzo dobra znajomość czynników technicznych powodujących zagrożenie oraz zachodzące między nimi relacje. W literaturze przedmiotu m.in. Charchalis i Czyż [43] podają elementy składające się na identyfikację źródła i materiały palne, ujęte zarówno ilościowo, jak i jakościowo. Do identyfikacji zagrożeń wykorzystywane są analizy raportów, statystyk pożarowych, obserwacje załogi, pomiary prowadzone w siłowni podczas inspekcji oraz codziennej eksploatacji, a także analizy scenariuszy pożarów [44], z uwzględnieniem udziału czynnika ludzkiego.

W praktyce do modelowania pożarów na statkach adaptowane są komercyjne narzędzia, wykorzystywane do modelowania pożarów w urbanistyce. Przeznaczone do modelowania pożarów w okrętownictwie programy nie są rozpowszechnione. Przykładem takiego programu jest Smartfire, który jest stworzony na potrzeby modelowania pożarów w budynkach, ale może być wykorzystywany do modelowania pożarów kabin na statkach morskich [45]. Na Uniwersytecie Greenwich zaprojektowano i wykonano narzędzie Maritime Exodus [46], które wraz ze środowiskiem Smartfire służy do modelowania ewakuacji załogi lub pasażerów podczas pożaru dużych jednostek. Zagadnienie to było tematem publikacji i programu Unii Europejskiej (EU) Galea [47, 48]. Do modelowania stosowany jest także program EVAC, który wraz z modelem FDS może służyć do jednoczesnego modelowania pożaru na statku i ewakuacji pasażerów oraz członków załogi [49]; dla okrętów jest to program SURMA [50].

Modelowanie pożarów siłowni okrętowych realizowane jest również z wykorzystaniem CFAST – zob. praca [51]. Modelowanie rozprzestrzeniania się dymu podczas pożaru w siłowni, z uwzględnianiem stopnia komplikacji jej geometrii, prowadzone było przez Wang i Su [52, 53]. Modelowanie pożarów i eksplozji siłowni dwupaliwowych na statkach było tematem badań Guan i Zhao [40]. Hoover [54] opisywał możliwości zastosowania CFAST do modelowania parametrów pożarów na statkach. Modelowanie pożaru, w tym rozprzestrzeniania się dymu oraz wpływu czasu potrzebnego do osiągnięcia parametrów krytycznych, a także możliwość ewakuacji z kabiny na statku, z użyciem modelu strefowego BRANZFIRE, przedstawił Salem [55]. Problem rozprzestrzeniania się dymu podczas pożaru kabiny na statku podjęto w pracy [56].

Zastosowanie modeli strefowych i objętościowych do modelowania pożarów na statkach pasażerskich było badane przez Nicolau i Sprou [57], zaś próbę modelowania pożaru na statku w powiązaniu z czynnikiem ludzkim (model HFACS-FCM) podjęli Soner i in. [58]. Modelowanie parametrów pożaru materiałów kompozytowych na statkach prowadzone było z wykorzystaniem narzędzia TMat [59]. Porównanie narzędzi do modelowania pożarów i ocenę ich przydatności w okrętownictwie przeprowadził Salem [60].

Ważne jest to, aby już na etapie projektowania wstępnego, pomimo ograniczonej ilości informacji w założeniach projektu, wykorzystywać narzędzia do modelowania pożarów. Pozwoli to na uniknięcie kosztów zmian w procesie iteracyjnym [61, 62].

Modele pożarów pozwalają na określenie dynamiki rozwoju pożaru. Dostarczają danych wykorzystywanych podczas wyboru metod zabezpieczania oraz opracowywania procedur postępowania. Budowane są z wykorzystaniem wielu założeń i uproszczeń odpowiednich dla konkretnych scenariuszy. Doświadczenia z eksploatacji siłowni pokazują jednak, że scenariuszy pożarów jest nieskończenie wiele i że bezpieczeństwo pożarowe siłowni zależy przede wszystkim od sposobu postępowania załogi.

Podstawowym źródłem powstania pożaru są gorące powierzchnie. Dlatego na potrzeby inspekcji siłowni włączane są kamery termowizyjne. Mogą to być systemy ciągłej inspekcji, takie jak FLIR AXB Marine Thermal Monitoring System [63], oraz stosowane przez załogę kamery wbudowane w smartfony (np. CAT S60) [64], umożliwiające szybką inspekcję dużych powierzchni, również w trudno dostępnych miejscach. Obecnie stosowane, zarówno przez załogi, jak i inspektorów, pirometry laserowe dają co prawda możliwość dokładnego pomiaru w precyzyjnie określonym miejscu, jednakże nie jest możliwe ich wykorzystanie do szybkich przeglądów wszystkich miejsc stwarzających zagrożenie.

Możliwości zastosowania termografii do nieniszczących testów na statkach przedstawiono w pracy [65], wskazując, że narzędzie to ma wiele zastosowań, m.in. w systemie detekcji pożarów, i pozwala na uniknięcie wielu awarii. Passage, Muzevic i Kelenc [65] zaproponowali włączenie kamer termowizyjnych do systemu telewizji CCTV i integrację urządzeń z czujkami pożarowymi oraz z centralnym systemem alarmowym. Wraz z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania pozwoli to na wczesne ostrzeganie przed możliwością powstania pożaru [66].

Przykłady zastosowania termowizji w inspekcji siłowni, zarówno małych jachtów rekreacyjnych, jak i dużych komercyjnych jednostek towarowych, oraz charakterystykę narzędzi wykorzystywanych podczas inspekcji przedstawiono w opracowaniu [67] firmy Flir System Germany. Możliwości zastosowania kamer termowizyjnych zaprezentowano również w pracy autorki [68].

Gwarancja bezpieczeństwa pożarowego siłowni obejmuje całokształt działań w codziennej eksploatacji oraz regularne inspekcje prowadzone przez załogę i zewnętrznych inspektorów. Utrzymanie czystości w siłowni, utrzymanie reżimów przeglądów i remontów, właściwe obsługiwanie urządzeń siłowni, przestrzeganie procedur to tylko przykłady czynności, które powinny znaleźć się w obowiązujących procedurach zarządzania bezpieczeństwem, realizowanych w środowisku siłowni okrętowej.

Wysokie temperatury, hałas, drgania, zanieczyszczone powietrze, konieczność wykonywania pracy w pozycjach nieergonomicznych, kołysanie statku utrudniające poruszanie się to najczęściej zgłaszane przez załogi czynniki, które powodują przeciążenia fizyczne [69] członków załóg maszynowych. Praca pod presją, konieczność podejmowania szybkich decyzji na podstawie wielu sygnałów odbieranych równocześnie, izolacja społeczna to z kolei czynniki powodujące przeciążenia psychiczne. Dlatego, na podstawie wyników m.in. diagnoz ergonomicznych [70], należy już w fazie projektowej przewidywać wpływ czynników, takich jak ruch statku, wibracje czy hałas, na operatora. Modele uwzględniające te czynniki proponują do wykorzystania przez projektantów statków Montewka i in. [71].

Problem warunków pracy na statkach jest analizowany przez Międzynarodową Organizację Morską [72, 73, 74] oraz Międzynarodową Organizację Pracy (ILO) [75]. Dokumenty wydane przez te organizacje określają z drobnymi różnicami m.in. dopuszczalną liczbę godzin pracy i minimalny czas wypoczynku oraz jego miejsce. Problem złych warunków pracy dotyczy przede wszystkim wielonarodowościowych załóg statków, armatorów zatrudniających marynarzy z najniższym uposażeniem. Tego dotyczyły analizy warunków pracy we flocie hiszpańskich statków, przedstawione w pracy [76]. Marczak [77] zajmowała się bezpieczeństwem załóg statków w świetle przepisów IMO i ILO.

Bezpieczeństwo załóg zależne jest także od szkoleń i alarmów ćwiczebnych prowadzonych na statkach. Odbywają się one zgodnie z wymaganiami przepisów krajowych i międzynarodowych [2, 78, 79, 80]. Wpływ alarmów ćwiczebnych na poziom bezpieczeństwa oceniła Szcześniak w pracy [81]. Ważnym zagadnieniem w procesie kształcenia i treningów załóg są również lądowe ośrodki szkoleniowe, które oferują możliwość przećwiczenia postępowania proceduralnego w różnych scenariuszach zdarzeń. Ośrodki ratownictwa wyposażone są w poligony lub symulatory. Idea szkolenia polega na stworzeniu możliwości reagowania na różne zagrożenia w warunkach bliskich rzeczywistym, a zarazem bezpiecznych [82–87].

Największym zagrożeniem dla załogi jest pożar na statku. Gwarancją jego ugaśnienia jest ograniczenie do obszaru, w którym powstał oraz niedopuszczenie do rozprzestrzeniania się ognia w inne rejony statku. Instalacje wykrywcz, alarmowe, gaśnicze, przenośny sprzęt gaśniczy powinny zapewnić możliwość szybkiego reagowania na wystąpienie zagrożenia – zarówno z udziałem załogi, jak i automatycznego. Wykorzystane środki i instalacje gaśnicze powinny być nie tylko efektywne, ale powinny także powodować możliwie małe zniszczenia siłowni, nie zagrażać ludziom i środowisku, przy czym ich użycie nie może powodować utraty stateczności jednostki.

Bezpieczeństwo pożarowe siłowni zależne jest więc od zabezpieczeń projektowo-konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Konwencja SOLAS (rozdz. II-2) [2], przepisy Polskiego Rejestru Statków (PRS) (cz. V) [88] i inne uregulowania zawierają wymagania dotyczące obydwu rodzajów przedsięwzięć. Zabezpieczenia konstrukcyjne są to przede wszystkim przegrody ogniotrwałe różnych klas, np. wymaga się, by przegrody specjalne siłowni chronione były przegrodami najwyższej klasy odporności – klasy A-60 [2].

Obecnie badania zabezpieczeń konstrukcyjnych mają na celu zmniejszenie ich wagi, potrzebnej objętości oraz polepszenie właściwości termoizolacyjnych. Istotnym problemem dla bezpieczeństwa siłowni jest także rozplanowanie obiektów ryzyka w siłowni względem siebie [89–96] i dbałość o ich właściwe zabezpieczenie, np. poprzez izolację czy likwidowanie przecieków.

Problem zabezpieczeń eksploatacyjnych pożarowych siłowni jest tematem wielu prac [97, 98]. Obecnie ukierunkowane są one głównie na lepsze wykorzystanie instalacji na wysokorozdrobnioną wodę, instalacji mgłowych [99, 100, 101] oraz środków gaśniczych alternatywnych, bezpiecznych dla załóg i środowiska, takie jak Novec™ 1230 [102, 103].

1.2. Systematyzacja pojęć związanych z zagrożeniem pożarowym

Na potrzeby dalszych rozważań w niniejszym rozdziale usystematyzowano pojęcia związane z zagrożeniem pożarowym.

Siłownia okrętowa w niniejszej pracy jest rozumiana jako wydzielony przegrodami przedział maszynowo-kotłowy statku, zawierający urządzenia napędowe i niektóre mechanizmy pomocnicze, usytuowany w kadłubie, najczęściej na rufie, śródokręciu lub w dziobowej części statku, w którym umieszczone są obsługiwane są przez załogę maszyny i urządzenia wraz z instalacjami obsługującymi elementy układu energetycznego statku: silniki główne, pomocnicze, kotły, pompy, spalarki, wirówki paliwa i in. Za integralną część siłowni uważa się także centralę manewrowo-kontrolną, jednakże ze względu na panujące w niej warunki, odmienne od pozostałych pomieszczeń siłowni, jest ona w analizach poziomu bezpieczeństwa pożarowego badana osobno [104–107].

Obiektami zwiększonego ryzyka pożarowego w siłowni okrętowej są zarówno miejsca przechowywania, transportu i wycieku materiałów palnych, jak i miejsca stanowiące potencjalne źródła zapłonu – gorące powierzchnie. Są to miejsca sklasyfikowane jako szczególnie niebezpieczne i podlegające monitorowaniu oraz regularnym kontrolom i nadzorowi [26]. Za kryterium oceny przyjmuje się w odniesieniu do materiałów palnych ich temperaturę zapłonu i samozapłonu. W celu określenia stopnia bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej, zarówno na etapie projektowania, jak i podczas eksploatacji, należy także oszacować prawdopodobieństwo rozszczelnienia i wycieku materiału palnego, którym najczęściej jest paliwo ciekłe lub gazowe. W odniesieniu do gorących powierzchni w niniejszej pracy za graniczną bezpieczną temperaturę przyjęto 220°C. Zgodnie z wymaganiami międzynarodowych przepisów [2] powyżej tej temperatury powierzchnie muszą być izolowane ze względu na wysokie prawdopodobieństwo zapłonu paliwa w przypadku kontaktu z nimi.

Zarządzanie bezpieczeństwem rozumiane jest jako zbiór zaleceń i procedur postępowania oraz stworzonych narzędzi, których zadaniem jest usprawnienie działań załogi w celu eliminacji błędów ludzkich [107], również w aspekcie poziomu jakości ergonomicznej. Poziom nieakceptowalny powoduje zwiększenie liczby wypadków.

Bezpieczeństwo rozumiane jest niezwykle szeroko. Potocznie definiowane jest jako stan zaspokojenia poczucia bezpieczeństwa, w którym nie jest spodziewane wystąpienie zagrożenia, awarii czy zakłóceń [1]. Jest podstawową potrzebą człowieka, a w odniesieniu do techniki – wyznacznikiem zdolności prawidłowego funkcjonowania systemu.

Bezpieczeństwo techniczne rozumiane jest jako zdolność danego tworu technicznego, działającego w określonych warunkach, do zapewnienia niezaisnienia zagrożenia dla ludzi i środowiska, w przewidzianych granicach i w określonym czasie.

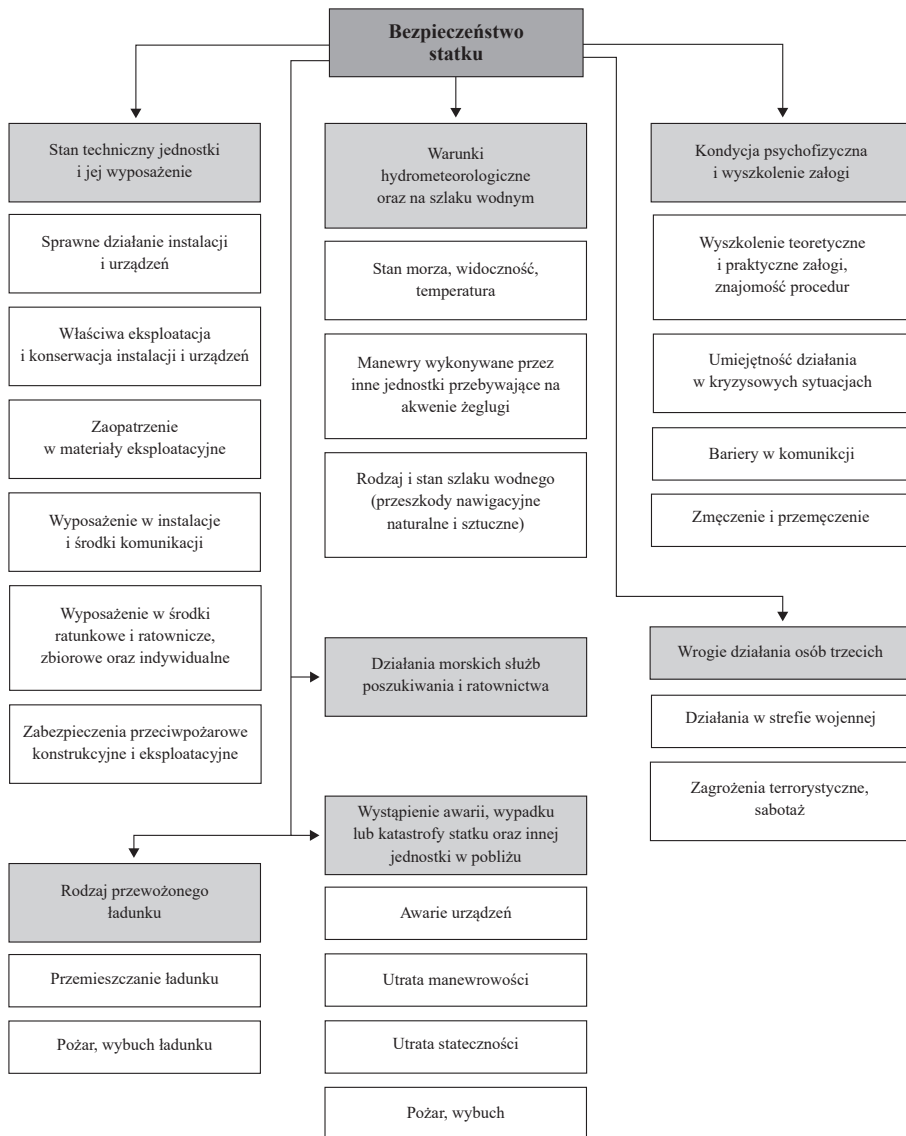
W ujęciu ilościowym bezpieczeństwem technicznym jest prawdopodobieństwo niewystąpienia żadnego zagrożenia dla ludzi i środowiska [1], w określonych warunkach, w określonym czasie i w przewidzianych granicach.

Bezpieczeństwo techniczne definiowane jest również pośrednio poprzez trwałość międzyzagrożeń, prawdopodobieństwo zagrożenia technicznego, częstość zagrożeń technicznych, intensywność zagrożeń technicznych, wartość oczekiwaną trwałości międzyzagrożeń, współczynnik bezpieczeństwa technicznego, całkowity czas niedziałania, prawdopodobieństwo przywrócenia bezpieczeństwa technicznego, częstość przywracania bezpieczeństwa technicznego, intensywność przywracania bezpieczeństwa technicznego, wartość oczekiwaną całkowitego czasu niedziałania danego obiektu technicznego wskutek uszkodzeń powodujących zagrożenie techniczne, dyspozycyjność bezpieczeństwa technicznego, czyli poprzez jakość ochrony [1].

Autorka proponuje za bezpieczeństwo statku uznać zdolność systemu (obejmującego statek i człowieka), działającego w określonych warunkach (w określonym stanie eksploatacji, określonych warunkach żeglugi, przy założeniu sprawności jednostki i braku zagrożeń ze strony innych jednostek czy ludzi), do zapewnienia w przewidzianych granicach (przy akceptacji możliwości wystąpienia nieistotnych dla rejsu incydentów, które nie spowodują jego przerwania i nie stanowią zagrożenia) i w sprecyzowanym czasie (w przewidzianym czasie eksploatacji bądź czasie do kolejnego przeglądu klasowego czy remontu) nieistnienia zagrożenia dla ludzi i środowiska (dla pasażerów, członków załogi oraz środowiska morskiego). Ze względu na wiele czynników wpływających na bezpieczeństwo statku nie jest to jednak definicja wyczerpująca.

Bezpieczeństwo statku w ujęciu współczesnym jest więc interdyscyplinarnym pojęciem, którego prawidłowe zdefiniowanie wymaga nie tylko wiedzy technicznej nt. bezpieczeństwa eksploatacji statku jako obiektu technicznego, ale także znajomości zagadnień związanych ze sztuką nawigacji, z ergonomią stanowiska pracy, psychologią pracy, z zagadnieniami polityki międzynarodowej, meteorologii, hydrologii, prawodawstwa, dotyczącymi terroryzmu i innymi. Bezpieczeństwo żeglugi jest złożonym problemem. Może być rozpatrywane zarówno na podstawie oceny prawidłowego działania mechanizmów i urządzeń, jak i właściwego postępowania człowieka czy wpływu warunków hydrometeorologicznych. Bezpieczeństwo statku związane jest z jego stanem technicznym, wyposażeniem, przewożonym ładunkiem,

z wyszkoleniem i doświadczeniem załogi, z koniecznością spełniania wymogów międzynarodowych przepisów, z zaangażowaniem i rozsądkiem. Bezpieczeństwo to także dbałość o stan techniczny jednostki i właściwa jej eksploatacja.



Rys. 1.1. Klasyfikacja czynników wpływających na bezpieczeństwo statku

Bezpieczeństwo pożarowe statku jako problem badawczy rozumiane jest jako stan, w którym zaistnienie pożaru i jego rozprzestrzenianie się są mało

prawdopodobne, a potencjalnie skutki wystąpienia zagrożenia są małe w stosunku do wartości jednostki. Nie można jednak założyć, że pożar nie wystąpi. Dlatego wydaje się zasadne dopuszczenie możliwości zaistnienia takiego zdarzenia, ale z niskim prawdopodobieństwem i ze skutkami, które nie spowodują konieczności przetrwania żeglugi i nie będą stanowić zagrożenia dla życia i zdrowia człowieka.

Na rys. 1.1 przedstawiono usystematyzowanie czynników wpływających na bezpieczeństwo statku. Podzielono je na grupy charakteryzujące stan techniczny jednostki i jej wyposażenie, warunki hydrometeorologiczne, intensywność żeglugi oraz obecność przeszkód, kondycję psychofizyczną i wyszkolenie załogi, rodzaj przewożonego ładunku, prawdopodobieństwo zaistnienia awarii lub katastrof, wrogie działania oraz wsparcie Morskiej Służby Poszukiwania i Ratownictwa [108–111]. W każdej grupie zagadnień, przedstawionych w pracy [112], wymieniono wybrane czynniki, które powodować mogą zagrożenie.

1.3. Ryzyko wystąpienia zagrożenia pożarem jako problem eksploatacyjny i sposoby zapobiegania zagrożeniu

Według Kaplana i Garricka [113] nie ma możliwości uniknięcia wystąpienia ryzyka, istnieje jedynie wybór pomiędzy rodzajami ryzyka. Niezbędne jest udzielenie odpowiedzi na trzy pytania: Co może się wydarzyć? Jakie jest prawdopodobieństwo zdarzenia? oraz jeżeli dojdzie do zdarzenia: Jakie są przewidywane konsekwencje?

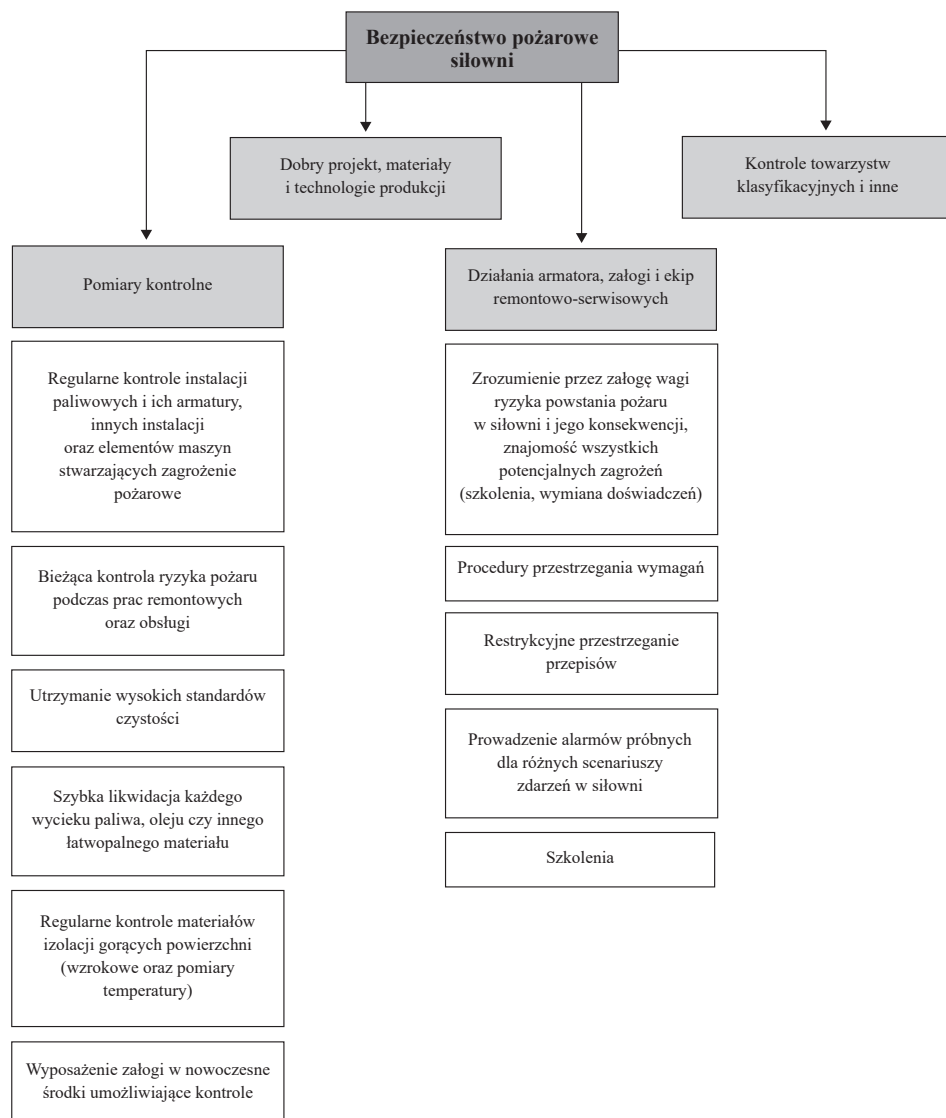
Według IMO ryzyko jest to niepożądane zdarzenie prowadzące do śmierci, uszczerbku zdrowia, utraty lub uszkodzenia statku, mienia lub zanieczyszczenia środowiska [114].

Zgodnie z terminologią IMO wyróżnia się trzy podkategorie pożarów na statkach; są to pożary przestrzeni mieszkalnych, maszynowych i ładunkowych.

Zasięg zagrożenia pożarowego na statku charakteryzuje się wyjątkowo dużą rozpiętością w porównaniu z innymi zagrożeniami. Straty materialne poniesione w wyniku pożarów ugaszonych w zarodku są niewielkie, jednak wraz ze wzrostem rozmiarów pożaru rosną gwałtownie. Pożary mogą spowodować zniszczenie rejonu statku lub utratę całego statku wraz z ładunkiem, a nawet znajdujących się w pobliżu innych statków, obiektów portowych czy stoczniowych.

Zagrożenie pożarowe i wybuchowe dotyczy całego statku. W zależności jednak od jego typu i przewidzianych zadań eksploatacyjnych można wyróżnić na każdej z jednostek rejonu szczególnego zagrożenia, w obrębie których mogą znajdować się obiekty ryzyka bądź które mogą być rozpatrywane w całości jako obiekty

ryzyka. Właściwości obiektów zależą od nagromadzenia czynników, takich jak skupienie materiałów palnych, urządzeń i ludzi, a także od układu dróg komunikacji wewnętrznej sprzyjających, bądź niesprzyjających, rozprzestrzenianiu się pożaru. Zagrożenie pożarowe i wybuchowe statku może także pochodzić z zewnątrz (poprzez działania wojenne, ataki terrorystyczne, ataki piratów).



Rys. 1.2. Składowe decyzyjne bezpieczeństwa pożarowego siłowni

Oceniając zagrożenie pożarowe danej jednostki, należy brać pod uwagę jej przeznaczenie, przewidywać ewentualne przyczyny pożarów i uwzględniać stan eksploatacji jednostki oraz zamierzone i niezamierzone działania ludzi. Specyfika analizy zagrożenia polega również na tym, że wartościami narażonymi na ryzyko są zarówno wartości materialne, jak i wartości, takie jak zdrowie i życie ludzkie, które trudno jest określać w jednostkach monetarnych.

Na rys. 1.2, na podstawie danych z pracy [24], przedstawiono czynniki, które wpływają na bezpieczeństwo pożarowe siłowni. Związane są one z projektem i wykonaniem siłowni oraz z jej wyposażeniem w instalacje wykrywczo-gaśnicze, ale także z odpowiednio podejmowanymi działaniami armatorów, inspektorów i przede wszystkim członków załogi.

Istotne znaczenie w ocenie bezpieczeństwa pożarowego siłowni mają również warunki i stan eksploatacji statku. Podczas prac remontowych mogą być czasowo wyłączone z eksploatacji instalacje wykrywcze i gaśnicze. Podręczny sprzęt gaśniczy może być poddawany kontrolom lub wymianie. Mogą być prowadzone prace niebezpieczne ze względu na ryzyko zagrożenia pożarowego bądź inne, w wyniku wykonywania których mogą pojawić się czasowo w siłowni dodatkowe materiały palne oraz źródła zapłonu. Ze względu na wymienione zagrożenia konieczny jest nadzór miejsc wykonywania prac remontowych, także po ich zakończeniu.

Podczas eksploatacji istotne jest zachowanie wysokich standardów czystości w siłowni okrętowej. Pozwala to na eliminację materiałów palnych bądź ich wczesne wykrycie (zauważony ślad wycieku). Kontrole w celu wczesnego wykrycia nieprawidłowości powinny być prowadzone nie tylko przez inspektorów zewnętrznych, ale przede wszystkim przez członków załogi [24, 115, 116].

Jednym z czynników wpływających w sposób pośredni na bezpieczeństwo żeglugi są uregulowania prawne, których zobowiązani są przestrzegać projektanci, konstruktorzy, wykonawcy, armatorzy i eksploataotorzy.

Podstawowym aktem prawnym obowiązującym w międzynarodowej żegludze jest *Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu* (konwencja SOLAS) [2]. Zgodnie z jej zaleceniami funkcjonują trzy grupy metod, za pomocą których prowadzone są działania mające na celu zapobieganie rozprzestrzenianiu się pożarów. Polegają one na stosowaniu zabezpieczeń konstrukcyjnych (zwanymi także zabezpieczeniami projektowo-konstrukcyjnymi czy biernymi), zabezpieczeń eksploatacyjnych (zwanymi także zabezpieczeniami czynnymi lub aktywnymi) i zarządzaniu bezpieczeństwem [2]. Do każdej z metod przypisane są ponadto szczegółowe wymagania zawarte w odpowiednich przepisach *Międzynarodowego kodeksu stosowania procedur prób ogniowych* (kodeksu FTP) [117], *Międzynarodowego kodeksu systemów bezpieczeństwa pożarowego* (kodeksu FSS), a także innych. Wymagania

dotyczące bezpieczeństwa żeglugi zawarte są również w *Międzynarodowej konwencji o wymaganiach w zakresie wyszkolenia marynarzy, wydawania im świadectw oraz pełnienia wacht* (konwencji STCW) [74], *Rozporządzeniu Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 23 kwietnia 2018 r. w sprawie wyszkolenia i kwalifikacji członków załóg statków morskich* [118] i *Międzynarodowym kodeksie zarządzania bezpieczną eksploatacją statków i zapobieganiem zanieczyszczaniu* (kodeksie ISM) [73].

Istnieje pogląd, że jednym z najskuteczniejszych sposobów walki z pożarami na statkach jest stosowanie zabezpieczeń konstrukcyjnych, a w szczególności podziału statku na strefy pożarowe za pomocą poziomych i pionowych przegród termicznych oraz konstrukcyjnych. W siłowni okrętowej istotny jest również właściwy dobór instalacji wykrywczej, gaśniczej bądź kombinacji instalacji gaśniczych i przenośnego sprzętu gaśniczego, a także profesjonalne i odpowiedzialne zachowanie załogi oraz prowadzone przez nią obserwacje i inspekcje [119, 120].

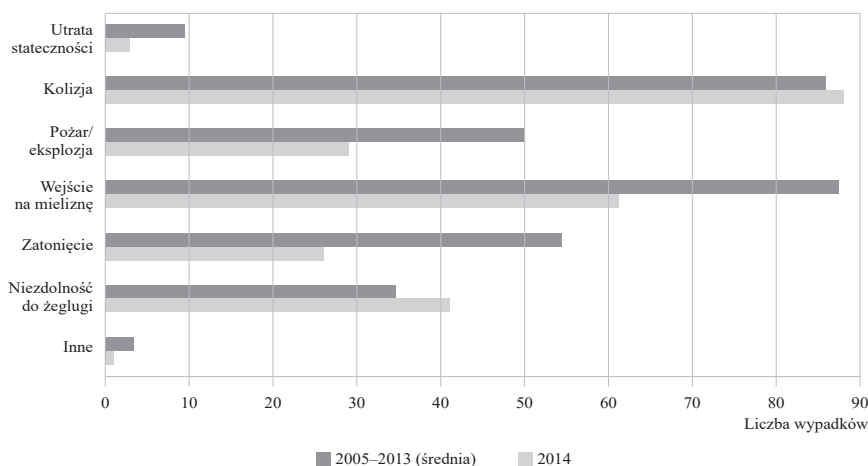
Analiza danych statystycznych również jest niezbędnym działaniem na rzecz poprawy bezpieczeństwa pożarowego. Na podstawie badań identyfikowane są rejony statku, w których najczęściej występują pożary, oraz przyczyny ich powstawania zależne zarówno od technicznych, jak i ludzkich czynników.

Wśród statystyk brakuje jednak danych, które dokładnie odzwierciedlałyby np. przebieg pożarów w siłowniach. Ponadto dane statystyczne podawane przez załogi są niepełne. Nie wszystkie zdarzenia są raportowane. Przypadki mniejszych pożarów, które nie spowodowały poważnych uszkodzeń statku, uszczerbku zdrowia czy życia, często są zatajane. Jest to niewątpliwie duży problem z punktu widzenia poprawności analiz danych i pewności co do ich zgodności ze stanem rzeczywistym.

Roczny przegląd europejskich wypadków i incydentów morskich z roku 2018 wykazuje, iż 53,1% (biorąc pod uwagę spowodowanie poważnych konsekwencji) stanowią wypadki nawigacyjne. Pożary stanowią kolejną przyczynę wypadków, a człowiek odpowiedzialny jest za nie w 57,8% [121].

Zgodnie z analizami przeprowadzonymi w pracy [122] prawdopodobieństwo powstania pożaru na statku wynosi 10^{-2} , w tym 10^{-3} stanowią pożary poważne, a 10^{-4} – pożary, których rezultatem jest całkowita utrata jednostki. Zgodnie z badaniami Przywartego [123] prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru wynosi $5,18 \times 10^{-5}$ na kilometr przebytej drogi.

Analiza statystyk zdarzeń zagrażających bezpieczeństwu prowadzi do wniosku, iż pożary na statkach występują na trzecim, czwartym miejscu po kolizjach i wejściach na mieliznę (rys. 1.3).

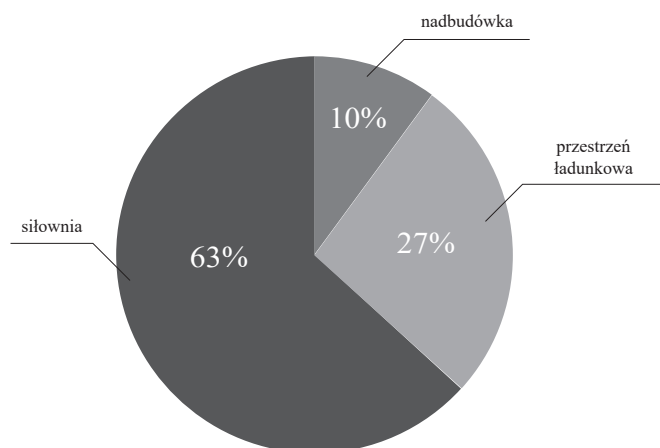


Rys. 1.3. Liczba zdarzeń zagrażających bezpieczeństwu jednostek oceanotechnicznych, z podziałem na grupy wg przyczyny, w latach 2005– 2013 oraz w roku 2014

Źródło: opracowano na podstawie pracy [124].

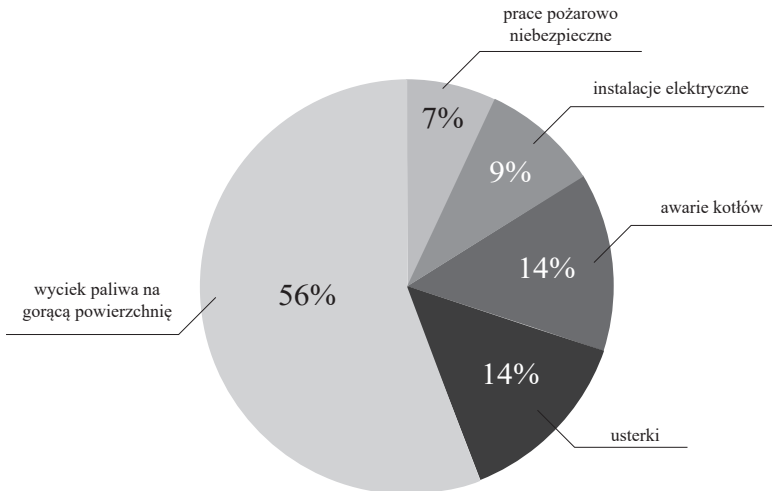
Podobne dane, opisujące przyczyny wypadków morskich w żegludze światowej w latach 1997–2011, przedstawiono w pracy [125].

Dane statystyczne towarzystwa klasyfikacyjnego Det Norske Veritas (DNV) wykazują, że ponad połowa pożarów ma swoje źródło w siłowni okrętowej (rys. 1.4) i że główną przyczyną ich powstania był wyciek substancji palnych na gorącą powierzchnię elementów silnika, kolektorów, głowic itp. (rys. 1.5).



Rys. 1.4. Miejsce powstania pożaru wg towarzystwa klasyfikacyjnego DNV

Źródło: opracowano na podstawie pracy [126].



Rys. 1.5. Udział powstania pożarów wg przyczyny powstawania, wg towarzystwa klasyfikacyjnego DNV

Źródło: opracowano na podstawie pracy [126].

Raport z paryskiego memorandum, przygotowany przez Port State Control (PSC), z 2014 roku podaje, że pożary stanowiły 13,43% raportowanych zdarzeń [127]. Także dane statystyczne według danych IMO wykazują, iż pożary stanowią istotne zdarzenia, trzecie w kolejności po zdarzeniach nawigacyjnych [5], i że większość z nich ma miejsce na otwartych wodach.

1.4. Zagrożenie pożarowe w siłowni okrętowej

1.4.1. Definicje i klasyfikacja pożarów

Współcześnie stosowane są różne definicje pożaru. Można podzielić je ze względu na fizykochemiczny aspekt pożaru albo ze względu na jego administracyjno-ekonomiczny wymiar. Pożar może być definiowany jako niekontrolowany w czasie i przestrzeni proces spalania, powodujący straty materialne, utratę zdrowia lub życia [128, 129]. Definiowany jest on także jako zbiór procesów fizykochemicznych towarzyszących spalaniu w wybranym układzie termodynamicznym, powodujący zmiany tego układu, lub jako całokształt zjawisk towarzyszących spalaniu [130].

Na potrzeby statystyczne klasyfikuje się pożary na małe, średnie, duże i bardzo duże (w zależności od przestrzeni objętej pożarem). Pożary siłowni okrętowej mogą obejmować jej fragment, całą siłownię lub mogą wydostać się poza ten rejon statku

i dalej rozprzestrzeniać. Ze względu na rodzaj paliwa pierwotnego wyróżnia się pożary ciał stałych, cieczy i gazów. Według dynamiki zjawiska pożary są ustalone (swobodnie wypalające się) i zakłócone (gaszone, tłumione). Systematykę podziału pożarów przedstawiono w tab. 1.1.

Tabela 1.1. Systematyka pożarów według różnych kryteri

Kryterium klasyfikacji pożarów	Rodzaj pożaru
Potrzeby statystyczne	małe średnie duże bardzo duże
Rodzaj pierwotnego paliwa	pożary ciał stałych pożary cieczy pożary gazów
Dynamika pożaru	ustalone (swobodnie wypalające się) zakłócone (gaszone, tłumione)
Miejsce rozwoju pożaru	wewnętrzne (obejmujące jedno pomieszczenie/ rejon lub wiele pomieszczeń/ rejonów) zewnętrzne

Pożar jest zjawiskiem dynamicznym. Kontrola pożaru jest możliwa jedynie w fazie przedrozgorzeniowej, gdy jego moc nie przekracza wartości krytycznej. Rozprzestrzenianie się pożaru zależne jest od występowania mechanizmów przekazywania ciepła, bezpośredniego oddziaływania płomienia oraz oddziaływania obiektów.

1.4.2. Parametry i miary oceny rozwoju pożarów siłowni okrętowych

Pożar charakteryzowany jest przez tzw. parametry pożaru. Wielkości te są funkcjami czasu i przestrzeni, a ich wybór zależy od potrzeb badającego i rezultatu, którego oczekuje. Do parametrów, za pomocą których może być definiowany pożar [131, 132, 133], należą między innymi moc pożaru, czas trwania pożaru do wypalenia, czas do osiągnięcia fazy pożaru w pełni rozwiniętego, powierzchnia pożaru, temperatura pożaru, średnia temperatura gazów w pomieszczeniu, wzrost temperatury gazów w warstwie podsufitowej, liniowa prędkość rozprzestrzeniania się pożaru, intensywność wymiany gazowej, gęstość zadymienia, parametry opisu płomienia (np. wysokość), parametry charakteryzujące wymianę ciepła i in.

Dokładny ilościowy opis matematyczny pożaru prowadzi do zapisania złożonych równań różniczkowych rozwiązywanych tylko w szczególnych przypadkach.

Podstawowy układ równań, stosowany w metodzie obliczeniowej mechaniki płynów wykorzystywanej w analizach, na potrzeby bezpieczeństwa pożarowego przedstawił McGrattan [134]. Opisał on równanie zachowania masy (w przypadku rozwiązań związanych z bezpieczeństwem pożarowym rozbudowane o równania transportu składników mieszaniny, pozwalające określić stężenia tlenu, paliwa oraz produktów spalania), które przedstawił także jako równanie transportu składników mieszaniny (równanie zachowania składników), równanie zachowania momentu oraz równanie zachowania energii (w którym w zastosowaniach związanych z bezpieczeństwem pożarowym człon odpowiadający za oddziaływania pola ciśnienia oraz dyssypację energii kinetycznej zazwyczaj się pomija).

Aby opisany układ równań został zamknięty, należy opisać powiązania pomiędzy ciśnieniem a gęstością, co w przypadku zagadnień związanych z bezpieczeństwem pożarowym w wystarczającym stopniu opisuje równanie gazu doskonałego [135].

Rozwiązywane, w ramach analiz rozprzestrzeniania się dymu i ciepła, problemy charakteryzuje przepływ o dużej turbulencji. W celu uproszczenia stosuje się metody RANS (Reynolds Average Navier-Stokes), DNS (Direct Navier-Stokes), DVM (Discrete Vortex Methods), zaś w przypadku zagadnień inżynierii bezpieczeństwa stosuje się model turbulencji $k - \varepsilon$ [135–139].

Potencjał niszczący pożaru zależy od energii chemicznej substancji palnej (obciążenia ogniowego) i intensywności jej wyzwalania. Moc pożaru decyduje o szybkości zmian jego temperatury, emisji dymu i toksycznych produktów rozkładu termicznego [109]. Moc pożaru definiuje ilość energii wytwarzanej przez pożar. Szybkość wytwarzania tej energii równa jest szybkości straty paliwa podczas spalania, która wyrażona jest w postaci relacji:

$$\dot{Q} = m_f \Delta c_c \quad (1.1)$$

Na potrzeby pożarów projektowych, zgodnie z NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting [140], wprowadzona została klasyfikacja szybkości rozwoju pożaru na podstawie współczynnika wzrostu pożaru α . Ilość wyzwalanego ciepła w danej chwili q jest iloczynem współczynnika wzrostu pożaru α i czasu τ^2 :

$$q = \alpha \tau^2 \quad (1.2)$$

Podaje się cztery wartości współczynnika:

$\alpha = 0,002931 \text{ kW/s}^2$ – dla pożaru o wolnym rozwoju;

$\alpha = 0,011271 \text{ kW/s}^2$ – dla pożaru o średnim rozwoju;

$\alpha = 0,04689 \text{ kW/s}^2$ – dla pożaru o szybkim rozwoju;

$\alpha = 0,1878 \text{ kW/s}^2$ – dla pożaru o bardzo szybkim rozwoju [140].

W literaturze podaje się także czas do osiągnięcia mocy pożaru 1000 kW. Dla pożarów wolnych są to 584 s, dla pożarów średnich – 292 s, dla pożarów szybkich – 146 s, a dla pożarów bardzo szybkich – 73 s [141]. Pożary siłowni są pożarami cechującymi się szybkim lub bardzo szybkim rozwojem.

Na początku pożaru temperatura zazwyczaj wzrasta powoli i jest uzależniona od sukcesywnego przenoszenia ognia na przedmioty lub konstrukcje znajdujące się coraz dalej od ogniska. Płomień wędruje szybko wzdłuż pionowych ścian, a wolniej wzdłuż powierzchni poziomych. Rozszerzenie się strefy pożaru jest zależne od kierunku ciągu powietrza oraz od przewodnictwa cieplnego, unoszenia lub promieniowania, rozprzestrzeniania się płomieni i iskier. W fazie wstępnej przebiegi wartości temperatury są na tyle nieregularne, że nie można określić zależności temperatury od czasu. Po zakończeniu procesu rozpalania temperatura gwałtownie wzrasta i charakteryzuje się pewnym stałym przyrostem w czasie. Końcowy przebieg pożaru cechuje wyraźne stałe zmniejszanie się temperatury.

Znajomość procesów zachodzących w fazie wzrostu pożaru jest ważna ze względu na ocenę możliwości ewakuacji ludzi ze statku. Charakterystyka fazy pożaru rozwiniętego dostarcza zaś ważnych informacji na potrzeby projektowania ochrony biernej pomieszczeń [131].

Szybkość rozwoju pożaru zależy od stopnia nagromadzenia materiałów palnych w danym pomieszczeniu (w kabinach mogą to być materiały konstrukcyjne, wykończeniowe i wyposażenia, w siłowni – przede wszystkim paliwa i oleje, a w przestrzeniach ładunkowych – przewożone towary) oraz od ich właściwości, rozmiarów pomieszczenia, dopływu powietrza, odpływu produktów pożaru oraz działania instalacji gaśniczych. Warunki rozprzestrzeniania się pożaru na statku w początkowym okresie zależne są także od usytuowania głównych dróg komunikacji wewnętrznej i od systemu wentylacji. W dalszym stadium rozwoju pożar przenika przez ściany i stalowe pokłady do sąsiednich pomieszczeń.

Istotnym parametrem opisującym rozwój i oddziaływanie pożaru jest także strumień ciepła oddziałujący na materiały palne umieszczone w określonej odległości E_0 od pożaru. Oszacowanie jego wartości umożliwia ocenę ryzyka zapłonu tych materiałów. Strumień ciepła wyrażony jest wzorem [142]:

$$\dot{q}_R = \frac{q}{12,56E_0^2} \quad (1.3)$$

Parametrem opisu pożaru jest także wysokość płomienia H_p która wyznaczana jest z różnie definiowanych zależności. Przyjmując za kryterium opisu miejsce nagromadzenia się materiałów palnych, wysokość płomienia należy wyrazić w postaci formuły [142]:

$$H_{pt} = 0,001(k\dot{Q}_{pow})^{0,4} \quad (1.4)$$

Podaje się trzy wartości współczynnika k :

$k - 1$, gdy w pomieszczeniu blisko źródła pożaru nie ma ścian;

$k - 2$, gdy paliwo zgromadzone jest blisko ściany;

$k - 4$, gdy paliwo zgromadzone jest w narożniku.

Opisuje się również temperaturę kolumny gazów wytwarzanych przez pożar [142]:

$$\Delta t = \frac{0,222(k\dot{Q}_c)^{2/3}}{E^{5/3}} \quad (1.5)$$

Istotnym parametrem opisu pożaru, szczególnie ze względu na możliwość ewakuacji, jest szybkość wytwarzania warstwy dymu [142]:

$$M = 0,071\dot{Q}_{pow}^{1/3} z^{5/3} (1 + 0,026 \dot{Q}_{pow}^{2/3} z^{-5/3}) \quad (1.6)$$

Na warunki ewakuacji ma wpływ także gęstość optyczna dymu opisująca widoczność w dymie. Parametr ten określony jest zależnością [142]:

$$D_{dym} = \frac{D_m m}{V_{dym}} \quad (1.7)$$

Dla warunków ewakuacji ma znaczenie także czas potrzebny do wypełnienia pomieszczenia dymem τ_{dym} , który wyrażony jest zależnością [142]:

$$\tau_{dym} = 200 \frac{A_{podł}}{\dot{Q}^{0,6}} \quad (1.8)$$

Zagrożenie pożarem na statku w dużym stopniu zdeterminowane jest przez rejon, którego dotyczy. Siłownia okrętowa jest miejscem, w którym duże ilości materiałów palnych, takich jak paliwa czy oleje smarne, zgromadzonych na małej powierzchni, stwarzają szczególnie duże zagrożenie. Z uwagi na fakt równoczesnej obecności wielu potencjalnych źródeł zapłonu, takich jak gorące powierzchnie, prawdopodobieństwo powstania pożaru w siłowni jest większe niż w innych rejonach.

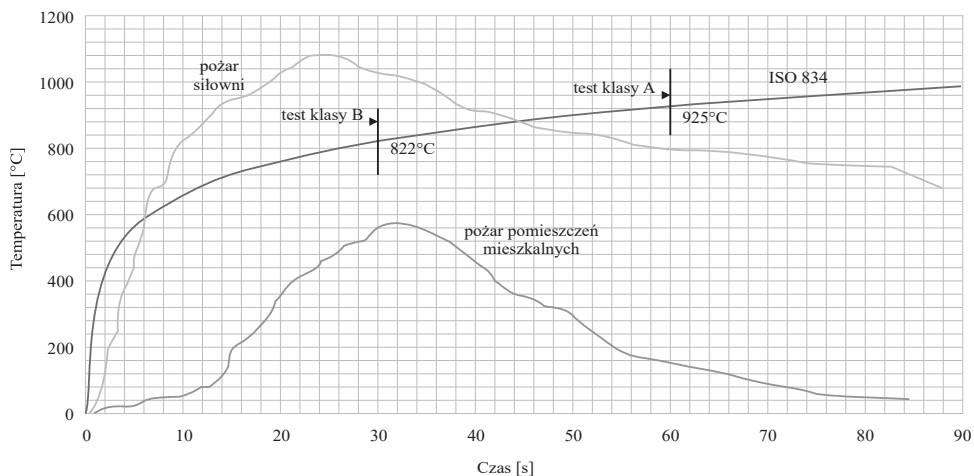
W przestrzeniach ładunkowych ryzyko powstania pożaru wiąże się np. z możliwością powstania samozapłonu transportowanego ładunku. Pomieszczenia załogi i pasażerów to rejon, w których dochodzi do pożarów w wyniku nieodpowiedzialnych zachowań ludzi, ale także awarii instalacji, np. elektrycznych. W kuchniach szczególnie niebezpieczne są miejsca przygotowywania potraw w głębokim oleju. Materiały palne to także materiały zgromadzone w pomieszczeniach służących

do magazynowania farb lub rozpuszczalników. Urządzenia elektroniczne zaś to potencjalne obiekty ryzyka powstania pożaru przede wszystkim na mostkach kapitańskich.

Czas trwania pożaru siłowni waha się od kilku–kilkudziesięciu minut do ponad doby. Osiągane wartości temperatury mogą przekraczać 1000°C , a nawet 1200°C . Pożary w siłowni szybko osiągają fazę pożaru w pełni rozwiniętego. Są zdecydowanie bardziej intensywne i dynamiczne w fazie początkowej niż pożary w pomieszczeniach mieszkalnych. Dynamika rozwoju pożaru w siłowni zależy od intensywności wypływu paliwa (z nieszczelności), jego właściwości, geometrii pomieszczenia i warunków w nim panujących. W przypadku wypływu paliwa $0,1\text{ kg/s}$ osiągana moc pożaru wynosi $4,4\text{ MW}$, w przypadku $0,2\text{ kg/s}$ wzrasta ona do $8,8\text{ MW}$, w przypadku wypływu paliwa $0,5\text{ kg/s}$ wynosi ona 33 MW , w przypadku 1 kg/s – 44 MW , a w przypadku 2 kg/s – już 88 MW [133, 143].

Moc pożaru siłowni we wczesnym etapie rozwoju w przybliżeniu równa jest ilości wytwarzanego ciepła na jednostkę czasu podczas spalania paliwa uwalnianego z nieszczelności. Moc pożaru zwiększa się jednak sukcesywnie wskutek palenia się innych palnych materiałów w pomieszczeniu, np. izolacji kabli elektrycznych [143].

Na rys. 1.6 przedstawiono porównanie zmian temperatury w czasie w przypadku pożaru opisanego standardową krzywą temperatura–czas, zgodnie z normą ISO 834, oraz w przypadku pożarów pomieszczeń mieszkalnych na statku



Rys. 1.6. Porównanie zmian temperatury w czasie w przypadku pożaru opisanego standardową krzywą temperatura–czas, zgodnie z ISO 834, oraz w przypadku pożarów pomieszczeń mieszkalnych na statku (z ograniczoną ilością materiałów palnych) i pomieszczenia kategorii A – siłowni na statku

Źródło: opracowano na podstawie pracy [144].

(z ograniczoną ilością materiałów palnych) i pomieszczenia kategorii A siłowni na statku. Krzywa opisująca pożar siłowni pokazuje gwałtowny wzrost temperatury w krótkim czasie (po 10 s temperatura przekracza 800°C) do wartości znacznie przekraczających maksymalne wartości temperatury pożarów standardowych (wzrost temperatury do 800°C po czasie trzykrotnie dłuższym, wynoszącym 30 s). Na wykresie zobrazowano także przebieg zmian temperatury w czasie dla pożaru pomieszczeń mieszkalnych na statku (wartość temperatury maksymalnej nie przekracza 600°C).

Przykładowe wartości mocy pożaru, przy masowej szybkości spalania $m' = 0,045 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, cieple spalania $q_c = 44\,000 \text{ kJ/kg}$ i gęstości $\rho = 845 \text{ kg/m}^3$, w zależności od masy paliwa (dostarczanego do momentu jego odcięcia), grubości jego warstwy i powierzchni rozlewu – kałuży paliwa, przedstawiono w tab. 1.2 [133, 143].

Tabela 1.2. Moc pożaru kałuży paliwa w siłowni okrętowej w zależności od masy paliwa oraz powierzchni rozlewu, przy grubości jego warstwy równej

Masa paliwa [kg]	Powierzchnia rozlewu [m^2]	Moc pożaru [MW]
1	1,18	2,30
10	11,80	23,40
100	118,00	234,00
500	592,00	1172,00
1000	1183,00	2343,00

Źródło: opracowano na podstawie pracy [143].

Wzrost masy paliwa w pożarze kałuży paliwa o rząd wielkości skutkuje wzrostem mocy pożaru również o rząd wielkości.

Moc pożaru strumieniowego, tzw. *jet fire* (pochodnia), w siłowni okrętowej zależy przede wszystkim od ilości paliwa dostarczanego w określonym czasie [130–133]. W tab. 1.3 przedstawiono spodziewaną moc pożaru w zależności od ilości dostarczanego paliwa, np. z wycieku.

Moc pożaru strumieniowego wzrasta w związku ze spalaniem się wtórnych materiałów palnych w siłowni, takich jak izolacje kabli, przy czym pożary typu strumieniowego często rozprzestrzeniają się w niekontrolowany sposób.

Rozkład wartości temperatury podczas pożaru w siłowni okrętowej zależy od miejsca powstania pożaru, ilości i właściwości materiału palnego, wentylacji oraz geometrii pomieszczeń. W tab. 1.4 przedstawiono podstawową charakterystykę ilościowo-jakości siłowni jako miejsca powstania i rozwoju pożaru.

Tabela 1.3. Moc pożaru strumieniowego w siłowni okrętowej w zależności od strumienia masy paliwa (przy $q_c = 44\,000$ kJ/kg i współczynnika niecałkowitości spalania $\varphi = 0,86$)

Strumień masy dostarczanego paliwa [kg/s]	Moc pożaru [MW]
0,1	4,4
0,2	8,8
0,5	22,0
1,0	44,0
2,0	88,0

Źródło: opracowano na podstawie pracy [130].

Tabela 1.4. Cechy siłowni jako potencjalnego obszaru wystąpienia pożaru

Cechy substancji palnych	
Rodzaj	paliwa i oleje (w postaciach ciekłej i lotnej), farby, rozpuszczalniki, izolacje kabli elektrycznych
Ilość	kilka tysięcy ton
Lokalizacja	zbiorniki, zęzy maszynowe, stanowiska prób wtryskiwaczy, wirówki, skrzynie korbowe silników, pompy paliwa i oleju, palniki kotłów, przecieki oraz nieszczelności rurociągów
Temperatura zapłonu	wymagana wyższa od 60°C dla paliw i olejów
Charakterystyka źródeł zapłonu	
Rodzaj	gorące powierzchnie elementów części maszyn, kolektory, rury wydechowe, miejsca iskrzenia generatorów i silników elektrycznych, uszkodzonych przewodów elektrycznych i in.
Ilość	w zależności od wyposażenia siłowni
Lokalizacja	w zależności od wyposażenia siłowni
Temperatura	około 150 – 1500°C
Parametry pożaru	
Temperatura	do około 1200°C
Czas trwania	do kilkunastu godzin
Charakter pożaru	gwałtowny
Przebieg	często bez fazy początkowej
Warunki wentylacji	
Rodzaj wentylacji	naturalna, mechaniczna
Otworki wentylacyjne	drzwi, świetliki, wyjścia ewakuacyjne, szyby
Rozmieszczenie otworów wentylacyjnych	w zależności od rozmiaru i geometrii siłowni
Wydajność	zgodnie z przepisami

Tabela 1.4. Cechy siłowni jako potencjalnego obszaru wystąpienia pożaru (cd.)

Zapobieganie rozprzestrzenianiu się pożaru	
Metody konstrukcyjne	przegrody pożarowe, zamknięcia, uszczelnienia
Metody eksploatacyjne	instalacje i środki gaśnicze, przenośny sprzęt gaśniczy
Wykrywanie	instalacje wykrywcze
Zarządzanie	zgodnie z procedurami

Źródło: opracowano na podstawie pracy [145].

W tab. 1.4 scharakteryzowano materiały palne, źródła zapłonu, warunki wentylacji i sposób zabezpieczenia jako podstawowe czynniki determinujące możliwość powstania i rozprzestrzeniania się pożaru w siłowni okrętowej przy założeniu, że utleniaczem jest tlen.

1.4.3. Przyczyny i identyfikacja zagrożeń pożarem w siłowni okrętowej

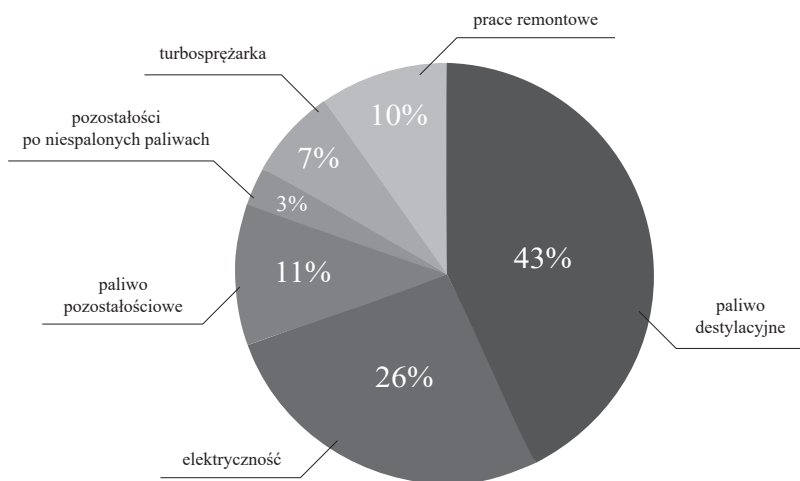
Do wystąpienia pożaru niezbędne są trzy czynniki: materiał palny, źródło zapłonu i utleniacz. Siłownia okrętowa jest miejscem, z którego podczas pożaru niemożliwe jest wyeliminowanie utleniacza, którym jest powietrze. Ze względu na znaczne rozmiary siłowni nawet po odcięciu wentylacji pozostanie w niej ilość powietrza zdolna do podtrzymywania pożaru. W siłowni przepływają strumienie wymuszane przez wentylację, a w czasie pożaru – wywołane konwekcją ciepłą.

Materiałami palnymi są przede wszystkim paliwa i oleje smarne w zbiornikach, przewodach paliwowych, zęzach przedziału maszynowego, w wirówkach, skrzyniach korbowych silników, pompach paliwa i oleju, palnikach kotłów. Paliwo może pochodzić także z nieszczelności rurociągów i przecieków. Łączny zapas paliwa i olejów na statku może wynosić kilka tysięcy ton. Oznacza to dużą koncentrację znacznych ilości łatwopalnego materiału w rejonie najwyższego ryzyka powstania pożaru.

Na rys. 1.7 przedstawiono udział pożarów w siłowni okrętowej w zależności od przyczyny.

Podczas codziennej eksploatacji właściwie zaprojektowane i dobrze wykonane instalacje paliwowe nie powinny stwarzać zagrożenia pożarowego i wybuchowego. Niebezpieczeństwo pojawia się w chwili powstania wycieku paliwa.

Trudno jest konstrukcyjnie wyeliminować wszystkie potencjalne źródła wycieków paliwa. Łatwiej jest zniwelować gorące powierzchnie poprzez np. ich właściwą izolację [26].



Rys. 1.7. Udział pożarów w siłowni okrętowej w zależności od przyczyny

Źródło: opracowano na podstawie pracy [26].

Miejszem powstania pożaru w siłowni okrętowej mogą być silniki. Ich konstrukcja powoduje, że podczas awarii, np. w wyniku zatarcia łożysk korbowych, ramowych, napinacza łańcuchów, napędu wału rozrządu, pożar może powstać w karterze, w przestrzeniach podtłokowych (na skutek przedmuchu spalin przez wyłamane pierścienie tłokowe czy zniszczenia w wyniku eksploatacji tłoków i tulei cylindrowych) oraz w kolektorze spalin wydechowym. Dodatkowym zagrożeniem jest powstanie mgły olejowej mogącej spowodować eksplozję.

Podczas niecałkowitego spalania paliwa powstaje osadzająca się na urządzeniach wydechowych sadza, której zapłon jest możliwy przy nadmiernym jej nagromadzeniu, co skutkuje znacznym wzrostem temperatury w urządzeniach wydechowych (do 1000°C) oraz wystąpieniem dużej ilości iskier [28, 43, 125].

Zagrożenie pożarowe w siłowni stwarzają także zbiorniki paliwa. 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 powietrze. 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 w pomieszczeniu, następstwem czego może stać się wykipienie zawartości zbiornika.

Jako najniebezpieczniejsze źródła zapłonu w siłowni okrętowej wskazuje się gorące powierzchnie elementów maszyn. Dużym zagrożeniem są także prowa-

dzzone prace remontowe, otwarty ogień i prace szlifiersko-spawalnifiche. Obszerne opracowanie na temat źródeł zapłonu stanowi dokument DNV [26].

Obszarami zagrożonymi powstaniem pożaru są także rejon lub pomieszczenie zespołów prądotwórczych, pomieszczenie z wirówkami paliwa i oleju, warsztat, kotły, spalarki i inne.

Miejsce, o nieco odmiennym charakterze niż pozostałe rejony siłowni, jest centrala manewrowo-kontrolna (CMK). Na budowanych obecnie statkach, o wysokim stopniu automatyzacji, znajduje się w niej jednak wiele urządzeń mogących przyczynić się do powstania i rozprzestrzeniania się pożaru.

Pożar z siłowni do innych rejonów statku może rozprzestrzeniać się poprzez:

- przegrody pożarowe niewłaściwe dla danych warunków;
- przegrody z uszkodzoną izolacją (np. w wyniku oddziaływania drgań, gdy następuje obsunięcie się izolacji lub po remontach);
- źle izolowane rurociągi;
- otwarte drzwi;
- kanały i szyby wentylacyjne;
- tory kablowe i in.

Podczas żeglugi w warunkach tropikalnych, chociaż jest to niedozwolone, załogi czasowo blokują drzwi wejściowe do siłowni w pozycji otwartej, aby zapewnić dopływ powietrza z nadbudówki. W sytuacji wystąpienia pożaru stwarza to duże zagrożenie przeniesienia go do ciągów komunikacyjnych nadbudówki.

Kanały wentylacyjne mogą być drogą rozprzestrzeniania się pożaru, zwłaszcza gdy nie mają odpowiednich zamknięć – klap pożarowych. Tory kablowe mogą być drogą rozprzestrzeniania się pożaru, gdy kable i przejścia kablowe są niewłaściwie wykonane i eksploatowane. Powinny być one co najmniej nierozprzestrzeniające płomienia i tak ułożone, aby nie utraciły swoich pierwotnych właściwości nierozprzestrzeniania płomienia. Wnioski wynikające z badań [41] wskazują, że dla zwiększenia bezpieczeństwa pożarowego kable należy prowadzić w dużych wiązkach. Odległości pomiędzy wiązkami powinny być większe od 6 cm, wiązek nie powinno być więcej niż dwie, przy czym horyzontalne prowadzenie kabli uważa się za bezpieczniejsze.

Szyby siłowni izolowane są najczęściej od zewnątrz. Jest to rozwiązanie prostsze technologicznie i zapobiegające gromadzeniu się cząstek paliw, olejów w materiale izolacji. Izolowane są one zgodnie z wymaganiami przegrody A, najczęściej klasy A-60. Dodatkowo wykonuje się izolację na pokładach, na długości 400–600 mm, w celu ograniczenia możliwości nagrzewania się pokładu w przypadku pożaru i tym samym ochrony nadbudówki przez przedostaniem się do niej ognia.

Ponieważ produkty niecałkowitego i niezupełnego spalania paliwa z układu paliwowego i oleju generować mogą powstawanie iskier, instalacja spalin wylotowych musi spełniać wymagania bezpieczeństwa przeciwpożarowego statku. Do ich gaszenia, a także do zatrzymywania popiołu i sadzy stosowane są łapacze iskier. Ich zadaniem jest także zmniejszenie właściwości zapalnych iskier, aby nawet w przypadku wydostania się ich na zewnątrz nie mogły stworzyć zagrożenia pożarowego.

Istotne, z punktu widzenia możliwości rozprzestrzeniania się pożaru, jest także usytuowanie szybu siłowni. Może być on zlokalizowany w innym, niż nadbudówka, rejonie. (W starszych konstrukcjach szyb siłowni przylegał do pomieszczeń mieszkalnych lub był nimi obudowany. Występowało w związku z tym zagrożenie, iż pożar przedostanie się do nadbudówki).



Rys. 1.8. Przykład zastosowania dyslokacji szybu siłowni poprzez wydzielenie go z nadbudówki

Źródło: [146].

Rozwiązania stosowane współcześnie to nie tylko wydzielenie (rys. 1.8), ale także oddalenie szybu od nadbudówki. Na większości statków są one jednak zlokalizowane w tym samym rejonie statku, blisko siebie, a okna kabin skierowane są na szyb siłowni. Oddziaływanie cieplne poprzez przegrodę może uniemożliwić przebywanie w jej sąsiedztwie; w granicznym przypadku możliwe jest przedostanie się pożaru przez przegrody do pomieszczeń mieszkalnych lub korytarzy [89–96].

1.5. Podsumowanie

Bezpieczeństwo statku zależne jest od wielu czynników. Przytoczone i sformułowane definicje wskazują na złożoność i interdyscyplinarność problemu, a statystyki pokazują, że pożary, szczególnie w siłowniach, są niezmiennie od lat występującymi zdarzeniami, które zagrażają zdrowiu i życiu załogi oraz pasażerów, a także powodują istotne zniszczenia, włącznie z utratą jednostki.

Pożary na statkach, w zależności od miejsca ich powstania, charakteryzują się różnymi parametrami. Pożary siłowni okrętowych mają gwałtowny przebieg. Charakteryzuje je gwałtowny wzrost temperatury do wartości znacznie przewyższających temperaturę pożarów standardowych oraz pożarów innych rejonów statku. Na scenariusze pożarów w tym rejonie mają wpływ duże nagromadzenie materiałów palnych na małej powierzchni, liczne potencjalne źródła zapłonu i obecność utleniacza.

Gorące powierzchnie w siłowni okrętowej, takie jak kadłub silnika, zawory indykatorowe, kolektory wydechowe spalin, turbosprężarki, kadłuby pomp wtryskowych paliwa, rurociągi dolotu i przelewu paliwa pomp wtryskowych oraz powierzchnie reflektorów nad silnikiem, uważa się za miejsca powstawania potencjalnych pożarów, w związku z czym zaleca się ich regularne kontrole.

Wśród dróg rozprzestrzenienia się pożaru w siłowni znajdują się drogi niewłaściwe dla danych warunków przegrody, przegrody z uszkodzoną izolacją, źle izolowane rurociągi, otwarte drzwi, kanały i szyby wentylacyjne, a także tory kablowe i in. Rozprzestrzenianie się pożaru w siłowni zależne jest także od usytuowania szybu siłowni.

Ograniczenie zagrożenia pożarem w siłowni okrętowej oznacza konieczność eliminacji błędów w czasie projektowania statku i siłowni, świadomość konsekwencji degradacji stanu technicznego przegród i izolacji oraz jej zapobieganie, niespalanie paliw niespełniających wymagań jakościowych, prawidłowa regulacja silników, przestrzeganie procedur obsługi i zasad prowadzenia remontów, ograniczenie wpływu czynnika ludzkiego poprzez przestrzeganie wymagań dotyczących odpowiednich kwalifikacji załogi, wystarczającą obsadę oraz zabezpieczenie przed oddziaływaniem warunków hydrometeorologicznych w akwenie żeglugi.

Ze względu na potencjał niszczący pożaru, w szczególności pożaru siłowni okrętowej, istnieje potrzeba poszukiwania rozwiązań, które mogą przyczynić się do zmniejszenia liczby pożarów na statkach i ograniczenia możliwości ich rozprzestrzeniania się. Działania powinny mieć charakter studialny i obejmować modelowanie zjawiska, w celu określenia parametrów opisujących pożar, oraz przewidywanie jego rozwoju i rozprzestrzeniania się, ale także stosowanie zabezpieczeń

projektowo-konstrukcyjnych, które będą miały za zadanie ograniczenie możliwości powstania i rozwoju pożaru oraz jego rozprzestrzeniania się, jak również stosowanie metod eksploatacyjnych, które obejmują procedury codziennej eksploatacji obiektów zwiększonego ryzyka i użycie dostępnych środków oraz instalacji gaśniczych.

2. MOŻLIWOŚCI I SPOSOBY ZWIĘKSZANIA BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

2.1. Interpretacja bezpieczeństwa pożarowego w aspekcie prawnym

Tradycyjne podejście do projektowania ma charakter preskrypcyjny. Jego zaletą jest zrozumiałość i łatwość wykonania oraz sprawdzenia, wadą natomiast – mała elastyczność i praktycznie brak możliwości stosowania niekonwencjonalnych rozwiązań, których ocena aprobowanymi metodami nie jest możliwa. Poszukiwania możliwości zastosowania nowych materiałów, konstrukcji i technologii spowodowały, iż zamiast dotychczasowego podejścia deterministycznego coraz częściej stosuje się probabilistyczne podejście do walki z pożarem [147].

Charakter preskrypcyjny podczas projektowania bezpieczeństwa pożarowego statku jest szczególnie widoczny w konwencji SOLAS – w rozdziale II-2, w którym zagadnienia związane z rozprzestrzenianiem się pożarów, będące filozofią bezpieczeństwa, ujęte są w grupie podstawowych zadań dotyczących bezpieczeństwa pożarowego, takich jak:

- zapobieganie powstaniu pożaru i wybuchu;
- zmniejszenie ryzyka utraty życia w wyniku pożaru;
- zmniejszenie, w wyniku pożaru, ryzyka uszkodzenia statku, jego ładunku i zagrożenia dla środowiska;
- ograniczenie, opanowanie i stłumienie pożaru oraz wybuchu w przedziale, w którym powstał;
- zapewnienie pasażerom i załodze właściwych i łatwo dostępnych dróg ewakuacji [2].

W rozdziale II-2 konwencji SOLAS sformułowano wymagania funkcjonalne, dotyczące zapobiegania rozprzestrzenianiu się pożarów, takie jak:

- podział statku na główne strefy pionowe i strefy poziome za pomocą przegród termicznych i konstrukcyjnych;
- oddzielenie pomieszczeń mieszkalnych od pozostałych części 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.

W połowie lat 90. ubiegłego wieku rozpoczęła się w IMO, przede wszystkim w Komitecie Bezpieczeństwa Morskiego i w Podkomitecie ds. Ochrony Pożarowej (obecnie w Sekcji Statkowych Systemów i Wyposażenia), dyskusja nad potrzebą zmiany zasad formułowania przepisów budowy i eksploatacji statków morskich. Wynikiem tej dyskusji było uzgodnienie metodyki postępowania przy wprowadzaniu tzw. rozwiązań alternatywnych, z uwzględnieniem analizy ryzyka pożarowego i wybuchowego oraz ilościowych kryteriów oceny ryzyka i bezpieczeństwa. W części F rozdziału II-2 ww. konwencji zawarto metody rozwiązań alternatywnych bezpieczeństwa pożarowego; są to:

- 1) inżynierska analiza ryzyka;
- 2) ocena rozwiązania alternatywnego dotyczącego realizacji zadań i wymagań funkcjonalnych z rozdziału II-2, ze wskazaniem, że stopień uzyskanego poziomu zabezpieczenia jest nie niższy niż ten, który wynika z zastosowania bezpośredniego wymagań i rozwiązań zawartych w przepisach w rozdziale II-2;
- 3) zatwierdzenie rozwiązania lub konstrukcji alternatywnej przez administrację, wraz z oceną spełnienia wymagań równorzędności uzyskanego poziomu zabezpieczenia, kompletności oraz rzetelności przeprowadzonych analiz i ocen.

Inżynierska analiza ryzyka obejmuje identyfikację zagrożeń pożarowego, czyli:

- określenie typu statku i pomieszczenia/ pomieszczeń będących przedmiotem rozważań;

- ustalenie wymagania/ wymagań nakazanych, których statek lub pomieszczenie/ pomieszczenia nie spełniają;
- ustalenie zagrożeń pożarem i wybuchem dla statku lub rozpatrywanego pomieszczenia/ pomieszczeń;
- ustalenie możliwych źródeł zapłonu;
- ustalenie potencjału pożarowego dla każdego rozpatrywanego pomieszczenia;
- ustalenie potencjału wytwarzania dymu i toksycznych wycieków dla każdego rozpatrywanego pomieszczenia;
- ustalenie potencjału rozprzestrzeniania się pożaru, dymu lub toksycznych wycieków z rozpatrywanego pomieszczenia/ pomieszczeń do innych pomieszczeń;
- określenie wymaganych kryteriów bezpieczeństwa pożarowego, które muszą być spełnione dla statków lub rozpatrywanego pomieszczenia/ pomieszczeń wytypowanych przez wymagania/ wymagania nakazane (kryteria ustalone na podstawie celów bezpieczeństwa pożarowego i wymagań funkcjonalnych

- powinny zapewniać stopień bezpieczeństwa nie mniejszy niż uzyskany przez stosowanie wymagań nakazanych oraz powinny być policzalne i mierzalne);
- szczegółowy opis konstrukcji i rozwiązań alternatywnych, wraz z wykazem założeń do projektu, i wszelkie proponowane ograniczenia działania lub warunków pracy;
 - techniczne uzasadnienie wskazujące, że konstrukcje i rozwiązania alternatywne zapewniają spełnienie kryteriów bezpieczeństwa pożarowego.

Możliwość praktycznego zastosowania rozwiązań alternatywnych, których celem jest zwiększenie poziomu bezpieczeństwa pożarowego, pojawiła się w okrętownictwie wraz z wejściem w życie nowych przepisów rozdziału II-2 konwencji SOLAS w lipcu 2002 roku. W przepisach z roku 2002 nie znalazły się jednak kryteria ilościowe opisujące zakładany poziom bezpieczeństwa pożarowego. Nie zostały także określone kryteria ilościowe opisu obiektów ryzyka na statku, kryteria opisu pożaru ani kryteria weryfikacji zastosowanych rozwiązań alternatywnych; zostały jedynie zaproponowane metody oceny ryzyka.

Współcześnie w działaniach zmierzających do zmian wymagań przepisów obserwuje się kierunki postępowania, które skutkować będą koniecznością udowodnienia przez projektanta bezpieczeństwa proponowanego rozwiązania, a nie – jak do tej pory – koniecznością spełnienia wymagań przepisów. Bezpieczeństwo mierzone będzie np. dopuszczalną liczbą wypadków lub ich ofiar na podstawie projektowania opartego na analizie ryzyka.

W tradycyjnym podejściu projekt oparty musi być na określonych wymaganiach przepisów (tzw. *rules-based design*). Kolejne podejście oparte jest na analizie ryzyka (tzw. *risk-based design*) i wymaga poszerzonych analiz, ale pozwala na stosowanie nowych, niekonwencjonalnych, rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo, pod warunkiem wykazania spełnienia wymagań dotyczących bezpieczeństwa ich stosowania, i jest sposobem projektowania, który w przyszłości zapewne będzie dominujący.

Okrętownictwo zaadaptowało metody oceny ryzyka z przemysłu chemicznego i jądrowego. W latach 90. ub.w. Międzynarodowa Organizacja Morska zaaprobowała stosowanie w okrętownictwie metody oceny ryzyka FSA (Fire Safety Assessment) [32]. Jest to metoda uniwersalna, która może być stosowana do analiz wszystkich rodzajów wypadków i która jest akceptowana na wszystkich rodzajach statków. Jednakże pozwala ona na określenie skutków zdarzeń tylko w odniesieniu do ludzi i mienia, a nie do środowiska morskiego. IMO zaleca więc, by wykorzystać dodatkowo metodologię ustalania kryteriów akceptowalności ryzyka dla środowiska morskiego [148] norweskich standardów technicznych (tzw. standardów NORSOK).

Działania w celu ograniczenia ryzyka podejmowane są także przez Międzynarodowe Stowarzyszenie Zarządu Latarni Morskich i Oznakowania Nawigacyjnego (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, IALA) [149]. IALA zaleca stosowanie metody PAWSA (Ports and Water-Ways Safety Assessment) do jakościowej analizy, oceny i kontroli ryzyka w portach i na torach wodnych oraz dostępnych dla żeglugi śródlądowej. Druga metoda: IWRAP (IALA Waterway Risk Assessment Programme) stosowana ma być na torach wodnych i wąskich przejściach [30].

Obecnie coraz częściej, zgodnie z zaleceniami IMO zawartymi w przepisach *Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*, MSC/Circ. no. 1023, MEPC/Circ. no. 329, 2002 [150], wraz z poprawkami, w okrętownictwie analizy ryzyka prowadzi się właśnie metodą formalnej oceny bezpieczeństwa żeglugi (FSA).

Według IMO „ryzyko” jest definiowane przez częstotliwość zdarzenia rozpatrywaną w powiązaniu z konsekwencją (mierzoną śmiertelnością) [150]. Ryzyko może być wyznaczane z wykorzystaniem statystyk, metod modelowania ryzyka albo jako ich kombinacja. Jakość otrzymanych wyników zależy jednak od jakości danych wejściowych. Dlatego należy wykorzystywać aktualne i pełne statystyki. Istnieje jednak ryzyko, iż nie zawierają one wszystkich zdarzeń, gdyż nie wszystkie one są raportowane i zgłaszane.

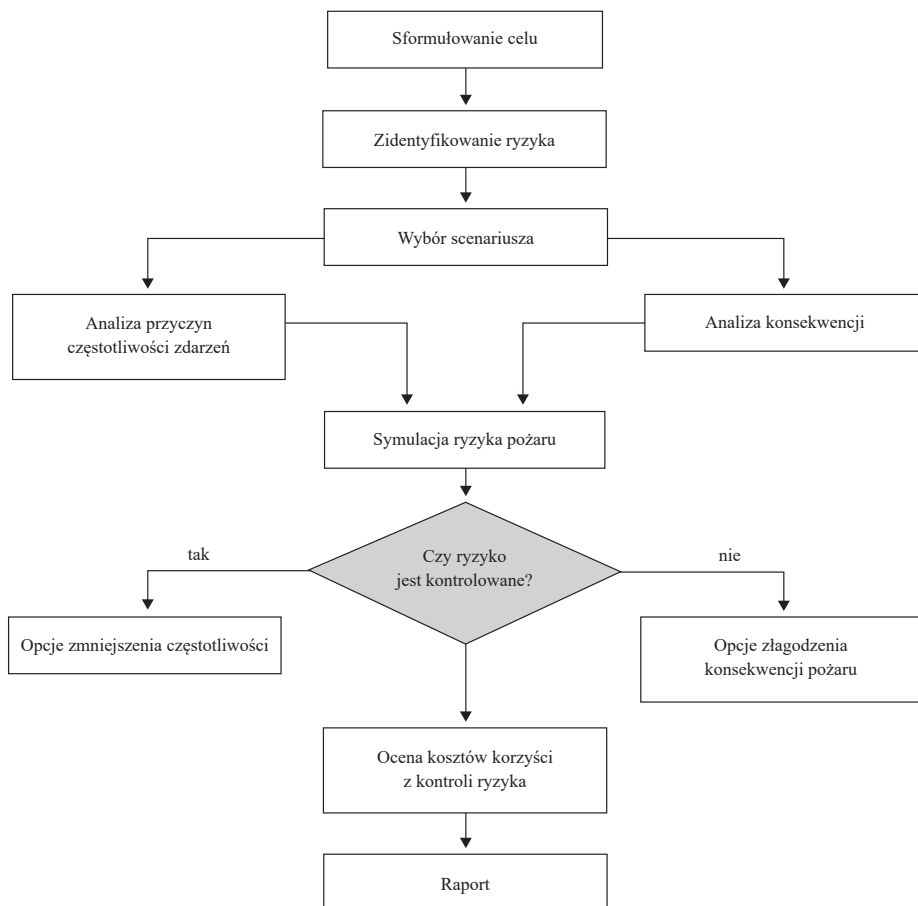
FSA jako systematyczna metoda, czyli proces decyzyjny oceny ryzyka bezpieczeństwa morskiego (życia, zdrowia, środowiska morskiego i dóbr materialnych), ma na celu oszacowanie kosztów, a w związku z tym korzyści płynących z zastosowania różnych opcji redukcji ryzyka. Analiza oparta jest na pięciu krokach; są to:

- identyfikacja zagrożeń pożarowych,
- ocena ryzyka wynikającego ze zidentyfikowanych zagrożeń (oszacowanie ryzyka),
- identyfikacja różnych opcji kontroli ryzyka (wyznaczenie opcji sterowania ryzykiem),
- ocena kosztów/ korzyści różnych opcji kontroli ryzyka (oszacowanie kosztów i korzyści),
- rekomendacje dla decydentów (lub dla decydenta).

Na rys. 2.1 przedstawiono algorytm postępowania w metodzie FSA.

Na każdym z etapów metody FSA wykorzystuje się różne narzędzia. Identyfikacja zagrożeń jest krytycznym krokiem w analizie ryzyka. Polega na stworzeniu listy największych zagrożeń, określeniu scenariuszy, przewidywaniu rozwoju konsekwencji. W celu identyfikacji zagrożeń wykorzystuje się np. HAZOP (Hazard and Operability Study – analizy ryzyka), FTA (Fault Tree Analysis – drzewa uszkodzeń),

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis – analiza rodzajów i skutków błędów). Niezawodność człowieka określana jest techniką przewidywania błędu człowieka THERP (Technique for Human Error-Rate Prediction – technika przewidywania błędu człowieka) [151].



Rys. 2.1. Algorytm postępowania w metodzie FSA

Źródło: opracowano na podstawie pracy [32].

Oszacowanie ryzyka polega na wyznaczeniu jakościowego lub ilościowego ryzyka wypadków, np. za pomocą metody QRA (Quantitative Risk Assessment). Ustala się kryteria bezpieczeństwa z wykorzystaniem np. macierzy ryzyka, analizując częstotliwość i konsekwencje zdarzeń. Tworzy się drzewa udziału ryzyka, buduje się krzywe F-N (przedstawiające zależność między częstotliwością a dotkliwością wypadków pod względem ich dopuszczalności) dla poszczególnych kategorii wypadków.

Pożądane jest także stworzenie diagramu czynników wpływu RID (Regulatory Impact Diagram) odnoszącego się do wyznaczenia i oszacowania wpływu czynników prawnych, organizacyjnych i in. [151].

Wyznaczanie opcji ryzyka prowadzi się, budując łańcuchy przyczynowe, wyznacza się sposoby sterowania ryzykiem, tworząc określoną liczbę opcji zarządzania ryzykiem.

Szacowanie kosztów i korzyści prowadzi się dla danej opcji ryzyka, identyfikując koszty wprowadzenia ich w życie oraz zyski. Tworzy się koszty jednostkowe. Szacunki kończy się rekomendacjami dla decydenta.

Podczas oceny ryzyka wg IMO (na podstawie FSA Guidelines) ryzyko jest określane jako nieakceptowalne, tolerowane lub powszechnie akceptowalne. Jeżeli jest nieakceptowalne, musi być usunięte bez względu na koszty. Ryzyko tolerowane jest określane jako dopuszczalne, pod warunkiem, że jest zarządzane na poziomie ALARP (As Low As Reasonable Practicable), czyli tak niskie, jak uzasadnione praktycznie [151].

Projektowanie oparte na analizie ryzyka pozwala na stosowanie rozwiązań alternatywnych. Jest ścieżką, która umożliwia wykazanie, iż rozwiązania te mogą być stosowane zgodnie z wymaganiami przepisów.

2.2. Przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym w siłowni okrętowej

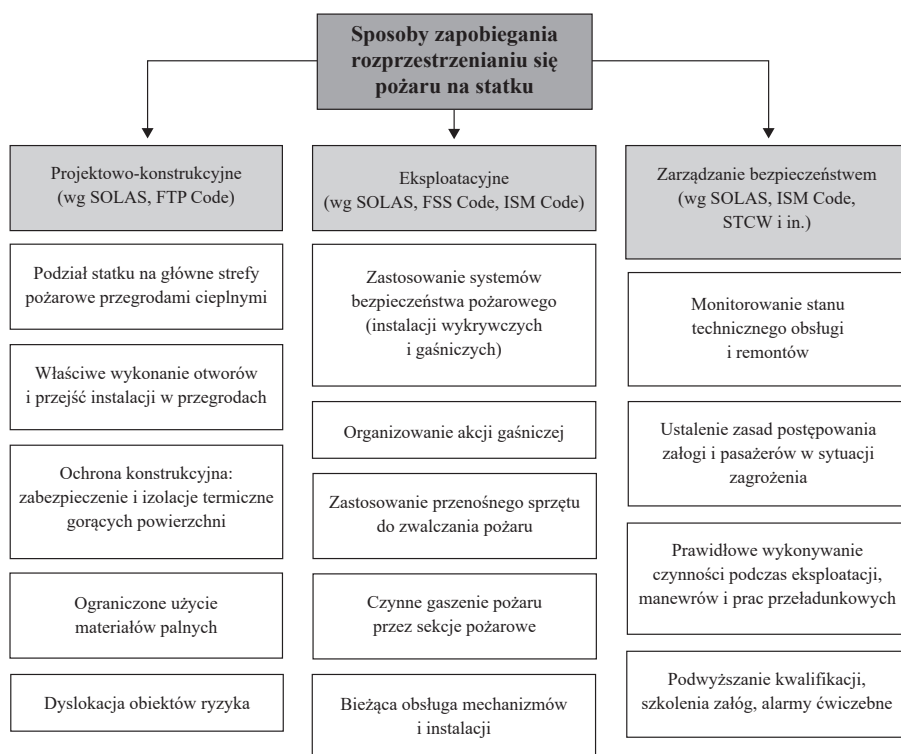
2.2.1. Zabezpieczenia projektowo-konstrukcyjne (bierne)

Przedziały maszynowe kategorii A

Obecnie wyróżnia się trzy grupy sposobów (rys. 2.2), według których prowadzone są działania mające na celu zapobieganie rozprzestrzenianiu się pożarów [145, 152]. Polegają one na zastosowaniu zabezpieczeń projektowo-konstrukcyjnych (zwanых także biernymi), zabezpieczeń eksploatacyjnych (zwanых także czynnymi lub aktywnymi) i wdrożeniu zarządzania bezpieczeństwem.

Zastosowanie sposobów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych oraz zarządzanie bezpieczeństwem na statku regulowane są wymaganiami konwencji SOLAS. Każda z metod obejmuje ponadto szczegółowe wymagania zawarte odpowiednio w przepisach kodeksów FTP [117], FSS [153] oraz ISM [73], a także w konwencji STCW [74] oraz innych [154].

Stosowanie zabezpieczeń konstrukcyjnych, a w szczególności podział statku na strefy pożarowe, za pomocą poziomych i pionowych przegród konstrukcyjnych i cieplnych, jest podstawową metodą zabezpieczenia przeciwpożarowego statku.



Rys. 2.2.2. Sposoby zapobiegania rozprzestrzenianiu się pożaru na statku

Zabezpieczenia konstrukcyjne mają na celu zminimalizowanie możliwości powstania, a przede wszystkim rozprzestrzeniania się pożaru. W zależności od typu statku dzieli się kadłub i nadbudówkę statku przegrodami pożarowymi klasy A na główne strefy pożarowe, których rola polega na utrzymaniu pożaru w rejonie jego powstania, co ma zasadnicze znaczenie zarówno ze względu na akcję gaśniczą (którą dużo łatwiej się prowadzi, jeżeli się przyjmie, że pożar nie przedostanie się do innych pomieszczeń w założonym czasie), jak i w odniesieniu do szacowania potencjalnych strat, które pożar może spowodować.

Jednym z celów projektowania układu przestrzennego poszczególnych przedziałów na statku jest ograniczenie możliwości rozprzestrzeniania się pożaru między strefami. Główne strefy pożarowe oddzielane są przegrodami o właściwościach zależnych od spodziewanego zagrożenia, wynikającego z przeznaczenia przyległych pomieszczeń.

W przegrodach mogą znajdować się otwory, przejścia instalacji i inne konstrukcje, które mogą wpływać na osłabienie właściwości ochronno-wytrzymałościowych.

Dlatego otwory w grodziach i pokładach powinny mieć zamknięcia i zabezpieczenia o odporności ogniowej równej co najmniej odporności przegrody [145, 155, 156].

Zgodnie z zaleceniami przepisów na statkach stosowane są przegrody pożarowe klasy A, B, C.

Siłownia okrętowa, zgodnie z wymaganiami przepisów przeciwpożarowych, wydzielona jest przegrodami pożarowymi w celu ograniczenia możliwości rozprzestrzeniania się pożaru. Za obszary o najwyższym stopniu ryzyka powstania pożaru w siłowni uważa się przedziały maszynowe kategorii A. Zgodnie z wymaganiami przepisów są one otoczone grodziami i pokładami stalowymi klasy A, o odporności ogniowej wymaganej dla przegród pożarowych, w zależności od kategorii sąsiadujących z nimi pomieszczeń. Szyb przedziału maszynowego kategorii A, wraz z jego szczytem i kominem, wykonany jest w postaci konstrukcji stalowej o wymaganej odporności ogniowej. Płyty podłogowe normalnie używanych przejść komunikacyjnych w przedziałach maszynowych kategorii A są wykonane ze stali. Materiały stosowane na podłogi, oszalowania ścian, sufitów lub pokładów w przedziałach maszynowych i w centralach manewrowo-kontrolnych są niepalne. Miejsca, w których możliwe jest wnikanie par ropopochodnych w strukturę materiałów izolacyjnych, są pokryte powłoką ochronną. Jeśli kotły opalane paliwem ciekłym są usytuowane w przedziale maszynowym na międzypokładzie i jeśli pomieszczenie kotła nie jest oddzielone szczelnymi przegrodami klasy A, to na międzypokładzie jest zamontowana szczelna zrębica stalowa otaczająca kocioł, o wysokości co najmniej 0,2 m [32].

Przykładowe rozwiązanie ognioodpornych przegród

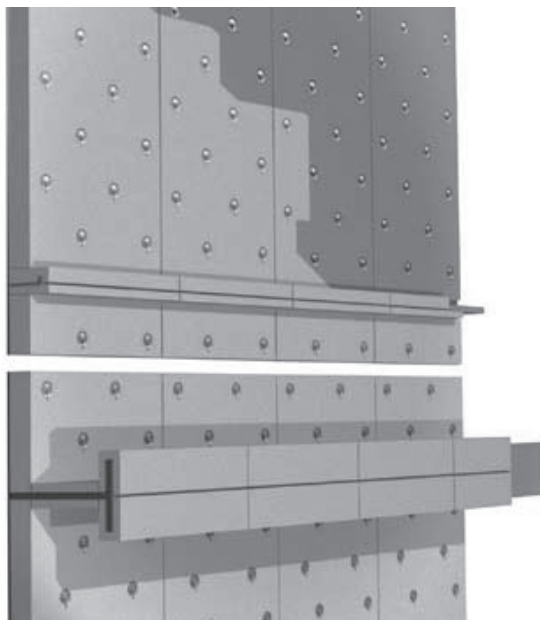
Obecnie oferowane na rynku ognioodporne przegrody wykonane są głównie ze stali lub z aluminium, z izolacją z wełny mineralnej.

Przykładowe rozwiązania izolacji przegród okrętowych przedstawiono na rys. 2.3. Jest to najczęściej stosowana wspólnie konstrukcja przegrody klasy A-60, z izolacją z wełny mineralnej o grubości 60 mm.

W pomieszczeniach, w których mogą znajdować się produkty ropopochodne, np. w siłowni okrętowej, pokrycia powierzchni izolacji wykonane są z materiałów nieprzepuszczających tych produktów i ich par. Izolacja przeciwpożarowa w takich pomieszczeniach pokryta jest blachą metalową (nieperforowaną) lub zalaminowaną matą z włókna szklanego, dokładnie uszczelnioną na połączeniach [88].

Obecnie trwają badania nad możliwością zastosowania przegród wykonanych z materiałów kompozytowych FRP (Fire Reinforce Polymer). Znajdują one zastosowanie w konstrukcji nadbudówek, w szczególności statków pasażerskich. Mają zarówno wiele wad, jak i wiele zalet. Pozwalają na redukcję masy przegród o około 60%, co umożliwia zwrot kosztów nakładów w krótkim czasie, zmniejszenie zużycia

paliwa, uzyskanie dodatkowej dostępnej przestrzeni na pokładzie, redukcję wagi wyższych kondygnacji nadbudówki, a tym samym lepszą stateczność jednostki. Lepsza stateczność oznacza mniej kolizji oraz wejść na mieliznę, co według zwolenników tego typu rozwiązań jest korzystne, bo właśnie tego rodzaju wypadki w statystykach wymieniane są na pierwszym i drugim miejscu, a więc przed pożarami.



Rys. 2.3. Przegroda stalowa klasy A-60 Marine Fire Slab 100

Źródło: opracowano na podstawie pracy [158].

Kompozyty FRP są jednak materiałami palnymi, podczas spalania których wydzielają się znaczne ilości dymu. Przewiduje się stosowanie ich w układzie „sandwich” – FRP pomiędzy materiałami niepalnymi, jednakże rozwiązanie to nie gwarantuje bezpieczeństwa. Naruszenie takiej konstrukcji, np. poprzez poprowadzenie instalacji czy niedostatecznie dokładne jej odtworzenie po pracach remontowych, jest łatwe, co powoduje, iż ryzyko zapalenia znacznie wzrasta [159].

Obecnie uregulowania prawne, dotyczące zastosowania kompozytów FRP, uwzględniają taką możliwość jedynie na małych jednostkach szybkich. Od połowy 2018 roku prowadzone są dyskusje, których celem jest stworzenie przepisów odnoszących się do dużych jednostek, w szczególności do statków pasażerskich.

Nowe możliwości konstrukcji przegród pożarowych stwarzają także ich izolacje. W rozwiązaniach innowacyjnych wykorzystuje się izolacje o mniejszej

grubości i masie, ale o porównywalnych z konwencjonalnymi parametrach odporności ogniowej.

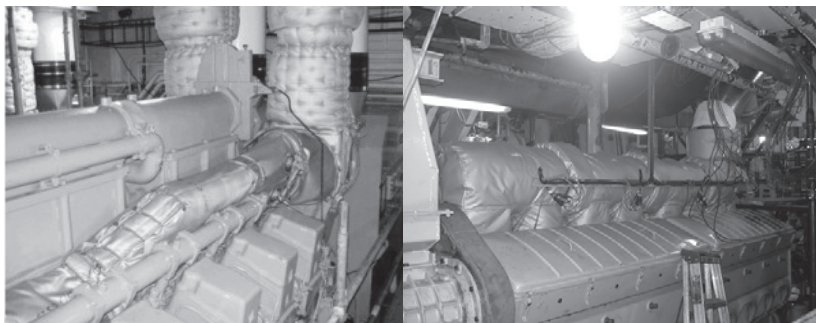
Oprócz konwencjonalnych izolacji z wełny mineralnej występują izolacje z płyt/koców ceramicznych [160]. Producenci podają, iż są one lżejsze od izolacji ze standardowej wełny mineralnej nawet o 25–50%. Porównywalne właściwości izolacyjne uzyskiwane są przy mniejszych grubościach izolacji. Korzystniejsze są także właściwości fizyczne produktu. Przykładowo przewodność cieplna w temperaturze 10°C wełny mineralnej wynosi 0,035 W/mK, a wyrobu typu koc FireMaster Marine Plus Blanket (48 kg/m³) – 0,0321 W/mK [160].

Innowacyjnym rozwiązaniem jest także mikroporowaty arkusz termoizolacyjny w postaci płyty izolacyjnej w osłonie szklanej, szyty z wykorzystaniem specjalnej nici, który ma bardzo dobre właściwości termiczne i mechaniczne; jest lekki i elastyczny. Niezbędna do skutecznej izolacji grubość tego rodzaju izolacji jest nawet czterokrotnie mniejsza niż w rozwiązaniach standardowych [161]. Przewodność cieplna jest w tym wypadku znacznie niższa niż w innych rozwiązaniach obecnych na rynku. Grubość wynosi tylko 10 mm, przy 2,4 kg/m², co zapewnia izolację spełniającą warunki przegrody A-60 [161].

Rozwiązanie to jest dobrym rozwiązaniem alternatywnym dla rejonów, w których priorytetem jest ograniczenie masy oraz powierzchni. Stosowane jest przede wszystkim na jachtach z materiałów GRP, w celu spełnienia wymagania kodu LY3, a także na okrętach wojennych.

Problem właściwej izolacji na statku nie dotyczy jedynie przegród. Izolowane muszą być także przewody elektryczne, rurociągi, kanały wentylacyjne czy gorące powierzchnie silników i inne.

W rozwiązaniach konwencjonalnych izolacje silników wykonuje się z wełny mineralnej i pokryw z płyt metalowych. Innowacyjnym rozwiązaniem mogą być tzw. koce [162].



Rys. 2.4. Izolacja kolektorów i kanału spalin wylotowych

Źródło: [163].

Przykładowym rozwiązaniem jest produkt FireMaster Marine Plus Blanket. Jest to izolacja niepalna, zgodnie z wymaganiami kodeksu FTP. Dostępne grubości izolacji mieszczą się w przedziale 25–60 mm, a przewodność cieplna w temperaturze 100°C wynosi 0,0426 W/mK, zaś w temperaturze 200°C osiąga wartość 0,0561 W/mK. Przykładowe rozwiązania izolacji przedstawiono na rys. 2.4.

2.2.2. Zabezpieczenia eksploatacyjne (czynne)

Zwiększenie zakresu bezpieczeństwa siłowni zależne jest od możliwości jak najszybszego ugaszenia pożaru. Przenośny sprzęt gaśniczy zazwyczaj nie jest wystarczający w pożarach siłowni. Lokalne, uruchamiane automatycznie, instalacje gaśnicze, takie jak instalacja na mgłę wodną, w wielu scenariuszach okazują się efektywnym rozwiązaniem. Często zachodzi jednak konieczność użycia objętościowej instalacji gaśniczej. W siłowni jest to zazwyczaj instalacja na CO₂ lub tzw. zamienniki halonów. Instalacje gaśnicze na statkach projektowane są zgodnie z wymaganiami konwencji SOLAS [2] oraz kodeksu FSS [154], a także przepisów towarzystw klasyfikacyjnych [88, 44].

W celu zapewnienia akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego w grupie zabezpieczeń eksploatacyjnych na statkach znajdują się gaśnice wykonane na podstawie wytycznych IMO oraz stałe instalacje gaśnicze.

Ze względu na sposób gaszenia stałe instalacje gaśnicze, stosowane w przestrzeniach maszynowych, można podzielić na objętościowe (gazy, zamienniki halonów, piana lekka), lokalne (woda, mgła wodna, piana ciężka/ lekka) oraz powierzchniowe (woda). Mogą być one uruchamiane ręcznie lub automatycznie.

Obszarem działania stałych instalacji gaśniczych są pomieszczenia i szyby pomieszczeń zdefiniowanych w przepisach SOLAS jako pomieszczenia maszynowe kategorii A, w których znajdują się kotły opalane paliwem olejowym lub zespoły paliwa olejowego; pomieszczenia maszynowe kategorii A, w których znajdują się silniki spalinowe oraz silniki o innym przeznaczeniu, jeśli ich moc użyteczna przekracza 375 kW, a także bezwachtowe pomieszczenia maszynowe, w których znajdują się turbiny parowe lub osłonięte maszyny parowe o łącznej mocy nie mniejszej niż 375 kW.

Ponadto armator jest zobowiązany wyposażyć pomieszczenia siłowni większe niż 500 m³ (na statkach pasażerskich o pojemności brutto ≥ 500 i statkach towarowych o pojemności brutto ≥ 2000) w stałe lokalne instalacje gaśnicze z wodnym czynnikiem gaśniczym lub równoważnym. Są to systemy, które są stosowane do gaszenia najbardziej pożarowo niebezpiecznych rejonów na statku, bez konieczności ewa-

kuacji załogi z pomieszczenia, wyłączania silnika czy uszczelniania pomieszczenia. Ten typ instalacji może działać automatycznie [88].

Zgodnie z wymaganiami kodeksu FSS stosowane są także stałe instalacje wykrywcze i alarmowania pożaru, automatyczne instalacje tryskaczowe z funkcją wykrywania pożaru i z funkcją alarmowania, systemy wykrywania dymu metodą próbkowania. W kodeksie tym zawarto także wymagania dotyczące systemu oświetlenia dolnego oraz układu dróg ewakuacji [154].

Stosowane obecnie w siłowni okrętowej instalacje gaśnicze przedstawiono w tab. 2.1.

Tabela 2.1. Instalacje gaśnicze stosowane w siłowni okrętowej

Instalacja	Zastosowanie w siłowni
Zraszająca wodna	nad studzienkami żezowymi, zbiornikami paliwa oraz innymi powierzchniami, na które może rozlać się paliwo, nad miejscami, w których może wystąpić szczególne zagrożenie pożarowe
Lokalna instalacja zraszająca wodna	do gaszenia zagrożonych powstaniem pożaru powierzchni głównych i pomocniczych silników spalinowych; kotłów, szczególnie w rejonie palników; powierzchni spalarek śmieci; wirówek podgrzanego paliwa; urządzeń opalanych paliwem płynnym, np. kotłów oleju grzewczego
Tryskaczowa	w całej siłowni lub w stałych lokalnych instalacjach gaśniczych, np. nad niebezpiecznymi pożarowo elementami spalarek śmieci
Mgła wodna	do gaszenia objętościowego i lokalnego; umieszczane np. nad silnikiem głównym, nad palnikiem kotła, w pomieszczeniach z wirówkami
Kurtyny wodne	zamiast przegrody klasy A-60, do jednostronnego zraszania ścianki stalowej klasy A-0 lub drzwi oszklonych w ścianie klasy B
Piana ciężka	nad urządzeniami i miejscami szczególnie narażonymi na powstanie pożaru w wyniku rozlanego paliwa (pożar kałuży paliwa)
Piana lekka	do gaszenia objętościowego całego pomieszczenia
Dwutlenek węgla	do gaszenia znacznej części lub całej siłowni
Gazy obojętne	do gaszenia objętościowego
Zamienniki halonów, np. Novec™ 1230	do gaszenia objętościowego
Inne, np. aerozole, proszki gaśnicze	lokalnie
Stale lokalne instalacje zraszające, z wodnym czynnikiem gaśniczym lub instalacje równoważne	dodatkowo na statkach towarowych o pojemności brutto 2000 lub większej, w przedziałach maszynowych kategorii A, o objętości większej niż 500 m ³

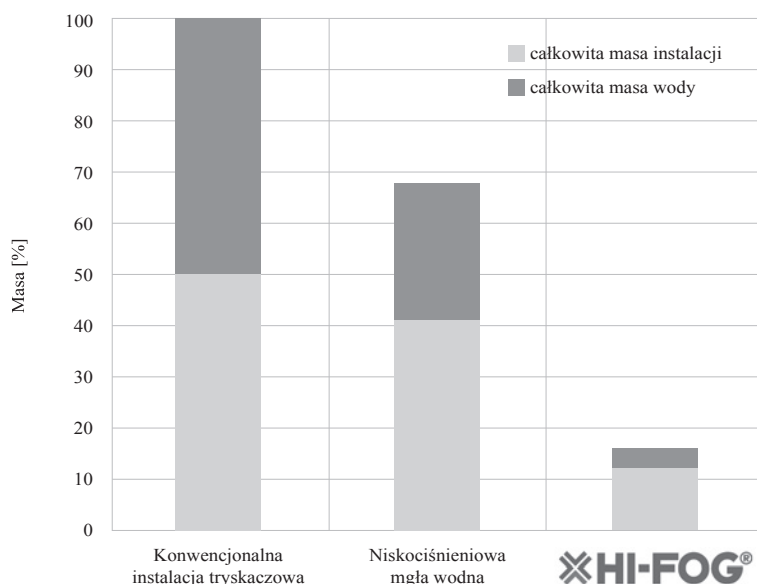
Instalacją gaśniczą, którą cechuje duża efektywność gaszenia, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa dla człowieka i środowiska naturalnego, jest instalacja na mgłę wodną oraz na zamiennik halonów Novec™ 1230.

Instalacja na mgłę wodną (HI-FOG) jest instalacją zarówno do gaszenia lokalnego, jak i objętościowego. Jej efektywność jest determinowana rozdrobnieniem

kropli, które im są mniejsze, tym efektywniej odbierają ciepło. Podobnie jak w przypadku innych instalacji wodnych, użycie mgły wodnej nie wymaga ewakuacji ludzi ze strefy działania. Instalacje mgłowe od innych instalacji wodnych odróżnia możliwość zastosowania ich jako instalacji objętościowych. Dysze mgłowe w krótkim czasie i z dużą efektywnością potrafią ugasić pożar, wykorzystując do 90% mniej wody niż instalacje wodno-hydrantowe. Instalacje te są bezpieczne dla ludzi i środowiska naturalnego [164–169].

Na nowo budowanych statkach dysze mgłowe umieszcza się także nad silnikiem głównym, nad palnikiem kotła, w pomieszczeniach wirówek oraz w innych miejscach [165].

Instalację na mgłę wodną cechują nie tylko lepsza efektywność gaśnicza i bezpieczeństwo stosowania, ale także dużo mniejsza masa (zarówno potrzebnej wody, jak i elementów instalacji). Na rys. 2.5 przedstawiono porównanie masy instalacji i wody przewidzianej do gaszenia [166, 167].



Rys. 2.5. Masa instalacji HI-FOG w porównaniu z innymi rozwiązaniami

Źródło: opracowano na podstawie publikacji [166].

Innowacyjnym środkiem gaśniczym jest bezpieczny dla środowiska Novec™ 1230. Jego potencjał niszczenia warstwy ozonowej równy jest 0, potencjał tworzenia efektu cieplarnianego wynosi około 1 jednostki, a czas życia w atmosferze – nie więcej niż 3–5 dni. Novec™ 1230, pochłaniając ciepło, już przy niskich stężeniach, mając

zdolność szybkiego rozprzestrzeniania się (wymagane stężenie projektowe osiągnięte jest w ciągu 10 sekund w całej chronionej przestrzeni), pozwala na skuteczną walkę z ogniem. Novec™ 1230 nie przewodzi prądu, nie pozostawia osadów po użyciu; cechuje go zerowy stopień szkodliwości dla chronionych pomieszczeń i ich wyposażenia oraz wysoki margines bezpieczeństwa dla ludzi [170].

W przedziałach maszynowych kategorii A oraz, o ile jest to niezbędne, w innych przedziałach maszynowych powinny znajdować się urządzenia zapewniające usuwanie dymu w przypadku powstania pożaru. Wymagane są także czujki wykrywcz. Stosowane w siłowni ich rodzaje przedstawiono w tab. 2.2.

Tabela 2.2. Czujki wykrywcz w siłowni

Rodzaj czujek	Zastosowanie
Czujki wykrywcz mgły olejowej	w miejscach potencjalnych przecieków paliwa/ oleju
Czujki wykrywcz dymu	w całej siłowni, również w CMK
Czujki płomieni	w pobliżu kotłów i spalarni, w których nieprawidłowo wykonywane czynności mogą powodować nagłe pojawienie się płomienia; w pobliżu urządzeń do obróbki paliwa

2.3. Podsumowanie

Większość obowiązujących obecnie przepisów dotyczących bezpieczeństwa pożarowego ma charakter preskrypcyjny. Projektant, konstruktor i eksploatacja powinni postępować zgodnie z przepisami. Coraz częściej jednak projektowanie opiera się na analizach ryzyka i konieczności udowodnienia przez projektanta, że rozwiązanie jest bezpieczne i że spełnia wymagania konwencji SOLAS [2].

Jeśli chodzi o zabezpieczenia konstrukcyjne, poszukiwane są zabezpieczenia spełniające wymagania przepisów dotyczących rozwiązań alternatywnych, a więc np. materiały i konstrukcje lżejsze i cieńsze od konwencjonalnych oraz łatwiejsze w montażu. Trwają badania i testy konstrukcji o małej masie, wykonanych z materiałów palnych FRP w układach „sandwich”. Zastosowanie tego typu przegród do konstrukcji nadbudówki pozwala na znaczne zmniejszenie jej masy, co ma istotne znaczenie na dużych promach pasażerskich, a także zapewnia lepszą stateczność jednostki.

Woda jest podstawowym środkiem gaśniczym, a jej wykorzystanie jest coraz lepiej dostosowane do chronionych obiektów ryzyka, np. gdy jest ona wysokorozdrobniona w instalacjach HI-FOG, efektywnie gasi pożary, nie powodując strat materialnych.

W instalacjach gaśniczych wykorzystuje się środki gaśnicze, które są nie tylko efektywne, ale również bezpieczne dla środowiska i człowieka, także podczas gaszenia. Obecnie środkiem takim jest m.in. Novec™ 1230.

Instalacje gaśnicze dostarczane są w modułach, co znacznie przyspiesza ich instalację, a w trakcie eksploatacji usprawnia ich naprawę czy wymianę.

3. GENEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Większość wypadków i znacznych strat materialnych na statkach jest wynikiem pożarów. Sukcesywne zwiększanie bezpieczeństwa pożarowego umożliwia ograniczenie liczby zdarzeń. Podjęcie tego tematu wynikało z potwierdzonej statystycznie liczby zaistniałych pożarów, w tym pożarów siłowni – rejonu szczególnie zagrożonego i ważnego dla eksploatacji.

Ponieważ człowiek jest sprawcą ponad 80% wypadków, istnieje potrzeba ergonomicznego diagnozowania załóg i miejsc pracy w siłowni, prowadzonego w celu pozyskania danych opisujących czynniki powodujące przeciążenia fizyczne i psychiczne, wpływające na zdolność utrzymania bezpieczeństwa pożarowego w siłowni.

Brakuje w wyposażeniu załóg nowoczesnych środków technicznych do szybkiego i skutecznego wykrywania miejsc podwyższonego ryzyka powstania pożaru. Prowadzone podczas codziennej eksploatacji obserwacje, bądź ich brak, nie zapewniają odpowiednio wczesnego wykrycia nieprawidłowości, które mogą przyczynić się do powstania pożaru.

Do oceny bezpieczeństwa pożarowego w żegludze stosuje się zbyt mało modeli i symulatorów. Stwierdzono, że nie ma na rynku komercyjnych modeli komputerowych pożarów siłowni okrętowych, a prowadzone w tym zakresie próby modelowania opierają się głównie na programach mających zastosowanie w urbanistyce. Istnieje potrzeba innego szkolenia załóg, z wykorzystaniem trenażerów i symulatorów.

Celem głównym pracy jest identyfikacja, analiza i synteza przyczyn zaistnienia pożarów siłowni okrętowych na potrzeby poszukiwania sposobów zwiększania poziomu bezpieczeństwa pożarowego tych siłowni.

W związku z tym celem pracy jest ustalenie metod i sposobów szybkiej identyfikacji zagrożeń, narzędzi i metod wnioskowania oraz modelowania, a także wynikających z tego metod szkolenia załóg wpływających.

Celem użytkowym pracy jest identyfikacja i analiza obiektów ryzyka pożarowego z wykorzystaniem najnowszych technik termowizyjnej rejestracji, umożliwiającich otrzymanie natychmiastowych wiarygodnych wyników.

Holistyczne potraktowanie zagadnienia bezpieczeństwa pożarowego pozwoliło na wyodrębnienie celu częściowego pracy, którym jest zbadanie czynników ludzkich wpływających na powstanie pożaru, z jednoczesnym uwzględnieniem w analizie wpływu ergonomicznej organizacji pracy i ergonomicznego wyposażenia siłowni okrętowej. W celu ograniczenia liczby błędów ludzkich zaproponowano stworzenie modułów zarządzania bezpieczeństwem w siłowni okrętowej.

Konsekwencją uwzględnienia czynników technicznych w ocenie bezpieczeństwa pożarowego siłowi była ich analiza oraz modelowanie pożaru.

W trakcie modelowania pożaru z wykorzystaniem środowisk Pyrosim i SmokeView określono ich przydatność dla okrętownictwa.

Celem pracy jest także stworzenie narzędzi i metod opisu scenariuszy pożarowych na potrzeby określenia ryzyka powstania pożaru oraz pozyskania danych do jego modelowania.

Zakres pracy obejmuje badania obiektów podwyższonego ryzyka w siłowni, podczas rejsu morskiego, a także przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu biernego – pożaru w siłowni okrętowej na wybranej jednostce. Symulacja pożaru prowadzona jest z wykorzystaniem środowisk Pyrosim i SmokeView. Uznano, że przeprowadzenie symulacji na jednej wybranej jednostce będzie reprezentatywne.

Otrzymane wyniki badań i symulacji skojarzono i wykorzystano w celu zwiększenia bezpieczeństwa pożarowego siłowni.

Tematyka monografii obejmuje siłownię motorową statków morskich towarowych do przewozu ładunków suchych, ze standardowym wyposażeniem przeciwpożarowym.

4. IDENTYFIKACJA OBIEKTÓW ZAGROŻENIA POŻAROWEGO W SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

4.1. Metody badawcze stosowane w ocenie pożarów

Gorące powierzchnie w siłowni okrętowej są obiektami ryzyka, które najczęściej przyczyniają się do powstania pożaru. W celu weryfikacji potencjalnych źródeł zapłonu oraz przetestowania metody szybkiego wykrywania potencjalnych obiektów ryzyka przeprowadzono pomiary temperatury wybranych powierzchni. Listę punktów pomiarowych przygotowano na podstawie danych statystycznych scenariuszy zaistniałych pożarów, opracowywanych przez towarzystwa klasyfikacyjne, oraz na podstawie doświadczenia załóg zatrudnionych na statkach polskiego armatora.

Pomiary przeprowadzono podczas rejsu morskiego w sprawnej siłowni. Zastosowano metodę bezdotykową, z wykorzystaniem termografii oraz uzupełniającą przeprowadzono pomiary konwencjonalnym zdalnym termometrem laserowym.

Obecnie wykorzystanie termografii rekomendowane jest przez towarzystwa klasyfikacyjne jako efektywny, prosty i szybki sposób na wczesne wykrycie nieprawidłowości pracy urządzeń. Termografia nie jest jednak wykorzystywana przez załogi. Również inspektorzy klasyfikatorów PSC nie posługują się nią na co dzień, chociaż na wybranych łodziach motorowych można spotkać w siłowni system ciągłego nadzoru za pomocą kamer termowizyjnych [171].

Termografia wykorzystywana jest w serwisowaniu maszyn i urządzeń elektrycznych. Została szczegółowo opisana przez Meola i Carlomagno [172]. Pozwala na identyfikację w paśmie podczerwieni elementów urządzeń, których temperatura jest wyższa od temperatury akceptowalnej.

Należy jednak mieć na uwadze to, że termowizja pozwala na „widzenie” nie tego, co jest ciepłe i gorące, ale tego, co emituje lub odbija promieniowanie podczerwone. Należy więc zwracać uwagę na błędy, które mogą się pojawić w pomiarach materiałów o nietypowej, np. niskiej, emisyjności. Mimo że wykorzystywane do analizy pomiarów termograficznych oprogramowania, np. oprogramowanie FLIR Tools, posiadają funkcję ustawienia szacowanej emisyjności oglądanych obiektów, trzeba uwzględnić to, iż pomiar temperatury może okazać się jedynie dobrym szacunkiem. Błędy pomiarowe mogą pojawiać się także w odniesieniu do cienkich barier materiałów przepuszczających podczerwień [173].

Metoda ta ma jednak tę zaletę, że pomiar odbywa się bezkontaktowym urządzeniem kontrolno-pomiarowym, które może wyświetlać i przechowywać zmierzone wartości temperatury, jak również wizualne dowody pomiarów. Oszczędność czasu oraz spełnienie wymagania prowadzenia kontroli w szybkim tempie są zaletami, które dla żeglugi są bardzo istotne.

Statki towarowe są bardzo dobrymi obiektami do inspekcji termograficznych. Mają bardzo duże siłownie okrętowe, w których jest wiele trudno dostępnych miejsc, występują rozległe instalacje elektryczne, rozbudowane systemy elektroniczne, które trudno jest badać wizualnie czy wykonywać pomiary zdalnym termometrem laserowym [172]. Ponadto w tych właśnie rejonach względy bezpieczeństwa pożarowego, zapobieganie pożarom są niezwykle istotne. Wykorzystując termografię na podczerwień, łatwo można mierzyć temperaturę, 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 jednak zdalne termometry laserowe.

Zastosowanie kamer termowizyjnych na podczerwień daje większe możliwości i jest bezpieczniejsze. Dla ułatwienia wykrycia zagrożenia na statku, opierając się na wymaganiach przepisów, w systemach do nadzorowanie pracy siłowni okrętowych zaprogramowane są kryteria, do których podczas pracy automatycznie odwołują się urządzenia: kryterium 0, komunikat: OK (zmierzona temperatura $< 210,0^{\circ}\text{C}$); kryterium 1, komunikat: do monitorowania (w zakresie wartości temperatury $210,0^{\circ}\text{C} < 220,0^{\circ}\text{C}$); kryterium 2, komunikat: niedopuszczalne odchylenie (zmierzona temperatura $> 220,0^{\circ}\text{C}$) [65, 173].

4.2. Narzędzia pomiarowe stosowane w badaniach

Do inspekcji siłowni proponowane jest wykorzystanie kamery FLIR AX8. Urządzenie to jest małe, łatwe do użycia w ciasnej siłowni okrętowej. Wbudowana pamięć pozwala przechowywać zdjęcia w formacie jpg. Urządzenie ma wbudowany alarm dźwiękowy i sygnalizuje kolorem przekroczenie założonego kryterium temperatury [174]. Jest przystosowane do współpracy z systemami obrazującymi zagrożenia na monitorach w sterówce łodzi motorowych i na nich jest głównie używane.

Kamera AX8 wyposażona jest w obrazowanie MSX, firmy FLIR, które łączy zdjęcia z kamer rejestrujących w paśmie światła widzialnego i termowizyjnych, przez co są one łatwiejsze do interpretacji i bardziej zrozumiałe dla użytkownika. Ponadto

urządzenie może być zintegrowane z wyświetlaczami wielofunkcyjnymi Raymarine LightHouse II™ MFDs [174].

Badania w wybranej siłowni prowadzono z wykorzystaniem smartfonu CAT S60 z wbudowaną kamerą termowizyjną FLIR Lepton drugiej generacji [64].

Badanie pilotażowe z wykorzystania kamery na podczerwień, wbudowanej do telefonu, miało na celu przede wszystkim ocenę jej przydatności do diagnozowania obiektów ryzyka pożarowego w siłowni.

Kryterium nadrzędnym była możliwość zdiagnozowania w krótkim czasie dużych, a także trudno dostępnych miejsc. Dodatkową zaletą urządzenia jest jego dostępność i korzystna cena, a także intuicyjna obsługa. Ponadto wykonane pomiary można raportować z wykorzystaniem oprogramowania FLIR Tools, które stwarza wiele możliwości przetwarzania danych, w tym odczytania wartości temperatury w dowolnym punkcie zrobionego zdjęcia. Możliwy jest także import danych do arkusza kalkulacyjnego w celu ich dalszej obróbki.

Jedynym ograniczeniem podczas prowadzonych badań był fakt, iż zakres pomiarowy obejmował wartości do 150°C. W przypadku, gdy zanotowano taką lub większą wartość pomiaru, w tym samym punkcie, dla celów poznawczych, pomiar powtarzany był z wykorzystaniem termometru laserowego Sentry ST643, którego zakres pomiarowy mieścił się w granicach od -32°C do 760°C, a błąd pomiarowy deklarowany przez producenta wynosił $\pm 2^\circ\text{C}$. Pomiary wykonywane tym termometrem w dalszej części pracy nazywane są pomiarami ZTL (zdalnym termometrem laserowym).

4.3. Mapy termiczne wybranych obiektów ryzyka pożarowego

4.3.1. Identyfikacja gorących powierzchni silnika głównego

Mapy termiczne wybranych obiektów ryzyka wykonano na potrzeby identyfikacji potencjalnych obiektów ryzyka pożarowego w wybranej siłowni okrętowej.

Do pomiarów temperatury powierzchni wytypowano (w wyniku analiz danych statystycznych, danych udostępnianych przez ekspertów, klasyfikatorów, inspektorów i członków załóg) potencjalne miejsca powstania pożarów, takie jak: kadłub silnika głównego, silnik pomocniczy zespołu prądotwórczego, opalany kocioł parowy pomocniczy oraz kocioł parowy utylizacyjny. Pomiary wykonano w wybranych punktach podczas pracy urządzeń, przy obciążeniach przewidzianych dla stanu eksploatacji: podróż morska. Badania prowadzono na statku towarowym o wymiarach:

długość $L = 149,47$ m, szerokość $B = 22,99$ m, nośność = 17 059 DWT. Zrealizowano je w grudniu 2016 roku oraz w styczniu 2017 roku.

Program badań przewidywał badania wstępne diagnozujące rozkłady wartości temperatury na powierzchniach obiektów o zwiększonym ryzyku oraz badania właściwe przeprowadzone w wytypowanych punktach pomiarowych zlokalizowanych na kadłubie silnika głównego, silniku pomocniczym zespołu prądotwórczego, opalanym kotle parowym pomocniczym oraz kotle parowym utylizacyjnym. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem kamery termowizyjnej oraz termometru laserowego. W każdym ustalonym punkcie pomiarowym wykonano pomiar trzykrotnie. Serię badań w siłowni powtórzono trzy razy. Program badań oraz szczegółowe wyniki przedstawiono w publikacji [68].

Obiektem ryzyka pożarowego, wytypowanym do identyfikacji gorących powierzchni w siłowni, był silnik główny (o średnicy cylindra wynoszącej 460 mm, skoku tłoka wynoszącym 1932 mm, mocy równej 4719 kW, przy prędkości obrotowej wynoszącej 110 obr/min). Parametry pracy silnika głównego zamieszczono w tab. 4.1.

Tabela 4.1. Wybrane parametry pracy silnika głównego podczas pomiarów temperatury

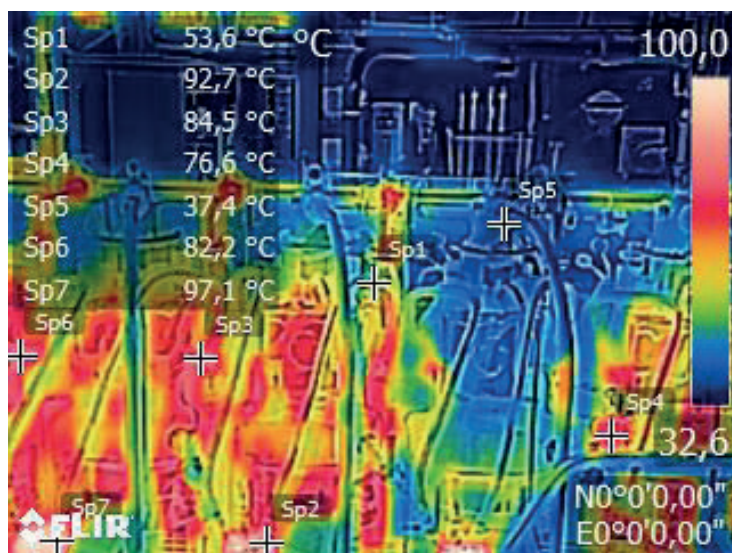
Parametr	Wartość	Jednostka
Prędkość obrotowa	101,1	obr/min
Temperatura otoczenia	38,9	°C
Prędkość obrotów zespołu wirnikowego turbosprężarki	16 400	obr/min
Ciśnienie doładowania	0,143	MPa
Temperatura spalin na wlocie do turbiny	470	°C
Temperatura gazów wydechowych na wylocie z turbiny	327	°C
Temperatura gazów wydechowych mierzona na cylindrach: 1, 2, 3, 4, 5	400, 395, 403, 411, 397	°C

Celem badań wstępnych silnika głównego, przeprowadzonych za pomocą kamery termowizyjnej, było rozpoznanie obszarów o podwyższonej temperaturze, będących potencjalnymi miejscami ryzyka wystąpienia pożaru. Na rys. 4.1 przedstawiono widok silnika głównego odwzorowany za pomocą kamery FLIR. Pomiar pozwolił na wykrycie obszarów o podwyższonej temperaturze, zaznaczonych kolorami żółtym, pomarańczowym i czerwonym.



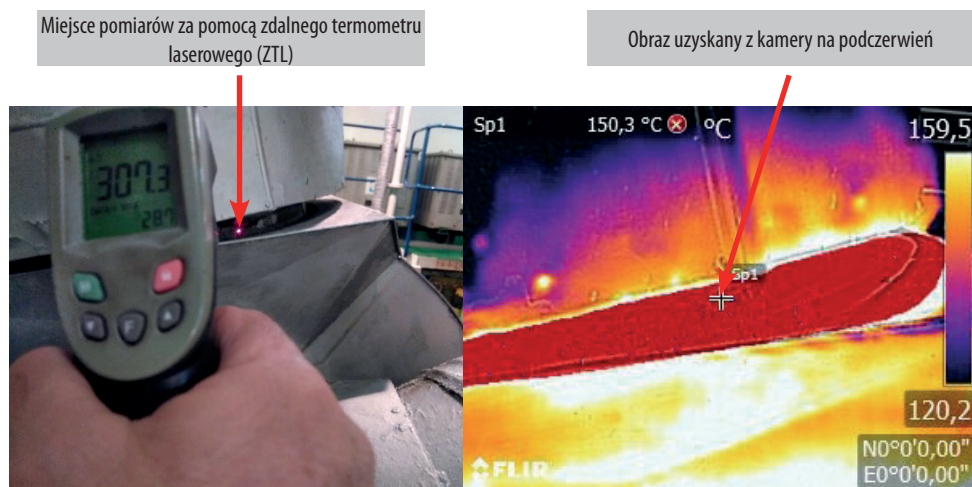
Rys. 4.1. Silnik główny. Temperatura przewodu paliwowego (zrzut z ekranu z programu FLIR Tools)

Przedstawiony obraz (rys. 4.1) uzyskano za pomocą oprogramowania FLIR Tools. Zidentyfikowano na nim punkty o najwyższej temperaturze. Największe wartości, zmierzone za pomocą kamery termowizyjnej, odnotowano na pompach wtryskowych paliwowych w punktach pomiarowych Sp2 (92,7°C) i Sp7 (97,1°C) – rys. 4.2.



Rys. 4.2. Silnik główny; zdjęcie (rys. 4.1) z kamery termowizyjnej opracowane z wykorzystaniem oprogramowania FLIR Tools (zrzut z ekranu)

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych za pomocą kamery FLIR odnotowano wartość ponad 150°C na elementach układu wylotu spalin z silnika głównego (rys. 4.3). Było to m.in. nieizolowane połączenie kołnierzowe na kolektorze spalin z turbosprężarki. W celu identyfikacji temperatury wykonano dokładne pomiary zdalnym termometrem laserowym (ZTL) – rys. 4.3.



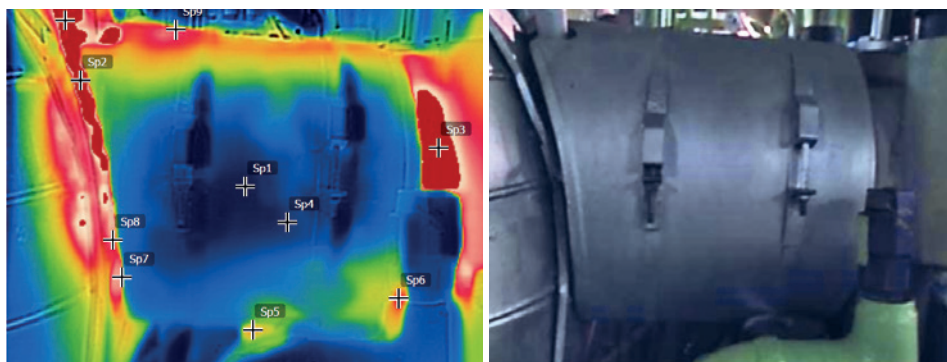
Rys. 4.3. Nieizolowane połączenie kołnierzowe kolektora spalin z turbosprężarką

W wyniku pomiarów zidentyfikowano obszar, w którym temperatura przekroczyła 300°C ($307,3^{\circ}\text{C}$) – rys. 4.3. Obszar zakwalifikowano jako szczególnie niebezpieczny.

Podobny tok postępowania i kryteria oceny przyjęto dla nieizolowanego odcinka kolektora spalin wylotowych, o najwyższej temperaturze w tym obszarze wynoszącej 247°C .

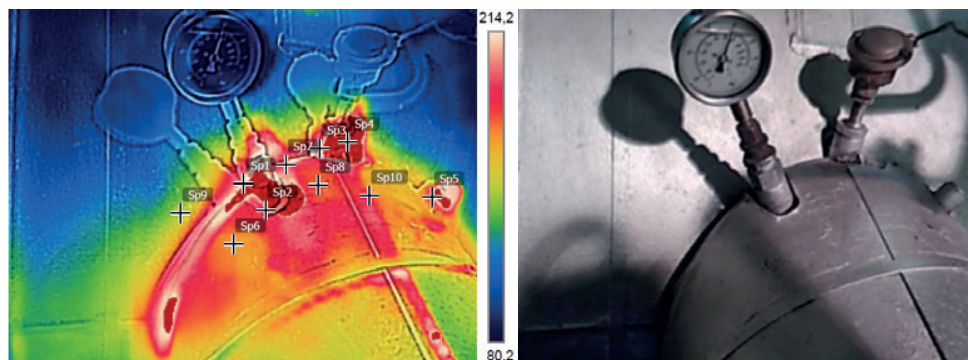
Oprogramowanie FLIR posiada funkcję identyfikacji temperatury w dowolnie wybranych miejscach fotografowanych obiektów. Pierwotnie na zdjęciu kolektora spalin uwidoczniła się tylko jedna wartość temperatury (Sp1, rys. 4.4). Za pomocą oprogramowania FLIR Tools, dla urządzeń pomiarowych firmy FLIR, odczytano wartości temperatury w dowolnie wybranych na zdjęciu 9 punktach – od Sp2 do Sp10 (rys. 4.4). Oprogramowanie pozwoliło ponadto na opracowanie raportu, z którego fragment przedstawiono na rys. 4.4.

Pomiar na kolektorze spalin (rys. 4.4), wykonany z wykorzystaniem kamery termowizyjnej, wykazał, że najbardziej gorącymi miejscami są połączenia kolektorów – z temperaturą ok. 320°C . Uznano je za obiekty o znacznym zagrożeniu pożarowym.



Rys. 4.4. Fragment raportu wygenerowanego za pomocą oprogramowania FLIR Tools z pomiarów temperatury na kolektorze spalin (zrzut z ekranu); Sp1 – 64,2°C, Sp2 – 150,3°C, Sp3 – 150,3°C, Sp4 – 68,3°C, Sp5 – 127,1°C, Sp6 – 143,5°C, Sp7 – 130,0°C, Sp8 – 150,3°C, Sp9 – 150,3°C, Sp10 – 150,3°C

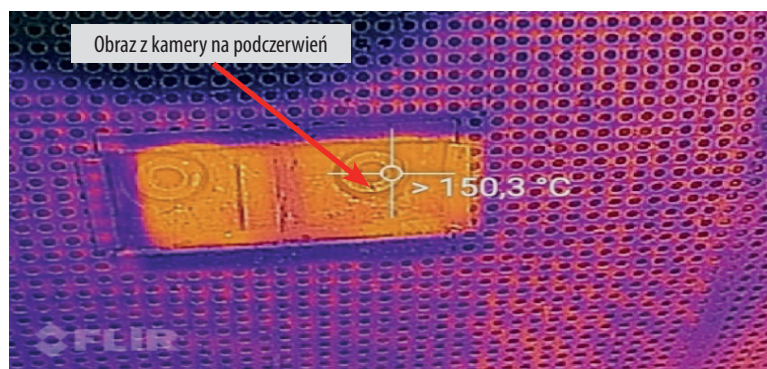
Miejszem pomiaru temperatury, której wartość przekroczyła 150°C, była także powierzchnia wokół mocowania do cylindra czujnika do pomiaru temperatury spalin (po prawej na rys. 4.5) oraz powierzchnia wokół mocowania wskaźnika przyrządu do odczytu (po lewej na rys. 4.5). Za pomocą oprogramowania FLIR Tools opracowano obraz termiczny obiektu (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Obraz termiczny wygenerowany za pomocą oprogramowania FLIR Tools, dotyczący pomiarów w miejscu mocowania czujnika do pomiaru temperatury spalin (po prawej) oraz w miejscu mocowania przyrządu do odczytu (zrzut z ekranu); Sp1 – 150,3°C, Sp2 – 150,3°C, Sp3 – 150,3°C, Sp4 – 150,3°C, Sp5 – 150,3°C, Sp6 – 141,6°C, Sp7 – 150,3°C, Sp8 – 146,7°C, Sp9 – 125,9°C, Sp10 – 146,4°C

Walidacja za pomocą ZTL wykazała, że temperatura w miejscu mocowania czujnika zdalnego wynosi 298°C, a w miejscu mocowania wskaźnika przyrządu do odczytu temperatury na wylocie cylindra – 295°C. Obiekty określono jako zagrażające bezpieczeństwu.

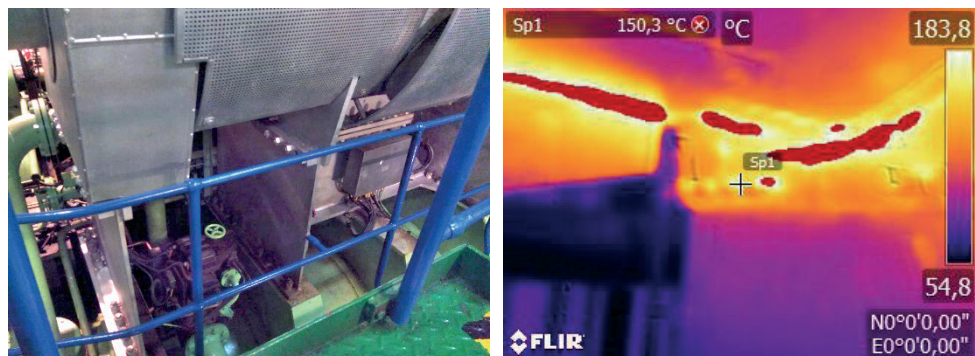
Temperaturę powyżej 220°C miały także nieizolowane zaślepione otwory inspekcyjne na kolektorze spalin silnika głównego (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Nieizolowane zaślepione otwory inspekcyjne na kolektorze spalin silnika głównego

Duże wartości temperatury, przekraczające 200°C , zanotowano na śrubach fundamentowych kolektora spalin (rys. 4.7).

Wyniki pomiarów pozostałych wytypowanych obiektów ryzyka przedstawiono w odrębnych publikacjach autorki. Opisano w nich szczegółowo wyniki poszczególnych pomiarów, prowadzonych analogicznie do pomiarów na silniku głównym, wykonanych kamerą termowizyjną oraz zdalnym pirometrem. Przedstawiono mapy termiczne i raporty wyników badań [68], które potwierdziły, że w siłowni okrętowej występują obiekty, których temperatura przekracza przyjęte granice i które uznane zostały jako zagrażające bezpieczeństwu pożarowemu.



Rys. 4.7. Śruby fundamentowe kolektora spalin silnika głównego

4.3.2. Wyniki badań obiektów zwiększonego ryzyka

Zgodnie z wymaganiami przepisów wszystkie powierzchnie w siłowni okrętowej, których temperatura przekracza 220°C , powinny być efektywnie izolowane. W badanej siłowni za pomocą kamery termowizyjnej wykazano, iż powierzchni, których temperatura znacznie przewyższa tę wartość, jest wiele. Zmierzone wartości temperatury wynosiły nawet ponad 300°C ; dotyczy to szczególnie niedoizolowanego/ nieizolowanego łączenia. Proponowana metoda zastosowania kamery termowizyjnej wbudowanej do smartfona okazała się skuteczna, pozwalając na szybką identyfikację obiektów ryzyka.

Metoda badania w warunkach okrętowych ma wiele zalet. Poza szybkością pomiaru i możliwością oceny sytuacji badanie możliwe jest w warunkach małego zadymienia oraz podczas tzw. *black out*, gdy w siłowni jest ciemno. Możliwość wykrycia podwyższonej temperatury w takich warunkach znacznie zwiększa szansę wykrycia awarii, a nawet źródła pożaru.

W badanej siłowni najwyższą temperaturę zanotowano na silniku zespołu prądotwórczego; wyniosła ona $486,3^{\circ}\text{C}$. Zestawienie powierzchni, na których wartości temperatury przekraczają 220°C , przedstawiono w tab. 4.2.

W wyniku prowadzonych badań na wybranej jednostce zidentyfikowano miejsca, w których – pomimo wysokiej temperatury – nie ma izolacji bądź w których jej stan nie jest wystarczająco dobry, by mógł zapewnić bezpieczeństwo w sytuacji kontaktu z paliwem.

Tabela 4.2. Zidentyfikowane obszary wybranej siłowni okrętowej sklasyfikowane jako szczególnie niebezpieczne

Obszar	Temperatura [°C]
Silnik główny	
Połączenie na kolektorze spalin	320
Nieizolowane połączenie kołnierzone na kolektorze spalin z turbosprężarką	307
Miejsce mocowania czujnika do pomiaru temperatury spalin	298
Miejsce mocowania wskaźnika przyrządu do odczytu temperatury spalin	295
Nieizolowane zaślepienie otwory inspekcyjne na zbiorczym kolektorze spalin	261
Nieizolowany odcinek kolektora spalin wydechowych	247
Śruby fundamentowe kolektora spalin	200
Kocioł parowy utylizacyjny	
Otwory inspekcyjne kanału spalinowego kotła	296
Spalinowy zespół prądotwórczy	
Miejsca mocowania przewodu spalinowego do turbosprężarki	486
Przewód spalin wylotowych za turbosprężarką	341
Obudowa turbosprężarki	321
Wieniec śrub na obudowie turbosprężarki	301

W wyniku hierarchizacji zlokalizowano miejsca potencjalnego uwolnienia się materiałów palnych w wybranej siłowni. Można dla nich określić scenariusze pożarów, ich potencjalne przebiegi i prawdopodobieństwo rozprzestrzeniania się w siłowni oraz poza nią, np. do nadbudówki.

4.4. Scenariusze pożarowe

Scenariusze pożarowe buduje się według przyjętego schematu, konsekwentnie realizując zadania danego etapu. W każdym przypadku scenariusz pożaru obejmuje:

- sytuację poprzedzającą pożar (miejsce oraz panujące w nim warunki środowiska okrętowego);
- źródła zapłonu (temperaturę i powierzchnie styku z potencjalnymi paliwami);
- właściwości paliw inicjujących (stan skupienia, powierzchnię wymiany ciepła, masę);
- paliwa podtrzymujące spalanie (bliskość paliw inicjujących, masę, możliwość dostarczania);
- potencjalny zasięg (poza pomieszczenie, poza rejon);
- lokalizację;
- istotne czynniki (wentylację, środowisko, porę dnia i inne);

- właściwe dane (dane statystyczne z przeszłości, prawdopodobieństwo uszkodzeń, częstotliwość zdarzeń, inne wskaźniki).

Scenariusz, zgodnie z wytycznymi [175], powinien również zawierać:

- dokładny opis miejsca powstania pożaru;
- dokładny opis rozwoju i rozprzestrzeniania się pożaru;
- wybór metody rozwiązania, np. modelowania pożaru;
- dobór danych wejściowych i założeń oraz uproszczeń dla rozpatrywanego modelu;
- algorytmy obliczeń;
- wyniki końcowe;
- interpretację wyników;
- wnioski końcowe.

Scenariusz pożarowy budowany jest w celu opisanie miejsca powstania pożaru i jego rozwoju oraz możliwości jego rozprzestrzeniania się. Scenariusz identyfikuje materiały palne z podziałem na paliwa inicjujące i wtórne. Określa ich właściwości, ilość i możliwość oddziaływania. Określa także przebieg pożaru poprzez wyznaczenie parametrów ilościowych charakteryzujących m.in. jego moc, dynamikę i zmiany tych parametrów w funkcji czasu.

Scenariusze pożarów w siłowni budowane są w celu rozpoznania potencjalnego zagrożenia poprzez opisanie różnych możliwych przebiegów pożaru, ale także w celu znalezienia efektywnej metody zapobiegania powstaniu i rozprzestrzenianiu się pożaru.

Budowa scenariuszy pożarowych polega na wyznaczeniu celów głównych i częściowych [175]. Za najważniejsze cele należy uznać:

- zminimalizowanie związanych z wystąpieniem pożaru wypadków, ochronę zdrowia i życia;
- zminimalizowanie związanych z wystąpieniem pożaru zniszczeń statku, jego konstrukcji i systemów zabezpieczeń;
- zminimalizowanie strat związanych z koniecznością przerwania eksploatacji statku (przestoju), z wystąpieniem strat założonego dochodu;
- zminimalizowanie strat wynikających z zanieczyszczenia środowiska naturalnego w wyniku wystąpienia pożaru.

Do celów częściowych należą:

- zapewnienie wystarczającego przeszkolenia i dbałość o zapewnienie bezpieczeństwa pasażerom i członkom załogi;
- zredukowanie kosztów poniesionych na zapewnienie adekwatnego do danych warunków poziomu bezpieczeństwa;
- innowacyjność projektu i jego „elastyczność”;
- możliwość weryfikacji rozwiązań alternatywnych.

Algorytm reprezentatywnego, najczęściej występującego w siłowni scenariusza pożaru i możliwych jego skutków przedstawiono na rys. 4.8. W zależności od warunków pożar może zostać ugaszony zaraz po wykryciu bądź może rozwijać się – aż do pożaru obejmującego całą siłownię czy rozprzestrzeniającego się do innych części statku. Wyznaczenie parametrów pożaru może odbywać się metodami obliczeniowymi, na podstawie wyników badań w warunkach rzeczywistej eksploatacji, badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych, danych z dochodzeń popożarowych lub z wykorzystaniem modeli pożaru i jego rozprzestrzeniania się, a także na podstawie wiedzy eksperckiej.

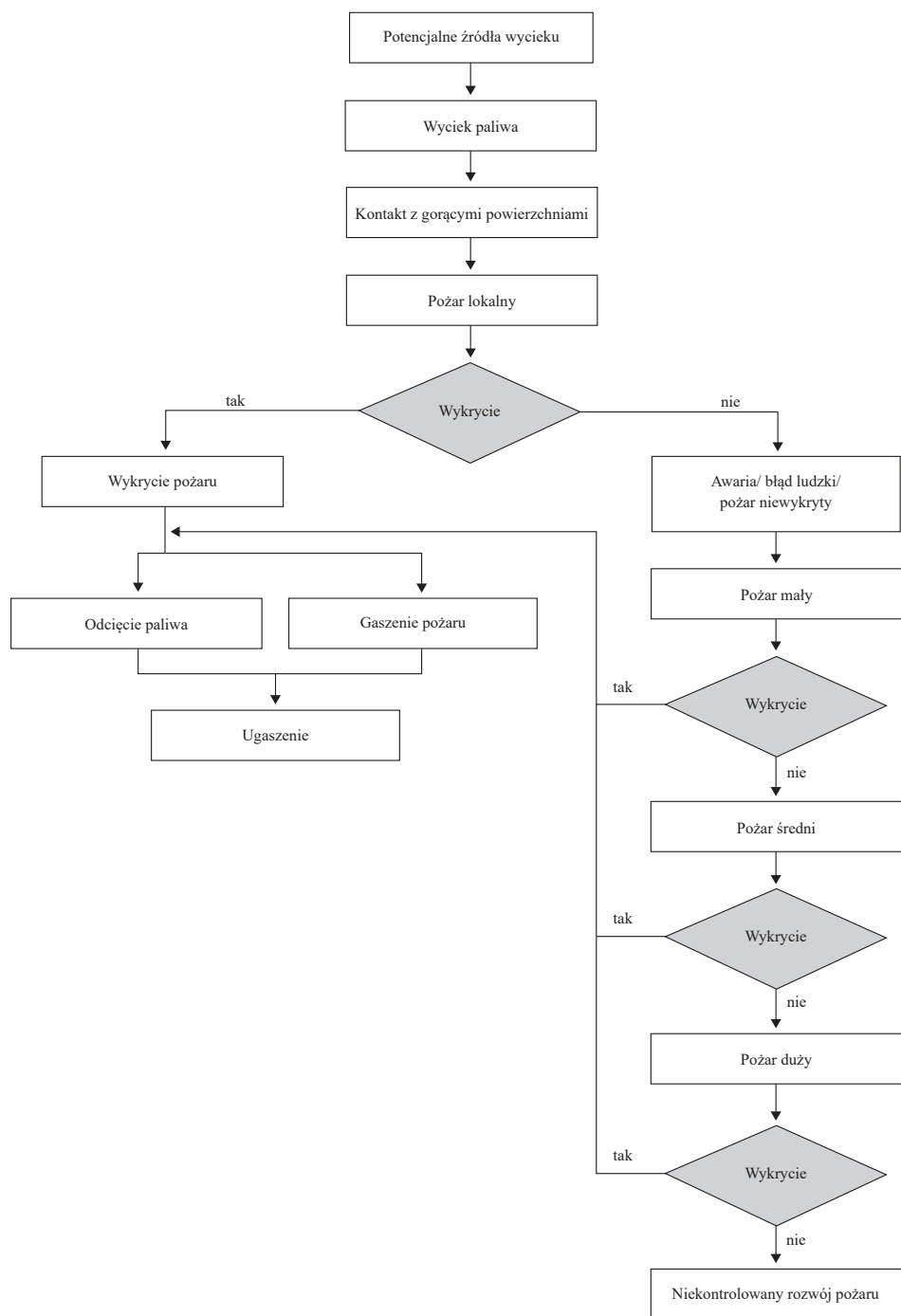
Poddawana regularnym przeglądom i remontom czysta siłownia jest miejscem, w którym prawdopodobieństwo powstania pożaru jest małe. Jednakże sytuacje awaryjne generują gwałtowny wzrost prawdopodobieństwa powstania pożaru. Przykładowy przewidywany scenariusz pożaru w sytuacji awaryjnej przedstawiono w publikacji [115]. Zagadnienia bezpieczeństwa pożarowego siłowni rozpatrywano w pracach [69, 116, 176, 177].

Badanym przez autorkę problemem, który wystąpił w siłowni, był przeciek w wyniku rozszczelnienia się pompy wtryskowej na cylindrze nr 1 silnika głównego, powstały wskutek pęknięcia pakietu uszczelniającego wewnątrz pompy, który przedstawiono na rys. 4.9. Pompa zamontowana była w sąsiedztwie kolektora wydechowego spalin oraz turbosprężarki obiektów zaliczonych do grupy o podwyższonym ryzyku powstania pożaru ze względu na możliwość zapłonu paliwa na ich powierzchniach.

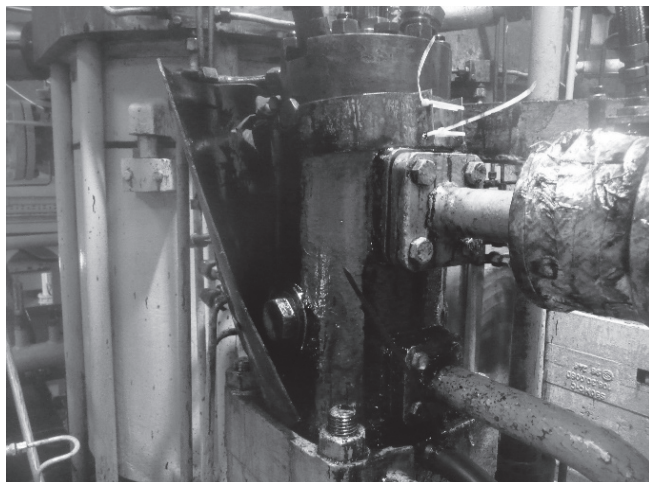
Pożar w siłowni może rozprzestrzeniać się w kierunku pionowym (ku górze) i w kierunku poziomym (wzdłuż pokładów). Kierunek ku górze rozprzestrzeniania pożaru to tory kablowe, platforma parowego kotła pomocniczego, opalanego paliwem, platforma powyżej silnika, na której znajduje się zbiornik rozchodowy paliwa oraz magazynowane są beczki z olejami zapasowymi, a także pomieszczenie silników zespołów prądotwórczych, drugi zbiornik rozchodowy paliwa, magazyn chemikaliów, pomieszczenie ze sprężarkami chłodni prowiantowej i ze sprężarkami klimatyzacji pomieszczeń, pomieszczenie ze spalarką okrętową ze zbiornikiem paliwa, również szyb maszynowy.

Na silnik kierowane jest powietrze z wentylatora nadmuchowego, w związku z czym do momentu wyłączenia wentylacji ewentualny pożar byłby podsycany przez strumień powietrza. Do momentu zamknięcia klap ogniowych i żaluzji powietrznych na kominie rozprzestrzenianiu się pożaru sprzyjałby również naturalny ciąg powietrza.

Kierunek wzdłuż pokładów rozprzestrzeniania się pożaru obejmować może kolektor wydechowy spalin, turbosprężarkę, beczki na podeście, CMK, zbiorniki paliwa, sąsiadujące ze sobą pomieszczenia, pomieszczenie wirówek paliwowych i olejowych, zbiorniki zapasowe paliwa ciężkiego, zbiorniki olejów smarnych, butle sprężonego powietrza i inne obiekty.



Rys. 4.8. Algorytm scenariusza powstania i rozwoju pożaru w siłowni okrętowej



Rys. 4.9. Miejsce przecieku paliwa na pompie wtryskowej. Układ nr 1 silnika głównego

Schemat dróg rozprzestrzeniania się pożaru we wszystkich siłowniach przedstawiono na rys. 4.10.

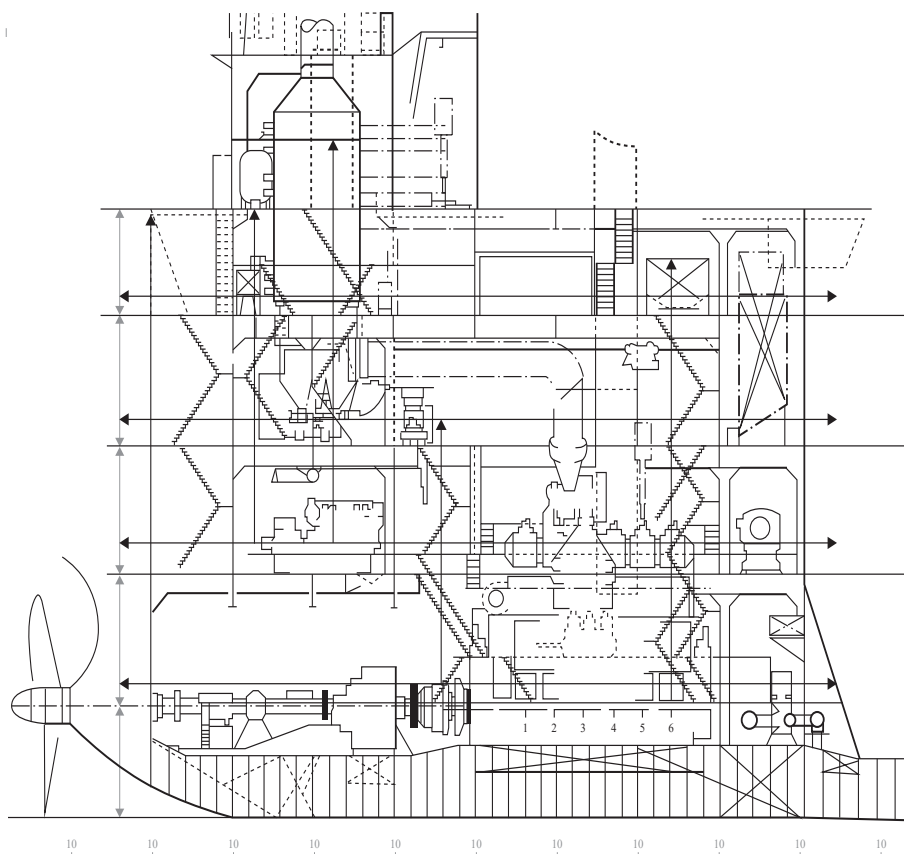
Zakłada się, że w siłowni w opisywanym przypadku zadziałałaby sygnalizacja pożaru – czujki dymu rozmieszczone na wszystkich platformach objętych pożarem i czujki płomienia umieszczone bezpośrednio nad silnikiem. Akcja gaśnicza prowadzona byłaby zgodnie z procedurami obowiązującymi na statku, określającymi zadania poszczególnych członków załogi. Pożar prawdopodobnie rozwijałby się gwałtownie, z szybkim rozprzestrzenianiem się ognia. Przenośne środki gaśnicze byłyby w tym przypadku niewystarczające. Konieczne byłoby uruchomienie stałej instalacji gaśniczej CO₂.

Powodzenie akcji gaśniczej w badanej siłowni zależałoby od oceny sytuacji, szybkości podejmowania decyzji, szczególnie dotyczącej uruchomienia stacji CO₂ i szybkości wykonania czynności prawie równoczesnych, takich jak wyłączenie wentylacji, zamknięcie klap wentylacyjnych, drzwi, klap ogniowych, kanałów wentylacyjnych i użycie stacji zdalnego zrywania zaworów zbiorników paliwa i oleju. Możliwy scenariusz pożaru przedstawiono na rys. 4.11.

Straty i szkody materialne w siłowni zależne są od scenariusza pożaru (rys. 4.11) i jego rozmiaru. W przypadku pożaru lokalnego zostałyby użyte CO₂.

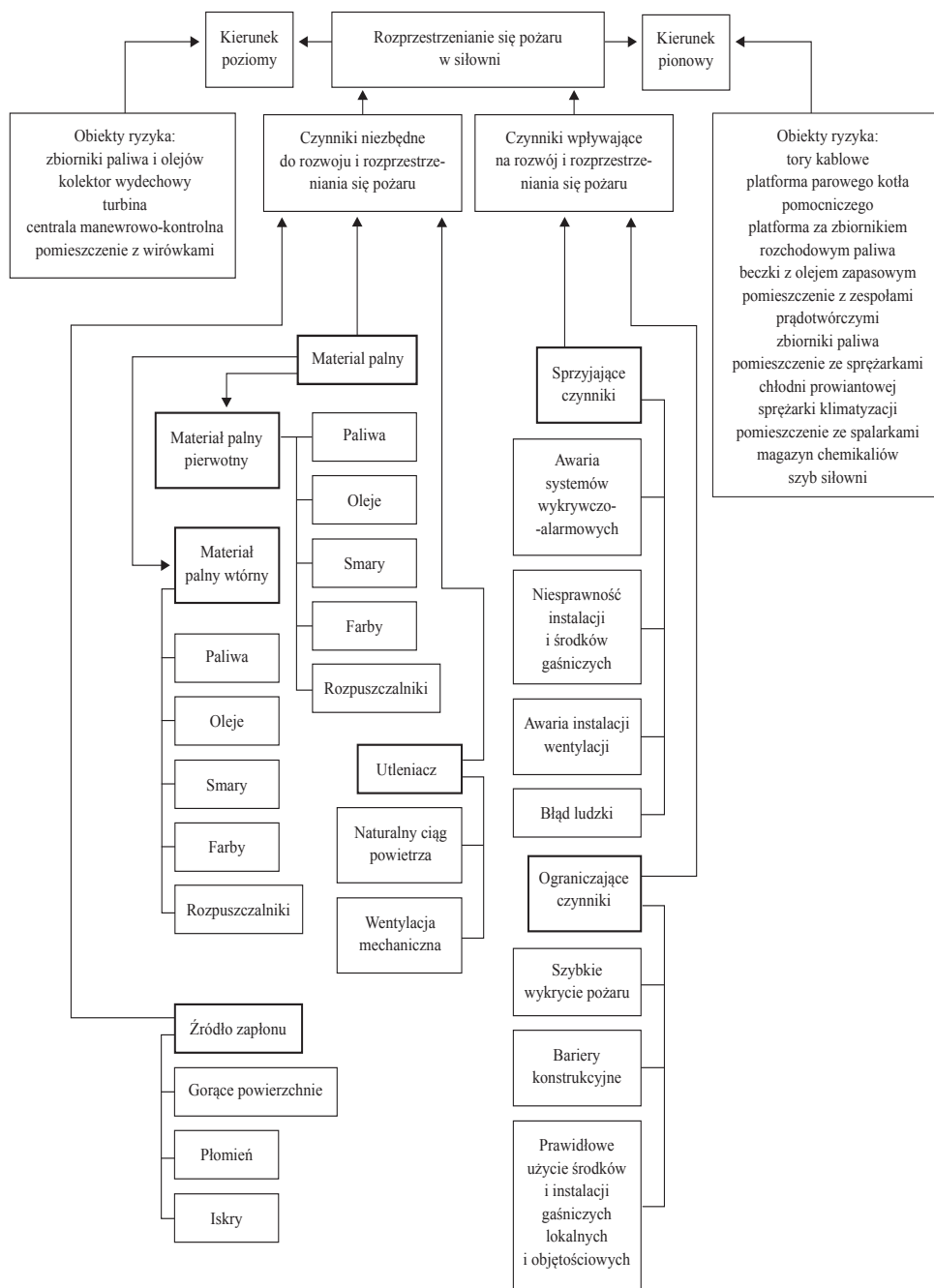
Podczas pożaru mogą zostać nadpalone tory kablowe w rejonie kolektora wydechowego spalin silnika głównego, a także może zostać uszkodzona turbosprężarka. Pożar o średnim zasięgu również wymagałby użycia CO₂. Mógłby rozprzestrzeniać się w dwóch kierunkach – poziomym i pionowym, również w obszarze sąsiadującym

z miejscem powstania pożaru, np. do pomieszczenia wirówek. Mogłyby ulec spaleniu tory kablowe, skrzynki elektryczne, mechanizmy lokalnego sterowania. Pożar mógłby przenieść się do pomieszczeń warsztatów maszynowych oraz do magazynku z częściami zapasowymi, jak również do centrali manewrowo-kontrolnej. Możliwy byłby także scenariusz, w którym pożar objąłby całą siłownię, czego skutki mogłyby doprowadzić do całkowitego wypalenia się jej wyposażenia.



Rys. 4.10. Schemat dróg rozprzestrzeniania się pożaru w płaszczyźnie symetrii w siłowni statku motorowego: 1 – silnik główny, 2 – silnik pomocniczy, 3 – wyparownik, 4 – pompa balastowa, 5 – awaryjna pompa p.poż., 6 – studzienka zęzowa, 7 – warsztat, 8 – sprzęgło, 9 – przekładnia, 10 – kocioł pomocniczy, 11 – spalarka, 12 – kolektor wydechowy

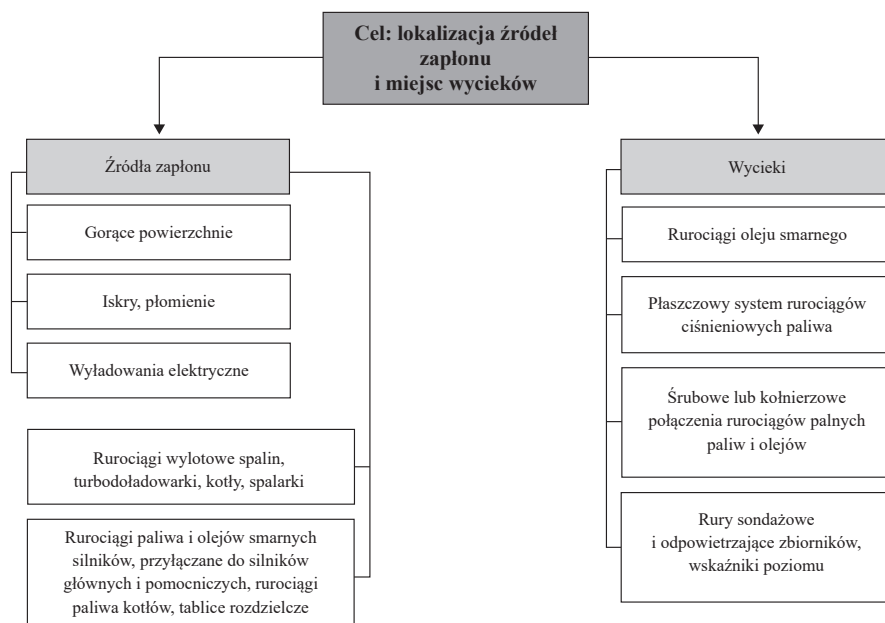
Źródło: opracowano na podstawie pracy [178].



Rys. 4.11. Możliwy scenariusz pożaru w siłowni

4.5. Scenariusz pożaru jako narzędzie oceny ryzyka pożarowego

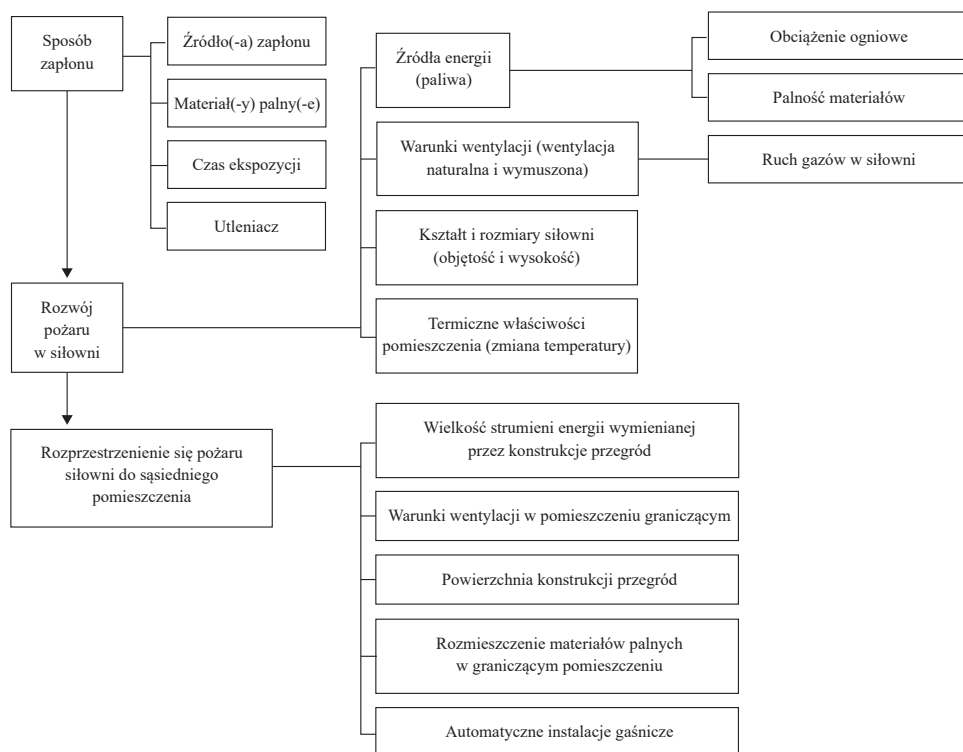
Budowanie scenariuszy pożarów opiera się na konstruowaniu i analizie schematów uwzględniających możliwe drogi rozprzestrzeniania się pożaru w różnych wariantach jego rozwoju i gaszenia. O scenariuszu pożaru w siłowni decyduje przede wszystkim rodzaj materiału palnego, którym są najczęściej paliwa i oleje smarne oraz źródło zapłonu. Ich lokalizacja umożliwia zaplanowanie różnych zdarzeń (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Lokalizacja źródeł zapłonu i miejsc uwolnienia się materiałów palnych

W celu zbudowania scenariusza pożaru należy zidentyfikować również czynniki wpływające na jego rozwój i rozprzestrzenianie się, także poza obręb siłowni (rys. 4.13). Są to właściwości i rozmieszczenie materiałów palnych w siłowni i pomieszczeniach przylegających, geometria siłowni, warunki wentylacji w siłowni i w pomieszczeniach przylegających oraz możliwość wymiany ciepła przez konstrukcje, a także instalacje gaśnicze.

Scenariusz pożaru zależy także od szybkości jego wykrycia oraz podjęcia działań mających na celu jego ugaszenie i niedopuszczenie do wydostania się poza siłownię. Algorytm uwzględniający analizę efektywności tych działań przedstawiono na rys. 4.14.

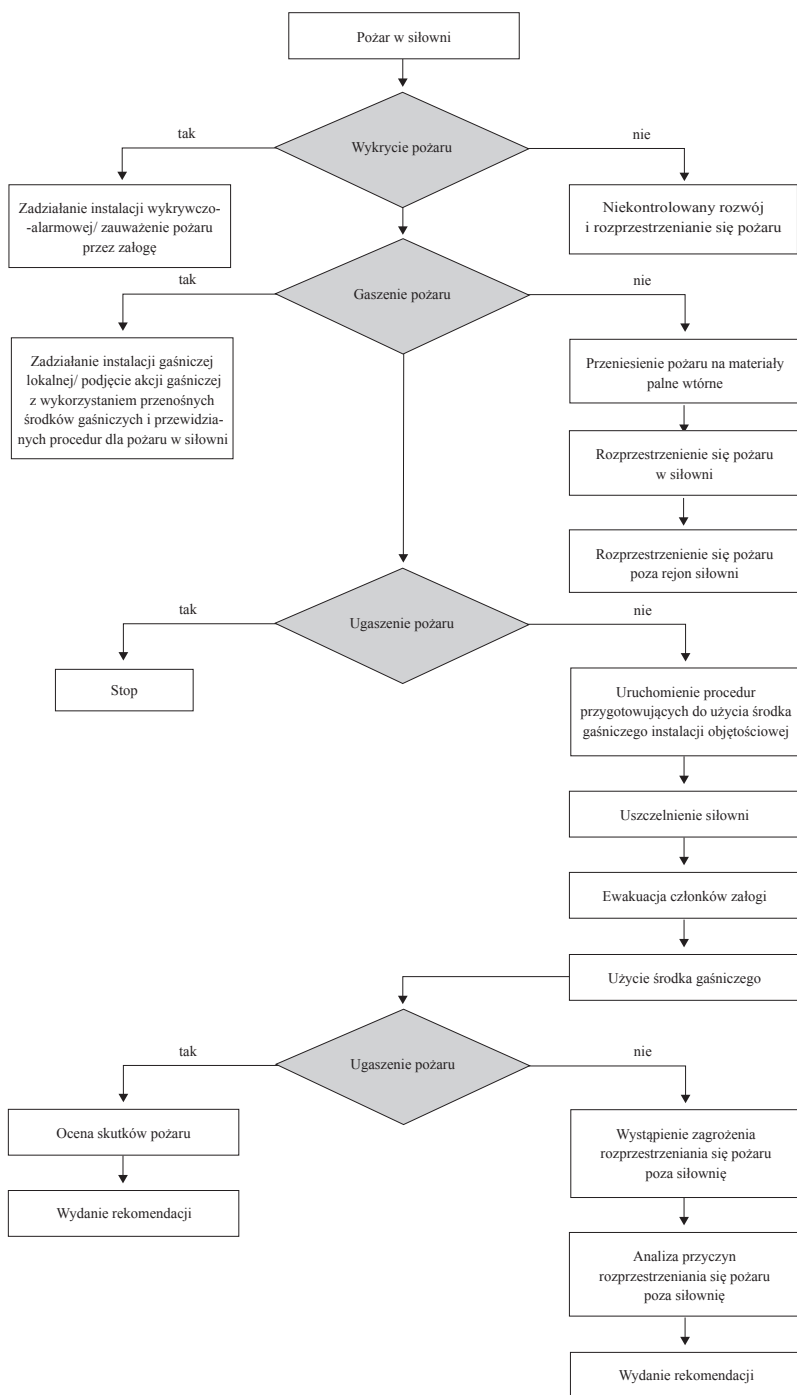


Rys. 4.13. Czynniki ryzyka wpływające na rozwój i rozprzestrzenianie się pożaru

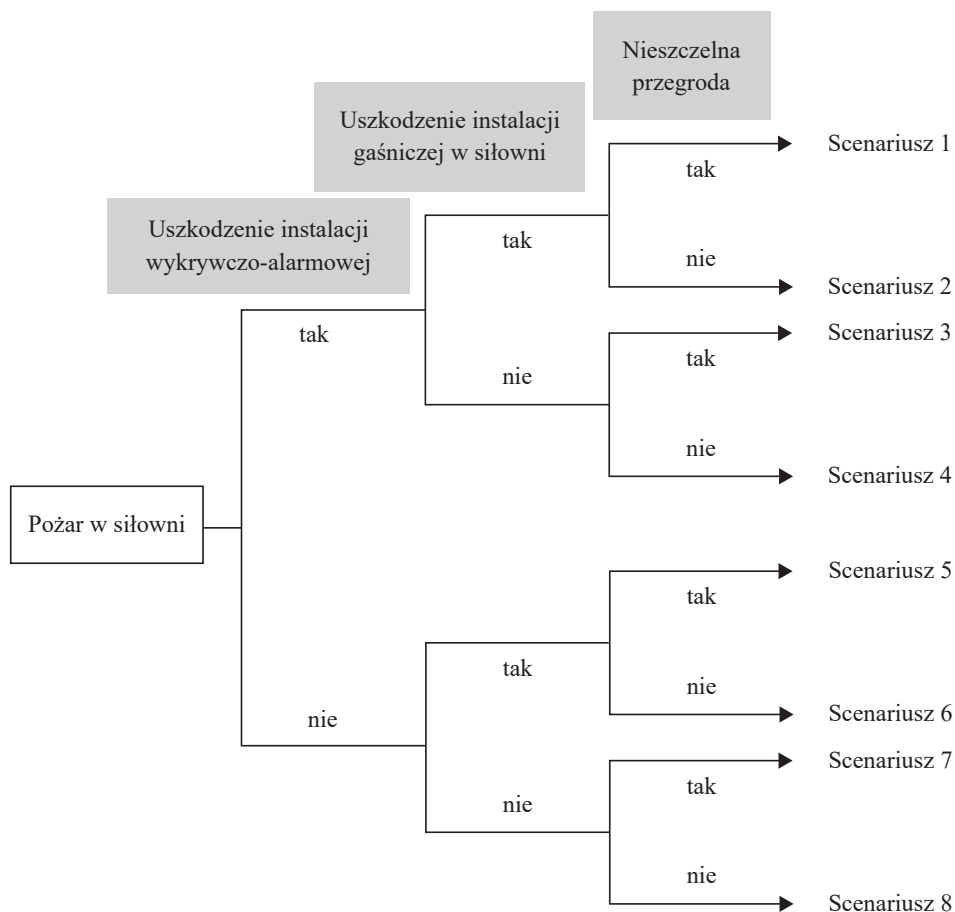
Źródło: opracowano na podstawie pracy [179].

Na każdym etapie rozprzestrzeniania się pożaru mogą wystąpić zdarzenia niepożądane, które będą miały na to wpływ. Na rys. 4.15 zamieszczono drzewo zdarzeń uwzględniające jedynie trzy z nich (uszkodzenie instalacji wykrywczo-alarmowej, instalacji gaśniczej w siłowni oraz nieszczelność przegrody siłowni) i dające w rezultacie przewidywać osiem możliwych scenariuszy pożarów, np. scenariusz nr 1 – najbardziej niekorzystny, gdyż pożar w siłowni nie jest odpowiednio wcześnie wykryty lub wcale nie jest wykryty ze względu na uszkodzenie instalacji wykrywczo-alarmowej, nie jest gaszony lub jest nieefektywnie gaszony ze względu na uszkodzenie instalacji gaśniczej oraz przenosi się do innych rejonów statku ze względu na nieszczelną przegrodę.

Przewidywanie rozwoju pożaru wymaga jak najlepszego rozpoznania czynników wpływających na możliwość rozprzestrzeniania się pożaru, ale także oceny ryzyka ich wystąpienia.



Rys. 4.14. Rozprzestrzenianie się pożaru w pomieszczeniu siłowni



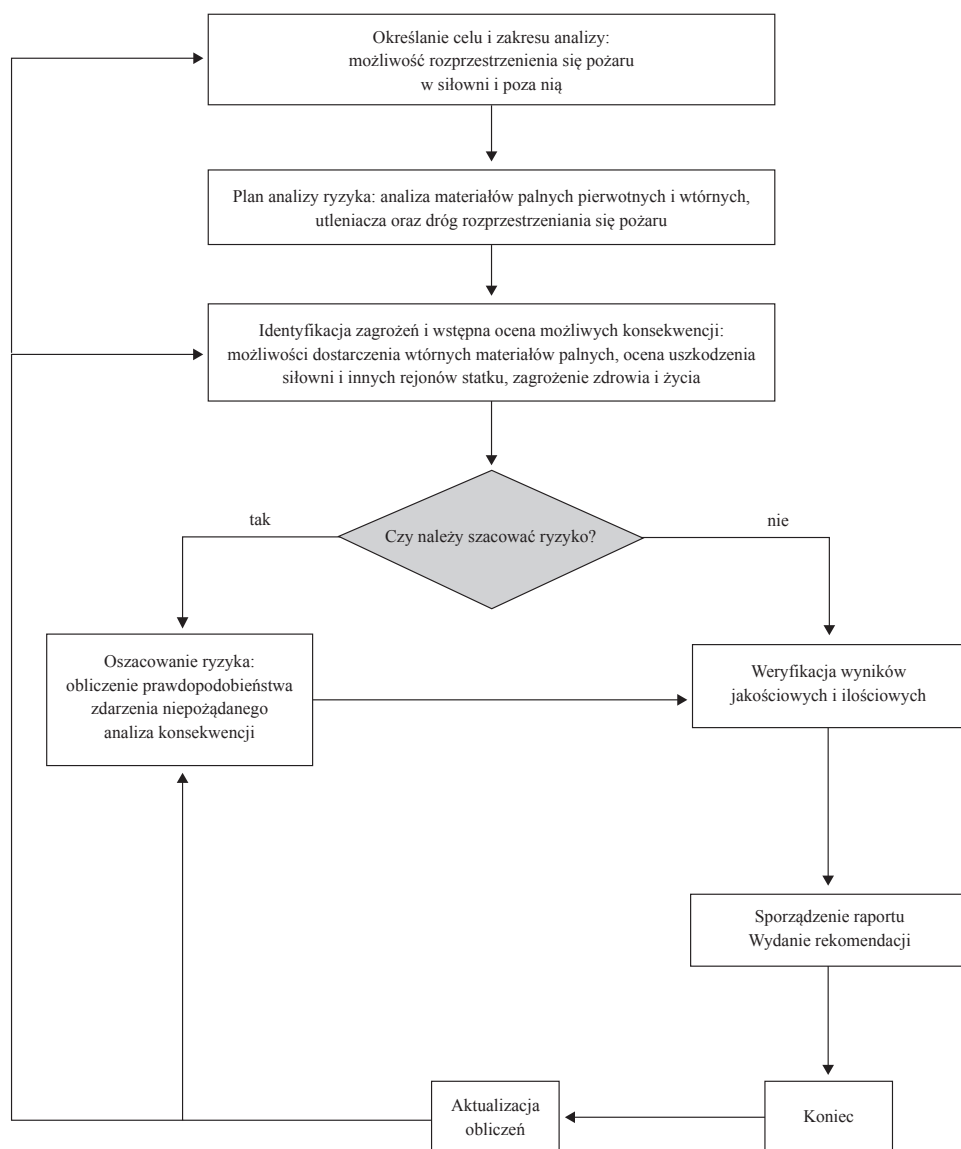
Rys. 4.15. Przykładowe drzewo zdarzeń

Do oceny ryzyka rozprzestrzenienia się pożaru w siłowni okrętowej i poza nią jest stosowany algorytm przedstawiony na rys. 4.16, zbudowany na podstawie literatury [180].

Do poszerzonych analiz ryzyka pożarowego wykorzystywany jest algorytm przedstawiony na rys. 4.17.

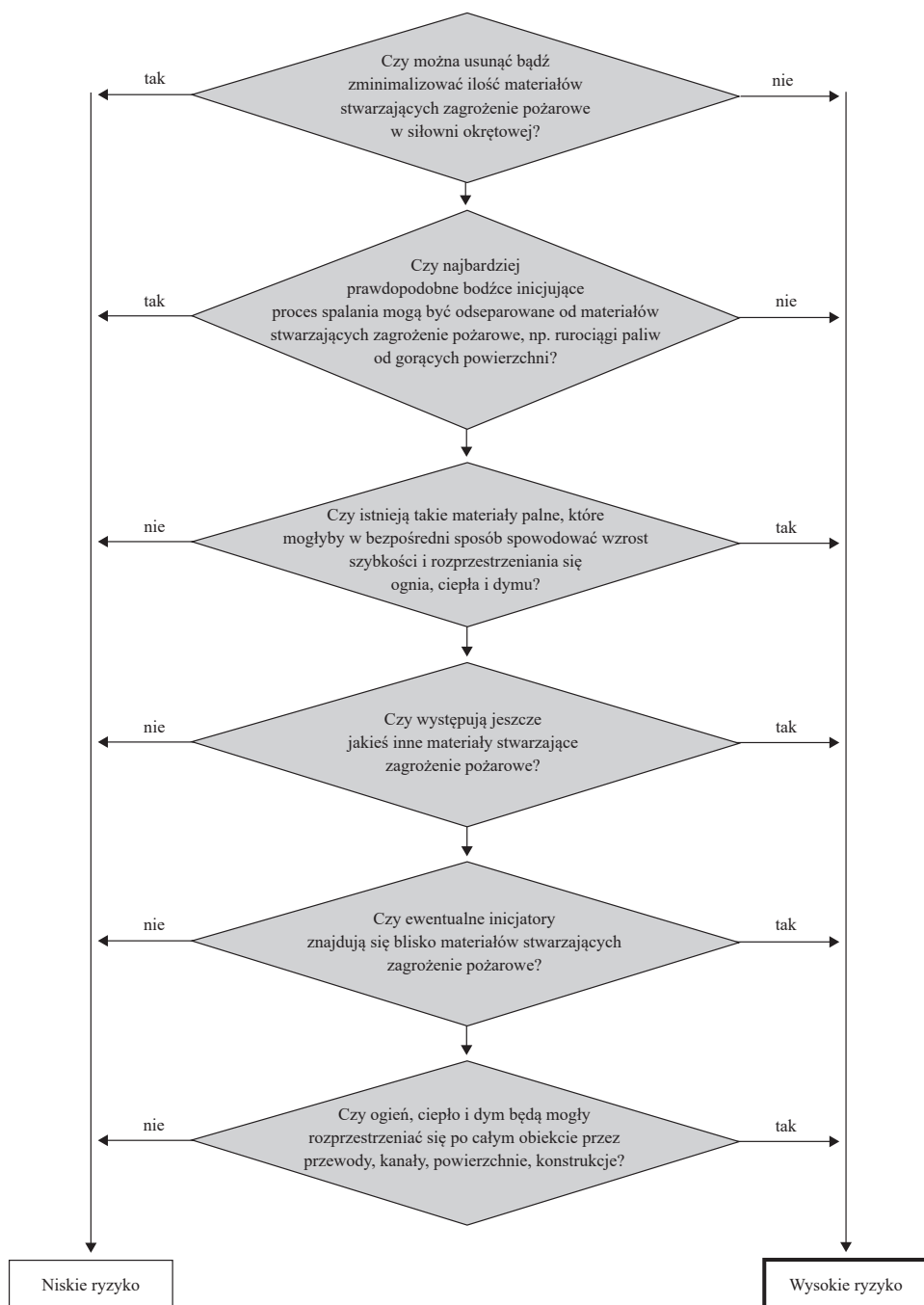
Dla większości siłowni okrętowych analiza z wykorzystaniem algorytmu kończy się stwierdzeniem, iż ryzyko powstania pożaru i jego rozprzestrzenienia się jest wysokie (zob. pogrubiona ramka na rys. 4.17).

Rozpoznanie scenariuszy powstania i rozprzestrzeniania się pożaru oraz oszacowanie ryzyka pozwala na zbudowanie drzewa zdarzeń, które jest narzędziem jakościowej oceny bezpieczeństwa pożarowego siłowni. Przykładowe drzewo przedstawiono w rozdz. 4.4 (rys. 4.11).



Rys. 4.16. Algorytm analizy ryzyka zaistnienia i rozprzestrzeniania się pożaru

Kolejnym etapem analiz bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej jest opis ilościowy zagrożeń, który został przedstawiony w rozdz. 7. Analiza problemów bezpieczeństwa pożarowego siłowni została przedstawiona bardziej szczegółowo w publikacjach [69, 116, 172].



Rys. 4.17. Algorytm oceny ryzyka pożarowego

Źródło: opracowano na podstawie pracy [181].

4.6. Podsumowanie

W wyniku prowadzonych badań w wybranej siłowni za pomocą kamery termowizyjnej zidentyfikowano obiekty ryzyka. Przyjętym w badaniach kryterium była wartość temperatury. Obiekty o temperaturze powyżej 220°C sklasyfikowano jako niebezpieczne, ponieważ w przypadku zetknięcia się z nimi materiałów palnych istnieje niebezpieczeństwo zapłonu, a ponadto wartość 220°C przyjmuje się w wymaganiach przepisów [2] jako wartość, przy której wymagana jest izolacja termiczna obiektów.

Wykazano, iż w wybranej siłowni występują powierzchnie, których temperatura znacznie przewyższa wartość graniczną; są to przede wszystkim nieizolowane powierzchnie.

Zaproponowana metoda identyfikacji obszarów podwyższonego ryzyka powstania pożaru w siłowni za pomocą kamery termowizyjnej okazała się skuteczna i pozwoliła na szybkie określenie obiektów zagrożonych, także tych usytuowanych w trudno dostępnych miejscach. Metoda może być wykorzystywana w codziennej eksploatacji siłowni przez załogę do oceny bezpieczeństwa pożarowego oraz w sytuacjach awaryjnych, np. podczas utarty zasilania (brak światła w siłowni), do prognozowania rozwoju pożaru i lokalizacji jego źródła. Metoda pozwala również na wykrycie nieprawidłowości pracy urządzeń i maszyn oraz ocenę stanu okablowania i rurociągów.

Dokładna identyfikacja obiektów ryzyka w siłowni okrętowej prowadzi do prognozowania przebiegu możliwych pożarów. Przedstawione metody oceny bezpieczeństwa pożarowego siłowni, takie jak scenariusze ich możliwych przebiegów, z uwzględnieniem czynnika ludzkiego, algorytmy oceny ryzyka, drzewa zdarzeń, pozwalają na jakościową ocenę bezpieczeństwa pożarowego siłowni.

5. MODELOWANIE POŻARU I BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

5.1. Szacowanie ryzyka powstania pożaru w siłowni okrętowej

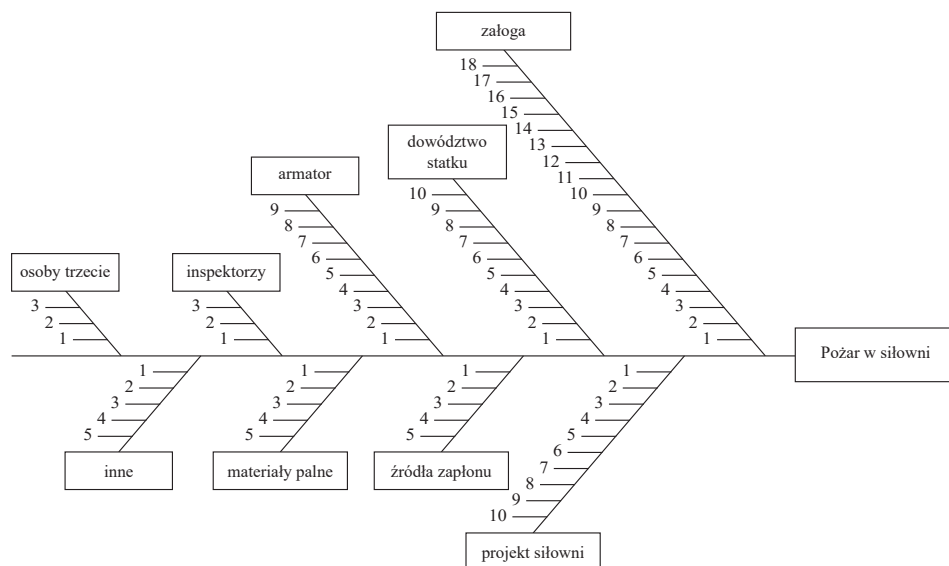
Szacowanie ryzyka powstania pożaru wykonywane jest metodami ilościowymi i jakościowymi. Często konieczne jest jakościowo-ilościowe podejście i rozwiązywanie zagadnień bezpieczeństwa metodami eksperckimi. W niniejszym przypadku zastosowano metodę diagramu Ishikawy [182]. Jest to diagram przyczyn i skutków zagrożeń, który stanowi graficzną ilustrację jakościowej analizy przyczyn powstania pożaru w siłowni okrętowej. Przedstawia on wzajemne relacje pomiędzy czynnikami ryzyka pożaru oraz ich skutki [182, 183].

Źródłem informacji do sporządzenia diagramu „rybiego szkieletu” były badania danych statystycznych, „burza mózgów”, obserwacje i pomiary, badania ankietowe i in. Do sporządzenia diagramu przyczyn pożaru w siłowni okrętowej wykorzystano wyniki badań statystycznych opisane w rozdz. 1, wyniki badań przedstawione w rozdz. 4 (mające na celu analizę gorących powierzchni w siłowni okrętowej) oraz rozdz. 6 (dotyczące czynnika ludzkiego).

Pozioma oś na rys. 5.1 wskazuje skutek generowany przez wskazane przyczyny. Skierowane pod kątem ostrym względem niej proste, naśladujące ułożenie ości w szkielecie rybit, określają główne kategorie przyczyn pożaru w siłowni okrętowej.

Przyczyny kwalifikowane były do różnych kategorii zagrożeń. Nad osią poziomą podano przyczyny związane z czynnikiem ludzkim (załogę, dowództwo statku, armatora, klasyfikatorów i osoby trzecie), pod osią zaś – przyczyny związane z projektem siłowni (geometrię, rozmieszczenie obiektów ryzyka, organizację komunikacji urządzeń z człowiekiem i in.), ze źródłami zapłonu, z materiałami palnymi oraz z tzw. czynnikami dodatkowymi, np. z warunkami hydrometeorologicznymi, awariami poza siłownią, wypadkami, katastrofami i in. (rys. 5.1).

Za pomocą liczb przedstawiono przyczyny powstania pożaru dla poszczególnych kategorii, według zasady, że przyczyny o większym znaczeniu należy umieścić bliżej środka szkieletu.



Rys. 5.1. Podstawowe przyczyny powstania pożaru w siłowni okrętowej – rysunek poglądowy diagramu Ishikawy

Opis przyczyn dla poszczególnych kategorii przedstawiono w tab. 5.1–5.10.

Tabela 5.1. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: załoga (maszynowa)

Niedostateczne wiedza i doświadczenie
Niewystarczająca znajomość wymagań przepisów i procedur
Nieprzestrzeganie wymagań przepisów i procedur
Niezrozumienie ryzyka i nieprzewidywanie konsekwencji
Zła organizacja pracy
Brak alarmów próbnych na morzu oraz ćwiczeń i szkoleń na lądzie
Stosowanie niedozwolonych rozwiązań technicznych i organizacyjnych
Niewłaściwa regulacja parametrów pracy urządzeń
Brak nadzoru i dozoru
Nieprzestrzeganie zasad strategii eksploatacji
Niedostateczna dbałość o czystość
Stosowanie niewłaściwych materiałów eksploatacyjnych
Zła kondycja psychiczna i fizyczna załogi
Bariera językowa
Niesubordynacja, niedbałość i lekceważenie obowiązków
Zmęczenie i przemęczenie
Wiek
Uzależnienie od używek

Tabela 5.2. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: dowództwo statku

Niewystarczające wiedza i doświadczenie oraz rutyna
Nieprzestrzeganie przepisów
Nieznajomość przepisów
Lekceważenie obowiązków i opieszałość
Brak empatii i komunikacji z załogą
Lekceważenie alarmów i komunikatów
Brak autorytetu, nieegzekwowanie wykonywania poleceń
Zła organizacja pracy
Brak alarmów ćwiczebnych
Uzależnienia od używek

Tabela 5.3. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: armator

Niewystarczająca wiedza i doświadczenie
Nieprzestrzeganie przepisów
Niewystarczająca znajomość przepisów
Brak środków finansowych
Nieprzestrzeganie zasad strategii eksploatacji
Niewykonywanie zaleceń inspektorów
Nieegzekwowanie obowiązków
Rozbudowana administracja, zły podział obowiązków
Brak właściwego przepływu informacji

Tabela 5.4. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: inspektorzy

Niewystarczająca znajomość przepisów i procedur
Nierzetelne przeglądy
Celowe nieuwajawianie uchybień

Tabela 5.5. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: osoby trzecie

Inne statki i obiekty oceanotechniczne
Akty terroru, działania wojenne
Nielegalni imigranci, pasażerowie

Tabela 5.6. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: projekt siłowni

Niewłaściwe rozmieszczenie względem siebie obiektów ryzyka
Brak izolacji gorących powierzchni
Niewłaściwe materiały i technologie wykonania
Stworzenie warunków do powstawania uszkodzeń izolacji w wyniku drgań
Stworzenie warunków do powstawania pęknięć rurociągów w wyniku drgań
Ograniczona przestrzeń, brak dostępu do miejsc ryzyka
Niedostateczne oświetlenie
Nieczytelne wskazania, zbyt duża ilość informacji podawanych jednocześnie
Niezapewnienie ergonomicznej pozycji na stanowiskach pracy
Niewłaściwy dobór i rozmieszczenie instalacji wykrywczych oraz instalacji i środków gaśniczych

Tabela 5.7. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: źródła zapłonu

Otwarty ogień
Iskra powstała wskutek tarcia
Iskra elektryczna
Gorące powierzchnie (rozszczelnienie, uszkodzenie lub brak izolacji – identyfikacja zob. rozdz. 4)
Czynne oddziaływanie ciepła (np. prace spawalnicze, zatarcie mechanizmów)

Tabela 5.8. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: materiały palne

Paliwo (rurociągi paliwa, zbiorniki z osprzętem, elastyczne połączenia, wirówki, nasiąknięte izolacje, rozlewy w wyniku awarii i in.)
Smary (w układach smarowania, opakowania, mgła olejowa, np. w karterze)
Rozruszniki
Farby
Zaolejone szmaty i in.

Tabela 5.9. Przyczyny powstania pożaru dla kategorii: przyczyny inne

Warunki hydrometeorologiczne
Awarie poza siłownią
Błędy załogi poza siłownią
Wypadki morskie
Katastrofy morskie

Tabela 5.10. Określenie częstości występowania i stopnia negatywnego oddziaływania niedostatecznej wiedzy i doświadczenia

P_i	S_i
0,9	0,9
0,9	0,9
0,5	0,9
0,9	0,9
0,9	0,5
0,9	0,5
0,9	0,9
0,9	0,5

Z analizy przyczyn [115, 116, 177] wynika, że pożary w siłowni okrętowej związane są w bardzo dużym stopniu z postępowaniem załogi (co jest potwierdzeniem danych z opisywanych statystyk), przede wszystkim załogi maszynowej, ale także dowództwa statku. Istotną rolę odgrywają także projekt oraz jakość i poprawność budowy statku.

Szacowanie ryzyka powstania pożaru w siłowni okrętowej wymaga nadania wag poszczególnym kategoriom i przyczynom. Zgodnie z klasyfikacją w diagramie (rys. 5.1) przyjęto zasadę, że większe wagi przypisywane są przyczynom położonym bliżej osi głównej. Ryzyko powstania pożaru opisuje zależność:

$$\text{ryzyko powstania pożaru} = f(\text{załoga, dowództwo statku, armator, inspektorzy, osoby trzecie, projekt siłowni, źródło zapłonu, materiały palne, inne}) \quad (5.1)$$

Na potrzeby przeprowadzenia szczegółowych analiz opisywane są poszczególne rodzaje ryzyka. Na przykład ryzyko powstania pożaru zależne od załogi siłowni (zob. tab. 5.1) opisane jest zależnością:

$$\text{ryzyko powstania pożaru zależne od załogi} = f(x) \quad (5.2)$$

gdzie: x – zob. tab. 5.1.

W analogiczny sposób opisywane są pozostałe zidentyfikowane rodzaje ryzyka.

Dla poszczególnych przyczyn powstania pożaru w siłowni wyznacza się indeks ryzyka R_{yz_i} ustalający ranking czynników ryzyka. Ryzyko powstania pożaru odzwierciedla przyczyny, które zwiększają zagrożenie, zgodnie z relacją [184,185]:

$$Ryz_{zi} = P_i S_i \quad (5.3)$$

Do oceny wartości P_i oraz S_i wykorzystuje się metodę ekspercką bezpośredniego szacowania [184, 185]. Częstość występowania i -tego czynnika oceniania jest przez ankietowanych ekspertów w skali trójstopniowej: jako niska, średnia lub wysoka. W celu ilościowego opisu poszczególnym stopniom przypisuje się wartości numeryczne: 0,1 dla niskiej częstotliwości występowania i odpowiednio: 0,5 oraz 0,9. Do oceny stopnia negatywnego oddziaływania stosuje się analogiczną skalę. W przypadku niskiego stopnia przyjmuje się wartość 0,1, w przypadku średniego stopnia – 0,5, a w przypadku dużego stopnia – 0,9 [184, 185].

Wartość indeksu ryzyka wyznacza się na podstawie oceny j -tego respondenta z zależności [184, 185]:

$$Ryz_{zi}^j = P_i^j S_i^j \quad (5.4)$$

Uwzględniając oceny wszystkich respondentów, określa się średni indeks ryzyka dla każdego z analizowanych czynników, który wyrażony jest w postaci relacji (5.5) dla n liczby ankietowanych [184, 185]:

$$\overline{Ryz_{zi}} = \frac{\sum_{j=1}^i R_{zi}^j}{n} \quad (5.5)$$

Przykładowo dla pierwszej z identyfikowanych przyczyn powstania pożaru: niedostateczna wiedza i doświadczenie (tab. 5.1, poz. 1) wyznaczono, na podstawie danych z przeprowadzonej diagnozy ergonomicznej 8-osobowej załogi maszynowej (tab. 5.10, wzór 5.5.), wartość średniego indeksu ryzyka, która wyniosła 0,63:

$$\overline{Ryz_{zi}} = \frac{\sum_{j=1}^i Ryz_{zi}^j}{n} = \frac{5,04}{8} = 0,63$$

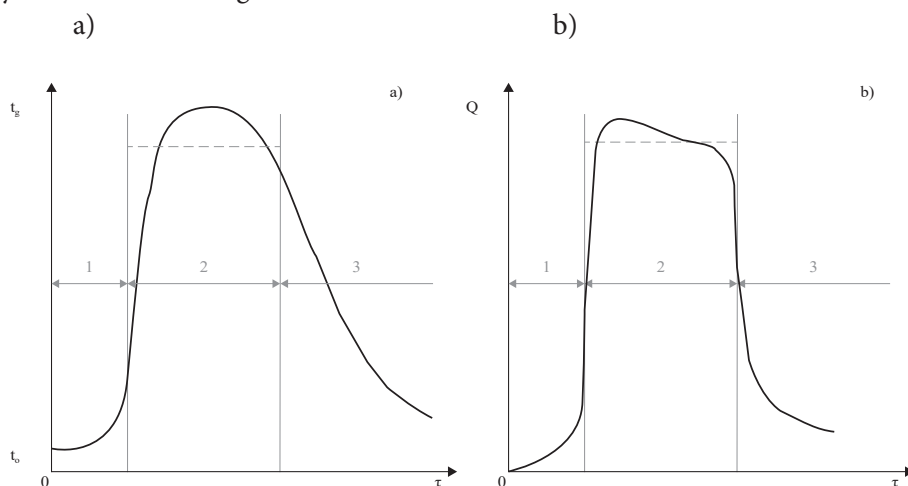
W celu stworzenia rankingu ryzyka dotyczącego poszczególnych przyczyn pożaru w siłowni określa się wartość średnią indeksu ryzyka na podstawie poszczególnych przyczyn w każdej kategorii oraz sumarycznie dla wszystkich kategorii.

5.2. Model matematyczny pożaru

5.2.1. Założenia metodyczne modelu

Podczas rozwoju i rozprzestrzeniania się pożaru można wyróżnić dwie wyraźnie rozdzielone fazy – przedrozgorzeniową i porozgorzeniową. Pierwszą z nich charakteryzuje lokalny charakter pożaru – spalanie pojedynczych materiałów palnych. Wystąpienie rozgorzenia – nagłego, prawie symultanicznego, zapłonu wszystkich materiałów palnych w pomieszczeniu (w warunkach korzystnych proporcji mieszanin gazowych oraz przy przekroczeniu krytycznych wartości natężenia promieniowania) – powoduje zmianę pożaru z lokalnego na pożar obejmujący całe pomieszczenie. Zjawisku towarzyszą gwałtowne przemieszczanie się płomieni, zmiany w procesach wymiany ciepła, wzrost wymiany ciepła na drodze promieniowania, zmiany w pionowych rozkładach wartości temperatury i udziałach składników mieszaniny gazów w pomieszczeniu.

Ze względu na dynamikę zmian temperatury w czasie wyróżnia się fazę wzrostu pożaru, fazę pożaru w pełni rozwiniętego oraz fazę wygaszania pożaru (rys. 5.2). Początkowo rozwój pożaru zależy przede wszystkim od ilości i rodzaju materiałów palnych, po rozgorzeniu na jego dynamikę mają wpływ głównie warunki wentylacji, czyli ilość dostarczanego utleniacza.



Rys. 5.2. Fazy rozwoju pożaru: a) przebieg średniej temperatury gazów w pomieszczeniu w funkcji czasu, b) szybkość zmian wydzielania się ciepła podczas spalania paliwa w funkcji czasu; 1 – faza wzrostu pożaru, 2 – faza pożaru rozwiniętego, 3 – faza wygaszania pożaru

Źródło: opracowano na podstawie pracy [186].

Warunkiem wystąpienia pożaru jest dostarczenie do materiału palnego energii w ilości wystarczającej do jego zapłonu bądź wygenerowanie przez materiał energii powodującej jego samozapłon.

Podczas rozwoju pożaru wydziela się ciepło, którego część podtrzymuje procesy spalania, a część rozprzestrzenia się poprzez konwekcję i drogą promieniowania, powodując nagrzewanie się zgromadzonych w pomieszczeniu materiałów. Rozwój pożaru w pomieszczeniu obejmuje termiczne, chemiczne oraz aerodynamiczne procesy i jest zależny od wzajemnych relacji między nimi. Dominującymi zjawiskami w rozwoju pożaru są promieniowanie, konwekcja i przemieszczanie się płomieni. Proces uzależniony jest od ilości, właściwości i rozmieszczenia nagromadzonych materiałów palnych, wysokości i objętości pomieszczenia, w którym rozwija się pożar, a także od warunków aerodynamicznych (wentylacji, konwekcji oraz ruchu gazów), instalacji gaśniczych oraz przegród chroniących pomieszczenie.

W większości modeli rozpatruje się rozwój pożaru do momentu rozgorzenia, który według różnych badaczy można określić na podstawie warunków przedstawionych w tab. 5.11. Pozwala to na określenie warunków granicznych bezpieczeństwa danego pomieszczenia, na dobór systemów i środków zabezpieczeń.

Tabela 5.11. Wyniki badań warunków koniecznych do zaistnienia rozgorzenia

Autor	Temperatura [°C]	Strumień ciepła [kW/m ²]
Hagglund	600	brak danych
Fang	450, 600	17,33
Budnicki i Klein	673, 771	15,00
Lee i Breese	650	17,30
Babrauskas	600	20,00
Fang i Breese	706 ± 92	20,00
Quintiere i McCaffrey	600	17,70, 25,00
Thomas	520	22,00
Parker i Lee	brak danych	20,00

Źródło: opracowano na podstawie pracy [187].

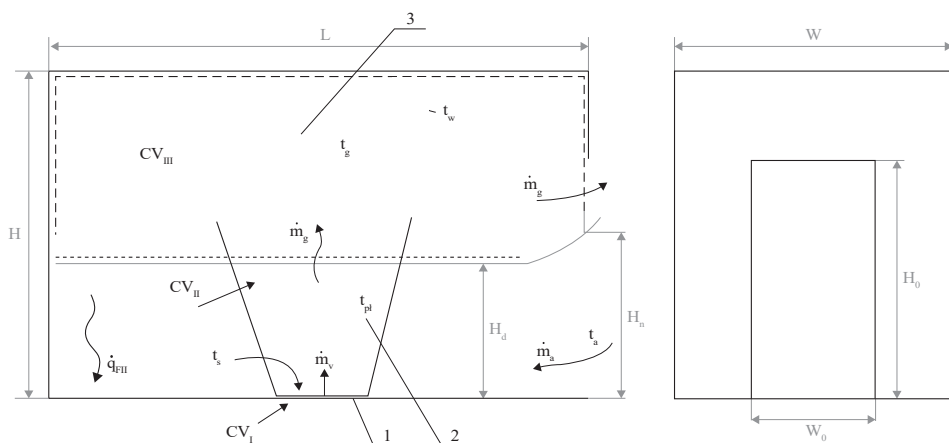
Ze względu na możliwość walidacji pomiarowej badanego zjawiska, jak również uproszczenia obliczeń numerycznych w opisie matematycznym pożaru zastosowano model zerowymiarowy, o parametrach skupionych. Ze względu na właściwości parametrów pożaru do opisu modelu zastosowano strefowy podział przestrzeni o parametrach skupionych.

Parametry formalne strefowego modelu pożaru, zawarte w przestrzeni pomieszczenia, przedstawiono na rys. 5.3. Pomieszczenie podzielono na strefę spalania

(pierwotnego materiału palnego) (CV_I), strefę płomienia (CV_{II}), strefę zadymienia (produktów spalania) (CV_{III}) oraz strefę oddziaływania cieplnego.

Zależności występujące między strefami opisują równania praw mechaniki oraz wymiany energii i masy. W modelu przyjęto, że mieszanina gazów w każdej strefie jest homogeniczna i że między strefami nie występuje ich mieszanie się.

W celu wyznaczenia podstawowej wielkości określającej pożar, czyli temperatury gazów w pomieszczeniu, należy wyznaczyć równania bilansu masy i energii w pomieszczeniu oraz opisać strumień ciepła przenikającego przez ścianę.



Rys. 5.3. Dekompozycja strefowa przestrzeni pomieszczenia: 1 – materiał palny, CV_I – strefa spalania materiału palnego, 2 – strefa mieszania, CV_{II} – strefa płomienia, 3 – warstwa podsufitowa produktów spalania, CV_{III} – strefa produktów spalania – zadymienia

Źródło: opracowano na podstawie pracy [186].

Przyjmując założenia przedstawione w literaturze [186], można wyznaczyć strumień masy wpływający z pomieszczenia (oznaczenia zob. rys. 5.3):

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_o \rho_a \sqrt{2g \left(\frac{t_a}{t_g} \right) \left(1 - \frac{t_a}{t_g} \right)} (H_0 - H_n)^{3/2} \quad (5.6)$$

Strumień masy powietrza wpływający do pomieszczenia przez otwór określa równanie:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_g - \dot{m}_v \quad (5.7)$$

Zgodnie z założeniem Rocketts (oznaczenia zob. rys. 5.3):

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d W_o \rho_a \sqrt{2g \left(\frac{t_a}{t_g} \right) \left(1 - \frac{t_a}{t_g} \right)} (H_n - H_d)^{1/2} \left(H_n + \frac{H_d}{2} \right) \quad (5.8)$$

Bilanse masy i energii wyznacza się dla poszczególnych stref opisanych w modelu pożaru (rys. 5.3). Ich szczegółowe zapisy i rozwiązania zostały przedstawione w publikacji [186].

W strefie spalania (CV_I), jeżeli szybkość parowania paliwa zależna jest od strumienia ciepła powierzchni paliwa, temperatury powierzchni i otoczenia oraz ciepła parowania, to [186]:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{q}_s'' \cdot A_{pal}}{c_{pal}(t_s - t_a) + c_v} \quad (5.9)$$

Strumień ciepła wymienianego przez powierzchnię, potraktowany jako suma strumieni: ciepła przekazywanego na drodze konwekcji od płomienia, strumienia ciepła promieniowania od płomienia, oddziaływania cieplnego nagranych powierzchni i warstwy produktów spalania, pomniejszony o promieniowanie powierzchni, wyraża zależność [186]:

$$\begin{aligned} \dot{q}_s'' = & \alpha_s(t_{pł} - t_{par,pal}) + \varepsilon_{pł}\sigma t_{pł}^4 + (1 - \varepsilon_{pł})F_{pł,podł}\sigma(\varepsilon_g t_g^4 + (1 - \varepsilon_g)t_{sc}^4) \\ & + (1 - \varepsilon_{pł})F_{podł,pal}\sigma t_{podł}^4 - \sigma t_{par,pal}^4 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Przyjęto, że emisyjność płomienia zależna jest od jego wysokości:

$$\varepsilon_{pł} = 1 - \exp(-a_{pł}H_{pł}) \quad (5.11)$$

gdzie wysokość płomienia:

$$H_{pł} = 16,2 \left[\frac{\left(r + \frac{\omega \rho_a}{\rho_v} \right)^2 \omega}{\rho_a^2 g (1 - \omega)^5} \right]^{1/5} \cdot \dot{m}_b^{2/5} \quad (5.12)$$

W strefie płomienia (CV_{II}) bilans energii oznacza równość energii pochodzącej z procesu spalania, energii promieniowania cieplnego, pochłanianej przez płomień, pomniejszonej o sumę energii oddawanej przez płomień do strumienia energii transportowanej w objętości CV_{II} [186]:

$$\begin{aligned} & \dot{m}_b c_c + \varepsilon_{pt} F_{P_{podł}} \sigma (\varepsilon_g t_g^4 + (1 - \varepsilon_g) t_{sc}^4) A_{pal} - \varepsilon_{pt} \sigma t_{pt}^4 2 H_{pt} \sqrt{\pi A_{pal}} \\ &= \dot{m}_g c_g (t_{pl} - t_a) + \dot{m}_{py} [c_e + c_{pal} (t_{par.pal} - t_a) - c_g (t_{par.pal} - t_a)] \end{aligned} \quad (5.13)$$

Jeżeli ilość powietrza jest niewystarczająca, by zapewnić całkowite spalanie:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_v} < \lambda \quad (5.14)$$

to strumień masy spalanego paliwa jest ilorazem strumienia masy napływającego do pomieszczenia i λ :

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_a}{\lambda} \quad (5.15)$$

Wówczas masowa szybkość pyrolizy paliwa [186]:

$$\dot{m}_{py} = \dot{m}_v - \dot{m}_b \quad (5.16)$$

Jeżeli $\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_v} > \lambda$, to spalanie odbywa się z nadmiarem tlenu i $\dot{m}_b = \dot{m}_v$, więc $\dot{m}_{py} = 0$.

W strefie produktów spalania (CV_{III}) na potrzeby opisu konwekcji i promieniowania korzysta się z równania [186]:

$$\begin{aligned} \dot{m}_g c_g (t_{pt} - t_g) &= \alpha_{sc} A_{sc+suf} (t_g - t_{sc}) + \dot{q}_{r,sc}'' A_{sc+suf} + \dot{q}_r'' A_{podł} + \\ &+ \sigma t_{sc}^4 A_0 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Strumień ciepła oddziałującego na ścianę określony jest formułą:

$$\dot{q}_{r,sc}'' = \varepsilon_g \sigma t_g^4 + \gamma (1 - \varepsilon_g) \sigma t_{podł}^4 - [1 - (1 - \gamma)(1 - \varepsilon_g)] \sigma t_{sc}^4 \quad (5.18)$$

gdzie współczynnik geometrii strefy:

$$\gamma = \frac{A_{podł}}{A_{sc+suf}} \quad (5.19)$$

Strumień ciepła promieniującego od dolnej części strefy produktów spalania:

$$\dot{q}_{r,d}'' = \varepsilon_g \sigma t_g^4 + (1 - \varepsilon_g) \sigma t_{sc}^4 - \sigma t_{podł}^4 \quad (5.20)$$

Zakładając przewodzenie ciepła przez ściany i jego straty na drodze konwekcji, strumień ciepła przepływającego od gazów do ścian wyznacza się z zależności [186]:

$$\dot{q}_{r,\dot{s}c}'' + \alpha_{\dot{s}c}(t_g - t_{\dot{s}c}) = k_{\dot{s}c}(t_{\dot{s}c} - t_g) \quad (5.21)$$

gdzie współczynnik ciepła przepływającego przez przegrody:

$$k_{\dot{s}c} = \frac{1}{\frac{\sigma}{\lambda_{\dot{s}c}} + \frac{1}{\alpha_{\dot{s}c,a}}} \quad (5.22)$$

Przez przegrody poziome, np. podłogi, wymiana ciepła odbywa się na drodze promieniowania, konwekcji i przewodzenia [186]:

$$F_{p\text{podł}} \dot{q}_{r,d}'' = \alpha_{p\text{podł}}(t_{p\text{podł}} - t_a) + k_{\dot{s}c}(t_{p\text{podł}} - t_a) \quad (5.23)$$

Równania zasady zachowania masy i energii dla rozpatrywanych stref rozwiązano metodą numeryczną, z zastosowaniem metody Newtona–Raphsona opisanej przez Quintiere'a i in. [188]. Walidacji dokonano na podstawie wyników badań eksperymentalnych [188].

W przypadku pożaru w pełni rozwiniętego w pomieszczeniu, z uwzględnieniem strat, bilans ciepła ma postać [186]:

$$\dot{m}_a i_a - \dot{m}_g i_g - \Delta \dot{q} = \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho V_i) \quad (5.24)$$

a po przekształceniu:

$$\dot{q}_c - \dot{m}_g \int_{298}^{t_g} c_p dt - \Delta \dot{q}_c = \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho V_i) \quad (5.25)$$

Poszukiwany sumaryczny strumień entalpii ma postać:

$$\dot{q}_c = \dot{m}_{\text{pal}} i_{\text{pal}} + \dot{m}_a i_a - \dot{m}_{\text{py}} i_{\text{py}} \quad (5.26)$$

Przyjmując, że strata ciepła przez okna odbywa się poprzez promieniowanie oraz że ciepło przekazywane jest do ścian przez konwekcję i radiację, otrzymujemy:

$$\Delta \dot{q} = \dot{q}_{\dot{s}c} + \dot{q}_r \quad (5.27)$$

Reasumując, że powyższe rozważania, równie bilansu energii dla pożaru w pełni rozwiniętego zapisujemy w postaci [186]:

$$\dot{q}_c - (\dot{m}_a + \dot{m}_{py}) \int_{298}^{t_g} c_p dt = \dot{q}_{sc} + \dot{q}_r \quad (5.28)$$

Zgodnie z założeniami z literatury [186] otrzymujemy wyrażenie:

$$\begin{aligned} \dot{q}_c - (\dot{m}_a + \dot{m}_{py}) \int_{298}^{t_g} c_p dt = & A_{sc+suf} \sigma \left[\frac{t_g^4 - t_{sc}^4}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{(\varepsilon_{sc}-1)}} \right] + \\ & + A_{sc+suf} \alpha (t_g - t_{sc}) + A_{sc} \sigma (t_g^4 - t_0^4) \end{aligned} \quad (5.29)$$

Wynik rozwiązanego równania bilansu energii wykorzystywany jest do wyznaczania temperatury gazów w pomieszczeniu podczas pożaru w pełni rozwiniętego.

5.2.2. Pożar kałuży paliwa

W silowniach okrętowych najczęściej występuje pożar kałuży paliwa, podczas którego paliwo przejmuje ciepło promieniowania i konwekcji. Ciepło przekazywane od płomienia powoduje parowanie paliwa i jego spalanie. Konsekwencją jest intensyfikacja oddziaływania płomienia zwiększającego strumień ciepła przyspieszającego parowanie. Kałuże paliw węglowodorowych płynnych, o cienkiej warstwie paliwa, w wyniku wrzenia na powierzchni parują, tworzą chmury o składzie zbliżonym do składu paliwa (*equilibrium flash evaporation*). Chmura nagrzewana jest gwałtownie w wyniku oddziaływania promieniowania przekazywanego od płomieni. Zachodzi wówczas proces turbulentnego mieszania powietrza, niespalonego paliwa i gorących produktów spalania [189].

Podczas pożaru paliwo nie spala się w całości, czego konsekwencją jest powstawanie sadzy. Pożary kałuż paliwa modelowane są za pomocą FDS, w których do modelowania przepływów wykorzystywane są cząstki tzw. lagrangeowskie.

Intensywność spalania paliwa, określana strumieniem masy produktów spalania, jest podstawowym parametrem opisującym pożar kałuży paliwa i jego zagrożenia.

Spalanie paliwa z kałuży paliwa przebiega w trzech etapach. W pierwszym etapie następuje gwałtowny wzrost strumienia masy produktów spalania z równoczesnym wzrostem temperatury płomienia. W etapie drugim – ustalonego spalania – ciepło otrzymywane w procesie spalania bilansuje się z ciepłem oddawanym do otoczenia. W etapie trzecim wartość masowej szybkości spalania maleje adekwatnie do zmniejszającej się ilości dostarczanego paliwa.

Wartości wzrostu strumienia masy produktów spalania wyznaczone są z zależności opisanej w pracy [189]:

– dla paliw o temperaturze wrzenia poniżej temperatury otoczenia:

$$\dot{m}' = \frac{0,001c_c}{c_e} \quad (5.30)$$

– dla paliw o temperaturze wrzenia powyżej temperatury otoczenia:

$$\dot{m}' = \frac{0,001c_c}{c_p(t_b - t_a) + c_e} \quad (5.31)$$

Wysokość płomienia pożaru kałuży paliwa zależy od jej powierzchni wyznaczonej przez umowną średnicę:

$$\frac{H}{D} = 1,73 + 0,33D^{-1,43} \quad (5.32)$$

gdzie H może być określone z formuły Thomasa:

$$H = 84r_{\text{poż}} \left(\frac{m'}{\rho_a \sqrt{2g} r_{\text{poż}}} \right)^{0,61} \quad (5.33)$$

lub:

$$H = 12D \left(\frac{m'}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,61} \quad (5.34)$$

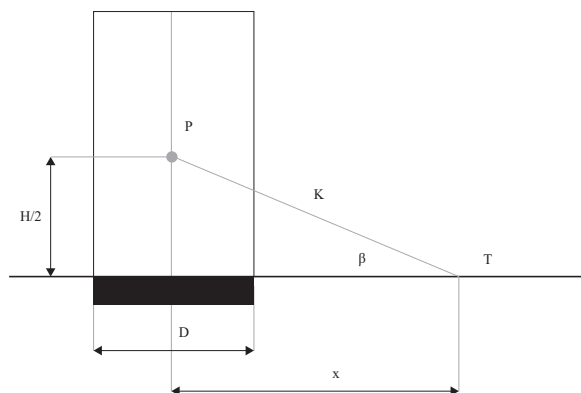
Dla pożarów kałuż paliw, w przypadku wpływu wiatru, w zależności opisującej wysokość płomienia uwzględnia się prędkość wiatru oraz dodatkowo wyznacza się kąt nachylenia płomienia [189].

Wysokość płomienia wyznacza się także z formuły Heskestada:

$$\frac{H}{D} = 0,235 \frac{Q^{2/5}}{D} - 1,02 \quad (5.35)$$

Podczas pożarów kałuż paliwa ciepło od płomienia do obiektów przekazywane jest głównie na drodze promieniowania. Strumień promieniowania zależy od temperatury płomienia i jego grubości, koncentracji promieniujących cząstek elementarnych w płomieniu i geometrycznych relacji między płomieniem a obiektem, na który oddziałuje. Do obliczeń natężenia promieniowania pożaru kałuży paliwa stosuje się różne modele matematyczne.

Model punktowego źródła (punktowy model źródłowy) został przedstawiony na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Interpretacja graficzna modelu punkowego pożaru kałuży paliwa

Źródło: opracowano na podstawie prac [189, 190].

W punktowym modelu źródłowym zakłada się, że ciepło jest emitowane z punktu P sferycznie wokół osi płomienia umieszczonego centralnie nad kałużą paliwa lub nad paliwem, np. w zbiorniku. Strumień ciepła absorbowany jest przez obiekt położony sferycznie w odległości K od punktu P na osi płomienia (rys. 5.4). W modelu do wyznaczania wysokości płomienia wykorzystywany jest wzór Heskestada, natomiast intensywność promieniowania opisana jest formułą przedstawioną w pracy [190] (oznaczenia zob. rys. 5.4):

$$\dot{q}_r \frac{\dot{Q}_r}{4\pi x^2} \quad (5.36)$$

gdzie:

$$\dot{Q}_r = \eta \dot{m} \Delta c_c \quad (5.37)$$

gdzie:

$$\dot{m} = \dot{m}' \left(\frac{\pi}{4} \right) D^2 \quad (5.38)$$

Jeżeli kałuże paliwa mają nieregularne kształty, to:

$$D_e = \left(\frac{4x A_{\text{kałuży}}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (5.39)$$

Jeżeli paliwo jest w zbiorniku, to strumień promieniowania cieplnego na poziomie gruntu określa się z formuły (oznaczenia we wzorze zob. rys. 5.4):

$$\dot{q}_r = \frac{\dot{Q}_r \cos \beta}{4\pi K^2} \quad (5.40)$$

Stosowane są także modele Shokri i Beyler oraz model Mudana [189, 190]. W modelu Shokri i Beylera zakłada się, że pożar kałuży paliwa jest źródłem promieniowania tożsamym z ciałem doskonale czarnym, o cylindrycznym kształcie, mającym jednorodną zdolność promieniowania. W modelu Mudana rozpatruje się pożar kałuży jako pionowe źródło promieniowania cylindrycznego. W numerycznych symulacjach intensywności promieniowania wykorzystywane są modele FDS. Wykorzystując model turbulencji $k - \varepsilon$, dla niskiej prędkości przepływów od pożaru produktów spalania i ciepła, rozwiązywać należy równania Naviera–Stokesa numerycznie [189].

Przedstawione zależności obowiązują w oprogramowaniu narzędzi stosowanych do modelowania pożaru. Wielkościami poszukiwanymi są moc pożaru, zmiany temperatury w czasie, szybkość rozprzestrzeniania się produktów spalania.

W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych zastosowane narzędzia spełniły założone oczekiwania i wykorzystane zostały się do realizacji eksperymentu symulacyjnego.

5.3. Modelowanie pożaru w siłowni okrętowej

5.3.1. Cel modelowania pożaru

Każdy model powinien być używany zgodnie ze swoim przeznaczeniem. Jednym z największych problemów w modelowaniu jest wybór i ustalenie wartości oraz odpowiednich danych wejściowych.

Modelowanie pożaru w siłowni okrętowej ma na celu określenie mocy pożaru, czasu jego trwania, rozprzestrzeniania się produktów spalania i zbadania innych parametrów, w zależności od intencji badacza i potrzeb. Nie ma jednak dwóch takich samych pożarów, nie istnieją więc ani równania, ani modele, które mogą opisać każdy pożar. Ze względu na wyposażenie siłowni, jej wielkość i geometrię, a także różnorodność napędów, paliw, warunków wentylacji, stanu technicznego i wpływu warunków środowiskowych oraz poziomu obsługi przez załogę modelowanie pożarów siłowni jest procesem możliwym do przeprowadzenia tylko przy precyzyjnym

określeniu parametrów mających znaczenie dla oczekiwanego efektu modelowania i jego celu.

Siłownia okrętowa jest przestrzenią na statku, w której najczęściej wstępującym pożarem jest pożar typu kałuża paliwa. Podstawowe parametry charakteryzujące pożar kałuży paliwa to moc pożaru, czas jego trwania oraz wysokość płomienia [134, 193, 194].

5.3.2. Istota i metody modelowania pożaru przy określonych założeniach

W ostatnich dziesięcioleciach zauważa się duży postęp w rozwoju matematycznych modeli do przewidywania różnych aspektów rozwoju pożaru w budynkach, szczególnie modeli do przewidywania prędkości rozwoju pożaru i wydzielania się oraz rozprzestrzeniania się produktów pożaru (dymu i ognia). Modele te mogą być stosowane także do przewidywania czasu potrzebnego do ewakuacji.

Stosowane są modele matematyczne pożaru probabilistyczne i deterministyczne. Probabilistyczne modele opisują rozwój pożaru jako sekwencję następujących po sobie zdarzeń (zapłonu, pojawienia się płomienia, rozgorzenia i innych) i służą do przewidywania przechodzenia jednego zdarzenia w drugie na podstawie prawdopodobieństwa. Takie modele są oparte na wieloletnich eksperymentach, danych statystycznych i analizie zdarzeń podobnych w warunkach rzeczywistych.

W modelach deterministycznych problem i układ są zdefiniowane, a prawa fizyki i chemii opisują rozwój pożaru. Pożar przedstawiony jest jako szereg równań numerycznych. Zarówno probabilistyczne, jak i deterministyczne modele składają się ze zbiorów układów równań matematycznych, rozwiązywanych symultanicznie z użyciem programów komputerowych.

W początkowej fazie pożaru (w fazie przedrozgorzeniowej) w pomieszczeniu można wyróżnić strefy o zbliżonych parametrach fizycznych i chemicznych. Jest to podstawą podziału modeli pożaru na modele strefowe (tzw. *zone models*) i modele przestrzenne (tzw. *field models*). Modele strefowe, obarczone dużą niepewnością, pozwalają na osiągnięcie określonych wyników w krótkim czasie. Rozpatrują one pomieszczenia podzielone na strefy, a uśrednione parametry obliczane są dla każdej ze stref oddzielnie. Modele strefowe opisują pożar w pojedynczym pomieszczeniu, umożliwiając analizę jego wzrostu i rozprzestrzeniania się; umożliwiają modelowanie rozprzestrzeniania się dymu oraz pożaru pomiędzy pomieszczeniami; są wykorzystywane także do określania czasu ewakuacji.

Modele przestrzenne wymagają zastosowania szybkich komputerów, dużych nakładów finansowych oraz długiego czasu, umożliwiając symulację parametrów

pożaru, rozprzestrzeniania się dymu, z uwzględnieniem wpływu wentylacji, wiatru i itp.

5.3.3. Narzędzia komputerowe do badań symulacyjnych

Kang i in. [61] wykazali potrzebę wykorzystywania modeli komputerowych w symulacjach pożarów w siłowni okrętowej już na etapie projektu wstępnego statku w celu uzyskania możliwości wyboru najbezpieczniejszego rozwiązania projektowego, podjęcia decyzji dotyczących rozmieszczenia i efektywności instalacji oraz środków gaśniczych, zakładanych procedur ewakuacji, przy ograniczonej liczbie danych założeń projektowych. Xuan-ze, Shou-xiang, Bo-si i Chang-hai [191] prowadzili, z wykorzystaniem LES – Fire Dynamics Simulator (FDS, version 6), symulacje pożarów w dużej siłowni okrętowej (28 x 22 x 84 m) wyposażonej w instalację wentylacji pożarowej. Obserwowali procesy wymiany ciepła i rozprzestrzeniania się dymu w pożarach typu *jet* – wytrysk paliwa (z uszkodzonego rurociągu na gorącą powierzchnię) oraz *pool fire* – kałuża paliwa (wyciek paliwa w dolnej części zbiornika). Wyznaczona moc pierwszego typu pożaru wyniosła 7278,2 kW, a drugiego – 3760,5 kW, przy założeniu działania instalacji wentylacyjnej. W przypadku niesprawnej instalacji wentylacyjnej, z powodu braku tlenu, po 360 s moc pożaru gwałtownie zmalała [191].

Projektowanie z wykorzystaniem modelowania numerycznego jest coraz częściej stosowaną metodą, przede wszystkim ze względu na możliwość znacznego obniżenia kosztów i skrócenia czasu modelowania. Symulacje dostarczają wiarygodnych danych dotyczących rozwoju i rozprzestrzeniania się pożaru oraz pozwalają na wstępną ocenę skuteczności projektowanych metod zabezpieczeń.

Modelowanie pożarów polega na rozwiązywaniu podstawowych równań procesu spalania obejmujących reakcje chemiczne spalania, reakcje wydzielania ciepła, ruch ośrodka, ruch cząstek paliwa, dyfuzję tlenu oraz przepływ ciepła. Właściwy dobór i zapis równań opisujących zjawiska oraz znalezienie metody ich rozwiązania pozwalają na budowanie modeli matematyczno-komputerowych opisujących pożar w czasie i przestrzeni oraz na wykorzystanie programów wspomagających modelowanie. Należą do nich m.in. programy: Pyrosime (który został wykorzystany przez autorkę), MARK, JASMINE, SOFIE, PHOENICS, FLUENT Fire Simulation, FireFOAM, KAMELON, SMARTFIRE, SOFIE, CFAST, CFX, FARSITE, FIRST, O-ZONE, ASET, B-RISK, BRANZFIRE [142, 145].

Modelowanie pożarów realizowane jest z wykorzystaniem modeli dynamiki płynów CFD (Fire Dynamics Simulation) i polega na rozwiązywaniu różniczkowych równań cząstkowych dotyczących zasad zachowania masy, pędu i energii

w przestrzeni objętej pożarem oraz w przestrzeniach otaczających. Równania te są rozwiązywane w ujęciu czasowo-przestrzennym, w zakresie profilu temperatury, ciśnienia, prędkości przepływu gazów, stężenia produktów gazowych [142].

Symulacja wykonywana w wykorzystywanym przez autorkę programie PyroSim jest prowadzona za pomocą aplikacji wykonawczej o nazwie Fire Dynamics Simulator (FDS). Jest to program obliczeniowej dynamiki płynów do symulacji rozwoju pożaru, stworzony przez Narodowy Instytut Standaryzacji i Technologii USA (NIST) [192].

FDS jest to program komputerowej (obliczeniowej) dynamiki płynów (CFD), w przypadku której przepływ gazu jest wymuszany termicznie. Program rozwiązuje numerycznie uproszczone równania Naviera–Stokesa odpowiednie dla przepływu o małych prędkościach Macha, napędzanego termicznie, ze szczególnym uwzględnieniem procesu rozprzestrzeniania się dymu i wymiany ciepła od pożaru.

Narzędziem wykorzystywanym przez autorkę jest również program Smokeview skojarzony z FDS, który generuje obrazy i animacje wyników, umożliwiając wizualizację płomienia i dymu [142].

Główny algorytm FDS jest jawnym schematem, typu predyktor–korektor, drugiego rzędu dokładności w przestrzeni i czasie. Najczęściej zakłada się, iż turbulencja ma formę LES (Large Eddy Simulation) Smagorinsky’ego, jednakże można prowadzić obliczenia, wykorzystując także schemat turbulencji DNS (Direct Numerical Simulation). Przy takim założeniu wymagane jest stworzenie bardzo gęstej siatki obliczeniowej. Zakłada się więc, że LES jest domyślnym modelem turbulencji [142].

5.3.4. Miary i kryteria szkodliwości pożaru dla człowieka

Oddziaływanie pożaru na organizm ludzki określane jest przez wskaźniki oddziaływania cieplnego w miejscu przebywania ludzi. Należą do nich temperatura krytyczna gazu oraz gęstość strumienia ciepła. Za wartości krytyczne przyjmuje się temperaturę w przedziale od 60°C do 70°C i gęstość strumienia ciepła od 580 W/m² [142]. Podczas badania wpływu pożaru na organizm ludzi rozpatruje się także stężenie toksycznych produktów w atmosferze obszaru objętego pożarem, co wyraża zależność:

$$\sum \frac{c_i}{c_{kr}} \leq 1 \quad (5.41)$$

Modelowanie zasięgu widzialności dostarcza informacji o bezpieczeństwie człowieka w sytuacji pożaru. Za bezpieczny uznaje się zasięg większy od charakterystycz-

negu wymiaru liniowego l_m pomieszczenia (czyli maksymalną odległość, w której może się znaleźć człowiek w czasie pożaru, do wyjścia z zagrożonego rejonu).

Określając możliwości zapobiegania rozprzestrzenianiu się pożaru, używamy parametru opisującego zdolność pożaru do jego rozprzestrzeniania się w pomieszczeniu, tj. między innymi odporność materiału (wyrobu) na działanie zewnętrznych źródeł podpalania. Dla każdego materiału istnieje charakterystyczna wartość zewnętrznego strumienia ciepła padającego na jego powierzchnię, przy której zachodzi jeszcze jego spalanie płomieniowe – tzw. krytyczny strumień ciepła. Do spowodowania zapalenia się materiału potrzebne jest ciepło podtrzymujące płomieniowe spalanie, stanowiące również wskaźnik odporności materiału na oddziaływanie zewnętrznych źródeł podpalania, określone w metodzie zgodnie z *Recommendation on improved fire test procedures for surface flammability of bulkhead, ceiling and deck finish materials*, Res. A no. 653(16) [195].

Ciepło podtrzymujące płomieniowe spalanie charakteryzuje także dynamikę rozprzestrzeniania się płomieni po powierzchni materiału w danych warunkach rozkładu termicznego i spalania.

Jako warunki graniczne modelowanego pożaru, które mogą być wykorzystane do sformułowania kryteriów określających pożar jako niebezpieczny, można przyjąć według autorki między innymi:

- przekroczenie założonej granicznej temperatury pożaru;
- przekroczenie założonej granicznej mocy pożaru;
- osiągnięcia fazy pożaru w pełni rozwiniętego w czasie krótszym niż założony;
- przekroczenie temperatury zapłonu materiału palnego pierwotnego;
- przekroczenie temperatury zapłonu materiału palnego wtórnego;
- przekroczenie temperatury zapłonu/ dopuszczalnej średniej i maksymalnej temperatury na przegrodzie, na barierze czy innej zdefiniowanej powierzchni;
- przekroczenie dopuszczalnego wzrostu temperatury w czasie krótszym niż założony;
- przekroczenie założonego czasu przejścia pożaru przez barierę/ przegrodę, czasu utraty szczelności na przenikanie ognia i dymu;
- przekroczenie temperatury utraty właściwości mechanicznych i plastycznych przegrody (bariery), np. drogi ewakuacji;
- niższe od założonego prawdopodobieństwo ugaszenia pożaru z wykorzystaniem sprzętu przenośnego i instalacji gaśniczych;
- przekroczenie dopuszczalnego stężenia toksycznych produktów spalania;
- stwierdzenie możliwości wydostania się pożaru poza pomieszczenie/ rejon, w którym powstał;
- brak bezpiecznej drogi ewakuacji;

- osiągnięcie określonej granicy czasu i przekroczenie parametrów bezpiecznej ewakuacji ludzi.

Przekroczenie wartości wyżej wymienionych parametrów, skutkuje poszukiwaniem nowego rozwiązania spełniającego założone kryteria.

5.3.5. Przykładowe parametry pożaru kałuży paliwa

Źródłem informacji dla modeli pożarów są wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczenia. Poniżej przedstawiono obliczenia reprezentatywnych parametrów pożaru dla wybranego rodzaju pożaru – pożaru kałuży paliwa. W przedstawionym schemacie obliczeń parametrów pożaru danymi wejściowymi są: objętość cieczy (paliwa) (V), masowa szybkość spalania paliwa (m'), efektywne ciepło spalania paliwa (c_c), gęstość paliwa (ρ), stała empiryczna (κ), temperatura otoczenia (t_a).

Za reprezentatywne parametry opisu pożaru w niniejszym opracowaniu uznaje się moc pożaru, czas jego trwania, wysokość płomienia [194].

Moc pożaru kałuży paliwa określona jest zależnością:

$$\dot{Q} = m' \Delta c_c (1 - e^{-\kappa \beta D}) A \quad (5.42)$$

Średnica pożaru kałuży paliwa określona jest zależnością:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.43)$$

Czas trwania pożaru wyraża relacja:

$$\tau_b = \frac{4V}{\pi D^2 \xi} \quad (5.44)$$

gdzie:

$$\xi = \frac{m'}{\rho} \quad (5.45)$$

Wysokość płomienia wyznacza jest wg Heskestada (5.46) lub wg Thomasa (5.47):

$$H_{p11} = 0,235Q^{2/5} - 1,02D \quad (5.46)$$

$$H_{p12} = 42D\left(\frac{m'}{\rho_a\sqrt{gD}}\right)^{0,61} \quad (5.47)$$

Dla sześciu rodzajów paliwa, o różnych właściwościach [134, 193, 194, 196], przedstawionych w tab. 5.12, przeprowadzono obliczenia parametrów pożaru. Wykorzystano zależności (5.42)–(5.47). Wybrane spośród obliczonych parametry opisujące pożar, jako dane wejściowe, zostały wykorzystane do modelowania pożaru siłowni okrętowej za pomocą wybranego narzędzia.

Tabela 5.12. Właściwości wybranych paliw [134, 193, 196]

Substancja palna	Masowa szybkość spalania [kg/m ² s]	Ciepło spalania [kJ/kg]	Gęstość [kg/m ³]	Stała empiryczna [m ⁻¹]
Olej transformatorowy	0,0390	46 000	760	0,7
Benzyna	0,0550	43 700	740	2,1
Olej opałowy	0,0350	39 700	970	1,7
Ropa naftowa	0,0335	42 600	855	2,8
Olej smarny	0,0390	46 000	760	0,7
Paliwo okrętowe – olej gazowy	0,0450	44 000	845	1,7

Dla małej kałuży paliwa wyniki obliczeń dotyczące różnych paliw zamieszczono w tab. 5.13.

Tabela 5.13. Parametry pożaru paliwa w zależności od rodzaju paliwa

Substancja palna	Ilość paliwa [m ³]	Wielkość kałuży [m ²]	Q [kW]	τ_b [s]	H_{p11} [m]	H_{p12} [m]
Olej transformatorowy	0,0141	1,4	1613,18	196,26	3,15	3,19
Benzyna	0,0141	1,4	3161,04	135,51	4,54	3,93
Olej opałowy	0,0141	1,4	1744,27	279,12	3,29	2,99
Ropa naftowa	0,0141	1,4	1950,04	257,05	3,50	2,91
Olej smarny	0,0141	1,4	1525,17	196,26	3,05	3,19
Paliwo okrętowe – olej gazowy	0,0141	1,4	2485,53	189,12	4,00	3,48

Dwukrotne zwiększenie ilości i powierzchni kałuży paliwa spowodowało wzrost mocy pożaru i wysokości płomienia. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 5.14.

Tabela 5.14. Parametry pożaru w zależności od ilości (podwojonej) paliwa i rozmiaru kałuży (dwukrotnie zwiększonej)

Paliwo	Ilość paliwa (dwukrotnie większa) [m ³]	Wielkość kałuży (dwukrotnie większa) [m ²]	Q [kW]	τ_b [s]	H_{p1} [m]	H_{p2} [m]
Olej transformatorowy	0,0282	2,8	3683,76	196,00	4,35	4,06
Benzyna	0,0282	2,8	6602,40	135,33	6,00	5,00
Olej opałowy	0,0282	2,8	3733,70	278,75	4,38	3,80
Ropa naftowa	0,0282	2,8	3975,81	256,70	4,54	3,70
Olej smarny	0,0282	2,8	3683,76	196,00	4,35	4,06
Paliwo okrętowe – olej gazowy	0,0282	2,8	5320,42	188,87	5,34	4,43

5.4. Badania symulacyjne pożaru

5.4.1. Obiekt badań

W pracy zbudowano model pożaru dla wybranego scenariusza w siłowni promu samochodowo-osobowego na przykładzie m/s Bielik (rys. 5.5).

**Rys. 5.5.** Prom m/s Bielik [197]

Prom m/s Bielik przewozi pasażerów i samochody w przeprawie miejskiej Warszów, na rzece Świna w Świnoujściu. Został zbudowany w Szczecińskiej Stoczni Remontowej „Gryfia” w roku 1998.

Dane techniczne jednostki [198]:

- nośność – 410 t (33 samochody osobowe, 700 osób);
- długość całkowita – 49,90 m;
- szerokość – 15,60 m;
- zanurzenie konstrukcyjne – 2,25 m;
- napęd – silnik spalinowy Caterpillar, o mocy 750 kW, 1500 obr.;
- napęd awaryjny – silnik o mocy 200 kW, 1500 obr., Caterpillar.

W siłowni paliwo składowane jest w zbiorniku rozchodowym o pojemności 1600 l. Zbiornik oleju cylindrowego ma pojemność 400 l, a zbiornik oleju hydraulicznego – 2000 l.



Rys. 5.6. Widok siłowni promu m/s Bielik ze wskazanym miejscem powstania pożaru

W scenariuszu założono, że pożar rozpoczął się w siłowni. Jego źródło znajdowało się w obrębie kałuży paliwa zlokalizowanej między silnikiem głównym a silnikiem pomocniczym – na widocznym na rys. 5.6 zielonym podeście. Założono, iż materiał palny stanowi 12 kg paliwa z wycieku z rurociągu, o średnicy 1 cm, doprowadzającego paliwo do silnika głównego, który zużywa 30–50 l/h paliwa. Ponadto w miejscu, z którego następuje wyciek, nie ma wysokiego ciśnienia, pod którym paliwo jest dostarczane do wtryskiwaczy. Symulację prowadzono przy założeniu, że wszystkie drzwi oddzielające rejon siłowni były zamknięte, a instalacja wentylacji była wyłączona.

Podstawowe wymiary geometryczne siłowni, wykorzystane do budowy modelu siłowni i jej wyposażenia, przedstawiono w tab. 5.15.

Tabela 5.15. Podstawowe wymiary silowni i znajdujących się w niej obiektów ryzyka

Parametr	Wartość [cm]
Wysokość przedziału maszynowego	208
Wysokość silnika głównego	157
Wysokość silnika pomocniczego	140
Wysokość zbiornika rozchodowego paliwa	150
Wysokość zbiornika hydroforu	130
Wysokość zbiornika oleju smarnego	100
Szerokość przedziału maszynowego	1050
Długość przedziału maszynowego	1050
Wysokość zębownicy platformy między silnikiem głównym a silnikiem pomocniczym	9,5

W modelu przyjęto właściwości paliwa przedstawione w tab. 5.16.

Tabela 5.16. Właściwości substancji palnej

Parametr	Charakterystyka
Rodzaj	olej opałowy
Ilość	12 kg (14,3 l, 0,0141 m ³)
Grubość warstwy kałuży paliwa	0,01m
Średnica kałuży paliwa	1,3 m
Objętość kałuży paliwa	0,01 m ³
Powierzchnia kałuży paliwa	1,4 m ²
Temperatura zapłonu	62°C
Wartość opałowa	39,7 MJ/kg
Gęstość	845 kg/m ³
Ciepło spalania	44 000 kJ/kg
Lepkość kinematyczna	55 mm ² /s
Masowa szybkość spalania	0,045 kg/m ² s

5.4.2. Narzędzie zastosowane w eksperymencie symulacyjnym

Model pożaru i jego wizualizację w wersji 3D zbudowano w środowisku PyroSim oraz SmokeView, który jest graficznym interfejsem modelu Fire Dynamics Simulation (FDS). Program posiada dokumenty walidacji i weryfikacji, które potwierdzają zgodność otrzymanych wyników z wynikami rzeczywistymi, a wysoki stopień pewności jakości obliczeń numerycznych, wykonanych w FDS, nadzorowany jest przez National Institute of Standards and Technology (NIST) z wykorzystaniem technik weryfikacyjnych modeli, zgodnie z normą ASTM E 1355.

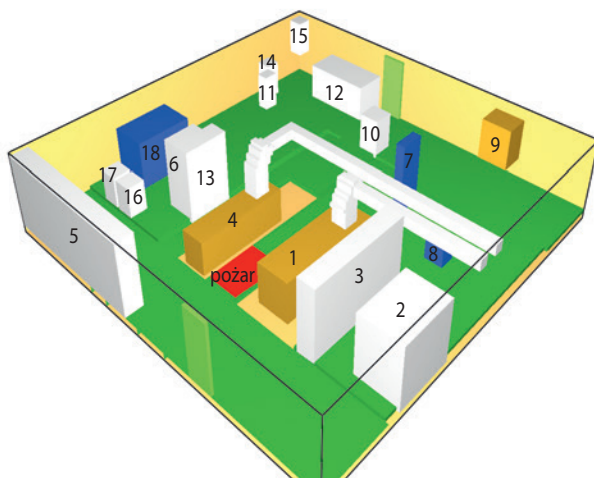
Z wykorzystaniem modelu FDS zaprogramowano symulację pożaru, rozprzestrzenianie się ognia, ruch dymu i zmianę temperatury [199]. Przeprowadzono walidację otrzymanych wyników obliczeń z wynikami rzeczywistymi za pomocą ogólnodostępnych dokumentów w programie [199, 200].

Celem modelowania było oszacowanie zmian temperatury i rozprzestrzeniania się ognia oraz produktów spalania w siłowni statku.

5.4.3. Dekompozycja przestrzeni pożaru siłowni okrętowej

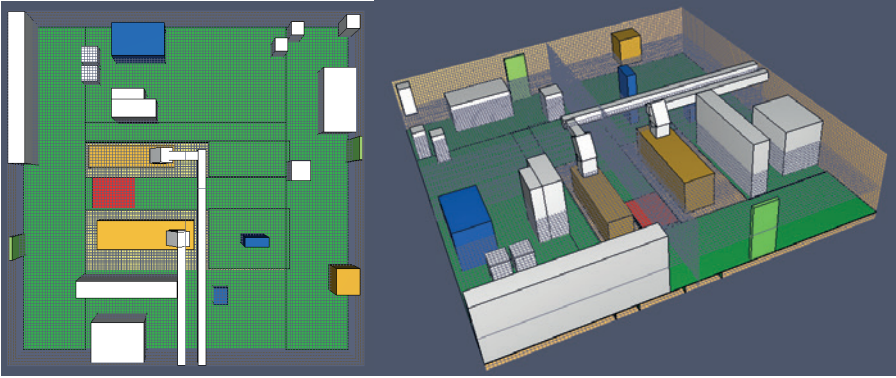
Modelowanie objęło geometrię siłowni okrętowej oraz jej wyposażenie: silnik główny, silnik pomocniczy, zbiorniki paliwa i oleju, kanały wentylacyjne oraz inne elementy. W celu zbudowania modelu obiektu rzeczywistego przyjęto założenia upraszczające oraz dobrano zmienne najlepiej opisujące geometrię siłowni i jej wyposażenia ważnego dla rozwoju, a także rozprzestrzeniania się pożaru.

Model graficzny, wraz z uwzględnieniem schematycznie przedstawionych elementów jej wyposażenia, z zachowaniem ich wymiarów i lokalizacji w siłowni, przedstawiono na rys. 5.7. Na czerwono zaznaczono kałużę paliwa, w wyniku zapalenia której powstał pożar.



Rys. 5.7. Model graficzny (widok 3D) rozmieszczenia obiektów w siłowni m/s Bielik (zrzut z ekranu): 1 – silnik główny, 2 – zbiornik paliwa rozchodowego, 3 – szafa sterownicza akumulatorów, 4 – silnik pomocniczy, 5 – miejsce sterowania i kontroli parametrów pracy siłowni (GTR), 6 – zbiornik oleju hydraulicznego, 7 – urządzenia regulacji i monitorowania instalacji hydraulicznej, 8 – pompa żęzowa, 9 – zbiornik rozchodowy oleju smarowego, 10 – pompa balastowa, 11 – hydrofor wody zaburtowej, 12 – skrzynia lodowa, 13 – pulpit sterowniczy urządzeń hydrauliki pokładowej, 14 – hydrofor wody słodkiej, 15 – podgrzewacz wody słodkiej (sanitarnej), 16 – transformator 1, 17 – transformator 2, 18 – zbiornik oleju do urządzeń hydrauliki pokładowej

Pomieszczenie siłowni przedstawiono za pomocą prostopadłościennych brył. Przeprowadzono dyskretyzację modelu geometrycznego w celu budowy modelu obliczeniowego. Na rys. 5.8 przedstawiono siatkę obliczeniową, nałożoną na model geometryczny siłowni, na potrzeby zastosowanej metody elementów skończonych.



Rys. 5.8. Siatka obliczeniowa dla wybranej siłowni (zrzut z ekranu)

Przeprowadzenie badań symulacyjnych wymagało zdefiniowania parametrów materiału palnego i powierzchni zapłonu. Z bazy programu Pyrosim wybrano krzywą pożaru oraz reakcję spalania. Założono, iż symulowany pożar (ze względu na właściwości materiału palnego) będzie przebiegał według krzywej pożaru szybkiego.

5.4.4. Program badań symulacyjnych

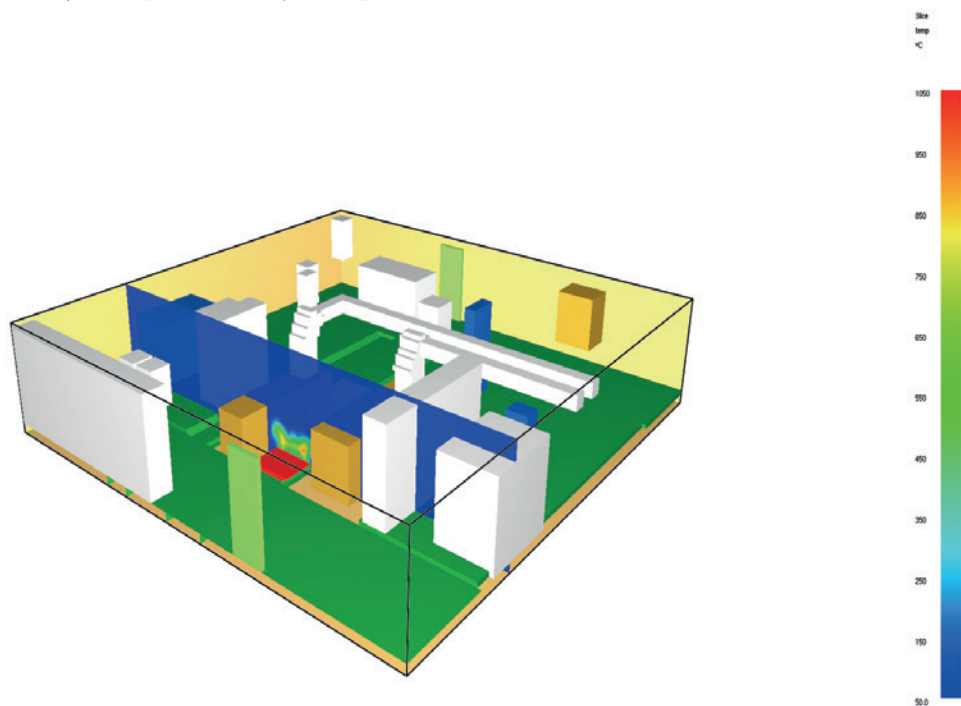
Program eksperymentu symulacyjnego przewidywał dekompozycję przestrzeni pomieszczenia maszynowego na elementy skończone, przyporządkowanie parametrów formalnych, identyfikację wartości parametrów formalnych jako danych wejściowych. Badanie przeprowadzono dla wybranego scenariusza pożaru, pożaru kałuży paliwa, przy założeniu braku dopływu paliwa wtórego i powietrza.

Zdefiniowano parametry wejściowe, takie jak (tab. 5.16) ilość paliwa, grubość rozlewu paliwa, masowa szybkość spalania, ciepło spalania oraz współczynnik niecałkowitości spalania paliwa. Oszacowano (tab. 5.13), z wykorzystaniem zależności (5.42)–(5.47), objętość, powierzchnię i średnicę kałuży paliwa, wysokość płomienia, czas trwania pożaru (wypalenia się kałuży paliwa) oraz moc pożaru. Uzyskano wartości porównywalne z danymi z literatury przedstawionymi w tab. 1.2.

Dla przyjętych danych wejściowych badano rozkład temperatury w różnych płaszczyznach, w założonych interwałach czasowych (co sekundę).

Poniższe wyniki ilustrują rozwój pożaru w płaszczyźnie prostopadłej do silników, równoległe do osi wzdłużnej statku i przechodzącej przez kałużę paliwa. Wyniki rejestrowano z częstotliwością wynoszącą 1 s.

Na rys. 5.9–5.12 przedstawiono wybrane zrzuty z ekranów operacji symulacji. Na rys. 5.9 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury, jeden z wielu modelowanych, w początkowej fazie pożaru – w 3 sekundzie.

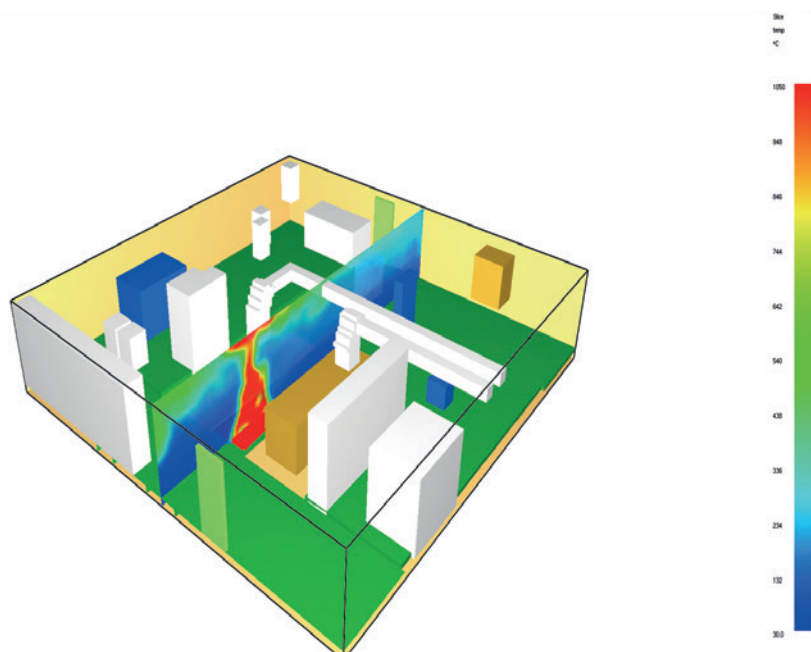


Rys. 5.9. Rozkład przestrzenny wartości temperatury gazów w 3 sekundzie pożaru siłowni (zrzut z ekranu): kolor niebieski oznacza temperaturę 100–300°C, kolor zielony oznacza temperaturę 300–700°C, kolor żółty oznacza temperaturę 700–850°C, kolor czerwony oznacza temperaturę 850–1000°C

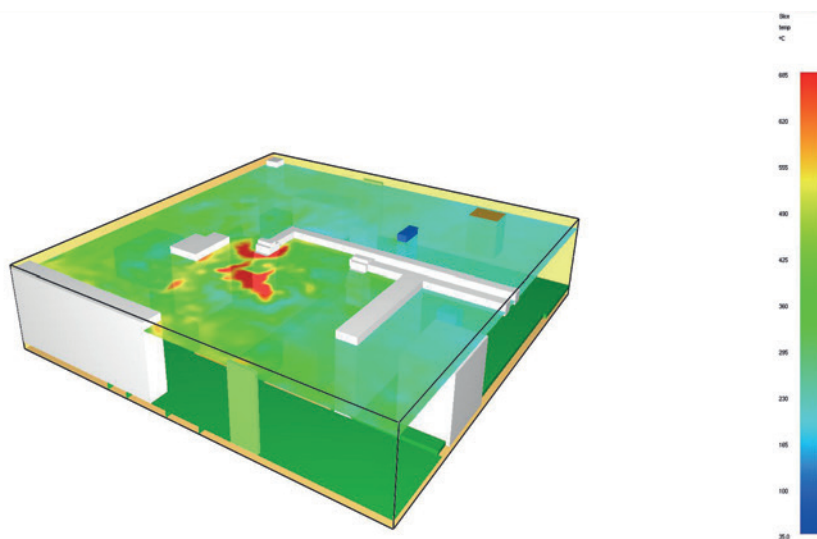
W płaszczyźnie przebiegającej równoległe do silnika głównego i silnika pomocniczego, na platformie między silnikami, przedstawiono graficznie rozkład temperatury w 20 sekundzie pożaru (rys. 5.10). Wartości temperatury nad kałużą paliwa i w warstwie podsufitowej przekraczały 850°C.

Rejestrację temperatury prowadzono również równocześnie z góry, co przedstawiono na rys. 5.11.

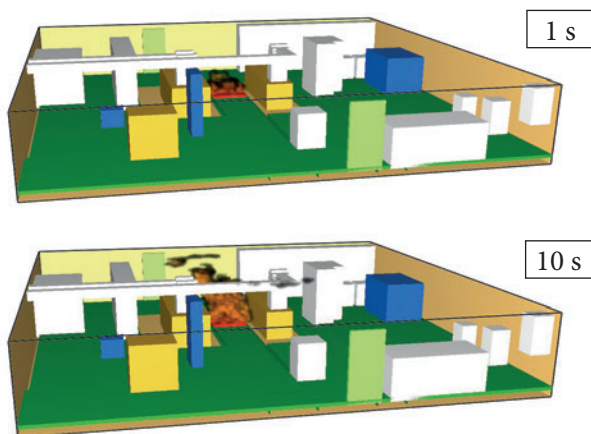
Badania symulacyjne rozprzestrzeniania się dymu już w pierwszej sekundzie ujawniły pojawienie się dymu nad materiałem palnym (rys. 5.12), który sukcesywnie się rozprzestrzeniał.



Rys. 5.10. Rozkład przestrzenny wartości temperatury gazów w 20 sekundzie pożaru siłowni (zrzut z ekranu); objaśnienia zob. rys. 5.9



Rys. 5.11. Rozkład przestrzenny temperatury spalin rejestrowany z góry w 20 sekundzie pożaru siłowni (zrzut ekranu); objaśnienia zob. rys. 5.9



Rys. 5.12. Rozkład przestrzenny dymu podczas pożaru w 1 i w 10 sekundzie pożaru (zrzut z ekranu)

Rozprzestrzenianie się dymu miało gwałtowny charakter. Już po 10 s kolumna dymu formowała warstwę podsufitową.

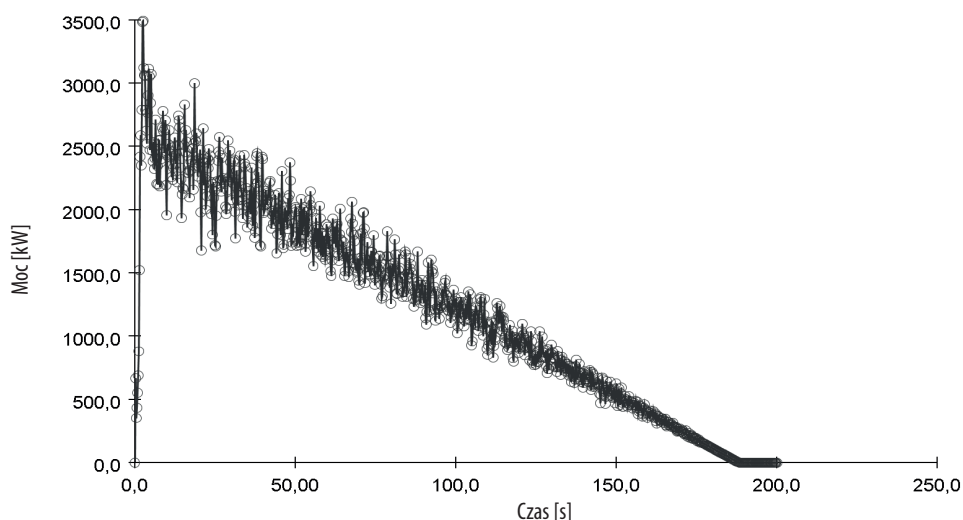
5.4.5. Dyskusja wyników badań

W wyniku symulacji otrzymano maksymalną wartość mocy pożaru $HRR = 3500 \text{ kW}$ w jego początkowej fazie. Podobną wartość mocy pożaru ($3760,5 \text{ kW}$) otrzymano także podczas modelowania pożaru kałuży paliwa w siłowni okrętowej z wykorzystaniem innego narzędzia [191].

Przebieg mocy modelowanego pożaru przedstawiono na rys. 5.13. W pierwszych sekundach pożaru nastąpił gwałtowny wzrost jego mocy (HRR).

Wzrost temperatury podczas modelowanego pożaru miał również gwałtowny charakter, a jej wartość nad kałużą paliwa przekroczyła 850°C . Czas trwania modelowanego pożaru wyniósł około 200 sekund. Pożar miał gwałtowny charakter, jednakże ze względu na brak wystarczającej ilości tlenu oraz ograniczoną ilość materiału palnego, a także dużą liczbę obiektów pochłaniających ciepło z pożaru pożar samoistnie dogasł po około trzech minutach. Interpretacja wyników wskazuje, iż jeżeli przy ognisku pożaru znalazłyby się inne materiały palne, np. dostarczane byłoby paliwo z wycieku lub leżałyby np. zaolejone szmaty, to pożar mógłby rozwijać się dalej. Otwarcie drzwi spowodowałoby dostarczenie tlenu, co także mogłoby przyczynić się do rozwoju pożaru.

Pomimo że programy Pyrosim i SmokeView przeznaczone były dla obiektów budowlanych, okazały się przydatne dla pomieszczeń statków morskich, do wykorzystania w okrętownictwie, co można uznać za osiągnięcie niniejszych badań.



Rys. 5.13. Przebieg mocy pożaru (zrzut z ekranu z programu symulacyjnego)

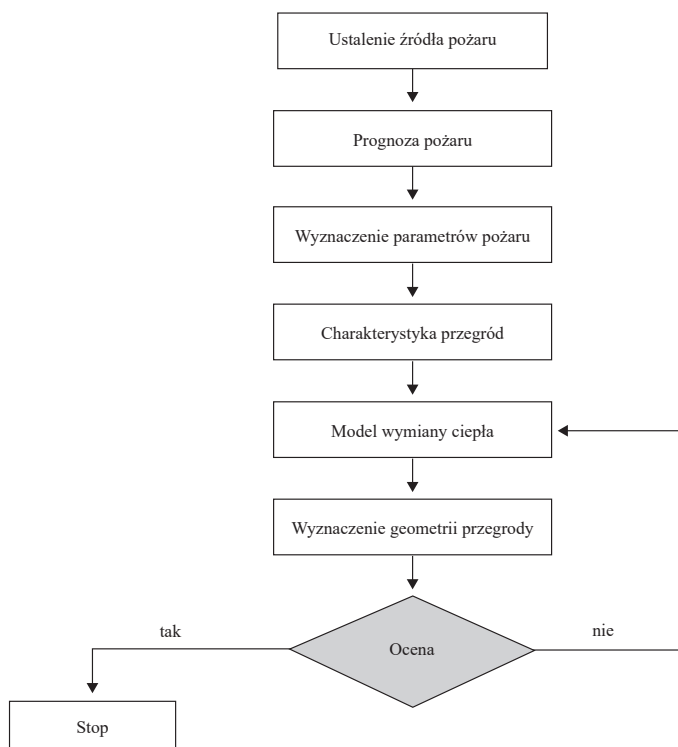
5.5. Ocena możliwości ograniczenia rozprzestrzeniania się pożaru z wykorzystaniem barier konstrukcyjnych

Odpowiednie oddalenie lub/ i rozdzielenie przegrodami obiektów zwiększonego ryzyka ma zasadniczy wpływ na zmniejszenie potencjału pożarowego i możliwość rozprzestrzeniania się pożaru na statku.

Wyniki analiz skutków pożaru z uwzględnieniem przegród przeciwpożarowych (rys. 5.14) przedstawiono m.in. w pracach [94, 96, 156]. Przeprowadzono modelowanie z wykorzystaniem algorytmu, który umożliwił, na podstawie operacji prowadzonych w kolejnych etapach, przeprowadzenie oceny zastosowanego rozwiązania zabezpieczenia konstrukcyjnego.

Do oszacowania bezpieczeństwa pożarowego wykorzystano geometryczny model przegród przeciwpożarowych, złożony z dwóch warstwowych płyt (metalowo-izolacyjnych) ze szczeliną powietrzną, która separuje przestrzeń, w której rozwija się pożar od przestrzeni chronionej. Na rys. 5.15 przedstawiono jednowymiarowy model symulacyjny przepływu ciepła między obiektami ryzyka podczas pożaru.

Na potrzeby analizy przepływu ciepła przez przegrodę przeciwpożarową zbudowano i opisano w pracy [96] jednowymiarowy model przegród, złożony z płyt dwuwarstwowych A i B, rozdzielonych szczeliną powietrzną (rys. 5.15, 5.16). Każda z płyt składa się z warstwy stali o grubości g_s i wełny mineralnej o grubości g_i (odpowiednio o współczynnikach przewodzenia ciepła λ_s i λ_i).



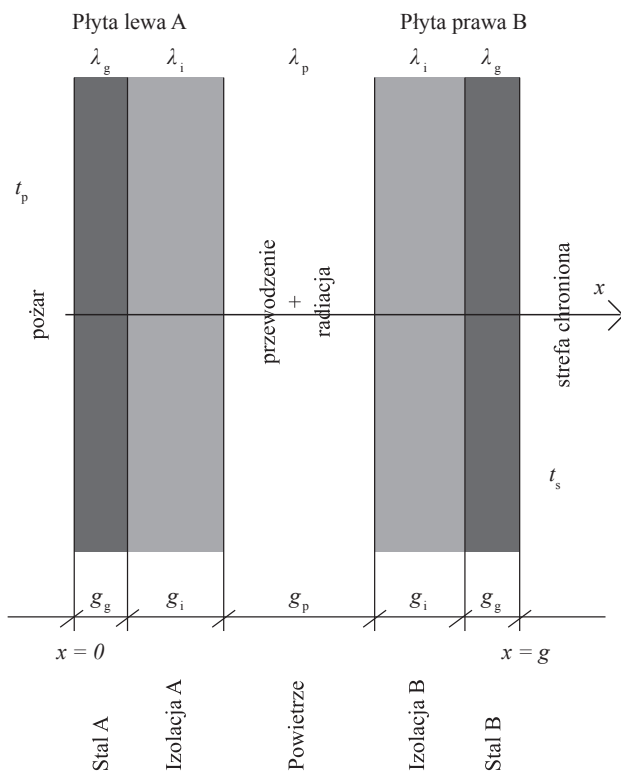
Rys. 5.14. Algorytm doboru geometrii przegród pożarowych

Źródło: opracowano na podstawie prac [94, 96, 156].

Płyty A i B są rozdzielone warstwą powietrza o grubości g_p i współczynnika przewodzenia ciepła λ_p . Zakłada się, że wymiary przegrody ochronnej w kierunkach y i z są znacznie większe niż jej grubość g w kierunku x [96].

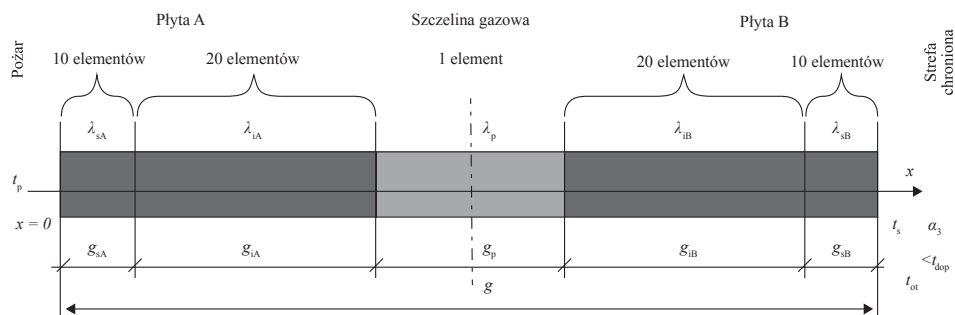
Przepływ ciepła przez warstwę powietrza między dwiema pionowymi płaszczyznami (przez szczelinę), o różnych wartościach temperatury, odbywa się drogą konwekcji. W warunkach nieustalonej konwekcji swobodnej w szczelinie o szerokości g_p występują zróżnicowane termiczne warstwy przyścienne (przy powierzchniach „cieplejszej” i „zimniejszej”) oraz strefa przewodzenia ciepła między tymi warstwami, o zmiennej grubości. Zakłada się, że w pewnych warunkach konwekcję w szczelinie zastępuje się przewodzeniem ciepła w gazie wypełniającym szczelinę.

W omawianym modelu dla stosunku $H/g_p > 3$ (wysokość przegrody H – 2,5 m) wykorzystano empiryczną formułę Jakoba [201] dla szczeliny, w której – w miejsce konwekcji – przyjmuje się dominację przewodzenia ciepła. Przy tym podejściu gęstość strumienia przewodzonego ciepła w szczelinie $\dot{q}_p$ obliczono z prawa Fouriera (z uwzględnieniem kryterium Rayleigha) w postaci [201]:



Rys. 5.15. Jednowymiarowy model przegród, złożony z płyt dwuwarstwowych lewej A i prawej B, rozdzielonych szczeliną powietrzną

Źródło: zrzut z ekranu z programu symulacyjnego; opracowano na podstawie pracy [96].



Rys. 5.16. Schematyczna struktura jednowymiarowego modelu cieplnego przegród przeciwpożarowych

Źródło: zrzut z ekranu z programu symulacyjnego; opracowano na podstawie pracy [96].

$$\dot{q}_p = \lambda_{pz} \cdot \frac{t_A - t_B}{g_p} \quad (5.48)$$

gdzie t_A i t_B są wartościami temperatury powierzchni szczeliny, a λ_{pz} jest zastępczym współczynnikiem przewodzenia ciepła gazu w szczelinie w postaci:

$$\lambda_{pz} = 0,18 \lambda_p \sqrt[4]{Gr} \cdot \sqrt[9]{\frac{g_p}{H}} \quad \text{gdy } 2 \cdot 10^4 < Gr < 2 \cdot 10^5 \quad (5.49)$$

lub

$$\lambda_{pz} = 0,065 \lambda_p \sqrt[3]{Gr} \cdot \sqrt[9]{\frac{g_p}{H}} \quad \text{gdy } 2 \cdot 10^5 < Gr < 1,1 \cdot 10^7 \quad (5.50)$$

gdzie λ_p jest współczynnikiem przewodzenia ciepła powietrza.

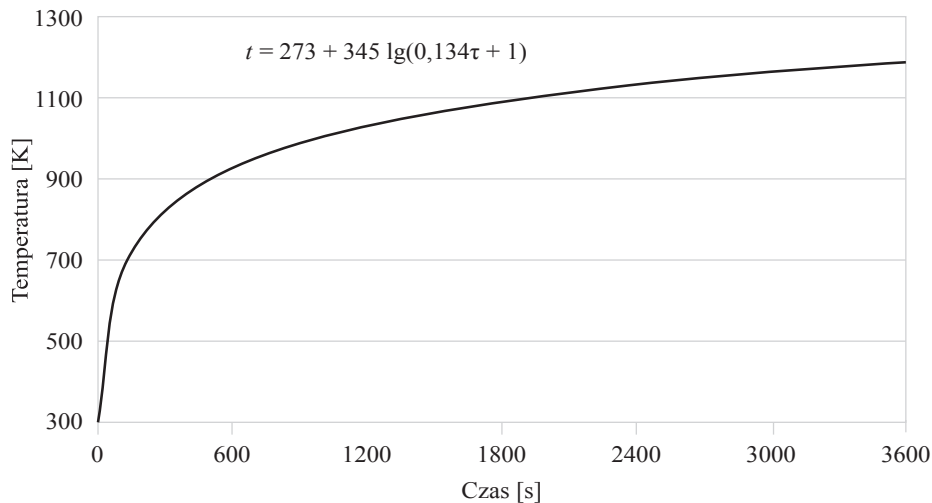
Dla liczby kryterialnej Rayleigha $Ra < 1000$ ($Ra = Gr Pr$, gdzie Gr i Pr oznaczają liczby kryterialne Grashofa i Prandtla) współczynnik λ_{pz} jest równy λ_p , natomiast dla $Ra > 1000$ współczynnik λ_{pz} obliczany jest z zależności (5.49) lub (5.50). W bilansie energii gazu w szczelinie w stanie nieustalonym podejście Jakoba nie uwzględnia efektów akumulacji ciepła w gazie.

Przyjęto, że w chwili początkowej $\tau = 0$ na powierzchni $x = 0$ pojawia się źródło ciepła, które wywołuje wzrost temperatury określony przebiegiem $t_p(\tau)$ (rys. 5.17). Przy założeniu dużych wartości współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni $x = 0$ (rys. 5.16) można przyjąć, że zmiany temperatury na tej powierzchni są podobne do przebiegu temperatury $t_p(\tau)$.

Nieustalony strumień ciepła przepływa przez płytę A, warstwę powietrza i płytę B, powodując stopniowy wzrost temperatury $t_s(\tau)$ na powierzchni $x = g$. Na tej powierzchni założono quasi-ustalony warunek brzegowy Fouriera zadaną wartością temperatury dopuszczalnej powietrza w strefie chronionej $t_{ot} < t_{dop} = 320$ K, której nie może ono przekroczyć przed upływem założonego czasu $\tau_{dop} = 3600$ s (lub 7200 s w zależności od wymagań). W modelu wydłużono czas badań do 10 800 s i przyjęto współczynnik przejmowania ciepła $\alpha_s = 10$ W/m² K.

Wymiana ciepła w płytach odbywa się drogą przewodzenia, przy założeniu idealnego kontaktu cieplnego między stalą a wełną mineralną. Dla stali i materiałów izolacyjnych oraz powietrza w szczelinie przyjęto uśrednione stałe wartości cech termofizycznych. Zestawienie cech termofizycznych modelu i wymiany ciepła zamieszczono w tab. 5.17.

Model symulacyjny zbudowano i rozwiązano przy współpracy z Nagórskim [96] metodą iteracyjną KM3R [203], z jawnym schematem dyskretyzacji, opartą na metodzie różnic skończonych.



Rys. 5.17. Standardowy przebieg wartości temperatury $t(\tau)$ dla znormalizowanego pożaru, określony przepisami *Recommendation on fire resistance tests for „A”, „B” and „F” class divisions, Res. A. no. 754 (18)*

Źródło: opracowano na podstawie pracy [202].

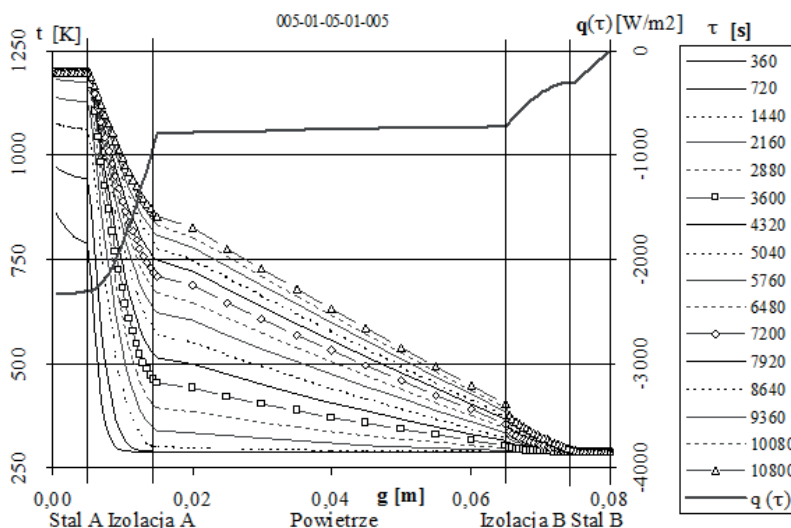
Model wykorzystano do symulacji przepływów ciepła w przegrodzie, przy różnych kombinacjach grubości poszczególnych warstw i cech termofizycznych substancji tworzących przegrodę.

Tabela 5.17. Zestawienie cech termofizycznych modelu i wymiany ciepła dla temperatury początkowej 290 K

	Przegroda dwupłytkowa				
	stal A	izolacja A	szczelina	izolacja B	stal B
Wysokość przegrody H [m]	2,5				
Grubość warstw g_i [m]	0,005	0,01, 0,03	0,03, 0,05, 0,07	0,01, 0,03	0,005
Współczynnik przewodzenia ciepła λ_i [W/(m K)]	40	0,05	0,04/0,08	0,05	40
Gęstość ρ_i [kg/m ³]	7800	100	0,7	100	7800
Ciepło właściwe c_{pi} [J/(kg K)]	450	800	1020	800	450
Rodzaj przepływu ciepła	przewodzenie	przewodzenie	przewodzenie (wg Jakoba)	przewodzenie	przewodzenie
Warunki brzegowe	$t_p(\tau, x = 0)$ dla $t_p > 1200$ K $t_p = 1200$ K			$t_{ot}(\tau = 7200$ s, $x = g) < 320$ K $a_{ot} = 10$ W/(m ² K)	

Źródło: opracowano na podstawie pracy [96].

Badania wykonano dla różnych kombinacji grubości warstw g_i . Na rys. 5.18 pokazano przykład rozkładu wartości temperatury $t(x, \tau_n)$, w wariancie przegrody 01-05-01 (cyfry oznaczają grubości warstw wełny mineralnej i szczeliny powietrznej przegrody, czyli $g_{iA} = 0,01$ m, $g_p = 0,05$ m, $g_{iB} = 0,01$ m), w wybranych chwilach czasu po zaistnieniu pożaru (we wszystkich wariantach płyty stalowe miały grubość $g_{sA} = g_{sB} = 0,005$ m). Pokazano także chwilowy rozkład gęstości strumienia ciepła $q = (x, \tau = 10\ 800$ s), z którego wynika, że przepływ ciepła przez przegrodę po 3 godzinach pożaru ma jeszcze nieustalony charakter. Jedynie w przypadku płyty stalowej A ze względu na założoną stabilizację temperatury $t_p = 1200$ K po osiągnięciu wartości $t_p = 1200$ K przepływ ciepła jest ustalony.



Rys. 5.18. Chwilowe rozkłady wartości temperatury oraz rozkład gęstości strumienia ciepła $q(\tau = 10\ 800$ s) w przegrodzie o grubości 0,08 m (wariant 01-05-01)

Źródło: zrzut z ekranu [96].

Badania symulacyjne przeprowadzono dla przegród o całkowitych grubościach g od 0,06 m do 0,14 m, w czasie do 3 godzin. Uzyskane rozwiązania dyskretne pozwoliły na ocenę pól temperatury w różnych wariantach przegród.

Badania przeprowadzono dla modeli płyt o trzech grubościach szczeliny powietrznej ($g_p = 0,03, 0,05$ i $0,07$ m) i dwóch grubościach warstw wełny mineralnej ($g_{iA} = g_{iB} = 0,01$ i $0,03$ m), przy stałych grubościach płyt stalowych ($g_{sA} = g_{sB} = 0,005$ m). W tab. 5.16 zestawiono wartości współrzędnych x_i przegrody,

w których temperatura osiąga wartość nie większą niż 320 K (umowna wartość dopuszczalna temperatury środowiska chronionego) w 3 chwilach czasu $\tau = 1, 2$ i 3 h [96].

Przedstawione w tab. 5.18 wyniki wskazują, że w przegrodach dwupłytowych, o grubościach całkowitych $g \geq 0,1$ m, z warstwami wełny mineralnej, o grubościach $g_{iA} = g_{iB} \geq 0,03$ m, pole temperatury w przegrodach nie zależy od grubości szczeliny powietrznej (temperatura t_{dop} występuje w drugiej połowie warstwy A ($g_{iA} \geq 0,019$ m) w badanym zakresie czasu, poz. 10–12). W przegrodach o grubości całkowitej $g \leq 0,1$ m, z warstwami wełny mineralnej o grubości $g_{iA} = g_{iB} \leq 0,03$ m (np. 0,01 m), zaznacza się wyraźny wpływ szerokości szczeliny powietrznej na pole temperatury. Po pierwszej godzinie temperatura t_{dop} występuje jeszcze w szczelinie powietrznej (tab. 5.18, poz. 1, 4, 7), ale w kolejnych godzinach pożaru dotyczy pierwszej połowy warstwy izolacyjnej B (tab. 5.18, por. poz. 2, 3 z poz. 5 i 6 oraz 8 i 9 w odniesieniu do grubości całkowitej g).

Porównanie przegród, o takiej samej grubości $g = 0,10$ m, pokazuje korzystny wpływ większej grubości warstwy wełny mineralnej g_{iA} w wariancie 03-03-03, niż w wariancie 01-07-01 (tab. 5.18, por. poz. 10–12 z poz. 7–9). W badanych wariantach przegród temperatura na zewnętrznej powierzchni stalowej płyty B ($x = g$) nie przekraczała 290,5 K.

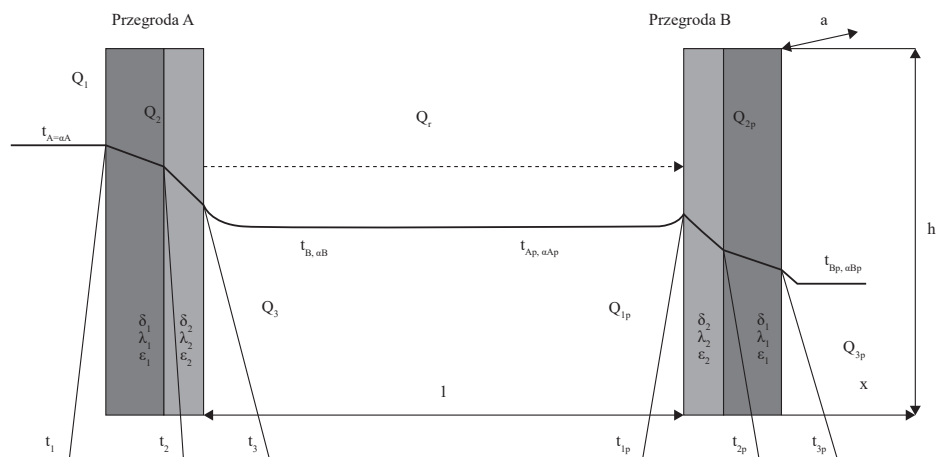
Tabela 5.18. Zestawienie współrzędnych x_i [m] dla 3 chwil czasu, w których temperatura $t(x, \tau) < t_{dop} = 320$ K

Poz.	Czas spełnienia warunku $t(x, \tau)$ < 320 K	Grubość całkowita g [m] i warianty przegród					
		0,06	0,08	0,10	0,10	0,12	0,14
		01-03-01	01-05-01	01-07-01	03-03-03	03-05-03	03-07-03
współrzędne x_i [m] odniesione do wymiaru $x = 0$							
1	po 1 godz.	0,044					
2	po 2 godz.	0,049					
3	po 3 godz.	0,052					
4	po 1 godz.		0,058				
5	po 2 godz.		0,067				
6	po 3 godz.		0,071				
7	po 1 godz.			0,071			
8	po 2 godz.			0,086			
9	po 3 godz.			0,089			
10	po 1 godz.				0,019	0,019	0,019
11	po 2 godz.				0,025	0,025	0,025
12	po 3 godz.				0,030	0,030	0,030

Źródło: opracowano na podstawie pracy [96].

Zwiększenie dokładności obliczeń modelu wymaga uwzględnienia temperaturowej zmienności cech termofizycznych substancji oraz modyfikacji przepływu ciepła w szczelinie i procedury odbioru ciepła po stronie chronionej [96].

Uprozczone obliczenia wartości temperatury po stronie nieekspozowanej przegrody, w sytuacji wystąpienia pożaru w układzie dwóch rozdzielonych przestrzeni powietrzną przegród, prowadzone były także z zastosowaniem modelu jednowymiarowego (rys. 5.19).



Rys. 5.19. Schemat układu dwóch przegród z dyslokacją do szacowania temperatury

Źródło: zrzut z ekranu [156].

Szacowanie temperatury t_{3p} na nieekspozowanej powierzchni obiektu ryzyka – przegrody podzielono na etapy określania jej wartości dla kolejnych procesów wymiany ciepła.

Dla modelu przyjęto następujące założenia upraszczające:

- rozkład wartości temperatury na ekspozowanej powierzchni przegrody A jest zgodny z krzywą przedstawioną na rys. 5.17,
- temperatura przy nieekspozowanej stronie przegrody B jest równa temperaturze otoczenia,
- znany jest współczynnik emisyjności.

W modelu otrzymaną wartość temperatury t_{3p} skonfrontowano z przyjętą w kryteriach oceny wartością graniczną. Jeżeli przekroczyła ona dopuszczalny poziom, to obliczenia kontynuowano przy większej odległości między przegrodami.

Obliczenia mogą być prowadzone dla kolejnych wartości temperatury określonej na eksponowanej powierzchni przegrody A, w przyjętych krokach czasowych w przedziale od 1 do 60 minut, jednakże przyjęto uproszczenie polegające na wykonaniu obliczeń dla kroku czasowego $\tau = 60$ min. Model wraz z szacunkowymi obliczeniami przedstawiono w publikacji [156]. Przykładowe otrzymane wyniki przedstawiono w tab. 5.19.

Tabela 5.19. Obliczone wartości temperatury dla przyjętego układu przegród z dyslokacją

Temperatura [°C]	Wartość przyjęta [°C]	Wartość obliczona [°C]
t_1	925	–
t_3	–	148
t_B	15	–
t_{Ap}	15	–
t_{3p}	–	19
t_{Bp}	15	–

Źródło: opracowano na podstawie pracy [156].

5.6. Podsumowanie

Model pożaru w wybranej siłowni okrętowej wymaga zidentyfikowania grup ryzyka powstania pożarów i opracowania scenariuszy pożarowych. Diagramy Ishikawy są one metodą, która pozwala określić przyczyny i skutki zagrożeń, przedstawić związki przyczynowo-skutkowe. Są one graficzną ilustracją jakościowej analizy ryzyka wywołującego zagrożenie – w rozpatrywanym wypadku pożaru w siłowni okrętowej.

Modelowanie pożaru w siłowni okrętowej miało na celu oszacowanie mocy pożaru, czasu jego trwania, zmian temperatury, rozprzestrzeniania się produktów spalania i zbadania innych parametrów w zależności od intencji badacza i wykorzystywanego narzędzia.

W celu rozpoznania możliwości modelowania pożaru w siłowni okrętowej wykorzystano środowiska PyroSim oraz SmokeView. Dla założonego scenariusza

pożaru kałuży paliwa otrzymano wizualizację zmian temperatury podczas pożaru i rozprzestrzeniania się produktów spalania.

W celu zbadania oceny skuteczności funkcjonowania przegród przeciwpożarowych zbudowano model w celu sprawdzenia zależności między grubością izolacji i odległością między przegrodami a ryzykiem rozprzestrzenienia się pożaru. Przeprowadzono badania symulacyjne.

Wskazano kierunki kolejnych badań, czyli modelowanie rozwoju i rozprzestrzeniania się pożaru w siłowni, przy zmiennych warunkach wentylacji oraz w zależności od ilości i rodzaju paliwa, oraz badanie możliwości zastosowania zabezpieczeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w celu ochrony obiektów zagrożonych w siłowni oraz poza nią.

Przyszłość podpowiada potrzebę kontynuowania badań skuteczności barier zapobiegających rozprzestrzenianiu się pożaru.

6. ROLA CZYNNIKA LUDZKIEGO W ZAGROŻENIU POŻAROWYM SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

6.1. Ergonomiczne determinanty bezpieczeństwa pożarowego

Bezpieczeństwo pożarowe w siłowni okrętowej determinowane jest przede wszystkim przez działania załogi. Błędy ludzkie są przyczyną większości zdarzeń niepożądanych. Trudne warunki pracy mają znaczny wpływ na zachowania załogi i powodować mogą zarówno błędne działania, jak i niepodjęcie odpowiednich czynności, co skutkować może zdarzeniami takimi, jak pożary.

Zarówno fizyczne, jak i psychiczne obciążenie pracą na statku są tematem prac prowadzonych przez Międzynarodową Organizację Morską [206] oraz Międzynarodową Organizację Pracy [207], które podejmują wiele inicjatyw na rzecz poprawy warunków pracy na morzu [208, 209]. Bezpieczeństwo pracy na statku regulowane jest przez międzynarodowe i krajowe prawodawstwo [73, 74, 210–215], a związane z tym problemy były badane przez Kubacką [204] i Milan [205]. Tematyka poruszana była również przez autorkę w publikacjach [17, 18, 69, 70, 112].

Do czynników pogarszających efektywność, bezpieczeństwo i komfort personelu w siłowni okrętowej należą przede wszystkim hałas, temperatura i wibracje, ale także wilgotność, oświetlenie, zanieczyszczenie powietrza, niedostosowanie stanowiska pracy do wykonywanych czynności oraz czynniki specyficzne dla środowiska okrętowego, takie jak kołysanie statku, zmieniające się strefy czasowe i klimatyczne, izolacja rodzinna, społeczna i kulturowa, specyfika organizacji pracy i hierarchii, inna dieta. Organizację pracy określają czas pracy, przerwy na odpoczynek, praca zmianowa, dostosowanie lub niedostosowanie zakresu obowiązków. Czynniki psychologiczne ważne dla procesu pracy to monotonia, monotypia i wysoki poziom stresu.

Ergonomiczne determinanty mają znaczenie nie tylko dla bezpieczeństwa i komfortu pracy, ale rozpatrywane są także w kontekście bezpieczeństwa pożarowego, np. niewłaściwe izolowanie czy ekranowanie wpływa znacznie nie tylko na pogorszenie komfortu pracy, ale stanowi także poważne zagrożenie pożarowe w wyniku kontaktu paliwa z gorącą powierzchnią. Niedoświetlenie jest nie tylko niedogodnością podczas pracy, ale może przyczyniać się także do zwiększenia ry-

zyka niezauważenia wycieku paliwa czy oleju, a tym samym do niepodjęcia działań prewencyjnych, mających na celu niedopuszczenie do jego zapłonu.

Zmęczenie, brak snu i brak możliwości kompensacji obciążeń, a także monotonia, monotypia, izolacja społeczna w dużym stopniu mogą przyczyniać się do niewłaściwych praktyk albo do zaniedbania obowiązków np. podczas inspekcji izolacji, mechanizmów. Monotonia często powoduje mechanicznie wykonywanie czynności, skutkujące niezauważeniem nieprawidłowej pracy mechanizmów, złego stanu instalacji. Tzw. czujność zostaje uśpiona, a codzienne czynności, będące rutyną, w rzeczywistości polegają na mechanicznym odtwarzaniu ruchów, bez udziału świadomości.

Niewłaściwe, nieczytelne oznakowanie instalacji, utrudniony dostęp do miejsc potencjalnych wycieków paliwa, niedoświetlenie ich, nieutrzymanie czystości w siłowni, zbyt duża liczba sygnałów wymagających podjęcia działań w tym samym czasie (np. podczas alarmów), ale także zmęczenie, złe nawyki, zaniedbania to tylko niektóre z czynników zwiększających ryzyko powstania pożaru w siłowni okrętowej.

6.2. Diagnoza ergonomiczna obciążeń operatorów siłowni okrętowych

W celu określenia stopnia osiągnięcia poziomu wymaganej jakości ergonomicznej przeprowadzono diagnozę wybranych stanowisk pracy w siłowni okrętowej. Wyniki badań wykorzystano do określenia obciążeń fizycznych i psychicznych członków załogi oraz korelacji pomiędzy ergonomicznością siłowni a jej bezpieczeństwem pożarowym [17, 18, 69, 70, 112].

Badania obciążeń fizycznych i psychicznych przeprowadzono wśród członków załogi maszynowej masowca zbudowanego w latach 90 ub.w., o pojemności DWT 11 848, długości 149 m, maksymalnym zanurzeniu 23 m i prędkości 6,2–6,8 w.

Do badań zastosowano metodę ekspercką. Wybór członków załogi poddanych badaniom wynikał z ich kompetencji udokumentowanych uprawnieniami do wykonywania aktualnie powierzonych funkcji i pracy na wybranym statku od co najmniej dwóch lat.

Członków załogi maszynowej poproszono o odpowiedzi na pytania z listy pytań kontrolnych (z listy dortmundzkiej dostosowanej do specyfiki stanowisk pracy). Pytania zgrupowano na podstawie: stanowiska pracy, metody pracy oraz obciążenia środowiskowego. Odpowiedzi operatorów były bardzo zbliżone; w większości takie same. Wyniki prowadzonej diagnozy, wskazujące na problemy występujące w miejscu pracy, przedstawiono w tab. 6.1–6.3.

Tabela 6.1 zawiera zagadnienia dotyczące stanowiska pracy: obciążenia fizyczne, psychiczne oraz problemy związane z odczytem wielkości i urządzeniami sterowania.

Tabela 6.1. Obciążenia wynikające ze specyfiki miejsca pracy

Obciążenia fizyczne	Obciążenia psychiczne	Problemy związane z odczytem wielkości i urządzeniami sterowania
– warsztat i magazynki nie są wystarczająco przestronne, a brak miejsca jest spowodowany głównie zajmowaniem miejsca przez innych pracowników, wykonujących w tym samym czasie przypisane im obowiązki – w siłowni rozmieszczenie przyrządów, przedmiotów pracy i urządzeń uniemożliwia przyjęcie prawidłowej pozycji w pracy. Wysokość płaszczyzny, na której są wykonywane czynności nie jest dostosowana do pozycji zajmowanej podczas pracy i odległości od oczu – powierzchnia przycisków jest zbyt gładka – nie ma odpowiednich podpórek i krzeseł zapobiegających konieczności stania – krzesła w CMK są nieodpowiednie pod względem obciążenia – długość narzędzi często nie zapewnia zmniejszenia czy uniknięcia skutków drżenia ręki przy pracach precyzyjnych – konstrukcja maszyn nie pozwala na dobrą konserwację i remonty – istnieje niebezpieczeństwo oparzeń – praca wymaga używania sprzętu ochrony osobistej, który upośledza odbiór informacji i utrudnia pracę – maszyny są źródłem odczuwalnych drgań wpływających na wykonywanie pracy. Niedogodności spowodowane są zarówno stałą, jak i okresową wibracją	– praca wymaga intensywnego zaangażowania narządu wzroku przy sztucznym oświetleniu, ocenianym na poziomie dostatecznym/ dobrym Istnieje możliwość odbioru olśnienia na stanowisku pracy – praca wymaga intensywnego zaangażowania narządu słuchu. Rodzaje sygnału są różne, a możliwości porozumienia się mową – ograniczone. Trudno jest oddzielić sygnały pod względem poziomu głośności – praca wymaga zaangażowania zmysłu dotyku (np. podczas sprawdzania, czy łożyska się nie przegrzewają), węchu	– w pracy stosowane są urządzenia sygnalizacyjne, wyświetlacze cyfrowe, a ich umiejscowienie nie jest właściwe dla pozycji siedzącej, zasięgu ramion, kąta patrzenia – opóźnienie wskazań w stosunku do zmian w układzie nie jest zmniejszone do granic możliwości

Tabela 6.2 zawiera diagnozę obciążeń zależnych od sposobu wykonywania pracy. Podzielono je na obciążenia fizyczne i psychiczne. Liczba obciążeń psychicznych znacznie przewyższa liczbę obciążeń fizycznych.

Tabela 6.3 zawiera informacje dotyczące wpływu zakłóceń zewnętrznych, środowiskowych pracy na statku; uwzględniono oddziaływanie promieniowania cieplnego, wilgotności, wentylacji, wibroakustyczne oraz inne szkodliwe czynniki.

Badania ergonomiczne stanowisk pracy wykazały, że poziom hałasu w rejonie silnika głównego wynosi 104–108 dB, przy wartości dopuszczalnej wynoszącej

110 dB. Podobne wartości pomiarów zanotowano przy zespołach prądotwórczych, nico niższe – w otoczeniu kotłów. Znacznie niższy poziom hałasu (około 70 dB) w siłowni okrętowej odnotowano jedynie w CMK (przy dopuszczalnej wartości 75dB) [216].

Tabela 6.2. Obciążenia wynikające ze sposobu wykonywania pracy

Zdiagnozowane obciążenie fizyczne	Zdiagnozowane obciążenia psychiczne
– praca wymaga wysiłku fizycznego, okresowo, średnio raz na miesiąc bardzo dużego – praca jest wykonywana w wielu pozycjach, w tym w wymuszonych w różnych przedziałach czasu – często ciężary muszą być podnoszone z poziomu podłogi, co wiąże się z koniecznością ich podnoszenia i dźwigania w przedziale od 5 do 50 kg – drogi nie zawsze są wolne od przeszkód – obciążenie jest zazwyczaj statyczne, dotyczy wielu grup mięśniowych – często pozycja pracy nie jest prawidłowa i nie można jej korygować – praca nie zapewnia właściwej przemienności wysiłku i odpoczynku – ruchy nie są zazwyczaj symetryczne, ani rytmiczne, nie można uniknąć gwałtownych zmian kierunku ruchu, a czynności nie są stereotypowe	– czasami praca wymaga dużej dokładności ruchów – czasami przed podjęciem czynności muszą być przetworzone dane – czasami konieczne jest użycie tabel, list i porównywanie danych, także w obcych językach; konieczna jest ocena danych – części, które mają być montowane nie są dostarczane w kolejności montażu, a ich pasowanie i montaż wymagają czasu – pomylenie sygnałów może mieć poważne konsekwencje, sygnały nie zawsze oznaczają to samo – praca nie jest dostosowana do osób starszych – ilość informacji przeciąża wydolność umysłową pracownika – czasami system przekazywania informacji jest zbyt szczegółowy – ważna informacja musi być pamiętana dłużej niż kilka sekund – czasami napięcie uwagi trwa dłużej niż 20 minut (alarmy włączają się jeden po drugim) – jest możliwe, aby sygnały z różnych źródeł pojawiały się jednocześnie – podczas awarii zdarza się, że informacja, która powinna być odebrana „jednym rzutem oka”, składa się z więcej niż pięciu pojedynczych elementów – pracownik nie może być natychmiast poinformowany o skutkach złego wyboru odpowiedzi na sygnał, co może mieć poważne konsekwencje – zdarzają się wprowadzające w błąd czynniki, które mogą powodować błędy, np. niedokładny odczyt czy niezrozumienie informacji w obcym języku – raczej nie ma możliwości szybkiego sprzężenia zwrotnego między ruchem korygującym a obsługiwanym układem

Analizując kompleksowo specyfikę wykonywanych obowiązków, ustalono, iż jest ona 6-zmianowa (zmienna); tygodniowo jest to 40 godzin pracy plus 20 nadgodzin. Podczas pracy przewidziano dwie przerwy po 15 minut (o godz. 10.00 i o godz. 15.00) oraz przerwę obiadową (od godz. 12 do godz. 13.00). Rytm pracy nie pozwala na przerwy wypoczynkowe dowolne, a tempo pracy jest wymuszone. Pracownik jest zmuszony dostosować się do maszyny.

Tabela 6.3. Obciążenia generowane przez środowisko pracy na statku

Oddziaływanie klimatyczne	Oddziaływanie wibroakustyczne	Oddziaływania inne szkodliwe
– praca odbywa się w bardzo niekomfortowych warunkach cieplnych ze względu na wysoką temperaturę, wilgotność, ruch powietrza oraz promieniowanie ciepłe – praca jest wykonywana w skrajnych temperaturach, a przerwy nie są do niej dostosowane – wentylacja nie gwarantuje utrzymania stałej temperatury – temperatura otoczenia: 5–50 °C – wilgotność w zakresie: 50–95% – występuje promieniowanie ciepłe, będące przyczyną nadmiernego przegrzania – miejsce pracy znajduje się w pobliżu gorących powierzchni – efekt chłodzący powietrza jest nieprzyjemny – środki zapobiegawcze przeciw niekomfortowym warunkom pracy przeszkadzają w niej – człowiek jest narażony na gwałtowne zmiany warunków klimatycznych, które są wynikiem pracy	– hałas jest przykry i wpływa na pracę – istnieje ryzyko uszkodzenia słuchu przez hałas o dużym poziomie głośności i widmie – wysokość dźwięków jest zmienna – hałas powodowany jest przez maszyny pomimo stosowania materiałów izolacyjnych i pochłaniających – hałaśliwe maszyny użytkowane są bezpośrednio przy pracowniku	– wskutek pracy występuje narażenie na czynniki chemiczne, szkodliwe i pyły (np. węglowodory aromatyczne z paliw, środki chemiczne do mycia filtrów, przeładunki ładunków niebezpiecznych). Są one nieprzyjemne i zagrażają zdrowiu pracownika, dlatego konieczne jest stosowanie technicznych środków zabezpieczających i środków ochrony osobistej

Rozpoznano obciążenia ruchowe z powodu pracy fizycznej w granicach od umiarkowanej do ciężkiej. Tętno podczas pracy wynosi od 90 do 110 uderzeń na minutę, a oddech – 15–30 na minutę. W strefie tropikalnej praca jest powodem ciągłego pocenia się. Praca jest odpowiednia dla mężczyzny. Samoocena obciążeń dokonana przez załogę wykazała, iż obciążenie fizyczne określane jest jako średnie, zaś psychiczne – jako ciężkie. Obciążenie środowiskowe zostało określone jako ciężkie, a organizacyjne – jako lekkie. Obciążenia obniżają wydajność ze względu na konieczność jednoczesnego wykonywania czynności lub zbyt ciężkiego mieszanego stresu. Nie jest prowadzona analiza wydajności pracy i błędów. Wskazana jest zmiana opracowania konstrukcyjnego wyrobów, norm produkcyjnych z uwagi na wymaganą dokładność ruchów, niezbędną siłę oraz łatwość dostępu do stanowisk pracy w transporcie, produkcji i czynnościach konserwacyjno-remontowych.

Analiza ergonomiczna stanowiska pracy operatora siłowni okrętowej wykazała wiele obciążeń zarówno fizycznych, jak i psychicznych, na których oddziaływanie narażeni są członkowie załogi. Przede wszystkim jest to bardzo wysoki poziom hałasu (ponad 100 dB), drgania oraz temperatura w przedziałach od 5°C do 50°C. Mechanicy narażeni są również na oddziaływanie szkodliwych substancji chemicznych (aromatycznych węglowodorów) i pyłów.

Praca w odzieży ochronnej bardzo często wymaga przyjęcia wymuszonej pozycji, co skutkuje dolegliwościami układu szkieletowo-mięśniowego oraz innych.

Podczas badania operatorzy ocenili pracę:

- ze względu na obciążenia fizyczne – jako średnią,
- ze względu na obciążenia psychiczne – jako ciężką,
- biorąc pod uwagę oddziaływanie środowiska pracy – jako ciężką,
- uwzględniając organizację pracy – jako lekką [17, 18, 69, 70, 112].

Specyfika i organizacja pracy, warunki eksploatacji urządzeń, ograniczona przestrzeń na statku, wpływ warunków hydrometeorologicznych są czynnikami, których wpływu nie da się wyeliminować. W mniejszym czy większym stopniu będą one generować obciążenia fizyczne i psychiczne, na które narażona jest załoga siłowni okrętowych. Należy tak zaprojektować przestrzeń i organizację pracy, aby w możliwie racjonalny sposób zminimalizować negatywny wpływ tych i innych opisanych czynników.

Podatność remontowa siłowni również w dużym stopniu warunkuje utrzymanie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego [18]. Zauważono, iż utrudnienia występują przede wszystkim wówczas, gdy naprawa czy wymiana pojedynczych części jest niemożliwa bez demontażu złożonych elementów urządzeń siłowni oraz gdy nie ma miejsca na składowanie demontowanych lub zapasowych części. Odkładanie ich na drogach komunikacji, w pobliżu miejsc o podwyższonym ryzyku pożaru, generuje zagrożenia. Kompensacja prac prowadzonych równocześnie przez kilka zespołów roboczych może prowadzić do tego, że wykonywane są w bliskim sąsiedztwie prace pożarowo niebezpieczne, np. prace w obrębie instalacji paliwowej i spawanie.

W siłowni występuje często konieczność demontażu innych elementów jej wyposażenia, np. sekcji rurociągów, które nie podlegają remontowi, a uniemożliwiają demontaż elementów remontowanych silników. Demontaż rurociągów może prowadzić do wycieków substancji palnych [18].

Właściwości ergonomiczne wpływające na bezpieczeństwo pożarowe siłowni okrętowej kształtowane są na etapie projektu technicznego statku. Ustala się wtedy rozmieszczenie obiektów ryzyka, takich jak przewody paliwowe i gorące powierzchnie silnika oraz projektuje się je tak, by były łatwo dostępne dla załogi w warunkach codziennej eksploatacji i podczas zdarzeń takich jak pożar. Projektuje się izolacje termiczne, co ma znaczenia zarówno dla bezpieczeństwa pożarowego, jak i bezpieczeństwa oraz komfortu pracy załogi.

W fazie eksploatacji szczególnie istotne jest zachowanie czystości, co ważne jest z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy – siłownia bez resztek paliw, olejów oznacza niskie prawdopodobieństwo poślizgnięcia się, upadku, ale także eliminację materiału palnego.

Podczas prac remontowych w siłowni należy zapewnić dostęp do maszyn i urządzeń, zaplanować miejsca składowania i drogi transportu części zapasowych, maszyn i urządzeń oraz koordynować prace zespołów roboczych, tak by wyeliminować możliwość powstania pożaru związaną z prowadzeniem prac pożarowo niebezpiecznych.

6.3. Ocena poziomu stresu jako czynnika wpływającego na bezpieczeństwo pożarowe

Czynnikiem w znacznym stopniu przyczyniającym się do utrzymania akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa na statku jest stres. Podczas rejsu morskiego jego skutki odczuwalne są przez każdego z członków załogi, jednakże u kadry kierowniczej statku potęgowane są odpowiedzialnością za bezpieczeństwo podległych pracowników, statek i przewożony ładunek.

W badaniach [217], obejmujących grupy zawodowe mężczyzn 85 kapitanów i 85 starszych mechaników okrętowych zatrudnionych w przedsiębiorstwie Polska Żegluga Morska, wykazano źródła stresu i poddano ocenie jego nasilenie. Zidentyfikowane źródła stresu i jego natężenie określono na podstawie kwestionariusza testu poziomu stresu.

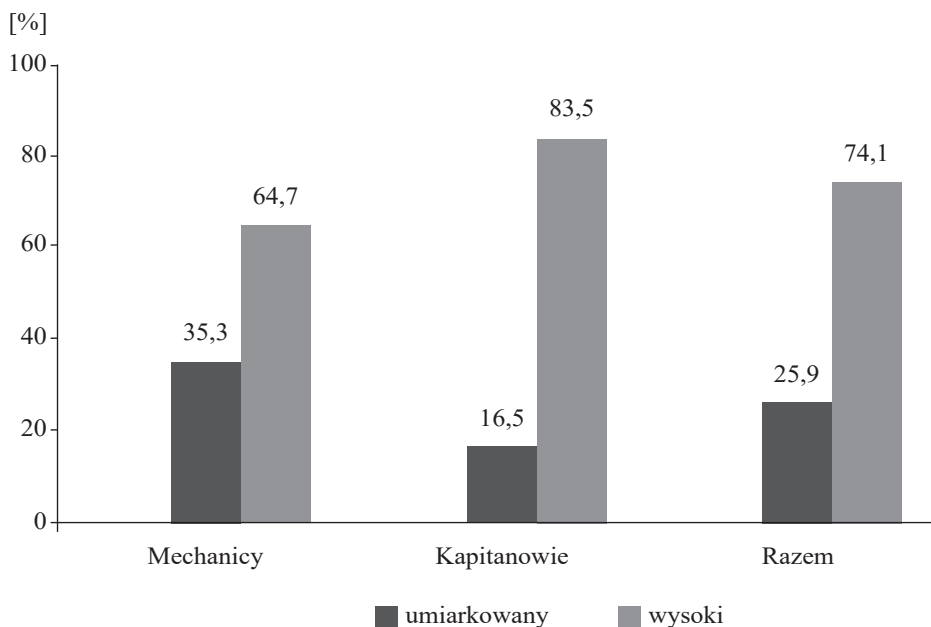
W grupie starszych mechaników jako największe źródło stresu wskazano odpowiedzialność za ludzi, ale także obciążenie ilością pracy, konflikt roli oraz obciążenie jakością pracy. Jako najmniej istotną wskazano dwuznaczność odgrywanej roli. W grupie kapitanów największymi źródłami stresu były odpowiedzialność za załogę, konflikt roli, obciążenie ilością pracy oraz obciążenie jakością pracy. Kariera oceniona została jako najmniej istotne źródło stresu.

Większość badanych uzyskała wyniki wskazujące na wysoki poziom stresu, którego źródłem może być odpowiedzialność za ludzi – 126 osób (74,1%). Wśród starszych mechaników było to odpowiednio 55 osób (64,7%), wśród kapitanów – 71 osób (83,5%). Rozkład poziomu stresu przedstawiono na rys. 6.1.

W pracy podjęto także próbę sprawdzenia, czy źródła stresu zróżnicowane są poprzez zmienne, do których zaliczono: wiek (grupy wiekowe), staż pracy (grupy stażowe), stan cywilny, posiadanie dzieci i miejsce zamieszkania (zameldowania). Dla każdej ze zmiennych wyznaczono rozkład średnich wartości źródeł stresu.

Na podstawie badań stwierdzono, iż natężenie źródła stresu uzależnione jest przede wszystkim od wieku i stażu pracy. Konflikt roli, obciążenie ilością i jakością pracy to czynniki, które generują umiarkowany poziom stresu. Nie stanowią one dla kapitanów i starszych mechaników przeszkody w wykonywaniu powierzonych im

obowiązków służbowych. Liczba dzieci, stan cywilny, miejsce zamieszkania nie są źródłem stresu i nie mają wpływu na wykonywane czynności zawodowe.



Rys. 6.1. Poziom stresu generowanego przez odpowiedzialność za załogę w badanych grupach

Źródło: opracowano na podstawie pracy [217].

6.4. Zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym w siłowni okrętowej

6.4.1. Funkcyjne i formalnoprawne aspekty zarządzania bezpieczeństwem pożarowym w siłowni okrętowej

System zarządzania jest sformalizowanym systemem do ustalenia polityki i celów oraz osiągnięcia tych celów poprzez wprowadzenie ulepszeń w organizacji. Można zdefiniować go jako uporządkowany sposób postępowania, egzekwowany przez kierownictwo, mający na celu zrozumienie i prowadzenie pożądanych czynności w celu zmniejszenia ryzyka, w tym ryzyka popełnienia błędu ludzkiego [2, 226, 227].

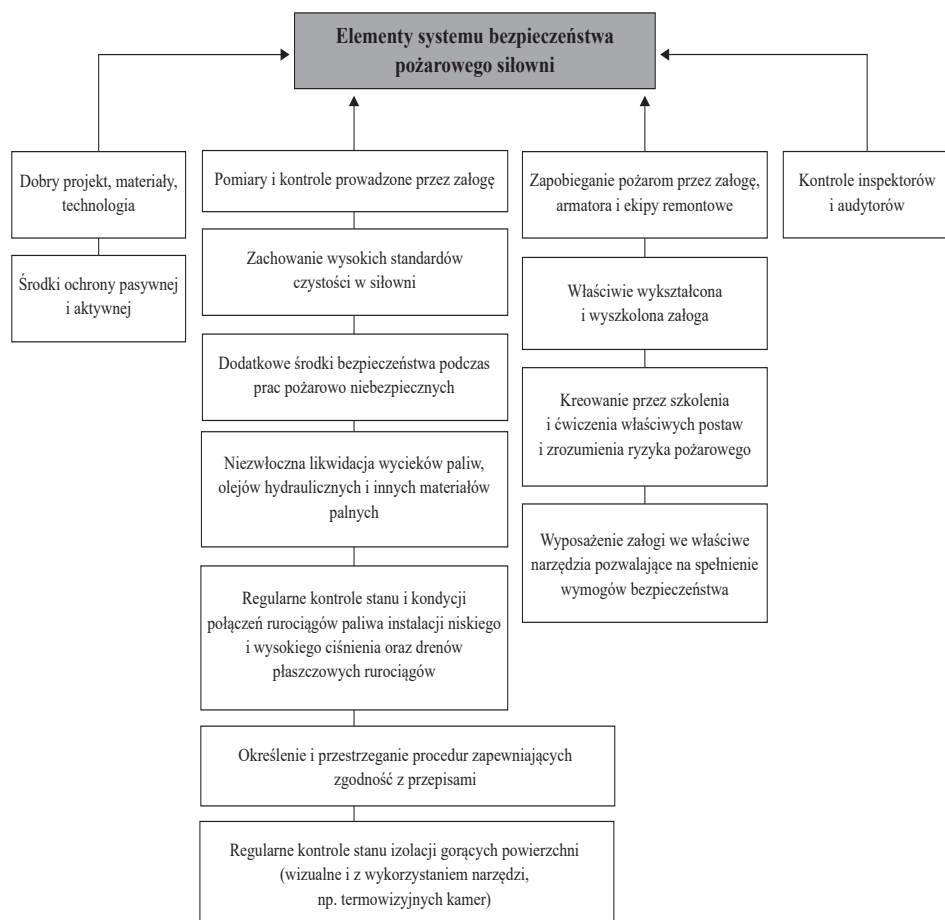
Zarządzanie bezpieczeństwem na statku ma na celu eliminację błędów ludzkich, które są główną przyczyną większości wypadków. Działania w tym zakresie prowadzone są na podstawie kodeksu ISM [73] i konwencji SOLAS [2]. Kodeks ISM przedstawia międzynarodową normę dotyczącą bezpiecznego zarządzania i eksploatacji statków oraz zapobiegania zanieczyszczaniu. Stosowanie kodeksu powinno wspierać rozwój kultury bezpieczeństwa w żegludze. Kodeks ISM jest pierwszym w historii żeglugi formalnym, obowiązkowym, standardem zarządzania bezpieczeństwem. Jego stworzenie miało na celu m.in. całkowitą lub przynajmniej częściową eliminację błędów ludzkich. Błędem tym zapobiega się poprzez opracowanie i wdrożenie w każdym przedsiębiorstwie żeglugowym i na statkach systemu zarządzania bezpieczeństwem (SZB) zgodnego z wymaganiami kodeksu. Za opracowanie, wdrożenie i utrzymanie systemu odpowiedzialny jest armator [226]. Istotnym dokumentem jest także konwencja STCW [74]. Jest to międzynarodowa konwencja o wymaganiach w zakresie wyszkolenia marynarzy, wydawania świadectw oraz pełnienia wacht. Szczegółowo określa zakres wiedzy i umiejętności, jakie powinien w procesie szkolenia nabyć marynarz, by zostać oficerem wachtowym lub oficerem mechanikiem [74].

Na statkach podstawowymi elementami systemu zarządzania bezpieczeństwem są:

- polityka bezpieczeństwa statku i załogi oraz ochrony środowiska prowadzona przez armatora,
- procedury i instrukcje postępowania dla różnych scenariuszy zdarzeń, w tym zagrożeń, zgodne z przepisami krajowymi i międzynarodowymi,
- dbałość o utrzymanie kompetencji i ustalenie kanałów komunikacji między pracownikami lądowymi a załogami statków oraz wewnątrz grup pracowniczych,
- procedury zgłaszania wypadków, zdarzeń i incydentów oraz wszelkich niezgodności przepisami, a także egzekwowanie zgłaszania zdarzeń.

Zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym siłowni okrętowej ma na celu wyeliminowanie czynnika ludzkiego jako przyczyny powstania pożaru. Osobami zaangażowanymi w zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym siłowni są, oprócz załogi, armator oraz klasyfikator, inspektorzy, ale również projektant i wykonawca. Zarządzanie powinno być realizowane na wszystkich etapach istnienia siłowni, tj. na etapie projektowania, podczas codziennej eksploatacji oraz w trakcie inspekcji wykonywanych przez uprawnione służby i towarzystwa.

Zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym na statku ma na celu przede wszystkim koordynację działań załogi w celu uniknięcia błędów ludzkich podczas eksploatacji oraz właściwe reagowanie w sytuacjach zagrożeń. Na rys. 6.2 przedstawiono elementy systemu zarządzania bezpieczeństwem pożarowym siłowni.



Rys. 6.2. Elementy systemu zarządzania bezpieczeństwem pożarowym siłowni

Podczas projektowania siłowni ważne jest właściwe rozlokowanie względem siebie obiektów ryzyka (potencjalnych źródeł zapłonu i materiałów palnych), podobnie jak wyposażenie siłowni w efektywne elementy zabezpieczeń konstrukcyjnych mających na celu ograniczenie rozprzestrzeniania się pożaru w siłowni i poza nią, wybór właściwych rozwiązań izolacji gorących powierzchni oraz właściwe zaprojektowanie i wykonanie instalacji gaśniczych, jak również dobór przenośnego sprzętu gaśniczego. Istotne jest także właściwe zaplanowanie przebiegu rurociągów, niestosowanie zbyt wielu i zbyt wygiętych połączeń elastycznych. Ponadto projektując siłownię, należy zapewnić członkom załogi możliwość dojścia do miejsc zwiększonego ryzyka powstania pożaru i innych zagrożeń na potrzeby inspekcji, przeglądów oraz remontów, a także właściwe doświetlić te dojścia.

W trakcie eksploatacji bezpieczeństwo pożarowe siłowni zależne jest od działań armatora. Jest on odpowiedzialny za zapewnienie właściwych materiałów eksploatacyjnych, planowanie remontów i przeglądów, ale również dobór załogi, która posiada właściwe wykształcenie i doświadczenie, a także zapewnienie jej bezpiecznych warunków pracy oraz wypoczynku.

Zarządzanie bezpieczeństwem to również planowanie alarmów ćwiczebnych dla różnych scenariuszy zagrożeń, egzekwowanie spełnienia wymagań dotyczących kursów i szkoleń w ośrodkach lądowych.

Klasyfikatorzy i inni inspektorzy odpowiedzialni są natomiast za kontrolę stanu siłowni okrętowej i spełnienie wszelkich wymagań formalnych przez załogę. Wraz z armatorem odpowiedzialni są za okresowe przeglądy i nadzór prac remontowych.

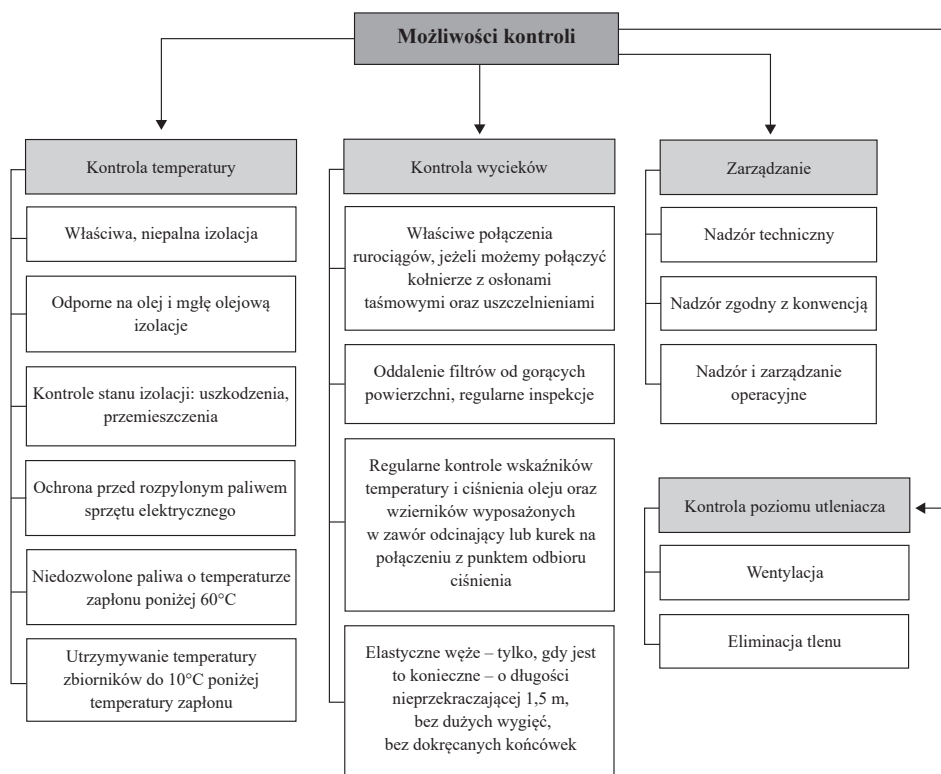
Zdecydowanie najważniejszym elementem w procesie zarządzania ryzykiem są jednak codzienne czynności wykonywane przez załogę siłowni okrętowej. Kontrole, przeglądy, remonty, pomiary, utrzymanie porządku, czystości i inne często żmudne zadania, ale wykonywane z należytą wiedzą, popartą doświadczeniem oraz starannością, w sposób istotny wpływają na utrzymanie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego siłowni.

Niewłaściwe wykonywanie, zaniedbanie czy zaniechanie wykonywania określonych czynności bezpośrednio przełożyć się może bowiem na zmniejszenie bądź zwiększenie poziomu bezpieczeństwa. Do najważniejszych czynności, wykonywanych przez załogę w zakresie ochrony przeciwpożarowej siłowni, zaliczyć należy kontrole szczelności instalacji paliwowych, a więc m.in. kontrole połączeń węży, innych połączeń, filtrów, lokalizację pękniętych przewodów, wykrywanie przecieków, kontrole stanu izolacji gorących powierzchni (oraz spełnienie wymagania ich zabezpieczenia i izolowania, jeżeli ich temperatura może przekraczać 220°C), kontrole urządzeń i instalacji na podstawie przyjętych wymagań przepisów i procedur. Załoga powinna również dbać o czystość siłowni, aby można było zauważyć najmniejsze nawet przecieki, które mogą stać się przyczyną powstania pożaru. Na bezpieczeństwo pożarowe siłowni mają wpływ także odpowiednie kwalifikacje i doświadczenie załogi oraz jej trzeźwość, a także wysokie standardy pracy.

Dodatkowe czynności, które mogą zostać wykonane w celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa pożarowego w siłowni, to np. malowanie na białą fragmentów instalacji, w przypadku których występuje ryzyko wycieku czy oznaczanie taśmami miejsc ryzyka w celu ich łatwiejszej identyfikacji i kontroli.

W celu zidentyfikowania wzajemnych powiązań między postępowaniem załogi a ryzykiem powstania pożaru stworzono schematy, których wykorzystanie może przyczynić się do ograniczenia, a nawet eliminacji błędów popełnianych przez za-

łogę jako przyczyn pożaru. Czynniki kontroli przyczyn powstania pożaru i jego rozwoju w siłowni podano na rys. 6.3 [27].



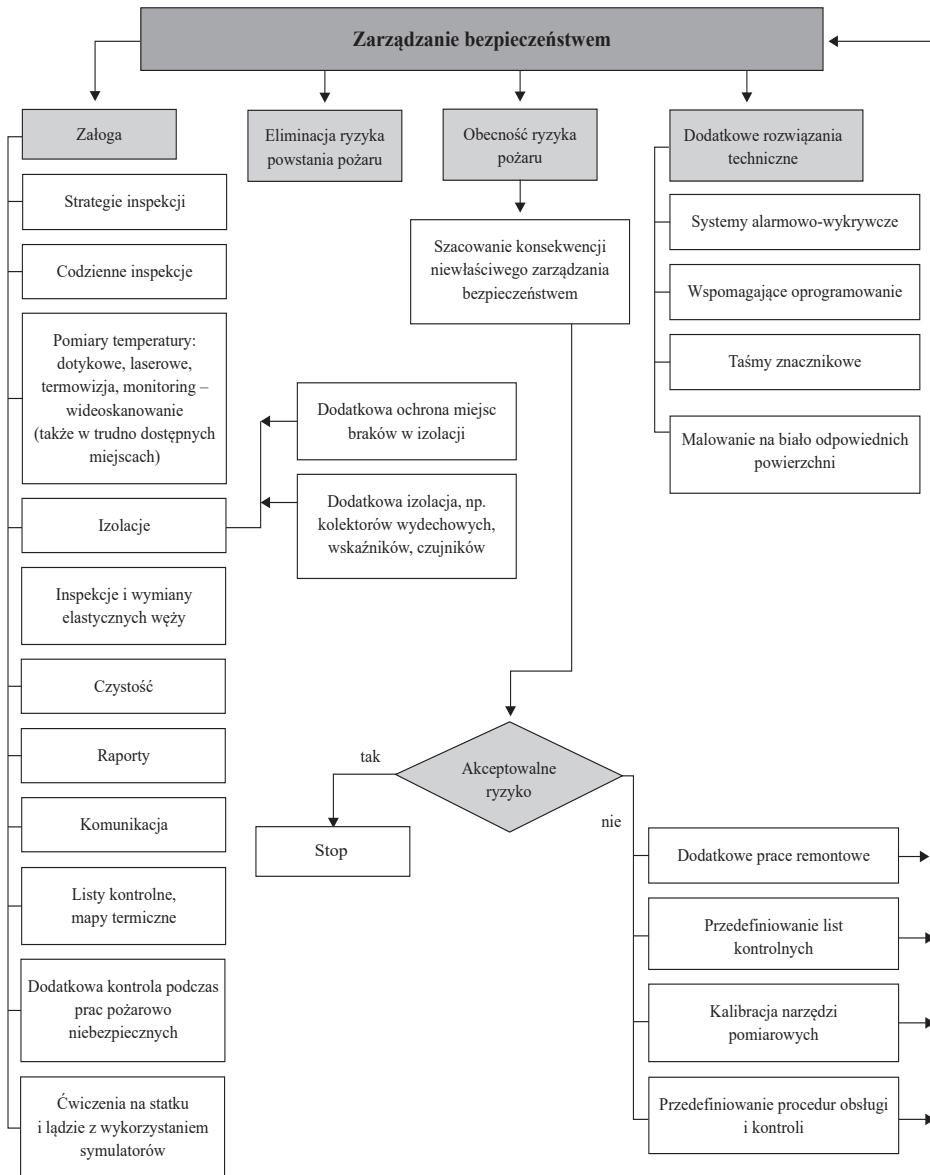
Rys. 6.3. Możliwości kontroli przyczyn powstania pożaru i jego rozwoju

Elementy zarządzania ryzykiem pożarowym w siłowni przedstawiono na rys. 6.4.

Analizy ze względu na swoją prostotę, wykorzystywane w postaci aplikacji w przenośnych urządzeniach, np. smartfonach, są stosowane przez załogę podczas oceny bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej.

W celu poprawienia efektywności działań prewencyjnych zarówno przez członków załogi, jak i inspektorów wykorzystywane są także listy kontrolne, które mają formę tabel zawierających wykaz miejsc, które należy poddać oględzinom. W tabelach znajdują się pola, w których należy umieścić notatkę o spełnieniu bądź niespełnieniu wymagań, i wskazany jest dokument, zgodnie z którym należy oceniać bezpieczeństwo.

Zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym w siłowni jest niezwykle istotnym procesem decydującym o uzyskaniu stopnia spełnienia wymagań satysfakcjonującego załogę i armatora.



Rys. 6.4. Składowe systemu zarządzania bezpieczeństwem

W codziennej eksploatacji zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym oparte powinno być przede wszystkim na przestrzeganiu przepisów i procedur. Powinny być one sformułowane w prosty sposób. Powinny być rozumiane przez załogę, która sama powinna dostrzegać potrzebę ich przestrzegania.

6.4.2. Błąd ludzki jako czynnik determinujący zagrożenie pożarowe

Prowadzone od wielu lat badania wykazują, iż błąd ludzki jest głównym powodem powstawania wypadków na statkach. W filozofii zarządzania ryzykiem popularne jest więc podejście „szukania ofiary ideologii”. Reason [218] proponuje inne podejście, w którym operatorzy postrzegani są nie jako główni sprawcy awarii czy katastrofy, a jako swego rodzaju ofiary awarii, które powstały wskutek złego projektu, wadliwych instalacji, wadliwej konserwacji i złych decyzji z zakresu zarządzania. Są oni ostatnim ogniwem łańcucha zdarzeń, który prowadzi do wystąpienia awarii [218]. Taki sposób myślenia pozwala na inne podejście do problemu ludzkiego błędu. Może być on z tej perspektywy postrzegany jako konsekwencja tzw. utajonych błędów [219–223], które mogą być wyeliminowane poprzez właściwe zarządzanie bezpieczeństwem.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony ludzi, środowiska i obiektów oraz sformalizowania zarządzania bezpieczeństwem w firmach żeglugowych IMO ustanowiła *Międzynarodowy kodeks zarządzania bezpieczeństwem* (ISM) [73], który obowiązuje na wszystkich rodzajach statków. Wskazuje on na odpowiedzialność w kontaktach między dowódcą statku a kierownictwem firmy, a także kładzie nacisk na zaangażowanie w zarządzanie administracji morskich. W pewnym sensie kodeks ISM jest narzędziem administracyjnym dla firm żeglugowych w zakresie organizacji bezpieczeństwa, obligatoryjnego wdrażania, certyfikacji i kontroli systemów bezpieczeństwa [218–222].

Zarządzanie bezpieczeństwem w specyficznym środowisku okrętowym, mające na celu eliminację błędów ludzkich na statku, jest procesem trudnym. Musi być ono modyfikowane w zależności od sytuacji i kształtowane poprzez interakcje ludzi [218–225].

Na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa ma wpływ też dostępność danych z wypadków. Jeżeli jednak członkowie załogi mają poczucie, że zgłoszone awarie i popełnione błędy prowadzić będą do dotkliwych konsekwencji albo jeżeli prowadzi się w firmie politykę nieujawniania zaistniałych zdarzeń, to tym samym tracone jest cenne źródło informacji. Identyfikowanie źródeł awarii, niewłaściwych schematów postępowania nie jest wtedy możliwe, a dostępne dane statystyczne nie są wiarygodne. Ludzkie błędy są i pewnie będą powszechne, a niewłaściwe podejście do błędów popełnianych przez załogę nie sprzyja budowaniu kultury bezpieczeństwa, „zamyka” załogę, uniemożliwiając podjęcie działań naprawczych na poziomie zarządzania [218–225].

Jednym z zagrożeń dla optymalnego zarządzania bezpieczeństwem na statku jest także tendencja do tworzenia zautomatyzowanych i zintegrowanych systemów bezpieczeństwa, z których czynnik ludzki został usunięty. Należy jednakże pamiętać o tym, że wówczas gdy ludzka działalność jest wykluczona z systemu (w celu uniknięcia błędów ludzkich), paradoksalnie jego funkcjonalność zostaje pozostawiona w rękach innego człowieka – projektanta systemu [218–225].

6.4.3. Kultura bezpieczeństwa w siłowni jako sposób ograniczenia zagrożenia pożarowego

Utrzymanie wysokiego stopnia bezpieczeństwa pożarowego w siłowni okrętowej wymaga akceptacji i postawy współodpowiedzialności członków załogi za to bezpieczeństwo. Budowanie kultury bezpieczeństwa na statkach morskich wymaga dobrego rozumienia relacji między członkami załogi oraz członkami załogi a obiektami technicznymi, z uwzględnieniem wpływu warunków hydrometeorologicznych.

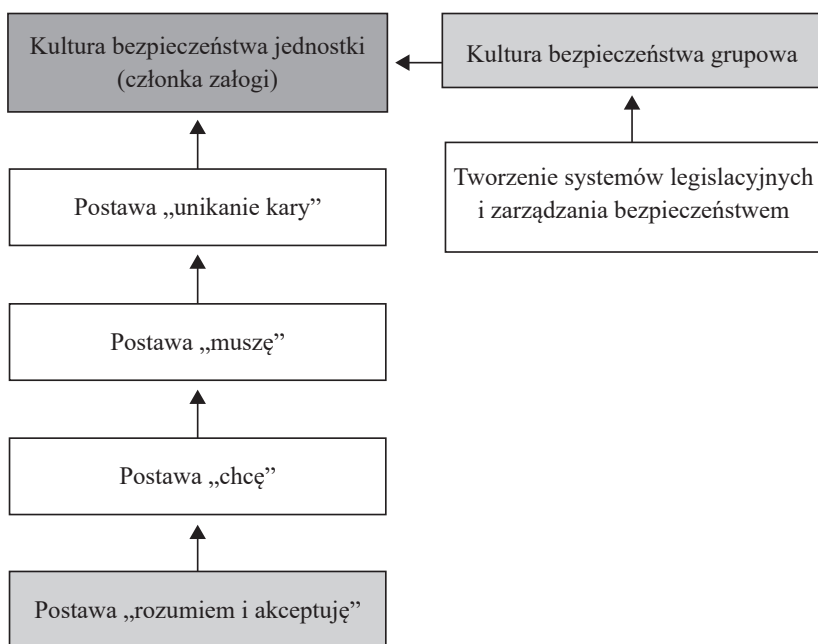
Kultura bezpieczeństwa w najprostszym ujęciu rozumiana jest jak zbiór indywidualnych i zbiorowych cech oraz postaw ludzkich. Jest ona wynikiem zachowań oraz stylu i jakości zarządzania bezpieczeństwem systemu statku morskiego [228, 229].

Kultura bezpieczeństwa musi być postrzegana jako działania jednostki oparte na zbiorze akceptowanych wzorców, przekonań i zasad, a także jako działania grupowe, które mają na celu tworzenie systemu zarządzania za pomocą procedur.

Celowość jej budowania może polegać na przyjęciu postawy unikania kary; przyjęciu postawy: muszę, wynikającej z konieczności wykonywania przez pracowników zadań ściśle według zasad i dokumentowania działań; przyjęciu postawy: chcę, w przypadku której pracownicy są partnerami w kształtowaniu poziomu bezpieczeństwa, chcą się angażować i mają realny wpływ na politykę w tym zakresie oraz w modelu najbardziej pożądanym; przyjęciu postawy: rozumiem i akceptuję, w przypadku której pracownicy w sposób naturalny i wynikający z wewnętrznego przekonania traktują zawsze kwestie bezpieczeństwa jako priorytetowe. Na rys. 6.5 przedstawiono kolejne stopnie budowania kultury bezpieczeństwa w systemie członków załogi – statek morski.

Celem budowania kultury bezpieczeństwa jest kształtowanie i modyfikacja zachowań, przekonań i postaw pracowników, tak by sami stali się odpowiedzialni za bezpieczeństwo swoje, współpracowników i obiektów technicznych.

W mniejszym czy większym stopniu większość wypadków da się przewidzieć. Istnieje jednak duże prawdopodobieństwo, że nie wydarzą się one, gdy każdej czynności towarzyszyć będzie myślenie o bezpieczeństwie jak o prioryecie.



Rys. 6.5. Budowanie kultury bezpieczeństwa w systemie członek załogi–statek morski

Źródło: opracowano na podstawie pracy [229].

Trudne, ale opłacalne będzie motywowanie członków załóg do takiego sposobu myślenia, który wynikać będzie z ich wewnętrznego przekonania, postaw, przy zapewnieniu przez kierownictwo dobrej atmosfery w stosunkach międzyludzkich. Nadmierny stres wynikający ze złych relacji może bowiem prowadzić do powstawania postaw buntu wobec przełożonych i izolacji poszczególnych członków załogi, skutkujących brakiem współpracy.

Sukcesem w budowaniu kultury bezpieczeństwa będzie zmniejszenie liczby popełnianych błędów, co skutkować będzie ograniczeniem wypadków i zdarzeń niepożądanych, w tym pożarów [17].

6.5. Podsumowanie

Siłownia okrętowa jest miejscem pracy, w którym panują trudne zmienne warunki pracy. Załoga zmuszona jest przebywać w hałasie. Narażona jest na oddziaływanie wysokiej temperatury oraz drgań. Praca wykonywana jest przy wymuszonych pozycjach ciała. Dodatkowy wpływ kołysania statku znacznie utrudnia wykonywanie

czynności. Podczas przeprowadzonej oceny ergonomicznej ujawniono wiele czynników negatywnie oddziałujących na pracownika. Zdiagnozowano także obciążenia psychiczne, które podczas pracy na morzu mają szczególne znaczenie.

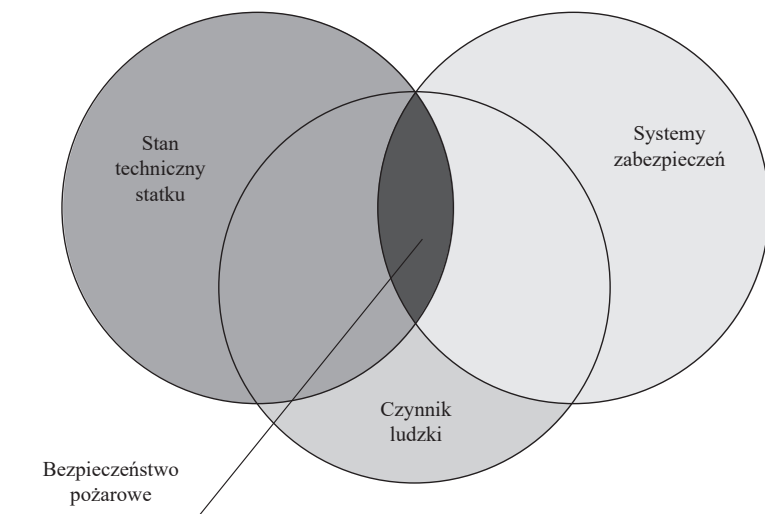
W celu zwiększenia bezpieczeństwa pożarowego w siłowni zaproponowano działania, w tym moduły zarządzania bezpieczeństwem, które mogą być narzędziami pomocnymi w codziennej eksploatacji statku, podczas remontów i inspekcji, a także na etapie projektowania. Zauważono także potrzebę budowania kultury bezpieczeństwa wśród członków załóg, tak by współodpowiedzialność za bezpieczeństwo była powszechnie akceptowaną postawą.

Istotne dla osiągnięcia pożądanego poziomu bezpieczeństwa pożarowego na statku jest także wyszkolenie załogi, przeprowadzone ćwiczenia i szkolenia – zarówno na morzu, jak i w ośrodkach lądowych, z wykorzystaniem symulatorów [230–232], które dają szansę na zwiększenie efektywności działań w sytuacjach zagrożenia, w warunkach rzeczywistych poprzez „przećwiczenie” scenariuszy.

7. METODY SZACOWANIA BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

7.1. Bezpieczeństwo pożarowe siłowni okrętowej jako rezultat oddziaływań w systemie człowiek–statek

Bezpieczeństwo pożarowe statków morskich jest opisywane niezawodnością funkcjonowania elementów systemu człowiek–obiekt techniczny, na który składają się maszyny i urządzenia przeznaczone do pełnienia funkcji realizowanych przez statek oraz systemy ich zabezpieczeń przez wystąpieniem pożaru (rys. 7.1). Parametry bezpieczeństwa pożarowego są częścią wspólną zbiorów parametrów opisujących stan techniczny obiektu, systemów zabezpieczeń oraz czynnik ludzki.



Rys. 7.1. Bezpieczeństwo pożarowe w systemie: stan techniczny statku–system zabezpieczeń–czynnik ludzki

Zależności między parametrami, charakteryzującymi bezpieczeństwo pożarowe, wynikają z przyjętych danych wejściowych, opisujących stan faktyczny badanego systemu. Wartości parametrów wynikają z przyjętych założeń dotyczących stanu technicznego obiektu oraz efektywności systemów zabezpieczeń, a także od jakości funkcjonowania człowieka w relacji z obiektami technicznymi i innymi ludźmi. Poszczególne parametry mają charakter mierzalny (np. temperatura) lub jak cechy, takie jak kondycja psychiczna człowieka, są trudno mierzalne i zmienne w czasie.

Bezpieczeństwo pożarowe siłowni statku przedstawione jest w postaci zależności:

$$\text{bezpieczeństwo pożarowe statku} = (\text{cechy obiektu technicznego} + \text{opis systemu zabezpieczeń} + \text{cechy człowieka} + \text{postępowanie człowieka}) \Delta \tau \quad (7.1)$$

Za cechy krytyczne opisujące obiekt techniczny, z punktu widzenia stwarzanego zagrożenia pożarowego siłowni, uznaje się: wielkość, ilość i lokalizację gorących powierzchni obiektów technicznych o temperaturze powyżej 220°C, wielkość, ilość i lokalizację rozszczelnień układu paliwowego i układu smarowania, miejsca iskrzenia, miejsca występowania otwartego ognia, stan izolacji burt, maszyn i urządzeń oraz rurociągów:

$$\text{obiekt techniczny} = \text{gorące powierzchnie} + \text{rozszczelnienia} + \text{miejsca iskrzenia} + \text{otwarty ogień} + \text{stan izolacji} \quad (7.2)$$

Za najistotniejsze parametry opisujące systemy zabezpieczeń uznaje się: sprawność działania systemów oraz adekwatność do spodziewanych zagrożeń.

$$\text{system zabezpieczeń} = \text{sprawność} + \text{adekwatność do spodziewanych zagrożeń} \quad (7.3)$$

Wybrane parametry opisujące cechy człowieka mające wpływ na bezpieczeństwo pożarowe siłowni to: wykształcenie, doświadczenie, znajomość procedur, kondycja fizyczna, kondycja psychiczna:

$$\text{cechy człowieka} = \text{wykształcenie} + \text{doświadczenie} + \text{kondycja fizyczna} + \text{kondycja psychiczna} \quad (7.4)$$

Parametry opisujące postępowanie człowieka to m.in.: poprawne działanie w odpowiedzi na uszkodzenie (zdarzenie inicjujące), czyli poprawna reakcja, która umożliwia bezpieczny przebieg procesu; błędne działanie człowieka, które wywołuje zdarzenie inicjujące; reakcja na zdarzenie inicjujące (błąd człowieka wywołuje awarię), reakcja na awarię (błąd człowieka wywołuje wypadek):

$$\text{postępowanie człowieka} = \text{poprawne działanie} + \text{błędne działanie} + \text{reakcja na zdarzenie inicjujące} + \text{reakcja na awarię} \quad (7.5)$$

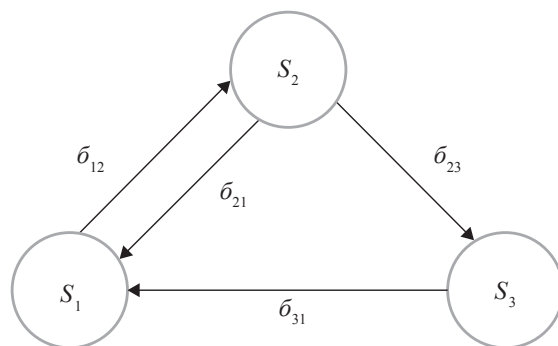
Charakterystyka bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej, jako rezultatu oddziaływań w systemie człowiek–statek, powinna zawierać opis techniczny parametrów obiektu, systemów zabezpieczeń, cech człowieka i popełnianych przez niego błędów.

7.2. Niezawodność obiektów technicznych i człowieka jako miara bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej

Niezawodność obiektów technicznych

Parametry opisujące obiekt techniczny i człowieka są zmienne w czasie i zależne od stanu technicznego obiektu i kondycji psychicznej człowieka oraz od nagle występujących bodźców skokowych związanych np. ze zmianą warunków hydrometeorologicznych. Na potrzeby prowadzonych symulacji przyjęto za czas eksploatacji, w którym prowadzono analizy, czas pełnienia wachty przez jedną obsadę – 4 godziny.

Miarą niezawodności obiektów technicznych, charakteryzującą zdolność do spełnienia wymagań, a więc do spełnienia stawianych im zadań, jest prawdopodobieństwo wykonania zadań, natomiast modelem niezawodnościowym jest model zmian stanów technicznych (rys. 7.2) [233].



Rys. 7.2. Model zmian stanów technicznych: S_1 – stan zdatności pełnej, S_2 – stan zdatności ograniczonej, S_3 – stan niezdatności, δ – intensywność przejścia między stanami

Źródło: opracowano na podstawie pracy [233].

Czas trwania stanu S_1 (do stwierdzenia zdatności ograniczonej – stan S_2) oraz czas trwania stanu S_2 (do czasu stwierdzenia stanu S_3) są zmiennymi losowymi, których rozkłady mogą być opisane rozkładem wykładniczym.

Czas powrotu do zdatności ograniczonej lub pełnej może być także opisany rozkładami wykładniczymi. Jeżeli jednak z powodu powtarzających się tych samych uszkodzeń, w tych samych warunkach, konieczne są naprawy, to czas ich wykonywania ma rozkład normalny [233].

Do opisu zmian stanów zdatności można ułożyć równania [233, 234] prawdopodobieństwa znajdowania się w ww. stanach.

$$P_1(\tau + \Delta\tau) = P_1(\tau)[1 - \delta_{12}\Delta\tau + o(\Delta\tau)] + P_2(\tau)[\delta_{21}\Delta\tau + o(\Delta\tau)] + P_3(\tau)[\delta_{31}\Delta\tau + o(\Delta\tau)] \quad (7.6)$$

$$P_2(\tau + \Delta\tau) = P_1(\tau)[\delta_{12}\Delta\tau + o(\Delta\tau)] + P_2(\tau)[(1 - (\delta_{21} - \delta_{23})\Delta\tau + o(\Delta\tau))] \quad (7.7)$$

$$P_3(\tau + \Delta\tau) = P_2(\tau)[\delta_{23}\Delta\tau + o(\Delta\tau)] + P_3(\tau)[(1 - \delta_{31}\Delta\tau + o(\Delta\tau))] \quad (7.8)$$

Jeżeli użytkownik zakłada, że obiekt eksploatowany może być tylko w stanie pełnej zdatności, niezawodność określana jest wzorem:

$$R_1(\tau) = P_1(\tau) \quad (7.9)$$

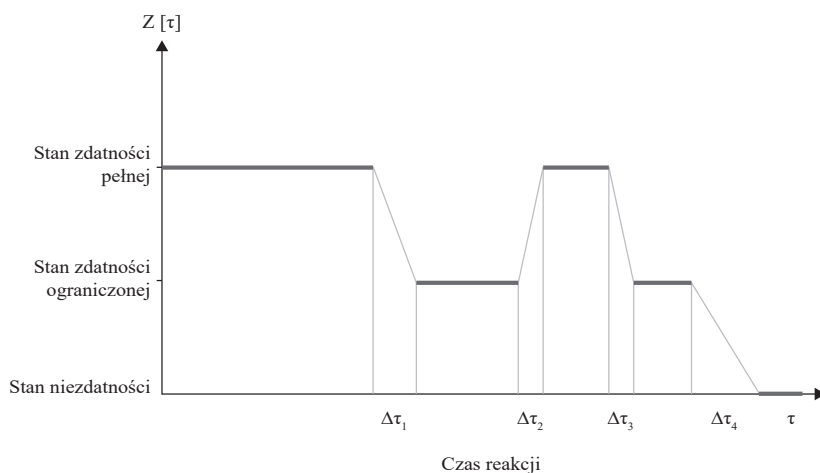
Jeżeli użytkownik zakłada, że obiekt może być eksploatowany w stanie zdatności częściowej, to jego niezawodność określona jest wzorem:

$$R_{1,2}(\tau) = P_1(\tau) + P_2(\tau) \quad (7.10)$$

Na potrzeby oceny niezawodności elementów układu energetycznego siłowni okrętowej i decydujących o poziomie bezpieczeństwa pożarowego obie zależności są poprawne. Dąży się do utrzymania obiektów technicznych w stanie pełnej zdatności, co równoznaczne jest z brakiem możliwości wystąpienia pożaru zależnego do czynnika technicznego. Przebywanie obiektu/ obiektów w stanie zdatności ograniczonej traktuje się jako czas, w którym może wystąpić pożar i dąży się do jego ograniczenia oraz prowadzi się wzmożony nadzór i dozór obiektów.

Zmienności parametrów w procesie funkcjonowania systemu nie da się dokładnie określić. Można jedynie szacować, które ze zdarzeń są najbardziej prawdopodobne. Stan bezpieczny – stan zdatności pełnej będzie okresowo przechodził w stan zagrożenia pożarem – stan zdatności ograniczonej, a przy odpowiednich warunkach – w stan utraty bezpieczeństwa pożarowego – stan niezdatności, z którego będzie lub nie będzie możliwy powrót do stanu bezpieczeństwa. Możliwości zmian stanów zdatności ilustruje rys. 7.3 wykonany na podstawie literatury [235].

Utrzymanie stanu bezpieczeństwa w siłowni okrętowej zależne jest przede wszystkim od działań prewencyjnych załogi maszynowej, polegających na niedopuszczeniu do wystąpienia czynników mogących powodować wystąpienie zagrożenia.



Rys. 7.3. Możliwości wystąpienia różnych stanów zdatości podczas eksploatacji obiektu

Źródło: opracowano na podstawie pracy [235].

Ze względu na dynamikę rozwoju pożaru w siłowni, na przejście ze stanu zagrożenia do stanu utraty bezpieczeństwa, ma wpływ przede wszystkim czas reakcji systemów zabezpieczeń (instalacji detekcji i gaśniczych) oraz człowieka (członka załogi maszynowej i oficera wachtowego), którego efektywność działania określana jest niezawodnością człowieka.

Niezawodność człowieka

Niezawodność człowieka jest wyrażona funkcją sprawności, opisującą prawdopodobieństwo działania człowieka bez błędu. Błąd człowieka traktowany jest jako zdarzenie losowe występujące w sposób przypadkowy w czasie jednej wachty [236].

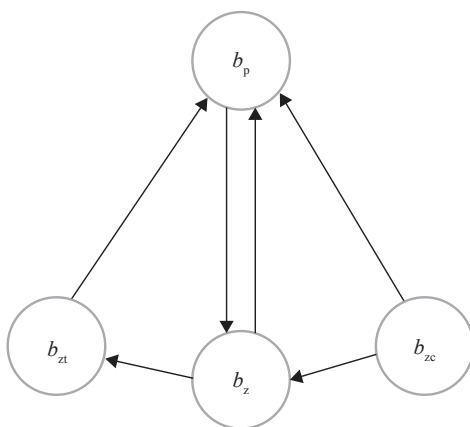
Funkcja sprawności i funkcja intensywności błędów [236] mają różną postać, w zależności wielu zmiennych, przede wszystkim od doświadczenia i wyszkolenia członka załogi oraz od jego stanu psychofizycznego. Jeżeli kwalifikacje danej osoby są wysokie i jeżeli jest ona wypoczęta i zdrowa, to błędy początkowe nie będą występować; będą pojawiać się natomiast pod koniec pełnienia wachty jako wynik narastającego zmęczenia.

Jeżeli osoba będzie posiadała niskie kwalifikacje, to pomimo faktu, iż będzie wypoczęta i zdrowa, w początkowym okresie będzie również popełniać błędy.

Prawdopodobieństwo działania człowieka bez błędu równoznaczne jest z niewystąpieniem pożaru spowodowanego błędem ludzkim. Zwiększenie poziomu

prawdopodobieństwa działania człowieka bez błędu jest możliwe dzięki podniesieniu poziomu jego kwalifikacji i dzięki właściwej organizacji miejsca i czasu pracy, a także stworzeniu możliwości kompensacji zmęczenia.

Korelacja między niezawodnością człowieka i obiektów technicznych a bezpieczeństwem przedstawiono w postaci grafu bezpieczeństwa (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Graf bezpieczeństwa zależności między stanem bezpieczeństwa, zagrożeniem bezpieczeństwa, stanem niezawodności technicznej i człowieka: b_p – stan bezpieczeństwa, b_z – stan zagrożenia bezpieczeństwa, b_{zt} – stan niezawodności technicznej, b_{zc} – stan niezawodności człowieka

Źródło: opracowano na podstawie pracy [237].

7.3. Zarządzanie ryzykiem powstania pożaru w siłowni okrętowej

Analiza i ocena ryzyka prowadzone są zgodnie ze schematem, który zawiera:

- zdefiniowanie zakresu analizy,
- opis systemu i procesu eksploatacji,
- identyfikację zagrożeń,
- identyfikację i wybór zdarzeń inicjujących,
- określenie potencjalnych scenariuszy wydarzeń,
- oszacowanie częstości występowania zdarzeń niepożądanych,
- oszacowanie wielkości skutków zdarzeń niepożądanych,
- oszacowanie poziomu ryzyka,
- wyznaczenie poziomów akceptacji ryzyka,
- wyznaczenie zbioru zdarzeń nieakceptowanych,

- ocenę możliwości ograniczenia ryzyka,
- określenie środków bezpieczeństwa [37].

Szacowanie bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej prowadzone jest na podstawie modelu ryzyka, który umożliwia określenie potencjalnych skutków, a więc ocenę strat dla człowieka, systemu technicznego oraz środowiska naturalnego [235].

Scenariusze zdarzeń niepożądanych, takie jak rozszczelnienie instalacji paliwowej, wyciek paliwa i jego zapłon na gorącej powierzchni, zostały opisane w rozdz. 4.

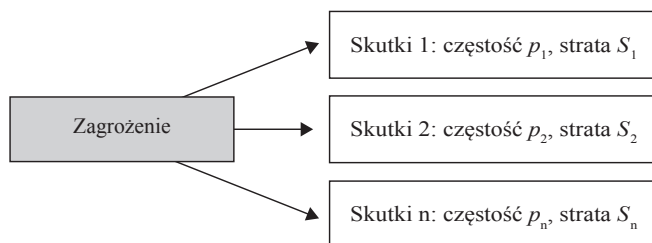
Straty wynikające z wystąpienia zdarzenia niepożądanego określają procent zniszczenia siłowni okrętowej lub jeżeli pożar rozprzestrzeni się na pozostałe rejonu statku – procent zniszczenia statku (określany także w jednostkach monetarnych) lub uszczerbek zdrowia czy utratę życia ludzi (koszty leczenia, rehabilitacji i odszkodowania).

Do określenia ryzyka stosowana jest miara ryzyka. Miara ryzyka jest iloczynem prawdopodobieństwa zdarzenia odniesionego do czasu i starty [37]:

$$R_z = P \cdot s \quad (7.11)$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru jest zmienną zależną od stanu obiektów technicznych i człowieka. Wielkość strat zależna jest od zagrożeń determinujących scenariusz pożaru i proporcjonalnie zależy od skutków pożaru, które wynikają z jego dynamiki oraz intensywności rozprzestrzeniania się.

Na potrzeby oceny ryzyka pożaru w siłowni okrętowej należy założyć, że jedno zagrożenie generować będzie w większości wypadków wiele potencjalnych skutków i występować będzie z różną częstotliwością (rys. 7.5).



Rys. 7.5. Opis zagrożenia jako przyczyny wielu potencjalnych skutków

Źródło: opracowano na podstawie pracy [235].

Przyjmując, iż jedno zagrożenie generować może różne skutki, należy przyjąć, iż ryzyko jest sumą iloczynów prawdopodobieństw i skutków (7.12):

$$R_z = P_1 \cdot s_1 + P_2 \cdot s_2 + \dots + P_n \cdot s_n = \sum_{i=1}^n P_i \cdot s_i \quad (7.12)$$

Na potrzeby poprawnej identyfikacji zagrożeń należy przyjąć jedną z metod proponowanych w kolumnie pierwszej tab. 7.1. Analizy ryzyka prowadzona będzie z wykorzystaniem jednej metody lub kompilacji metod przedstawionych w tab. 7.1 w kolumnie drugiej [235].

Tabela 7.1. Metody oceny ryzyka

Identyfikacja zagrożeń	Analiza i ocena ryzyka
Lista kontrolna	analiza scenariuszy wydarzeń
Analiza strat i ich źródeł	analiza postaci i skutków uszkodzeń
Burza mózgów	analiza drzewa błędów (przyczyny)
Odpytywanie ekspertów	analiza drzewa wydarzeń (skutki)
Metoda Delficka	analiza skutków i przyczyn FTA/ETA
Wstępna analiza zagrożeń	analiza przyczyn zdarzeń niepożądanych
Badanie zagrożeń w działaniu	analiza Markowa
Analiza zagrożeń w punktach krytycznych procesu	symulacja Monte Carlo
Analiza: Co...jeśli?	analiza niezawodności człowieka
Wskaźniki ryzyka	sieci bayesowskie
	analiza ukrytych wad
	analiza warstw ochronnych
	drzewa decyzyjne
	wielokryterialna analiza decyzji
	analiza wpływu przyczyny
	krzywe FN
	macierz możliwości i skutków
	analiza kosztów/ korzyści

Źródło: opracowano na podstawie pracy [235].

7.4. Koszty bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej

Bezpieczeństwo techniczne dowolnego obiektu technicznego zależne jest od generowanego przez ten obiekt zagrożenia technicznego, charakterystyki szkodowej otoczenia oraz poziomu i jakości ewakuacji.

Trudne do oszacowania i oceny koszty poniesione na zapewnienie bezpieczeństwa są sumą nakładów poniesionych na zapewnienie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa technicznego (K_{Btech}), kosztów zagrożenia technicznego (K_{Ztech}) i kosztów ewakuacji (K_{ewak}). Charakterystyka szkodowa narzucona jest przez lokalizację obiektu technicznego i jest pomijana [1]:

$$K_{\text{Btech}} = K_{\text{Ztech}} + K_{\text{ewak}} \quad (7.13)$$

Koszty zagrożenia bezpieczeństwa technicznego zależą przede wszystkim od jednostkowej niezawodności całkowitej elementów składowych układu funkcjonalnego (K_{UF}), wpływających na zagrożenie techniczne, oraz od łącznych kosztów układu bezpieczeństwa (K_{UB}):

$$K_{\text{Ztech}} = K_{\text{UF}} + K_{\text{UB}} \quad (7.14)$$

Z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej koszty niezawodności elementów składowych układu funkcjonalnego w fazie eksploatacji siłowni, są to koszty eksploatacji i obsługi maszyn, urządzeń i instalacji, a więc koszty paliw, i innych materiałów eksploatacyjnych, koszty przeglądów, remontów, modernizacji, koszty wynagrodzenia załogi, serwisantów, inspektorów. Do kosztów niezawodności elementów składowych zaliczane są także koszty izolacji, utrzymania siłowni oraz koszty niedopuszczenia do utraty szczelności instalacji.

Na koszty układów bezpieczeństwa składają się koszty utrzymania instalacji wykrywczych i gaśniczych oraz przenośnego sprzętu gaśniczego; są to koszty czynników gaśniczych, przeglądów, remontów, prób, modernizacji, obsługi przez załogę i serwisantów, a także koszty inspekcji.

Szacowanie kosztów bezpieczeństwa pożarowego wybranej siłowni wymaga identyfikacji w danym układzie funkcjonalnym obiektów o podwyższonym ryzyku pożarowym (przede wszystkim gorących powierzchni oraz miejsc potencjalnych uwolnień substancji palnych) w celu określenia kosztów materiałów i czynności niezbędnych do ich bezpiecznej eksploatacji.

Szacowanie kosztów bezpieczeństwa pożarowego w danym układzie bezpieczeństwa wymaga, poza scharakteryzowanymi elementami składowymi, oszacowania opłacalności wprowadzenia nowych zabezpieczeń, zarówno technicznych, jak i związanych z zarządzaniem bezpieczeństwem, a więc mających na celu wyeliminowanie czynnika ludzkiego.

7.5. Podsumowanie

Metody wyznaczania poziomu bezpieczeństwa pożarowego siłowni, takie jak określanie niezawodności obiektów technicznych i człowieka, szacowanie ryzyka powstania pożaru oraz określanie miary bezpieczeństwa, która charakteryzuje prawdopodobieństwa niewystąpienia zagrożenia, pozwalają na opis ilościowy bezpieczeństwa, który dostarcza cennych informacji zarówno dla projektantów, jak i eksploatorów.

Charakterystyka bezpieczeństwa dostarcza informacji o spodziewanych w czasie zagrożeniach, które wpływają na zdolność obiektów technicznych. Eksploatacja w celu osiągnięcia akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego w siłowni jest ukierunkowana na utrzymanie obiektów w stanie pełnej zdolności oraz przewidywanie w czasie zdarzeń mogących wpłynąć na ich niezawodność.

Określanie kosztów bezpieczeństwa dostarcza informacji o wielkości nakładów finansowych ponoszonych na utrzymanie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa i umożliwia ich odpowiednie zaplanowanie w czasie.

Wszystkie szacunki i obliczenia, mające na celu opis bezpieczeństwa pożarowego siłowni, należy prowadzić z uwzględnieniem funkcjonowania systemu człowiek–obiekt techniczny.

WNIOSKI

Bezpieczeństwo statku jest złożonym i interdyscyplinarnym zagadnieniem. Zależy od stanu technicznego, wyposażenia, przewożonego ładunku, akwenu, na którym odbywa się żegluga, oraz od warunków hydrometeorologicznych. Związane jest także z wyszkoleniem i doświadczeniem załogi oraz z jej działaniami podczas eksploatacji i w sytuacjach awaryjnych.

Bezpieczeństwo pożarowe siłowni okrętowej jest problemem zależnym od czynników technicznych i ludzkich. Zasadne jest szczegółowe rozpatrywanie każdego z nich, ale także badanie zależności między nimi, tak by w sposób kompleksowy można było rozpoznawać zagrożenia i szukać efektywnych metod zabezpieczeń.

Siłownia okrętowa jest wydzieloną przestrzenią kadłuba statku, w której praca silników głównych, pomocniczych, kotłów, spalarek oraz wielu innych urządzeń i instalacji, w tym przede wszystkim instalacji paliwowej, generuje zagrożenia powodujące możliwość powstania pożaru i jego rozprzestrzeniania się. Nagromadzenie materiałów palnych na zazwyczaj małej powierzchni siłowni, obecność wielu potencjalnych źródeł zapłonu i stała obecność utleniacza sprawiają, iż jest to rejon szczególnie podatny na powstanie pożaru. W przypadku wystąpienia pożaru, jeżeli nie zostanie on ugaszony w początkowej fazie, jego gwałtowny charakter powoduje, że dynamicznie rozwija się i rozprzestrzenia. Temperatura podczas pożarów siłowni przekracza 1000°C, a czas trwania waha się od kilku minut do ponad doby.

Najczęstszą przyczyną powstania pożaru w siłowni jest kontakt paliwa z gorącą powierzchnią. Gorące powierzchnie to przede wszystkim elementy układu wydechowego silnika. W niniejszej pracy pomiary temperatury wybranych powierzchni zostały zrealizowane na wybranej jednostce przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej.

Działania mające na celu zapobieganie powstawaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów na statkach to przede wszystkim stosowanie zabezpieczeń konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych, a także właściwe zarządzanie bezpieczeństwem. Realizowane są one w zgodzie z wymaganiami przepisów międzynarodowych, przede wszystkim z uwzględnieniem filozofii bezpieczeństwa zawartej w rozdziale II-2 konwencji SOLAS.

Zabezpieczenia konstrukcyjne na statku to głównie przegrody pożarowe. Obecnie poszukuje się takich materiałów i rozwiązań, które będą lżejsze od konwencjonalnych, cieńsze i łatwiejsze w montażu, i co najmniej równie efektywne. Testowane są na promach pasażerskich np. konstrukcje wykonane z udziałem materiałów FRP w układach *sandwich*.

Najczęściej stosowanym środkiem gaśniczym na statkach jest woda. Ze względu na swoją efektywność gaśniczą popularność zyskują instalacje wykorzystujące znacznie zdrobnioną wodę, stosowane przede wszystkim w instalacjach lokalnych. Coraz częściej stosowane są także instalacje na inne środki gaśnicze, które są nie tylko skuteczne, ale również bezpieczne dla środowiska i człowieka, np. Novec™ 1230. Instalacje te są wykonane modułowo co znacznie przyspiesza ich montaż, a w trakcie eksploatacji usprawnia ich naprawy i wymianę.

Systemy detekcji pożaru ewoluują w kierunku inteligentnych rozwiązań, które będą w krótkim czasie rozpoznawać zagrożenie i alarmować, a w nowatorskich rozwiązaniach nawet informować o przebywaniu bądź nieprzebywaniu w obszarze zagrożonym członków załogi lub pasażerów.

Obecnie prace IMO o tematyce bezpieczeństwa pożarowego statków dotyczą przede wszystkim problemów wykrywania i gaszenia pożarów na pokładach ro-ro, w tym pożarów samochodów z niekonwencjonalnymi napędami. Zaczyna być dyskutowany problem zagrożeń pożarowych w siłowniach wykorzystujących niekonwencjonalne źródła energii. Prowadzone są działania na rzecz poprawy bezpieczeństwa pożarowego operacji bunkrowania tego rodzaju paliwa.

Pragmatyka przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym siłowni powinna dotyczyć identyfikacji, klasyfikacji, zabezpieczenia bądź eliminacji obiektów ryzyka i wykluczenia możliwości powstania pożaru dla różnych scenariuszy. Powinna ona obejmować procedury i działania, których celem jest przede wszystkim niedopuszczenia do powstania nieszczelności, przez którą uwalniany może być materiał palny, ale także stwarzać możliwość szybkiego rozpoznania potencjalnych gorących powierzchni oraz ich ograniczenia lub eliminacji. Łatwiejsze w realizacji są zabezpieczanie gorących powierzchni i ciągła ich kontrola, dlatego należy szukać alternatywnych, w stosunku do stosowanych obecnie przez załogi, metod diagnozy bezpieczeństwa pożarowego siłowni.

Wskazuje się w tym wypadku na przydatność kamer termowizyjnych wbudowanych w smartfony, które mogą być używane w codziennej eksploatacji do szybkich szacunkowych lub dokładnych przeglądów dużych powierzchni siłowni w celu poszukiwania gorących powierzchni. Mają one przewagę nad stosowanymi powszechnie laserowymi termometrami ze względu na możliwość inspekcji nie tylko dużych, ale i trudno dostępnych powierzchni w siłowni oraz w warunkach małego zadymienia, a także w sytuacji powstania tzw. *black out*.

Przydatność takiej kamery zbadano podczas tworzenia map termicznych wybranej siłowni. Zidentyfikowano kilkanaście miejsc na silniku głównym, silniku pomocniczym oraz na kotle parowym utylizacyjnym, w przypadku których temperatura przekroczyła założony próg bezpieczeństwa wynoszący 220°C. W kolejnych

etapach badań planowane jest wykorzystanie również kamer termowizyjnych o szerszym zakresie pomiarowym. Będą one wykonywane na większej populacji siłowni okrętowych.

Mapy termiczne obiektów są dobrym źródłem informacji potrzebnej do diagnozy, jak i na potrzeby badań porównawczych. Dostarczają one załozde informacje o stanie izolacji w siłowni, ale także o miejscach nieprawidłowej pracy maszyn i urządzeń. Z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania stwarzają możliwość dokładnego określenia wartości temperatury w dowolnym punkcie zrobionego zdjęcia. W bardziej zaawansowanych konfiguracjach kilku kamer pozwalają na ciągły monitoring w czasie rzeczywistym bezpieczeństwa pożarowego siłowni.

W celu lepszego zrozumienia zjawiska pożaru na statku i doboru najlepszej metody zabezpieczenia do danych warunków tworzy się z wykorzystaniem różnych narzędzi, także opracowanych w niniejszej pracy, scenariusze pożarowe. Na podstawie danych statystycznych, badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych tworzy się różne warianty zdarzeń. Za pomocą np. diagramu Ishikawy określa się przyczyny podstawowe poszczególnych kategorii powstania pożaru w siłowni okrętowej. Pozwala to na szczegółowe analizy, formułowanie zależności, a także na wykorzystanie ich do modelowania pożarów. W niniejszej pracy przeprowadzono taką analizę, identyfikując przyczyny prowadzące do powstania pożaru.

Celem modelowania jest oszacowanie mocy pożaru, czasu jego trwania, zmian temperatury, rozprzestrzeniania się produktów spalania i zbadania innych parametrów, w zależności od intencji badacza i wykorzystywanego narzędzia. Modelowanie pożarów, szczególnie pożarów na statkach, jest problemem wciąż otwartym. Dla lepszego poznania zjawiska proponuje się poszukiwanie możliwości wykorzystania dostępnych narzędzi komercyjnych do modelowania pożaru.

W niniejszych badaniach zastosowano programy Pyrosim oraz SmokeView w celu graficznego przedstawienia przebiegu pożaru dla wybranego scenariusza. Przeprowadzono symulację pożaru kałuży paliwa. Otrzymano przebiegi wartości temperatury podczas pożaru i rozprzestrzeniania się produktów spalania. Oszacowano parametry opisujące pożar i jego dynamikę.

Kolejne badania będą ukierunkowane na obserwację pożaru większych ilości paliwa oraz z udziałem paliw wtórnych, a także przy założeniu, że do siłowni dostarczane jest w pierwszych minutach pożaru powietrze. Prowadzone będą także symulacje rozwoju pożaru, z uwzględnieniem działania instalacji gaśniczych i wpływu wentylacji.

Mając na uwadze to, że człowiek odpowiedzialny jest za większość zdarzeń niepożądanych, także tych prowadzących do pożarów, należy szukać przyczyn zaniedbań czy niewłaściwego postępowania wśród członków załogi.

Wskazuje się dwa kierunki działań – diagnozę ergonomiczną stanowisk pracy oraz zarządzanie bezpieczeństwem na podstawie zasobów ludzkich.

Diagnoza stanowisk pracy ma na celu wykrycie i wyeliminowanie niebezpiecznych i szkodliwych dla człowieka czynników oraz wskazanie rozwiązań, które pozwolą zwiększyć poziom bezpieczeństwa pożarowego siłowni.

Zdiagnozowane podczas badań: praca wykonywana przez załogę w hałasie, narażenie na oddziaływanie wysokiej temperatury, konieczność długotrwałego przebywania w nieergonomicznych pozycjach, duża liczba różnorodnych zadań, narażenie na długotrwały stres, a także skomplikowana geometria siłowni przyczyniają się do powstawania przeciążeń psychofizycznych, które skutkują występowaniem błędów ludzkich, także tych, które prowadzą do powstania pożaru w siłowni.

Podczas prowadzonej diagnozy ergonomicznej na wybranym statku wykazano wiele nieprawidłowości. Uzgodniono z załogą możliwości ich korekty lub eliminacji. W kolejnych etapach badań w tym obszarze planowane są diagnozy na większej liczbie statków różnych armatorów.

Kształtowanie kultury bezpieczeństwa jest istotne dla poprawy bezpieczeństwa pożarowego. Ważnym elementem tego procesu jest zarządzanie bezpieczeństwem pożarowym w siłowni.

Zarządzanie to procedury, instrukcje postępowania w różnych sytuacjach, pomagające właściwie reagować w niemalże mechaniczny sposób, ale także systemowe rozwiązania ułatwiające komunikację oraz procedury przydatne w analizach podczas projektowania. To narzędzia, które w prosty sposób porządkują schematy wykonywanych czynności, stwarzają możliwość uniknięcia zaniedbań, przeoczeń i innych błędów ludzkich.

Celem zarządzania bezpieczeństwem jest więc koordynacja działań załogi w celu uniknięcia błędów ludzkich podczas eksploatacji statku oraz właściwe reagowanie w sytuacjach kryzysowych.

Działania te wspierać należy z wykorzystaniem przedstawionych w pracy modułów. Mają one na celu usystematyzowanie działań, zwrócenie uwagi na szczególnie ważne zagrożenia, miejsca ryzyka powstania pożaru, jego możliwe przebiegi i konsekwencje.

Istotne z punktu widzenia efektywności działań załogi w sytuacji wystąpienia pożaru jest także szkolenie dotyczące alarmów ćwiczebnych na statku oraz w lądowych ośrodkach szkoleniowych. Wskazuje się na potrzebę wykorzystywania w takich szkoleniach wizualizacji pożarów w celu lepszego zrozumienia mechanizmu jego powstawania oraz rozprzestrzeniania się. Bardzo ważną rolę w szkoleniach odgrywają obecnie także symulatory. Pozwalają na poznanie i zrozumienie złożonych zjawisk, na zdobycie w krótszym czasie doświadczeń bardzo zbliżonych do doświadczeń w warunkach rzeczywistych.

LITERATURA

1. Pihowicz W., *Inżynieria bezpieczeństwa technicznego*, Warszawa, WNT, 2008.
2. Międzynarodowa Organizacja Morska, *Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (SOLAS 1974)*, Londyn, Międzynarodowa Organizacja Morska, 2014.
3. European Maritime Safety Agency (EMSA), *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2016*, <http://www.emsa.europa.eu/implementation-tasks/accident-investigation/items.html?cid=141&id=3156>, dostęp: 10.05.2019.
4. Kwiecińska B., Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2015, 44(116), 187–191. [in English]
5. Bogalecka M., Pożary jako przyczyny wypadków statków morskich w ujęciu statystycznym, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2015, 3(1), 171–180.
6. Eliopoulou E., Papanikolaou A., Casualty analysis of large tankers, *Journal Marine Science Technology*, 2007, 12, 240–250.
7. Eliopoulou E., Papanikolaou A., Volgarellis M., Statistical analysis of ship accidents and review of safety level, *Safety Science*, 2016, 85, 282–292.
8. Kopczewski M., Pełka D., Tobolski M., Logistyka bezpieczeństwa pożarowego jednostek pływających, *Logistyka*, 2012, 5, 562–571.
9. Urząd Statystyczny w Szczecinie, *Rocznik Statystyczny Gospodarki Morskiej 2017*, <https://szczecin.stat.gov.pl/publikacje-i-foldery/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-gospodarki-morskiej-2017,4,14.html>, dostęp: 3.02.2018.
10. Berg H.P., Storgård J., Lappalainen J., The impact of ship crews on maritime safety, Turku, *Centre of Publications of the Centre for Maritime University of Turku*, 2013.
11. Veiga J.L., Safety culture in shipping, *Journal of Maritime Affairs*, 2002, 1, 17–31.
12. Berg H.P., Human factors and safety culture in maritime safety, *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2013, 7(3), 343–352.
13. Ek Å., *Safety culture in sea and aviation transport*, PhD thesis, Department of Design Sciences, Lund University, 2006. [niepublikowana]
14. Ek Å., Runefors M., Borell J., Relationship between safety culture aspects-A work process to enable interpretation, *Marine Policy*, 2014, 44, 179–186.
15. Rumawas V., Asbjornslett B.E., Human factors on offshore supply vessels in the Norway Sea-an explanatory survey, *International Journal of Maritime Engineering*, 2016, 158, A1–A14.
16. Gemelos I. C., Ventikos N. P., Safety in greek coastal shipping: The role and risk of human factor revisited, *Journal of Maritime Affairs*, 2008, 7(1), 31–49.

17. Adamkiewicz A., Krystosik-Gromadzińska A., Modelling safety culture among crews of seafaring vessels, *New Trends in Production Engineering*, 2018, 1(1), 95–101.
18. Krystosik-Gromadzińska A., Poprawa bezpieczeństwa i komfortu pracy podczas eksploatacji i remontów siłowni okrętowej, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 2018, 108, 81–91.
19. Man Y., Lundh M., Porathe T., MacKinnon S., From desk to field- human factor issues in remote monitoring and controlling of autonomous unmanned vessels, *Procedia Manufacturing*, 2015, 3, 2674–2681.
20. Nippon Kaiji Kokai, *Good maintance on bard ships. Maintenance checklist for the master*, Tokio, NKClass, 2015.
21. American Bureau of Shipping, *Onboard routine maintenance check sheet*, Houston, American Bureau of Shipping, 2009, https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/reference-report/Maintenance_checklist.pdf, dostęp: 15.06.2019.
22. Dzeverdanovic M., Discourse of maritime forms (check lists), *Journal of Maritime Affairs*, 2008, 7(2), 449–465.
23. Det Norske Veritas, *Engine room fires can be avoided*, <https://exchange.dnv.com/Documentation/Maritime/FireSafety/FIRE%20mappe%202.qxd.pdf>, dostęp: 15.08.2015.
24. Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd, Enhancing fire safety awareness, <https://www.dnvgl.com/news/enhancing-fire-safety-awareness-66109>, dostęp: 18.10.2016.
25. Gard, Fire prevention in engine room, *Loss Prevention Circ. no. 02-12*, 2012, <http://www.gard.no/Content/20651289/Gard%20LPC%20Fire%20prevention%20in%20engine%20rooms.pdf>, dostęp: 15.09.2015.
26. Det Norske Veritas, Hot surfaces in engine rooms, *Technical paper. Paper series no. 2000 – P025*, 2000, https://svlsingapore.com/wp-content/uploads/2016/11/hot-surfaces-paper_DNV.pdf, dostęp: 23.11.2016.
27. International Maritime Organisation, *Measures to prevent fires in engine rooms and cargo pump-rooms*, 2006. <https://www.transportstyrelsen.se/contentassets/959bf209e4f407e86c09cf150860b69/51-8.pdf>, dostęp: 15.04.2012.
28. International Maritime Organisation, *Guidelines for measures to prevent fires in engine-rooms and cargo pump-rooms*, *MSC1/Circ. no. 1321*, 2009, <https://www.mardep.gov.hk/en/msnote/pdf/msin0913anx1.pdf>, dostęp: 15.04.2012.
29. Abramowicz-Gerigk T., Burciu Z., Kamiński P., Kryteria akceptowalności ryzyka w żegludze morskiej, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*, 2013, 96, 7–17.
30. Urbański J., Morgas W., Szpecht C., Bezpieczeństwo morskie-ocena i kontrola ryzyka, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 2008, 2(173), 53–68.

31. International Maritime Organisation, *Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use on the IMO rule-making process*, MSC/Circ. no. 1023, 2002, <http://www.safedor.org/resources/1023-MEPC392.pdf>, dostęp: 15.05.2012.
32. Polski Rejestr Statków, *Metodyka formalnej oceny bezpieczeństwa żeglugi (FSA)*, *Publikacja informacyjna nr 19/I*, Gdańsk, Polski Rejestr Statków, 2002.
33. International Maritime Organisation, *Formal Safety Assessment. FSA- Cruise ships. Details of the Formal Safety Assessment*, MSC no. 85/INF.2, 2008. http://www.safedor.org/resources/MSC_85-INF-2.pdf, dostęp: 26.05.2015.
34. Psaraftis H.N., Formal safety assessment: an updated review, *Journal of Maritime Science and Technology*, 2012, 17, 390–404.
35. International Maritime Organisation, *Formal safety assessment*, <http://www.imo.org/en/OurWork/safety/safetytopics/pages/formalsafetyassessment.aspx>, dostęp: 15.10.2018.
36. Papanikolaou A.D. (red.), *Risk-based ship design. Methods, tools and applications*, Berlin, Springer, 2009.
37. Adamkiewicz A., Fydrych J., Application of risk analysis in maintenance of ship power system elements, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2013, 36(108) 2, 5–12. [in English]
38. Monieta J., Zastosowanie miar bezpieczeństwa do oceny zdarzeń niepożądanych statków morskich, *Logistyka*, 2015, 3, 3371–3380.
39. UK P&I Club, *Risk focus: Engine room fires*, www.burgoynes.com, dostęp: 5.11.2018.
40. Guan Y., Zhao J., Shi T., Zhu P., Fault tree analysis of fires and explosions accidents for dual fuel (Diesel/Natural Gas) ship engine rooms, *Journal of Marine Science and Application*, 2016, 15, 331–335.
41. Kaneko F., Arma T., Yoshida K., Yuzui T., On a novel method for approximation of FN diagram and setting ALARP borders, *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, 20, 14–36.
42. Nobuyoshi F., Imamura T., Risk assessment for fire safety considering characteristic evacuees and smoke movement in marine fires, *Journal of Marine Science and Technology*, 2005, 10, 147–157.
43. Charchalis A., Czyż S., Analysis of hazard and safety requirements of a sea vessel engine rooms, *Journal of KONES Powertrain and Transportation*, 2011, 18(2), 49–56.
44. Nippon Kaiji Kokai, *Engine room fire. Guidance to fire prevention*, Tokio, NKClass 1994.
45. *Smartfire introduction*, <https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/index.html>, dostęp: 8.12.2017.
46. *Exodus animations*, https://fseg.gre.ac.uk/fire/EXODUS_animations.asp, dostęp: 8.12.2017.

47. Galea E.R., Lawrence P., Gwynne S., Filippidis L., Blackshields D., Sharp G., Wang Z., Ewer J., Simulation ship evacuation under fire conditions, in: *Proceedings of the Second International Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference*, London, August 20–22, 2003, London, The University of Greenwich, 2003, 159–172.
48. Galea E.R., Grandison A., Filippidis L., Gwynne S., Ewer J., Lawrence P., Safer by design: simulating fire and escape at sea, in: *Proceedings of the First International Conference Escape, Evacuation and Recovery, Survival from Ships and Offshore Structures*, London, March 10–11, 2004, London, [b.w.], 2004, 1–22.
49. Soares C.G, Pena F.L. *Developments in marine transportation and exploitation sea resources*, New York, Taylor & Francis Group, 2014.
50. SURMA Technical description software for comprehensive navy combat survivability analysis, <http://survivability.fi/files/SURMA-fire-simulation.pdf>, dostęp: 14.07.2017.
51. Petelin S., Perkozic M., Vidmar P., Petelin K., Ship's engine room fire modeling, in: *International Joint Power Generation Conference collocated with TurboExpo 2003 Conference Proceedings*, Atlanta, June 16–19, 2003, Atlanta, The American Society of Mechanical Engineers, 813–816.
52. Wang L., Su S., Three-dimensional numerical simulation of smoke motion in fire of the ship engine room with multilayer structure, *Brodogradnja*, 2011, 62, 366–372.
53. Wang L., Su S., Three-dimensional reconstruction of the fire in a ship engine room with multilayer structures, *Ocean Engineering*, 2013, 70, 201–207.
54. Hoover J., Application of the CFAST zone model to ships. Fire specification parameters, *Journal of Fire Protection Engineering*, 2008, 18, 199–122.
55. Salem A.M., Parametric analysis of a cabin fire rising a zone fire model, *Alexandra Engineering Journal*, 2013, 52, 627–636.
56. Li J., Pu J., Ren K., Zhang G., Ding L., Fire smoke characteristic in closed ship cabin: fire model study, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2016, 7(3), 257–26.
57. Nicolau N.G., Spyrou K.J., Numerical fire modelling for passenger ships, in: *Thirteenth International Congress of International Maritime Association of the Mediterranean*, Istanbul, October 2009, Istanbul Technical University, 2009.
58. Soner O., Asan, U., Celik M., Use of HFACS–FCM in fire prevention modelling on board ships, *Safety Science*, 2015, 77, 25–41.
59. Lua J., O'Brien J., Key Ch., Wu J., Lattimer B., A temperature and mass dependent thermal model for fire response prediction of marine composites, *Composites*, 2006, 1024–1039.
60. Salem A., Fire engineering tools used in consequence analysis, *Ships and Offshore Structures*, 2010, 5(2), 155–187.

61. Kang H.J., Choi J., Lee M., Park B.J., A framework for using computational fire simulations from early phases of ship design, *Ocean Engineering*, 2017, 129, 335–342.
62. Adamkiewicz A., Przybyła M., Evaluation of a marine object propulsion system preliminary design process using an iteration method, *Journal of Machine Construction and Maintenance*, 2018, 2(109), 87–93.
63. *Marine thermal monitoring system*, <http://www.flir.eu/marine/content/?id=71005>, dostęp: 7.09.2017.
64. CAT S60: smartfon z kamerą termowizyjną, <http://www.komputerswiat.pl/testy/sprzet/smartfony/2016/07/cat-s60-test.aspx>, dostęp: 25.08.2016.
65. Passage V., Muzevic M., Kelenc D., Infrared thermography in marine applications, *Brodogradnja*, 2008, 59, 123–130. [in English]
66. Bistrovic M., Ristov P., Komrcec D., Prediction of potential hot-spots by using a model based on a computerized real-time view with IR cameras on ships, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2017, 50 (122), 23–29. [in English]
67. *Engine room inspection*, <http://www.flir.co.uk/Cs/display/?id=42602>, dostęp: 20.07.2016.
68. Krystosik-Gromadzińska A., Affordable hybrid thermography for Merchant Vessel Engine Room Fire Safety, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2019, 57(129), 21–26. [in English]
69. Krystosik-Gromadzińska A., Analiza ergonomiczna stanowiska pracy – operator siłowni okrętowej, w: *Bezpieczeństwo pracy: środowisko, zarządzanie*, t.1, red. D. Zwolińska, Katowice, Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy, 2015, 129–140.
70. Krystosik-Gromadzińska A., Ergonomic assessment of selected work stations on a merchant ship, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 2018, 24(1), 91–99.
71. Montewka J., Goerlandt F., Innes-Jones G., Owen D., Hifi Y., Puisa R., Enhancing human performance in ship operations by modifying global design factors at the design stage, *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 159, 283–300.
72. International Maritime Organisation, *Guidance of fatigue mitigation and management*, MSC/Circ. no. 1014, June 12, 2001, <http://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/VisionPrinciplesGoals/Documents/1014.pdf>, dostęp: 15.02.2012.
73. *Międzynarodowy kodeks zarządzania bezpieczną eksploatacją statków i zapobieganiem zanieczyszczaniu oraz znowelizowane wytyczne do wdrażania przez administrację Kodeksu ISM*, Gdańsk, Polski Rejestr Statków S.A., 2009.
74. International Maritime Organisation Publishing, *STCW: Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers including 2010 Manila amendments*, London, International Maritime Organisation Publishing, 2010.

75. International Labour Organisation, *Text and preparatory reports of the Maritime Labour Convention*, 2006, <https://www.ilo.org/global/standards/maritime-labour-convention/text/lang-en/index.htm>, dostęp: 27.11.2017.
76. Orosa J., Oliviera A.C., Case study of safe working conditions in spanish merchant ships, *Polish Maritime Research*, 2012, 2 (73), 19, 43–48.
77. Marczak E., Bezpieczeństwo człowieka na statku w świetle obowiązujących przepisów, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2009, 18(90), 97–104.
78. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 września 1997 r. w sprawie bezpieczeństwa żeglugi statków morskich i bezpieczeństwa życia na morzu, *Dziennik Ustaw z 1997 r.*, nr 132, poz. 879.
79. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i rozwoju z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznego uprawiania żeglugi przez statki morskie, *Dziennik Ustaw z 2015 r.*, poz. 48.
80. Directive 2008/106/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on the minimum level of training of seafarers, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32008L0106>, dostęp: 15.05.2018.
81. Szczęśniak J., Importance of the on board crew trainings and drills for the improvement of the vessels safety, *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni*, 2013, 28(201), 88–94.
82. Ośrodek Szkoleniowy Ratownictwa Morskiego, *Szkolenia podstawowe*, Akademia Morska w Szczecinie, <https://osrm.am.szczecin.pl/pl/szkolenia/3-szkolenia-podstawowe/>, dostęp: 9.05.2018.
83. Ośrodek Szkolenia Ratowniczego, *Ochrona przeciwpożarowa – stopień podstawowy*, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, <http://osrgdynia.pl/terminy-kursow/>, dostęp: 9.05.2018.
84. Centrum Szkoleń Morskich w Gdyni, *Ochrona przeciwpożarowa – stopień podstawowy*, <https://www.oszgm.com/kursy-obowiazkowe-podstawowe/#ochrona-przeciwpozarowa>, dostęp: 9.05.2018.
85. International Maritime Training Centre Wilhelmsen, *Course schedule*, <https://www.wilhelmsen.com/other-services/imtc/course-schedule/>, dostęp: 9.05.2018.
86. Maersk Training, *Maritime, fire team member*, <https://www.maersktraining.com/b2c-course/fire-team-member/>, dostęp: 9.05.2018.
87. Chybowski L., Gawdzińska K., Lesicki O., Matejuk K., Nowosad G., An engine room simulator as an educational tool for marine engineers relating to exlosion and fire prevention of marine diesel engines, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2015, 43(115), 15–21. [in English]
88. Polski Rejestr Statków, *Przepisy budowy i klasyfikacji statków. Cz. V. Ochrona przeciwpożarowa*, Gdańsk, Polski Rejestr Statków, 2018.

89. Krystosik A., The dislocation of superstructure, engine room and it's casing as a method of fire protection of the ship, in: *Safety at sea*, red. J. Szantyr, M. Gerigk, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2001. [in English]
90. Krystosik A., Fire safety of ship in dependence on the location of superstructure and engine room, in: *Seas&Oceans: 1st International Congress, Proceedings*, Szczecin, 2001, Szczecin, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Szczecinie, 2001, 315–323. [in English]
91. Krystosik A., Zastosowanie dyslokacji przestrzennej do ograniczenia możliwości rozprzestrzeniania się pożaru na statku, w: *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów transportowych. Materiały VI Konferencji Okrętownictwo i Oceanotechnika*, Międzyzdroje, czerwiec 2002, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2002, 177–184.
92. Krystosik A., Analysis of fire spread between two vertical bulkheads on the ship, in: *Reliability-based design and optimisation, AMAS Workshop – RBO'02: Conference Proceedings*, Warszawa, wrzesień 2002, red. S. Jedno, K. Doliński, M. Kleiber, Warszawa, Polska Akademia Nauk, 2002, 247–258. [in English]
93. Krystosik-Gromadzińska A., Algorytm przenoszenia pożaru uwzględniający dyslokację jako sposób zabezpieczenia statku, w: *Transport zintegrowany. Materiały VII Konferencji Okrętownictwo i Oceanotechnika*, Międzyzdroje, czerwiec 2004, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2004, 97–102.
94. Krystosik-Gromadzińska A., Dislocation of risk objects as a method of fire protection on ship, *Marine Technology Transactions, Technika Morska*, 2004, 15, 343–350.
95. Krystosik-Gromadzińska A., Dislocation of risk object as an alternative design method of fire protection on ship, in: *Seas&Oceans: 2nd International Congress Proceedings*, Szczecin–Międzyzdroje, wrzesień 2005, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Morskiej, 2005, 161–170. [in English]
96. Krystosik-Gromadzińska A., Nagórski Z., Badania symulacyjne przepływu ciepła przez przegrody konstrukcyjne podczas pożaru na statku, w: *Komputerowe systemy wspomagania nauki, przemysłu i transportu. IX Konferencja: TRANSCOMP 2005*, Zakopane, grudzień 2005, Radom, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, 2005, 311–316.
97. American Bureau of Shipping, *Guidance notes on fire-fighting systems*, Houston, American Bureau of Shipping, 2017.
98. Ubowska A., Szczepanek M., Engine room fire safety-fire extinguishing systems requirements, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2016, 48(120), 51–57. [in English]
99. Hansen R.L, Back G.G., Water spray protection of machinery spacer, *Fire Technology*, 2001, 37, 317–326.

100. Kolstad E.A., Husted B.P., Effect of water mist and ventilation on engine room fire. in: *13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, Interflam Conference Proceedings*, London, June 2013, London, Interscience Communications, 2013.
101. Kolstad E.A., *Effect of water mist suppression system in engine room: Case study of fire in the cruise liner MS Nordlys*, Master thesis. University of Bergen, 2014 [niepublikowana].
102. 3M, *Enhance fire protection for marine applications*, http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_EU/Novec-1230/Fire-Protection/Resources/News/?PC_Z7_U00M8B1A0GOBD0A81CKVA01NK2000000_assetId=1361755920854, dostęp: 24.04.2018.
103. Hiltz J., Hertzberg T., Wal R., Rahm M., *New technologies for fire suppression on board naval craft (FiST). Final report no. DRDC-RDDC-R15-224*, Ottawa, Defence Research and Development Canada, 2015, https://www.researchgate.net/publication/291126303_New_Technologies_for_Fire_Suppression_On_Board_Naval_Craft_FiST_FINAL_REPORT, dostęp: 27.04.2018.
104. Balcerski A., *Siłownie okrętowe*, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 1990.
105. Wojnowski W., *Okrętowe siłownie spalinowe, cz. III*, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 1991.
106. Górski Z., *Siłownie okrętowe, cz. II. Instalacja okrętowe*, Gdynia, Akademia Morska w Gdyni, 2016.
107. Staliński M., *Siłownie okrętowe*, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacyjne 1955.
108. Krystosik-Gromadzińska A., *Morska Służba Poszukiwania i Ratownictwa w Polsce na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat i dziś, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2016, 42(2), 209–218.
109. Krystosik-Gromadzińska A., *Bezpieczeństwo załóg statków morskich w obliczu współczesnej przestępczości zorganizowanej*, w: *Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne. Zagrożenia CBRNE*, red. A. Gil, U. Nowacka, J. Kołdej, Częstochowa, Wydawnictwo Centralnej Szkoły Państwowej Straży Pożarnej, 2016, 45–63.
110. Krystosik-Gromadzińska A., Rogowski K., *Systemy ratownicze w Polsce – Morska Służba Poszukiwania i Ratownictwa*, w: *Systemy ratownicze w Polsce a bezpieczeństwo cywilne i wojskowe*, Wrocław, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. Gen. T. Kościuszki, 2015, 9–32.
111. Krystosik-Gromadzińska A., *Nowoczesne techniki i środki w ratownictwie morskim*, w: *Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne. Zmienność zagrożeń a innowacje w ratownictwie*, red. A. Gil, U. Nowacka, M. Chmiel, Częstochowa, Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej, 2014, 87–113.

112. Krystosik-Gromadzińska A., Bezpieczeństwo i ergonomia pracy na statku, *Logistyka*, 2015, 3, 1035–1041.
113. Kaplan S., Garrick B.J., On the quantitative definition of risk, *Risk Analysis*, 1981, 1, 11–27.
114. *Formal safety assessment*, www.imo.org, <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/FormalSafetyAssessment.aspx>, dostęp: 15.04.2018.
115. Krystosik-Gromadzińska A., Bezpieczeństwo pożarowe siłowni – rozprzestrzenianie pożaru, w: *Wybrane problemy eksploatacji siłowni okrętowych*, Szczecin, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2016, 145–159. ISBN 978-83-64434-11-2.
116. Krystosik-Gromadzińska A., Engine room fire safety, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2016, 47(119), 29–35.
117. Międzynarodowa Organizacja Morska, *Międzynarodowy kodeks stosowania procedur prób ogniowych (kodeks FTP). Rezolucja MSC. no. 61(67)*, Gdańsk, Polski Rejestr Statków, 1999.
118. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 23 kwietnia 2018 r. w sprawie wykształcenia i kwalifikacji członków załóg statków morskich, Dziennik Ustaw z 2018 r., poz. 802, <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180000802>, dostęp: 23.01.2019.
119. Norwegian Hull Club, *Recommended measures to prevent engine room fires*, 2019, <https://www.norclub.com/blog/recommended-measures-to-avoid-engine-room-fires/>, dostęp: 20.01.2019.
120. Nipon Kaiji Kokai, *Good maintenance on board ships*, Tokio, NKClass, 2017, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/Rules_Guidance/techpub/good_maintenance_on_board_ships_e2017.pdf, dostęp: 3.04.2017.
121. European Maritime Safety Agency, *Annual overview of marine casualties and incidents 2018. Report of European Maritime Safety Agency*, <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/3406-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2018.html>, dostęp: 11.2018.
122. Hakkarainen T., Hietaniemi J., Hostikka S., Karhula T., Kling T., Mangs J., Mikkola E., Oksanen T., *Survivability for ships in case of fire. Final report of SURSHIP-FIRE project, VTT Tiedotteita – Research Notes no. 2497*, VTT Technical Research Centre of Finland 2009, https://www.vtt.fi/Documents/2009_T2497.pdf, dostęp: 12.04. 2012.
123. Przywarty M., *Probabilistyczny model oceny bezpieczeństwa na akwenach przybrzeżnych*, Szczecin, Akademia Morska w Szczecinie, 2010.
124. *Statistical summary: marine transportation occurrences in 2014*, <http://www.tsb.gc.ca/eng/stats/marine/2014/ssem-ssmo-2014.asp>, dostęp: 5.11.2014.

125. *15 Years of Shipping Accidents: A review for World Wide Fund for Nature (WWF)*, Southampton Solent University, http://awsassets.panda.org/downloads/15_years_of_shipping_accidents_a_review_for_wwf_.pdf dostęp: 12.11.2014
126. *Maritime fire safety*, <https://exchange.dnv.com/Documentation/Maritime/FireSafety/FIRE%20mappe%202.qxd.pdf>, dostęp: 10. 09.2015.
127. Port State Control, *Adjusting Course. The Paris memorandum of understanding on Port State Control, Annual Report 2014*, <https://www.parismou.org/2014-annual-report-paris-mou-psc>, dostęp: 15.11.2015.
128. Kukuła T., Getka R., Żyłkowski O., *Techniczne zabezpieczenie przeciwpożarowe i przeciwwybuchowe statków*, Gdańsk, Wydawnictwo Morskie, 1981.
129. Wolanin T., *Podstawy rozwoju pożarów*, Warszawa, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, 1986.
130. Drysdale D., *An introduction to fire dynamics*, 3rd edition, Hoboken, Wiley 2011.
131. Getka R., *Contribution to the concept of the constructional fire protection of accommodation spaces on ships*. PhD thesis, University of Rostock, 1991. [niepublikowana]
132. Sychta Z., Kontrola szybkości rozkładu termicznego i spalania materiałów podstawowym warunkiem bezpieczeństwa pożarowego obiektów morskich, w: *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów transportowych. Materiały VI Konferencji Okrętownictwo i Oceanotechnika*, Międzyzdroje, czerwiec 2002, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2002, 319–329.
133. Assael M.J., Kakosimos K.E., *Fires, explosions, and toxic gas dispersions. Effect calculation and risk analysis*, Boca Raton, CRC Press, 2010.
134. McGrattan K., Miles S., Modelling enclosure fires using computational fluid dynamics (CFD), in: *SFPE handbook of fire protection engineering*, 3rd edition, Massachusetts, NFPA, 2008, 229–246.
135. Krajewski G., Węgrzyński W., Wykorzystanie narzędzi inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w projektowaniu i odbiorze systemów wentylacji pożarowej garaży zamkniętych, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2014, 36(4), 141–156.
136. Błazik-Borowa E., *Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji $k - \epsilon$ do wyznaczania parametrów opływu budynków*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
137. Launder B.E., Sharma B.I., *Mathematical models of turbulence*, London, Academic Press, 1972.
138. Launder B.E., Sharma B.I., The numerical computation of turbulence flow, *Computer Models in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3, 269–289.
139. Wilcox D.C., *Turbulence modelling for CFD*, 3rd ed., [b.m.], DCW Industries, Inc., 2006. ISBN 10: 1928729088.

140. National Fire Protection Association, *Standard for smoke and heat venting*, 2018, <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=204>, dostęp: 27.10.2018.
141. *The SFPE handbook of fire protection engineering*, 4th edition, Quincy, National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers, 2008.
142. *Czerwona księga pożarów. Wybrane problemy pożarów oraz ich skutków*, red. P. Guzewski, D. Wróblewski, D. Małozieć, Józefów, Państwowy Instytut Badawczy, 2014.
143. Getka R., Drogi ewakuacji z pomieszczeń maszynowych – liczba wyjść, konstrukcja i rozmieszczenie, *Scientific Journals of Maritime University of Szczecin*, 2011, 28(100), 1, 19–26.
144. ISO 834-1:1999, *Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1. General requirements*, Geneva, International Organization for Standardization 1999.
145. Krystosik-Gromadzińska A., *Dyslokacja obiektów ryzyka jako metoda zmniejszenia zagrożenia pożarem na statku*. Rozprawa doktorska, Szczecin, Politechnika Szczecińska, 2007. [niepublikowana]
146. Krystosik W., *Fotografie*, Archiwum prywatne, 2005.
147. Kobyliński L., Ocena ryzyka w odniesieniu do bezpieczeństwa hydromechanicznego statku, w: *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów transportowych. Materiały VI Konferencji Okrętownictwo i Oceanotechnika*, Międzyzdroje, czerwiec 2002, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2002.
148. NOR-SOK (Norsk Søkkel Konkurssepsisjon) *standard. Risk and emergency preparedness analysis. Z-013, Rev. no. 2*, Oslo, Norwegian Technology Centre 2001, <https://www.standard.no/pagefiles/955/z-013.pdf>, dostęp: 28.10.2017.
149. *The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, Tools for Ports and Restricted Waterways*, 2nd edition, Saint Germain en Laye, International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, 2009, <https://www.vindlov.se/globalassets/steg-for-steg/dokument/iala-risk-management-tool-for-ports-and-restricted-waterways-134-pdf-en1.pdf>, dostęp: 15.03.2017.
150. International Maritime Organisation, *Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process, MSC/Circ. no. 1023, MEPC/Circ. no. 329*, 2002, <http://www.safedor.org/resources/1023-MEPC392.pdf>, dostęp: 17.04.2018.
151. International Maritime Organisation, *Formal Safety Assessment, FSA- Cruise Ship. Detail of the Formal Safety Assessment, MSC85/INF. no. 2*, 2008, http://www.safedor.org/resources/MSC_85-INF-2.pdf, dostęp: 17.04.2018.
152. Krystosik-Gromadzińska A., Wybrane aspekty bezpieczeństwa w transporcie morskim, *Logistyka*, 2015, 3, 2602–2611.

153. International Maritime Organisation, *International Code for Fire Safety Systems (FSS)*, London, International Maritime Organisation Publishing, 2016.
154. International Maritime Organisation, *Escaperoutesignsandequipmentlocationmarkings, Res. A no. 1116(30)*, 2017, <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.1116%2830%29.pdf>, dostęp: 17.04.2018.
155. Kukuła T., Getka R., Żyłkowski O., *Techniczne zabezpieczenia przeciwpożarowe i przeciwybuchowe statków*, Gdańsk, Wydawnictwo Morskie 1981.
156. Krystosik-Gromadzińska A., Dislocation of objects on a ship as a method of fire protection, *Archivum Combustionis*, 2010, 30(4), 427–434.
157. *Plan pożarowy*, Biuro Projektowe Stoczni Szczecińskiej, Szczecin 2012. [niepublikowana]
158. *A60 Steel Bulkhead*, <https://www.paroc.com/applications/marine-and-offshore/a60-steel-bulkhead>, dostęp: 19.07.2017.
159. *Developments in fire protection of FRP composite vessels*, <https://e-lass.eu/media/2016/08/RINA-Conference-Paper.pdf>, dostęp: 15.03.2017.
160. *Fire master marine blanket*, http://www.morganadvancedmaterials.com/media/3506/fm_marine_offshore_fire_divisions_manual.pdf, dostęp: 15.03.2017.
161. *Thermal insulation for industrial applications*, <http://www.promat-marine.com/en/products/promaguard>, dostęp: 15.03.2017.
162. *Morgan thermal ceramics fire master marine plus blanket fire insulation provides up to 30 percent weight savings*, <http://www.professionalmariner.com/Web-Bulletin-2012/Morgan-Thermal-Ceramics-new-FireMaster-Marine-Plus-Blanket-fire-insulation-provides-up-to-30-percent-weight-savings/>, dostęp: 15.03.2017.
163. *Tug boat-manifold and exhaust piping*, <http://www.firwin.com/marine.html>, dostęp: 15.03.2017.
164. *New composit*, <http://www.power-technology.com/contractors/expansion/new-componit/new-componit8.html>, dostęp: 18.04.2017.
165. *Marine engine insulation*, <http://www.power-technology.com/contractors/expansion/new-componit/new-componit1.html>, dostęp: 18.04.2017.
166. *Co to jest HI – FOG?*, http://instac.pl/download/CO_TO_JEST_HI-FOG.pdf, dostęp: 20.05.2017.
167. *How high, pressure water mist firefighting system for ships works?*, <http://www.marineinsight.com/tech/how-high-pressure-water-mist-fire-fighting-system-for-ships-works/>, dostęp: 20.05.2017.
168. *Marine applications*, <http://marioff.fr/pagesperso-orange.fr/applications/marine.htm>, dostęp: 20.05.2017.
169. Liu L., Kim A.K., Review of water mist fire suppression systems. Fundamental studies, *Journal of Fire Protection Engineering*, 2000, 10(3), 32–50.

170. Novec™ 1230, https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/All-3M-Products/Novec/Novec-1230-Fire-Protection-Fluid/?N=5002385+8711017+8717595+8745195+3294857497&rt=r3, dostęp: 17.08.2018.
171. Gard, *Thermographical examinations of engine rooms*, 2003, <http://www.gard.no/web/updates/content/53333/thermographical-examinations-of-engine-rooms>, dostęp: 17.04.2016.
172. Meola C., Carlomagno G.M., Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15, 27–58.
173. Flir, *From the galley to the engine room: infrared thermography inspection of ships is gaining momentum*, <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=52129>, dostęp: 15.08.2017.
174. Flir, *Marine thermal monitoring system. Flir AX8*, <https://www.flir.eu/products/ax8-marine/>, dostęp: 30.08.2017.
175. American Bureau of Shipping, *Alternative design and arrangements for fire safety*, Houston, American Bureau of Shipping, 2004.
176. Krystosik-Gromadzińska A., Engine room and accommodation spaces as a place of fire hazard on a ship, in: *5th General Meeting of Network SAFERELNET. 5th European Framework*, Paris 2004, <http://www.mar.ist.utl.pt/saferelnet/wp2.asp>, dostęp: 15.04.2006.
177. Krystosik-Gromadzińska A., Bezpieczeństwo pożarowe siłowni statków handlowych, *Zeszyty Naukowe Szkoła Główna Służby Pożarowej*, 208, 65(2), 1, 161–186.
178. Herdzik J., *Poradnik motorzysty okrętowego*, Gdynia, Trademar, 2012.
179. Petterson O., Magnusson S.E., *Fire test methods – background, philosophy, development trends and future needs. Nordtest Project*, vol. 34–75, Lund, Nordtest, 1977.
180. Radkowski S., *Podstawy bezpiecznej techniki*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
181. *Materiały z wykładów*, www.sgsp2.inf.sgsp.edu.pl/dob_prez/wyk%B3ad.ppt, dostęp: 12.10.2017.
182. Kołodziński E., Lachowicz T., Romaniec P., Tomczyk Ł., Zepert P., *Modelowanie w inżynierii bezpieczeństwa*, Warszawa, WAT, 2015.
183. Kołodziński E., Lachowicz T., Romaniec P., Zepert P., *Wspomaganie decyzji w bezpieczeństwie*, Warszawa, WAT, 2014.
184. Szopa T., *Niezawodność i bezpieczeństwo*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
185. Mądrawska K., Rosochacki W., Ocena ryzyka w ruchu drogowym przez kierowców pojazdów uprzywilejowanych, *Bezpieczeństwo Pracy Nauka i Praktyka*, 2016, 11(542), 21–24.

186. Getka R., *Contribution to the concept of the constructional fire protection of accommodation spaces on ships*, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2011.
187. Babrauskas V., Estimating Room Flashover Potential, *Fire Technology*, 1980, 16(2), 94–103.
188. Quintiere J.G., McCaffrey B.J., Braven K., Experimental and theoretical analysis of quasi- steady small- scale enclosure fires, *International Symposium on Combustion*, 1979, 17(1), 1125–1137, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078479801071>, dostęp: 27.10. 2015.
189. Zhang M., Song W., Wang J., Chen Z., Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike, *Procedia Engineering*, 2014, 84, 565–577.
190. Crocker W.P., Napier D.H., Thermal radiation hazards of liquid pool fires and tank fires, *ICHEME Symposium Series*, 1986, 97, 159–184. <https://www.icheme.org/membership/communities/special-interest-groups/safety-and-loss-prevention/resources/hazards-archive/>, dostęp: 18.12.2014.
191. Xuan-ze H., Shou-xiang L., Bo-si Z., Chang-hai L., Effects of supply-exhaust ratio on smoke exhaust efficiency in a large machinery space, *Procedia Engineering*, 2016, 135, 469–475.
192. *Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV)*, <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>, dostęp: 25.10.2017.
193. Mehaffey J.R., Flammability of building materials and fire growth, in: *Building Science Insight'87. Designing for fire safety: The science and its application to building codes*, 1987, <https://publications-cnrc.canada.ca/eng/view/fulltext/?id=a2f1e26c-8d11-4481-a1a2-4b9afd5478e8>, dostęp: 29.10.2017.
194. *Fire dynamics tools (FDT), quantitative fire hazard analysis methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program*, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/s1/>, dostęp: 15.10.2017.
195. International Maritime Organization, *Recommendation on improved fire test procedures for surface flammability of bulkhead, ceiling and deck finish materials*, Res. A no. 653(16), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.653\(16\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.653(16).pdf), dostęp: 20.05.2017.
196. Urbański P., *Paliwa i smary*, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1997.
197. Czekaj K., *Przeprowa promowa w centrum Bielik*, http://www.fluidi.pl/o,1827/Przeprowa_promowa_w_centrum_Bielik/?zn=0&tab=1&rodz_zdj=4, dostęp: 17.06.2017.
198. *Dane techniczne promu m/s Bielik Żegluga Świnoujskiej*, Świnoujście, Żegluga Świnoujska, 2017.
199. National Institute of Standards Technology (NIST), *Fire dynamics simulator, technical reference guide*, vol. 1. *Mathematical model*, red. R. McGrattan et al., 6th edition,

- NIST, 2013, https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/2013/08/FDS_Technical_Reference_Guide.pdf, dostęp: 15.12.2017.
200. National Institute of Standards Technology (NIST), *Fire dynamics simulator (Version 5) technical reference guide, vol. 2. Verification*, red. R. McDermott et al., NIST, <http://sql.ktcad.nazwa.pl/archiwum/Pyrosim2016/podreczniki/Dokumenty-weryfikacji-FDS-Pyrosim-ENG.pdf>, dostęp: 27.05.2017.
 201. Wiśniewski S., *Wymiana ciepła*, Warszawa, PWN, 1988.
 202. International Maritime Organization, *Recommendation on fire resistance tests for "A", "B" and "F" class divisions*, Res. A. no. 754 (18), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.754\(18\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.754(18).pdf), dostęp: 20.05.2017.
 203. Nagórski Z., *Modelowanie przewodzenia ciepła za pomocą arkusza kalkulacyjnego, MRS + Excel = KM3R*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2001. ISBN 83-7207-226-4.
 204. Kubacka M., *Ergonomia w oceanotechnice*, Gdańsk, CTO, 1993.
 205. Milan L., *Zarys ergonomii okrętowej, cz. I, II*, Gdynia, Wyższa Szkoła Morska, 1982.
 206. International Maritime Organization, *Framework for consideration of ergonomics and work environment*, MSC-MEPC.7/Circ. no. 3, 2006, <http://www.imo.org/OurWork/HumanElement/TrainingCertification/Documents/MSC-MEPC7%20Circulars/3.pdf>, dostęp: 17.12.2017.
 207. International Labour Organisation, *A day in a life at sea*, 2014, http://ilo.org/global/about-the-ilo/multimedia/video/institutional-videos/WCMS_300848/lang--en/index.htm, dostęp: 30.06.2015.
 208. *Kampania zwalczająca nadmierne zmęczenie wśród marynarzy*, <http://www.solidarnosc.nms.org.pl/strony/menu/75.dhtml>, dostęp: 30.06.2015.
 209. Międzynarodowa Organizacja Pracy, *Trójstronna deklaracja zasad dotyczących przedsiębiorstw wielonarodowych i polityki społecznej*, http://www.mop.pl/html/index1.html#miedzynarodowe_standardy/deklaracja_trojstronna.html, dostęp: 30.06.2015.
 210. Konwencja o pracy na morzu, przyjęta przez Konferencję Ogólną Międzynarodowej Organizacji Pracy w Genewie dnia 23 lutego 2006 r., *Dziennik Ustaw z 2013 r.*, poz. 845, <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20130000845>, dostęp: 30.06.2015.
 211. International Maritime Organization, *Code for the construction and equipment of mobile offshore drilling units*, 2009, Res. A. no. 1023(26), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.1023\(26\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Assembly/Documents/A.1023(26).pdf), dostęp: 03.08.2015.
 212. Kodeks pracy, 1974, *Dziennik Ustaw z 2019 r.*, poz. 1040.

213. Ustawa z dnia 5 sierpnia 2015 r. o pracy na morzu, *Dziennik Ustaw z 2015 r.*, poz. 1569.
214. Polska Żegluga Morska, *System zarządzania bezpieczeństwem (SZB)*, Szczecin, Polska Żegluga Morska, 2010.
215. Dyrektywa Rady 2009/13/WE w sprawie wdrożenia Umowy zawartej między Stowarzyszeniem Armatorów Wspólnoty Europejskiej (ECSA) a Europejską Federacją Pracowników Transportu (ETF) w sprawie Konwencji o pracy na morzu z 2006 r. oraz w sprawie dyrektywy 1999/63/WE, *Dziennik Ustaw UE z 2009 r.*, nr 20, poz. 5.
216. PN-W-01350-4 : 1996. *Ochrona przed hałasem na statkach morskich. Dopuszczalne poziomy dźwięku na statkach towarowych i rybackich.*
217. Kropielewska M., *Ocena nasilenia stresu na stanowiskach pracowników statków dalekomorskich*. Praca magisterska, Pomorski Uniwersytet Medyczny w Szczecinie, 2015. [niepublikowana]
218. Reason J., *Human error*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
219. Turner B.A., Pidgeon N.F., *Man-made disasters*, Boston, Butterworth-Heinemann, 1997.
220. Jacobsson A., Ek Å., Akselsson R., Method for evaluating learning from incidents using the ideas of "level of learning", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24, 333–43.
221. Ek Å., Akselsson R., Safety culture on board six Swedish passenger ships, *Maritime Policy and Management*, 2005, 32(2), 159–76.
222. Jacobsson A., Ek Å., Akselsson R., Learning from incidents. A method for assessing the effectiveness of the learning cycle, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25, 561–70.
223. Ramęda H., *Zarządzanie bezpieczeństwem statku*, Szczecin, Zapol, 2009.
224. Langard B., Morel G., Chauvin Ch., Safety culture and operational safety management in maritime transportation, in: *The XXV Annual Occupational Ergonomics and Safety Conference*, Atlanta, June 2013, Atlanta, [b.w.], 170–175. ISBN 97819384865-1-6.
225. Krystosik-Gromadzińska A., Safety culture as an important factor of the fire safety of ship's engine room, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*. [po recenzjach]. [in English]
226. *Certyfikacja ISM*, <https://www.prs.pl/nadzory-okretowe/certyfikacja-ism.html>, dostęp: 10.11.2018.
227. *Maintenance of safety equipment*, <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2016-04/DNVGL-CG-0058.pdf>, dostęp: 5.05.2016.
228. *Common topic 4: Safety culture*, <http://www.hse.gov.uk/humanfactors/topics/common4.pdf>, dostęp: 7.08.2017.

229. Kowalski P., *Kultura bezpieczeństwa*, <http://kulturabezpieczenstwa.pl/bezpieczenstwo/835-kultura-bezpieczenstwa>, dostęp: 7.08.2017.
230. Krystosik-Gromadzińska A., Rogowski K., Wykorzystanie symulatora HOMAR OPA w szkoleniu MW, *General and Professional Education*, 2015, 4, 20–28.
231. Krystosik-Gromadzińska A., Grubicka J., Rogowski K., Symulator HOMAR OPA jako narzędzie służące do szkolenia załóg jednostek pływających MW w zakresie ochrony przeciwwawaryjnej, w: *Podmioty, środowiska i obszary edukacyjne: wyzwania i zagrożenia połowy XXI wieku*, t. 3, red. N. Starik, T. Węglarz, Poznań, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Bezpieczeństwa, 2015, 333–349.
232. Krystosik-Gromadzińska A., Rogowski K., The HOMAR OPA simulator as a training tool for *professional* petty officers and semen trainings in the subject of firefighting and water defence, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej*, 2012, 29, 95–101. [in English]
233. Girtler J., Kitowski Z., Kuriata A., *Bezpieczeństwo okrętu na morzu – ujęcie systemowe*, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1995.
234. Kopociński B., *Zarys teorii odnowy i niezawodności*, Warszawa, PWN, 1973.
235. Młyńczak M., Inżynieria bezpieczeństwa rozległych systemów technicznych, w: *VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Uszkodzeń Eksploatacyjnych, FUE 2015*, Augustów, czerwiec 2015. [plik pdf]
236. Hann M., *Komputerowa analiza niezawodności i bezpieczeństwa maszyn i konstrukcji okrętowych poddanych kołysaniom*, Gdańsk, Okrętownictwo i Żegluga, 2001.
237. Lewitowicz J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych. Statek powietrzny i elementy teorii*, Warszawa, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2001.

ABSTRACT

SELECTED PROBLEMS OF ENGINE ROOM FIRE SAFETY FORMING

The fire safety of a ship's engine room depends on the occurrence of the damages, breakdowns (primarily fuel installations) or disastrous events during the ship's operation, the effectiveness of the passive protection, the detection and fire-extinguishing installations, but also the risk of an operator's error. A holistic approach to the problem, conducting research on the system meant as a technical object and a human, allows to give the full description of the threats and their effects as well as indicating the best methods for the prevention of fires and limiting their spread under given circumstances.

In the engine room, the most common cause of fires, which is characterised by high dynamics and high gas temperatures, is the ignition of fuel on a hot surface. As a result of conducted analyses it is shown that mistakes made by the ship's crews are the main reason for occurrence of any adverse events, including fires. Striving to reduce their number, activities are implemented to build a culture of safety and to improve working and resting conditions. The workplaces are subject to ergonomic diagnoses to reduce physical and mental overload of crews. Training courses are also conducted both in the marine and land conditions using simulators. Security management systems are implemented, modified and supported by modular algorithms.

In order to increase the level of fire safety the measures are to identify risk objects, including the use of thermal imaging cameras built into smartphones, used to detect surfaces radiating temperature, which gives the possibility of quick control, also in difficult places available. Fire scenarios are being developed preceded by qualitative and quantitative identification of risk factors (Ishikawa diagrams, event trees, algorithms, risk indexes, etc.), which allows systemising the causes of fires and predicting their course. Modelling fires with a mathematical description and the use of computer models (such as Pyrosim and SmokeView) allows to determine the dynamics of their development and provide data used to choose methods of fire protection.

The determination of fire risk and modelling of the phenomenon contributes not only to increasing the level of safety of the engine room but also to the development of research in respect of new solutions of fire partitions and insulation and the extinguishing agents as well as the use of dislocation as a method of fire protection.

ZUSAMMENFASSUNG

AUSGEWÄHLTE PROBLEME FÜR DIE FEUERSICHERHEIT EINES SCHIFFSMASCHINENRAUMS

Die Brandsicherheit des Schiffsmaschinenraums hängt vom Auftreten von Beschädigungen, Ausfällen, (vor allem von Kraftstoffanlagen) katastrophalen Ereignissen während des Schiffsbetriebs oder der Wirksamkeit von baulichen Schutz-, Erkennungs- und Löschanlagen und dem Fehlerrisiko des Betreibers ab.

Ein ganzheitlicher Ansatz hinsichtlich des Problems, Erforschung des Systems, das ein technisches Objekt und ein Mensch bildet, ermöglicht eine vollständige Beschreibung der Bedrohungen und ihrer Folgen und die Ermittlung für die gegebene Bedingungen der besten Methoden zur Verhinderung des Auftretens von Bränden und zur Einschränkung ihrer Ausbreitung.

Im Schiffsmaschinenraum als häufigste Ursache der Brände, die sich durch eine hohe Dynamik und hohe Temperaturen der Gase auszeichnen, wird die Kraftstoffzündung auf einer heißen Oberfläche identifiziert. Als Ergebnis der durchgeführten Analysen wird angezeigt, dass Fehler der Besatzungen die Hauptursache für unerwünschte Ereignisse, einschließlich Brände, sind. Um ihre Zahl zu verringern, werden Aktivitäten durchgeführt, die auf den Aufbau einer Sicherheitskultur und die Verbesserung der Arbeits- und Erholungsbedingungen abzielen. Die Arbeitsplätze sind ergonomisch zu diagnostizieren, um die körperliche und psychische Belastung der Besatzungen zu verringern. Die Schulungen werden auch unter See- und Landbedingungen mit Hilfe von Simulatoren durchgeführt und Sicherheitsmanagementsysteme werden implementiert und modifiziert, die durch modulare Verhaltensalgorithmen unterstützt sind.

Um den Brandsicherheit des Schiffsmaschinenraums zu erhöhen, ergreift man Maßnahmen zur Identifizierung der Risikoobjekten u.a. mittels eingebauten in Smartphones Wärmebildkameras, die zur Erkennung von Oberflächen bei erhöhten Temperaturen eingesetzt werden. Das ermöglicht auch eine schnelle Kontrolle von Stellen, die schwer zugänglich sein können. Es werden Brandszenarien erstellt, die der qualitativen und quantitativen Identifizierung von Risikofaktoren vorausgehen (Ishikawa-Diagramme, Ereignissbäume, Algorithmen, Risikoindizes usw.), mit denen sie die Brandursachen systematisieren und deren Verlauf vorhersagen können. Modellierung der Brände mit mathematischer Beschreibung und mit der Anwendung von Computermodellen (wie Pyrosim und SmokeView) ermög-

licht die Dynamik ihrer Entwicklung zu bestimmen und Daten zur Auswahl von Brandschutzmethoden zu liefern.

Die Bestimmung des Brandrisikos und die Modellierung des Phänomens trägt nicht nur zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus im Maschinenraum bei, sondern auch zur Entwicklung von Forschungsarbeiten an neuen Lösungen von Trennwänden, Brandschutz- und Löschmitteln. Es trägt auch zur Verwendung der Dislokation als die Methode gegen die Ausbreitung von Feuer bei.