

Leszek Chybowski

**Eksplozje w skrzyniach korbowych
silników okrętowych – przyczyny,
zapobieganie i minimalizacja skutków**

*Pracę niniejszą dedykuję moim Mentorom:
prof. Bolesławowi Kuźniewskiemu
i prof. Wojciechowi Przetakiewiczowi*

W niniejszej pracy przedstawiono rezultaty realizacji tematu badań statutowych 1/S/KPBMIM/21 pn. „Poprawa efektywności funkcjonowania systemów technicznych poprzez modyfikację ich struktury i wykorzystanie nowoczesnych materiałów”, prowadzonego w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn i Materiałoznawstwa na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Szczecinie.

Leszek Chybowski

**Eksplzje w skrzyniach korbowych
silników okrętowych – przyczyny,
zapobieganie i minimalizacja skutków**

**Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie
Szczecin 2022**

Leszek Chybowski
Eksplozje w skrzyniach korbowych silników okrętowych
– przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego
Akademii Morskiej w Szczecinie



Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Adam Charchalis

prof. dr hab. inż. Stefan Żmudski

Redaktor naukowy:

prof. dr hab. inż. Katarzyna Gawdzińska

© Copyright by Leszek Chybowski & Akademia Morska w Szczecinie 2022

Na okładce wykorzystano schematy absorpcyjnych detektorów mgły olejowej
w wersji urządzenia komparatorowego i niwelacyjnego Typ 4 firmy Graviner

Opracowanie wydawnicze: Teresa Jasiunas

Projekt okładki: Tomasz Kwiatkowski

Skład komputerowy: Irena Hajdasz

ISBN 987-83-64434-37-2

Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie
70-506 Szczecin, ul. T. Starzyńskiego 8, www.wydawnictwo.am.szczecin.pl
Wydanie I. Nakład 200 egz. Format B5. Objętość 11 ark. wyd.
Druk: Volumina.pl Daniel Krzanowski, 71-063 Szczecin, ul. Ks. Witolda 7–9

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
Wstęp	9
1. Znaczenie tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych silników okrętowych	15
2. Skrzynie korbowe silników okrętowych	21
2.1. Podstawowe informacje o skrzyniach korbowych	21
2.2. Skrzynie korbowe silników bezwodzikowych	23
2.3. Skrzynie korbowe silników wodzikowych	24
3. Przyczyny eksplozji w skrzyniach korbowych	27
3.1. Spalanie, pożar i eksplozja	27
3.2. Sekwencja zdarzeń prowadzących do eksplozji w skrzyni korbowej .	29
3.3. Eksplozje w skrzyniach korbowych silników bezwodzikowych	33
3.4. Eksplozje w skrzyniach korbowych silników wodzikowych	36
4. Minimalizacja zagrożenia eksplozją w skrzyniach korbowych	41
4.1. Zalecenia ogólne	41
4.2. Kontrola stanu technicznego układów korbowo-tłokowych	41
4.3. Kontrola szczelności komór spalania	43
4.4. Kontrola stanu technicznego dławic trzonu tłoka	47
4.5. Postępowanie w przypadku alarmu ostrzegającego przed eksplozją ..	51
5. Budowa i zasada działania detektorów mgły olejowej	53
5.1. Podstawowe informacje o detektorach mgły olejowej	53
5.2. Detektory absorpcyjne	54
5.3. Detektory nefelometryczne	58
5.4. Dobór detektora mgły olejowej	60
6. Rozwiązania konstrukcyjne detektorów mgły olejowej	63
6.1. Detektory firmy Schaller Automation	63
6.2. Detektory firmy Daihatsu	69
6.3. Detektory firmy Kidde-Graviner	72
6.4. Detektory firmy Specs	76
6.5. Detektory firmy QMI	77

7. Wybrane systemy diagnostyczno-pomiarowe podsystemów silników okrętowych	81
7.1. Temperatura łożysk układu korbowo-tłokowego	81
7.2. Zużycie łożysk układu korbowo-tłokowego	85
7.3. Czujniki gazu w przestrzeniach podtłokowych	87
7.4. Ciśnienie w skrzyni korbowej	88
8. Minimalizacja skutków eksplozji w skrzyniach korbowych	91
8.1. Zawory eksplozyjne	91
8.2. Inertowanie skrzyń korbowych	93
8.3. Doprowadzenie wody do skrzyni korbowej	94
9. Kształcenie w tematyce eksplozji w skrzyniach korbowych	97
9.1. Informacje ogólne	97
9.2. Dane symulatora siłowni okrętowej	98
9.3. Wstępne założenia dla realizacji ćwiczenia	102
9.4. Symulacja pracy silnika z włączonym systemem bezpieczeństwa	104
9.5. Symulacja pracy silnika z wyłączonym systemem bezpieczeństwa	106
9.6. Perspektywy rozwoju scenariuszy szkoleniowych	109
Podsumowanie	111
Piśmiennictwo cytowane	113
Załączniki	121
Wykaz rysunków	163
Wykaz tabel	166
Streszczenie	167
Abstract	169

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

ATEX	– dyrektywa Unii Europejskiej definiująca wymagania zasadnicze, jakie musi spełniać każdy produkt przeznaczony do stosowania w strefach zagrożonych wybuchem (fr. <i>atmosphères explosibles</i>)
BWM	– system monitoringu zużycia łożysk (ang. <i>bearing wear monitoring</i>)
CCP	– detektor ciśnienia w skrzyni korbowej (ang. <i>crankcase pressure detector</i>)
CMK	– centrala manewrowo-kontrolna maszynowni
DMP	– dolne martwe położenie (dolny martwy punkt, zwrot wewnętrzny) tłoka
GMP	– górne martwe położenie (górny martwy punkt, zwrot zewnętrzny) tłoka
IACS	– Międzynarodowe Stowarzyszenie Towarzystw Klasyfikacyjnych (ang. <i>International Association of Classification Societies</i>)
IGC	– Międzynarodowy kodeks budowy i wyposażenia statków przewożących skroplone gazy luzem (ang. <i>International Gas Carrier Code</i>)
IGF	– Międzynarodowy kodeks bezpieczeństwa statków stosujących paliwo gazowe lub inne paliwa o niskiej temperaturze zapłonu (ang. <i>International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels</i>)
IMO	– Międzynarodowa Organizacja Morska (ang. <i>International Maritime Organization</i>)
LEL	– dolna granica wybuchowości (ang. <i>lower explosive limit</i>)
OMD	– detektor mgły olejowej (ang. <i>oil mist detector</i>)
°OWK	– stopień kątowy obrotu wału korbowego
pH	– wykładnik jonów wodorowych (miara odczynu roztworu)
p_k	– maksymalne ciśnienie sprężania
$p_{\max}$	– maksymalne ciśnienie spalania
p_o	– ciśnienie otoczenia
PRS	– Polski Rejestr Statków (ang. <i>Polish Register of Shipping</i>)
QMI	– skrótowa nazwa producenta detektorów mgły olejowej (ang. <i>Quality Monitoring Instruments</i>)
S	– skok tłoka
SAB	– skrótowa nazwa producenta detektorów mgły olejowej (niem. <i>Schaller Automation Blieskastel</i>)

SAN	– zawartość silnych kwasów nieorganicznych w oleju (ang. <i>strong acid number</i>)
SHD	– zatrzymanie silnika (ang. <i>shut down</i>)
SLD	– zmniejszenie prędkości obrotowej/obciążenia silnika (ang. <i>slow down</i>)
SOLAS	– Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (ang. <i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>)
SPU	– procesor sygnałowy (ang. <i>signal processing unit</i>)
STCW	– Międzynarodowa konwencja o wymaganiach w zakresie wyszkolenia marynarzy, wydawania im świadectw oraz pełnienia wacht (ang. <i>Standards of Training, Certification and Watchkeeping</i>)
TAN	– całkowita liczba kwasowa oleju smarnego (ang. <i>total acid number</i>)
TBN	– całkowita liczba zasadowa oleju smarnego (ang. <i>total base number</i>)
UEL	– górna granica wybuchowości (ang. <i>upper explosive limit</i>)
V	– objętość gazu w cylindrze

WSTĘP

Na rynku wydawniczym dostępnych jest wiele książek poświęconych budowie, zasadzie działania oraz eksploatacji silników spalinowych, w tym okrętowych. Pośród polskojęzycznych publikacji również nie brakuje podręczników omawiających podstawowe zagadnienia niezbędne do zrozumienia istoty konkretnych rozwiązań technicznych.

Mając to na uwadze, nie zamierzam powielać bardzo dobrych publikacji poświęconych tym zagadnieniom. Jednak wykładając od wielu lat przedmioty „eksploatacja urządzeń siłowni okrętowych” i „okrętowe tłokowe silniki spalinowe i ich systemy sterowania”, dostrzegłem istotny brak pozycji literaturowych ukierunkowanych na zagadnienia poprawy bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Publikacje z zakresu inżynierii bezpieczeństwa dotyczą zwykle zagadnień ogólnych lub stanowią wysoce specjalistyczne opracowania naukowe. Z kolei podręczniki teorii silników spalinowych poświęcają tym zagadnieniom zbyt mało uwagi, zwykle są to pojedyncze rozdziały.

Skłoniło mnie to do podjęcia wypełnienia wymienionej luki. Jednym z zagadnień w moim odczuciu wartym przedstawienia w postaci poradnika są wybuchy (eksplozje) w skrzyniach korbowych silników okrętowych. Pomimo że pojęcie eksplozji jest znaczeniowo węższe od pojęcia wybuchu, to mając na uwadze cel publikacji, terminy te będę stosował zamiennie.

Książkę niniejszą kieruję do studentów kierunków technicznych związanych z utrzymaniem ruchu maszyn i urządzeń oraz wszystkich operatorów silników spalinowych dużej mocy, wyrażając nadzieję, że przyczyni się ona choćby w minimalnym stopniu do poprawy bezpieczeństwa eksploatacji maszynowni różnych typów.

Silniki okrętowe wykorzystywane są od ponad wieku na statkach, a stopień ich rozwoju technicznego osiągnął wysoki pułap. Współczesne wodorowe (krzyżulcowe), wolnoobrotowe silniki tłokowe są najbardziej sprawnymi maszynami cieplnymi dotychczas zbudowanymi przez człowieka – sprawności ogólne dla systemów z głęboką utylizacją energii odpadowej przekraczają obecnie 55%.

Jednak pomimo rozwoju ich konstrukcji, zastosowania nowoczesnych materiałów, paliw, olejów smarowych oraz aplikacji systemów elektronicznego sterowania, zabezpieczeń i nadzoru silniki te stanowią źródło wielu zagrożeń, które mogą wystąpić podczas ich użytkowania i obsługi. Jednym z takich zagrożeń,

które wciąż jest obecne podczas pracy silników, zarówno napędu głównego, jak i pomocniczych, jest ryzyko eksplozji mgły olejowej w skrzyniach korbowych tych silników.

Brak pozycji książkowej przedstawiającej wymieniony temat w sposób kompleksowy skłonił mnie do napisania niniejszego przewodnika. Niektóre z opisanych zagadnień można znaleźć w postaci rozproszonej w różnych źródłach literatury lub w instrukcjach technicznych, inne zaś nie zostały ujęte w znanych mi publikacjach polskojęzycznych. Według mojej wiedzy niniejsze opracowanie jest pierwszym polskojęzycznym poradnikiem ujmującym w sposób kompleksowy tematykę przyczyn, zapobiegania oraz minimalizacji skutków eksplozji w skrzyniach korbowych silników okrętowych.

Z zamierzeniu moim niniejsza monografia ma stanowić informacyjny zbiór zebrany w jednej pozycji, a nie jak dotąd rozproszony w wielu instrukcjach, zaleceniach prawnych oraz podręcznikach na temat eksploatacji maszyn. Przy opracowaniu poradnika wykorzystałem upowszechnione i ogólnie dostępne w Internecie poradniki, instrukcje i zalecenia producentów maszyn i urządzeń okrętowych takich jak: Daihatsu, Electro-Motive, Graviner, Kidde-Graviner, Hoerbiger, Kongsberg Maritime MAN Energy Solutions, Quality Monitoring Instruments – QMI, Schaller Automation, Specs, WinGD i innych. Wszystkie przedstawione rozwiązania i oznaczenia są własnością ich odpowiednich właścicieli i podlegają ochronie na mocy praw autorskich, praw własności przemysłowej i innych przepisów, a zostały w niniejszym materiale przedstawione w celach edukacyjnych w zakresie dozwolonego użytku. Nie gwarantuję aktualności poszczególnych rozwiązań i odsyłam czytelnika do ewentualnych dostawców omawianych w pracy urządzeń celem uzyskania najbardziej aktualnej wiedzy.

W monografii wykorzystałem też materiały graficzne i informacje związane z tematem książki, które zaczerpnąłem z prac znawców tematyki eksploatacji silników spalinowych: Stefana Kluja, Leszka Piasecznego, Ildefonsa Piotrowskiego, Jana Wajanda, Kazimierza Witkowskiego, Kazimierza Włodarskiego i innych.

W pracy skorzystałem również z materiałów przedstawionych na stronie internetowej MarineDiesels, która popularyzuje wiedzę z zakresu mechaniki okrętowej. Niestety w przypadku tej ostatniej witryny internetowej, pomimo kilkukrotnych prób kontaktu z administratorem strony, nie uzyskałem żadnej odpowiedzi w sprawie zgody na publikację materiałów na niej przedstawionych. Informacje dotyczące tej strony przedstawiłem z podaniem wszystkich danych bibliograficznych, którymi dysponowałem.

Ponadto wszędzie, gdzie korzystałem ze źródeł internetowych, podawałem możliwie pełne dane bibliograficzne, jednak czasami ze względu na częsty brak podpisu źródeł sprowadzałem opis informacji o autorze do nazwy instytucji publikującej dany materiał. Tam, gdzie to było możliwe, próbowałem dotrzeć do imienia i nazwiska autora, jednak wiele próśb o informacje dotyczące autorstwa pozostało bez odpowiedzi. W przypadku dokumentów nieposiadających danych

kontaktowych autora podjęcie prób kontaktu nie było w ogóle możliwe. Dotyczyło to zwłaszcza prezentacji multimedialnych i niektórych rysunków. Jeśli jakkolwiek opis źródeł przedstawionych w niniejszej publikacji powinien zostać uzupełniony, uprzejmie proszę o kontakt osoby mające taką wiedzę celem dokonania korekt w kolejnych wydaniach niniejszej książki.

Tematykę bezpieczeństwa skrzyni korbowej silnika podzieliłem i przedstawiłem w dziewięciu rozdziałach głównych.

W rozdziale pierwszym dokonałem wprowadzenia do tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych silników okrętowych. Przedstawiłem podstawowe informacje statystyczne dotyczące wypadków związanych z eksploatacją silników okrętowych i ich zidentyfikowanych przyczyn w podziale na źródło zagrożenia.

Rozdział drugi zawiera podstawowe informacje na temat skrzyń korbowych, ich budowy, zadań i rozwiązań konstrukcyjnych w podziale na silniki wodzikowe i bezwodikowe. Przykłady zaczerpnąłem głównie spośród rozwiązań technicznych spotykanych w silnikach MAN Burmeister & Wain oraz Sulzer, Wärtsilä, WinGD.

Rozdział trzeci przedstawia przyczyny eksplozji w skrzyniach korbowych. Wprowadza czytelnika w zagadnienia procesów palenia, pożarów i eksplozji. Omawia sekwencję zdarzeń prowadzących do zajścia eksplozji w skrzyni korbowej oraz omawia główne przyczyny źródłowe tych eksplozji w silnikach wodzikowych i bezwodikowych.

Rozdział kolejny, czwarty, przybliży zagadnienia związane z minimalizacją zagrożenia eksplozją w skrzyni korbowej. Przedstawia zalecenia ogólne oraz szczegółowo omawia kontrole stanu technicznego układów korbowo-tłokowych, szczelności komór spalania i stanu technicznego dławic trzonu (długa) tłoka. Omówione są w nim również parametry oleju obiegowego silnika, których zmiana może stanowić informację o stanie technicznym elementów przyczyniających się do powstania eksplozji w skrzyni korbowej. Finalnie w rozdziale tym przedstawiono postępowanie w przypadku alarmu ostrzegającego przed możliwą eksplozją.

Rozdział piąty omawia budowę i zasadę działania detektorów mgły olejowej w podziale na detektory absorpcyjne i nefelometryczne, tj. typy detektorów spotykane w rozwiązaniach okrętowych.

W rozdziale szóstym przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne i podstawowe parametry techniczne detektorów mgły olejowej najpopularniejszych dostawców tych urządzeń.

Rozdział siódmy pokazuje budowę, zasadę działania i podstawowe rozwiązania konstrukcyjne systemów diagnostyczno-pomiarowych zwiększających bezpieczeństwo eksploatacji silnika w zakresie prewencji eksplozyjnej skrzyń korbowych. Zaprezentowane zostały systemy monitoringu temperatury łożysk układu korbowo-tłokowego, monitoringu zużycia łożysk, czujniki gazu oraz detektory ciśnienia w skrzyni korbowej.

W rozdziale ósmym omówiono działania prewencyjne w zakresie minimalizacji skutków potencjalnej eksplozji w skrzyni korbowej silnika. Scharakteryzowane zostały zawory eksplozyjne, inertowanie skrzyń korbowych oraz wykorzystanie wody do modyfikacji atmosfery skrzyni korbowej.

Rozdział ostatni przedstawia propozycje dotyczące kształcenia inżynierów mechaników okrętowych z tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych między innymi z wykorzystaniem symulatorów siłowni okrętowych w zakresie szkoleń poświęconych analizie przebiegu eksplozji i czynników do niej prowadzących oraz działania systemu zabezpieczeń silnika. Przykładowe scenariusze zdarzeń zaprezentowano z wykorzystaniem symulatora Neptune firmy Kongsberg Maritime. Symulacje dotyczyły użytkowania silnika z pracującym systemem bezpieczeństwa oraz z wyłączonym systemem bezpieczeństwa. W rozdziale ostatnim wykorzystałem scenariusze zdarzeń opracowane i przedstawione w przygotowanej w 2009 r. pod moim kierownictwem pracy dyplomowej inżynierskiej pana Oskara Ślesickiego.

Pracę kończy podsumowanie oraz załączniki w postaci wyimków z wybranych dokumentów prawnych Międzynarodowego Stowarzyszenia Klasyfikatorów Morskich (IACS), Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) i Polskiego Rejestru Statków (PRS), w tym przetłumaczonych z języka angielskiego na polski przepisów dotyczących bezpieczeństwa eksploatacji skrzyń korbowych, takich jak wybrane wytyczne IACS oraz fragmenty międzynarodowych kodeksów IMO. Dołożyłem starań, aby możliwie wiernie przełożyć oryginalny tekst. W przygotowaniu przekładu wspomógł mnie zespół tłumaczy dr. hab. Marka Hunta, któremu dziękuję za pomoc. Mając na uwadze, że wymienione tłumaczenia nie są dokumentami oficjalnymi, proszę, aby tam, gdzie to dotyczy, dla celów powoływania się na odpowiednie przepisy korzystać z anglojęzycznego materiału źródłowego, a przedstawione w załącznikach tłumaczenia traktować jako materiał pomocniczy.

Składam podziękowanie firmie Kongsberg Maritime za wyrażenie zgody na publikację zrzutów ekranowych z symulatorów. Ponadto dziękuję Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe badań będących przedmiotem niniejszej pracy. Bardzo dziękuję recenzentom: Profesorowi Adamowi Charchalisowi oraz Profesorowi Stefanowi Żmudzkiemu za cenne uwagi i wskazówki, które istotnie przyczyniły się do poprawy jakości niniejszej pracy. Dziękuję także Pani redaktor naukowej niniejszej monografii Profesor Katarzynie Gawdzińskiej za uwagi techniczne i edytorskie oraz Pani redaktor Teresie Jasiunas za opracowanie wydawnicze, a także Pani Irenie Hajdasz za skład i dużą pomoc w poprawie szaty graficznej pracy. Szczególne podziękowania kieruję jednak do Żony – za inspirację, motywację, cierpliwość i wsparcie. Podsumowując podziękowania, chciałbym wskazać jeszcze na dedykację niniejszej pracy, którą kieruję do moich mentorów – polihistorów i luminarzy, ludzi wybitnych i skromnych – w osobach Profesora Wojciecha Przetakiewicza i nieżyjącego już niestety Profesora Bolesława Kuźniewskiego.

Wyrażam przekonanie, iż niniejsza monografia będzie przydatnym przewodnikiem dla eksploatorów systemów energetycznych, a także umożliwi lepsze zrozumienie procesów zachodzących w silnikach spalinowych przez studentów kierunków mechanicznych uczelni wyższych. Proszę jednocześnie pamiętać, że książka niniejsza stanowi wyłącznie dodatkowe źródło informacji i nie zastąpi instrukcji i wytycznych producentów maszyn i urządzeń oraz przepisów w zakresie bezpieczeństwa. Do przestrzegania tych dokumentów zobligowany jest każdy eksploator maszyn. Ponadto należy pamiętać o zdrowym rozsądku i tym, że bezpieczeństwo jest zawsze na pierwszym miejscu.

Życzę Państwu przyjemnej lektury i proszę o kierowanie do mnie wszelkich uwag i propozycji, które mogłyby przyczynić się do poprawy jakości tej i kolejnych publikacji.

Leszek Chybowski

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

1. Allianz Global Corporate & Specialty *Safety and shipping review 2019*; Munich, 2019.
2. UNCTAD *Review of Maritime Transport*; United Nations: Genewa, 2020.
3. Grzywaczewski, Z. *Niezawodność statków*; Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego WEMA: Warszawa, 1988.
4. Cieślak, A.; Jacek, D.; Górski, M.; Dziubiński, M.; Kosmowski, K.; Markowski, A.; Pawlak, H.; Szopa, T.; Żyła, R. *Zapobieganie stratom w przemyśle*; Łódź, 2000; ISBN 83-87198-99-4.
5. Baalisampang, T.; Abbassi, R.; Garaniya, V.; Khan, F.; Dadashzadeh, M. Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation. *Ocean Eng.* **2018**, *158*, 350–366, doi:10.1016/j.oceaneng.2018.04.022.
6. Lieckfeld, G. *Wiadomości praktyczne o motorach gazowych*; Nakładem Hipolita Wawelberga: Warszawa, 1899.
7. Piotrowski I.; Witkowski K. *Okrętowe silniki spalinowe*; 3. Ed.; Trademar: Gdynia, 2013; ISBN 978-83-62227-48-8.
8. Chybowski, L. *Diagnozowanie silników okrętowych z zapłonem samoczynnym w oparciu o analizę procesów wtrysku i spalania paliwa*; Maritime University of Szczecin Press: Szczecin, 2019.
9. Valčić, M. *The learning resource for marine engineers* www.marinediesels.co.uk; Warshash Maritime Academy: Warsash, Rjeka.
10. Laskowski, R.; Chybowski, L.; Gawdzińska, K. An engine room simulator as a tool for environmental education of marine engineers; In: Rocha, A.; Costanzo, S.; Reis, L. (eds) *New Contributions in Information Systems and Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015; Vol. 354, Springer, Cham, pp. 311–322, doi: 10.1007/978-3-319-16528-8_29.
11. Grzywaczewski, Z.; Plewa, H.; Popielawski, T.; Załęcki, S. *Walka z pożarami na statkach*; Wydawnictwo Morskie: Gdańsk, 1967.
12. Kukula, T.; Getka, R.; Żyłkowski, O. *Techniczne zabezpieczenie przeciwpożarowe i przeciwwybuchowe okrętów*; Wydawnictwo Morskie: Gdańsk, 1981.
13. Włodarski, J. *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Uczelniane WSM w Gdyni: Gdynia, 1998.
14. Piotrowski, I.; Witkowski, K. *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*; Akademia Morska w Gdyni: Gdynia, 2005.

15. Krystosik-Gromadzińska, A. *Wybrane problemy kształtowania bezpieczeństwa pożarowego siłowni okrętowej*; Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie: Szczecin, 2020.
16. Karliński, J.; Ptak, M.; Chybowski, L. Simulation-Based Methodology for Determining the Dynamic Strength of Tire Inflation Restraining Devices. *Energies* **2020**, *13*, 991, doi:10.3390/en13040991.
17. Karliński, J.; Ptak, M.; Chybowski, L. A Numerical Analysis of the Working Machine Tyre Inflation Process to Ensure Operator Safety. *Energies* **2019**, *12*, 2971, doi:10.3390/en12152971.
18. Kaczyński, P.; Ptak, M.; Fernandes, F.; Chybowski, L.; Wilhelm, J.; Alves de Sousa, R. Development and Testing of Advanced Cork Composite Sandwiches for Energy-Absorbing Structures. *Materials (Basel)* **2019**, *12*, 697, doi:10.3390/ma12050697.
19. Ratajczak, M.; Ptak, M.; Chybowski, L.; Gawdzińska, K.; Będziński, R. Material and Structural Modeling Aspects of Brain Tissue Deformation under Dynamic Loads. *Materials (Basel)* **2019**, *12*, 271, doi:10.3390/ma12020271.
20. Chybowski, L.; Przetakiewicz, W. Estimation of the Probability of Head Injury at a Given Abbreviated Injury Scale Level by Means of a Function of Head Injury Criterion. *Syst. Saf. Hum. – Tech. Facil. – Environ.* **2020**, *2*, 91–99, doi:10.2478/czoto-2020-0012.
21. Chybowski, L.; Matuszak, Z. Marine Auxiliary Diesel Engine Turbocharger Damage (Explosion) Cause Analysis. *J. Polish CIMAC* **2007**, *2*, 33–40.
22. Chybowski, L.; Grzebieniak, R. Zagrożenie eksplozyjne w układach rozruchowych okrętowych silników wysokoprężnych. *Ekon. i Organ. Przedsiębiorstwa* **2009**, *5*, CD-ROM.
23. Chybowski, L.; Grzebieniak, R. Metoda oceny stanu technicznego zaworów rozruchowych wysokoprężnego silnika okrętowego. *Ekon. i Organ. Przedsiębiorstwa* **2009**, *5*, CD-ROM.
24. Chybowski, L.; Kazienko, D. The Development of an Explosion Protection System in the Starting Air Manifold of a High Power Engine. *Syst. Saf. Hum. – Tech. Facil. – Environ.* **2019**, *1*, 26–34, doi:10.2478/czoto-2019-0004.
25. Chybowski, L.; Strojecki, S.; Markiewicz, W. Simulation-Based Training in Fire Prevention and Fire-Fighting of Scavenge Air Receivers Fires. *Syst. Saf. Hum. – Tech. Facil. – Environ.* **2019**, *2*, 100–111.
26. Minkhorst, J.H. *Crank Case Explosions in Diesel Engines*; Studiecentrum TNO voor Scheepsbouw en Navigatie: Delft, 1957.
27. Chybowski, L.; Gawdzińska, K.; Ślesicki, O.; Patejuk, K.; Nowosad, G. An engine room simulator as an educational tool for marine engineers relating to explosion and fire prevention of marine diesel engines. *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin, Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2015**, *43*, 15–21, doi:10.17402/034.
28. Rickaby, P. et al. *Crankcase explosions*; IMAREST: Londyn, 2002;
29. Burgoyne, J.; Newitt, D. Crankcase explosions in marine engines. *A.S.N.E. J.* **1956**, February, 122–128.
30. Eckhoff, R.K. *Explosion Hazards in the Process Industries*; Elsevier: Houston, 2005; ISBN 9780976511342.
31. IACS *Requirements concerning machinery installations*; International Association of Classification Societies: London, UK, 2016.

32. PRS *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Część VII. Silniki, mechanizmy, kotły i zbiorniki ciśnieniowe*; Polski Rejestr Statków: Gdańsk, 2020.
33. Marine Diesels Operational Information. The Two Stroke Crosshead Engine Available online: http://www.marinediesels.info/2_stroke_crosshead_engine_access.htm (accessed on Mar 17, 2021).
34. Marine Diesels Operational Information. The Medium Speed 4 Stroke Trunk Piston Engine Available online: http://www.marinediesels.info/4_stroke_trunk_piston_engine_access.htm (accessed on Mar 17, 2021).
35. MAN B&W Diesel A/S *Crankcase Explosions in Two-stroke Diesel Engines*; MAN Burmeister and Wain: København, 2002.
36. CA69 *Crankcase explosion casualty investigation British Valour – Offshore Bermuda 23.03hrs (GMT) 18 March 2001*; Raport pobrano ze strony Martin's Marine Engineering Page – www.dieselduck.net, 2001.
37. Australian Transport Safety Bureau *Independent investigation into the equipment failure aboard the Hong Kong flag container vessel Maersk Tacoma*; Australian Government: Canberra, 2005.
38. Australian Transport Safety Bureau *Independent investigation into the equipment failure aboard the Australian flag roll-on/roll-off vessel Searoad Mersey*; Australian Government: Canberra, 2004.
39. The Hong Kong Special Administrative Region *Report of investigation into the engine room fire on board Hong Kong registered M.T. "An Tai Jiang" on 9 January 2009*; Marine Department. Marine Accident Investigation Section: Hong Kong, 2009.
40. Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation *Serious engine damage followed by fire on board the cargo vessel THETIS D on 26 October 2015 in the Kiel Bight*; BSU: Hamburg, 2018.
41. MAIB *Catastrophic engine failure, resulting in a fire and serious injuries to the engineer on board Wight Sky, off Yarmouth 12 September 2017*; Marine Accident Investigation Branch: London, 2018.
42. Żółtowski, B. *Podstawy diagnostyki maszyn*; Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej: Bydgoszcz, 1996.
43. Żółtowski, B.; Ćwik, Z. *Leksykon diagnostyki technicznej*; Wydawnictwo Uczelniane ATR: Bydgoszcz, 1996.
44. Heywood, J.B. *Internal combustion engine fundamentals*; McGraw-Hill, Inc.: New York, 1988; ISBN 0-07-028637-X.
45. Czerniaków, A. *Silniki wybuchowe*; E. Wende i S-ka: Warszawa, 1919.
46. Leduc, M. The marine Diesel engine Part two: The four stroke engine Available online: http://www.dieselduck.info/machine/01_prime_movers/diesel_engine/diesel_engine.02.htm (accessed on Mar 21, 2021).
47. Lambert, D. Engine Management Available online: <http://www.marineengineering.co.za/information/marine-engines/eng-management/> (accessed on Apr 29, 2021).
48. Ubowska, A.; Szczepanek, M. Engine rooms fire safety – fire-extinguishing system requirements. *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin, Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2016**, 48, 51–57, doi:10.17402/175.
49. Krystosik-Gromadzińska, A. Engine room fire safety. *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin, Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2016**, 47, 29–35, doi:10.17402/145.

50. Kokot, S. Czworokąt spalania Available online: <http://www.cfbt.pl/artykuly-cfbt/10-czworokat-spalania> (accessed on Mar 21, 2021).
51. Świerżewski, M. *Uwaga wybuch*; Instytut Wydawniczy CRZZ: Warszawa, 1972.
52. Żmudzki, S. *Badania głównych problemów spalania w silnikach wysokoprężnych z wtryskiem pośrednim*; Politechnika Szczecińska: Szczecin, 1976.
53. Krupowies, J. *Badania pierwiastków śladowych w oleju obiegowym jako element diagnostyki silnika*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 2001.
54. Bielawski, P. *Elementy diagnostyki drganiowej mechanizmów tłokowo-korbowych maszyn okrętowych*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 2002.
55. Burgoyne, J.; Cohen, L. The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* **1954**, 225, 375–392, doi:10.1098/rspa.1954.0210.
56. Islam, S. Crankcase explosion mechanism Available online: <https://www.slideshare.net/saiful12345660/crankcase-explosion-mechanism> (accessed on Mar 21, 2021).
57. SAB Operation Manual Part-No. 10980. Version 2.4, 11/2015 VISATRON® Oil Mist Detectors VN115/93, VN116/93, VN215/93; Schaller Automation: Blieskastel / Saarland, 2015;
58. Nanopdf Crankcase explosions Available online: https://nanopdf.com/download/crankcase-explosions_pdf (accessed on Mar 21, 2021).
59. Freeston, H.G.; Roberts, J.D.; Thomas, A. Crankcase Explosions: An Investigation into Some Factors Governing the Selection of Protective Devices. *Proc. Inst. Mech. Eng.* **1956**, 170, 811–824, doi:10.1243/PIME_PROC_1956_170_072_02.
60. Rattenbury, N. Crankcase explosions – A historical review – Where we are today. In *Crankcase explosions*; IMAREST: Londyn, 2002; pp. 3–13.
61. Holness, M. *Oil mist and machinery space fires*; Quality Monitoring Instruments Ltd.: Londyn, 1995.
62. Woodyard, D. Marine engines and auxiliary machinery. In *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*; ButterworthHeinemann: Oxford, 2004.
63. Piaseczny, L. *Technologia napraw okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Morskie: Gdańsk, 1992.
64. Clevite *Bearing failures. Major causes of bearing failure*; MAHLE Aftermarket GmbH: Stuttgart, 2014.
65. Wajand, J. *Uszkodzenia trakcyjnych silników spalinowych*; WNT: Warszawa, 1969;
66. Wilczkowski, A. *Awarie silników spalinowych. Uszkodzenia w układach korbowych*; Mossakowski i Wrochna – Spółka Jawna: Łódź, 1996.
67. Bielawski, P. *Utrzymanie w ruchu węzłów łożyskowych silników okrętowych*; Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie: Szczecin, 1988.
68. Nowosad, G. *Zabezpieczenia przeciweksplozyjne skrzyń korbowych nowoczesnych okrętowych silników spalinowych. Praca dyplomowa inżynierska*; Akademia Morska w Szczecinie: Szczecin, 2009.
69. MAN B&W Diesel A/S *MAN B&W G50ME-C9.6-TII Project Guide Electronically Controlled Two-stroke Engines*; MAN Energy Solutions SE: Augsburg, 2018.
70. Marine Diesels Horror Stories. Crankcase Explosion on Testbed Available online: [http://www.marinediesels.info/Horror Stories/testbed_exp.htm](http://www.marinediesels.info/Horror%20Stories/testbed_exp.htm).
71. Pitara, D. Marine LO System Explained Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=QOtN7yFXP8Y>.

72. Górski, Z.; Hajduk, T.; Kluj, S. *Procedury obsługi siłowni okrętowej z silnikiem wolnoobrotowym. Tom I*; Akademia Morska w Gdyni: Gdynia, 2005.
73. Górski, Z.; Hajduk, T.; Kluj, S. *Procedury obsługi siłowni okrętowej z silnikiem wolnoobrotowym. Tom II*; Akademia Morska w Gdyni: Gdynia, 2006.
74. Korczewski Z. *Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych*; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej: Gdańsk, 2017.
75. Włodarski, J.; Podsiadło, A.; Kluj, S. *Uszkodzenia systemu tłok–cylinder (TC) okrętowych silników spalinowych*; Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni: Gdynia, 2011.
76. Włodarski, J. *Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne*; WKiŁ: Warszawa, 1982.
77. Wikipedia Connecting rod Available online: https://en.wikipedia.org/wiki/Connecting_rod.
78. ebay Yanmar 3QM30F Marine Diesel Engine Piston and Connecting Rod Available online: <https://www.ebay.com/itm/284004999083>.
79. Chybowski, L.; Nozdrzykowski, K.; Grządziel, Z.; Dorobczyński, L. Evaluation of model-based control of reaction forces at the supports of large-size crankshafts. *Sensors (Switzerland)* **2020**, *20*, doi:10.3390/s20092654.
80. Kluj, S. *Diagnostyka urządzeń okrętowych*; Studium Doskonalenia Kadr WSM w Gdyni: Gdynia, 2000.
81. Wheel, D. Stuffing box Available online: <https://engineeringworkshop.blogspot.com/2009/09/stuffing-box.html>.
82. Wiewióra, A. *Eksploatacja urządzeń siłowni okrętowej – symulator. Materiały do wykładów*; Akademia Morska w Szczecinie: Szczecin, 2008.
83. Marine Diesels Crankcase Explosions – Action to be Taken in the Event of an Alarm Available online: http://www.marinediesels.info/members/Crankcase_Explosions/Action.htm.
84. Krystosik-Gromadzińska, A. Affordable hybrid thermography for merchant vessel engine room fire safety. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie, Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin* **2019**, *57*, 21–26, doi:10.17402/322.
85. Conrad Pirometr VOLTcraft IR 2201-50D USB, Optyka 50:1, –50 do 2200°C Available online: <https://www.conrad.pl/p/pirometr-voltcraft-ir-2201-50d-usb-optyka-501-50-do-2200-c-1599565>.
86. Ślesicki, O. *Analiza zabezpieczeń przeciwpożarowych i przeciwybuchowych stosowanych w silnikach Sulzer serii RTA. Praca dyplomowa inżynierska*; Akademia Morska w Szczecinie: Szczecin, 2009.
87. Hamied, M. *Effectiveness of Crankcase-Oil Mist Detectors*; University College of Southeast Norway: Bø, Kongsberg, Porsgrunn, Vestfold, 2016.
88. Marine Diesels Crankcase Explosions – Oil Mist Detection Available online: http://www.marinediesels.info/members/Crankcase_Explosions/Oil_Mist_Detection.htm.
89. Stocznia Szczecińska *Detektor o wysokiej czułości Typ 4 do określania stężenia mgły olejowej. Typ komparatorowy i niwelacyjny*; Stocznia Szczecińska: Szczecin, 1997.
90. Smith, B. *Oil mist detection as an aid to monitoring an engine's condition*; QMI Multiplex: London, 2001.
91. Schaller Automation *Possibilities and limits of the prevention of damage through the monitoring of crankcase compartments*; Schaller Automation: Blieskastel, 2009.

92. SAB *VISATRON Operating Instructions Article No.: 10024. VN 115 / 87 EMC, VN 116 / 87 EMC, VN 215 / 87 EMC, VN 115 / 87, VN 116 / 87, VN 215 / 87*; Schaller Automation: Blieskastel/Saar.
93. SAB *Safety for you and your engine Oil mist detector for VisatrOn® Vn301plus 2 and 4-stroke engines*; Schaller Automation: Blieskastel, 2019.
94. SAB *OIL MIST DETECTION SYSTEMS VISATRON® VN115/87plus, VN116/87plus, VN215/87plus*; Schaller Automation: Blieskastel, 2018.
95. SAB *Operation Manual Version 1.2 Visatron® VN301plus/VN301plusEX IACS UR M67/M10 type approved*; Schaller Automation: Blieskastel, 2015.
96. SAB *Operation Manual Part-No. 180081. Version 1.3, 06/2016 VISATRON® Oil Mist Detectors VN115/87plus EX*; Schaller Automation: Blieskastel / Saarland, 2016.
97. European Commission Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0034&from=pl>.
98. Kotunthu Crankcase Explosion and Oil Mist Detector Available online: <https://kotunthu.blogspot.com/2019/01/crankcase-explosion-oil-mist-detector.html>.
99. AK Shipping Zone Reconditioned Oil Mist Detector Daihatsu MD-9M Available online: <https://akshippingzone.com/product/reconditioned-oil-mist-detector-daihatsu-md-9m/>.
100. Oil Mist Detectors Solutions PTE Ltd. Daihatsu OMD. Oil Mist Monitor DOMM Available online: <https://www.oil-mist-detector.com/daihatsu-omd.html#tab-2>.
101. Daihatsu *MD-SX Sensor Type Oil Mist Detector*; Daihatsu Diesel Mfg. Co.: Osaka, 2004.
102. Niigata *Sensor for the Oil Mist Detector MD SX II*; Niigata Power Systems Co., Ltd.: Osaka, 2012.
103. Kidde-Graviner *Graviner Mk 6 Oil Mist Detector. Installation, operation and maintenance*. Manual 59812-120-1; 2005.
104. Kidde-Graviner *Graviner Mk 7 Oil Mist Detector. Installation, operation and maintenance*. Manual 59812-K007. 2011.
105. Kidde-Graviner *Graviner OMD Mk6 System. System Overview*; United Technologies. Graviner.
106. Graviner *The MK7 Oil Mist Detector Presentation*; Graviner. United Technologies;
107. *Specs Marine Safety, Instrumentation and Control System*; Seongnam City.
108. QMI *QMI Multiplex Oil Mist Detection System Manual*. Engine Detector; 2019.
109. Kongsberg Maritime *Diesel engine bearing monitoring*; Kongsberg Maritime AS: Trondheim, 2008.
110. Kongsberg Maritime *BearingMaster. A complete standalone alarm and monitoring system for bearings in slow-speed diesel engines*; Kongsberg Maritime AS: Trondheim, 2005.
111. Win GD *2-Stroke Dual-Fuel Safety Concept*; Winterthur Gas & Diesel: Winterthur, 2021.
112. Brünnet, H.; Reppekus, D.; Theobald, M.; Kornatz, G. Formation and avoidance of crankcase explosions in large oil, dual-fuel and gas engines. In *Proceedings of the 5th Rostock Large Engine Symposium*; Rostock, 2018; pp. 280–297.

113. Wimmer, A.; Glaser, J. *Indykowanie silnika*; AVL List GmbH. Instytut Zastosowań Techniki Sp. z o.o.: Warszawa, 2004.
114. Wajand, J. *Pomiary szybkozmiennych ciśnień w maszynach tłokowych*; WNT: Warszawa, 1974.
115. Electro-Motive *EMDEC Operating & Troubleshooting Guide. Electro-Motive Diesel Engine Control. N00012EP*; Electro-Motive Diesel Inc.: London, 2005.
116. Engineer Live Be prepared: constructive explosion protection Available online: <https://www.engineerlive.com/content/be-prepared-constructive-explosion-protection>.
117. Hoerbiger Reliable Explosion Protection for Marine Engines Available online: <https://www.hoerbiger.com/en-1/pages/112%0A>.
118. Marine Diesels Crankcase Explosions – Reducing Risks Available online: [http://www.marinediesels.info/members/Crankcase Explosions/Reducing Risks.htm](http://www.marinediesels.info/members/Crankcase%20Explosions/Reducing%20Risks.htm).
119. Sam Gas Project Membrane Nitrogen Gas Generators Available online: <http://samgasindia.com/membrane-technology.html>.
120. IMO *STCW – International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping*; International Maritime Organization: Londyn, 2018.
121. Łosiewicz, Z. Bezpieczeństwo pracy na morzu – weryfikacja kompetencji załóg w realnych warunkach zagrożenia pożarowego statku. *Autobusy* **2016**, 6, 260–263.
122. Charchalis, A. System oceny kształcenia w specjalności „Eksplatacja Siłowni Okrętowych” na przykładzie Akademii Morskiej w Gdyni. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2008**, 15, 377–384.
123. Rychter, T.; Teodorczyk, A. *Obliczenia wybuchów gazowych w przestrzeniach zamkniętych i wentylowanych*; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 2002.
124. Patejuk, K. *Charakterystyka zabezpieczeń przeciweksplozyjnych skrzyń korbowych wolnoobrotowych silników głównych. Praca dyplomowa inżynierska*; Akademia Morska w Szczecinie: Szczecin, 2011.
125. Listewnik, J. Symulator okrętowej siłowni spalinowej do celów kształcenia wysokokwalifikowanych kadr oficerskich mechaników okrętowych. In *Proceedings of the II Sympozjum Siłowni Okrętowych*; Dział Wydawnictw WSM: Szczecin, 1979; pp. 1–30.
126. Wiewióra, A.; Bykowski, D. Symulator siłowni okrętowej jako narzędzie do szkolenia i egzaminowania załóg statków. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2008**, 15, 307–313.
127. Kluj, S. Symulator siłowni okrętowej ER-SIM. *Zesz. Nauk. Akad. Morskiej w Szczecinie* **2008**, 15, 2140–246.
128. Kongsberg Maritime *Engine Room Simulator, ERS-L11 MAN B&W 5L90MC-VLCC, Version MC90-IV*; 2005.
129. Baggerud, B. *Engine Room Simulator ERS-L11 MAN B&W 5L90MC-VLCC Version MC90-IV MALFUNCTION LIST*; Kon, 2005.
130. Baggerud, B. *Engine Room Simulator ERS-L11 MAN B&W 5L90MC-VLCC Version MC90-IV VARIABLE LIST*; Kongsberg Maritime AS, 2005.
131. DNV-GL *Rules for classification. Ships Part 5 Ship types Chapter 7 Liquefied gas tankers*; DNV-GL, 2018.
132. IMO *Resolution MSC.391(95) Adoption of the International Code of Safety for Ships Using Gases of Other Low-Flashpoint Fuels (IGF CODE) – MSC 95/22/Add.1*; International Maritime Organization: London, 2015.

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1.	Wymagania IACS dotyczące zabezpieczeń przeciw eksplozjom w skrzyniach korbowych	123
Załącznik 2.	Przepisy PRS dotyczące do zabezpieczeń kadłuba silnika	153
Załącznik 3.	Treści dotyczące zabezpieczeń skrzyń korbowych silników okrętowych na gazowcach zawarte w kodeksie IGC	160
Załącznik 4.	Treści dotyczące zabezpieczeń skrzyń korbowych bezwodzikowych silników zasilanych gazem lub innymi paliwami o niskiej temperaturze zapłonu zawarte w kodeksie IGF	161

WYKAZ RYSUNKÓW

1.1.	Udział pożarów i eksplozji w całkowitych stratach statków w latach 2009–2018	16
1.2.	Stwarzające zagrożenie pożarem lub eksplozją podsystemy funkcjonalne okrętowego silnika	17
2.1.	Budowa układów korbowo-tłokowych silników rzędowych	21
2.2.	Korpusy silników okrętowych	22
2.3.	Przekrój silnika bezwodzikowego MAN B&W L58/64	23
2.4.	Przekroje poprzeczne typowych ram fundamentowych silników bezwodzikowych	24
2.5.	Przekrój silnika wodzikowego MAN B&W ME-GI S90	25
2.6.	Widok ramy fundamentowej silnika wodzikowego	25
2.7.	Spawane kolumny stojakowe	26
3.1.	Elementy składowe niezbędne do zainicjowania procesu spalania	27
3.2.	Obszary palności par (mgły) oleju mineralnego w mieszaninie z powietrzem ..	30
3.3.	Zmiana ciśnienia w skrzyni korbowej w trakcie eksplozji	31
3.4.	Przebieg ciśnienia podczas eksplozji testowej i stan otwarcia zaworu eksplozyjnego	31
3.5.	Nagranie z kamery przemysłowej przedstawiające eksplozję bezwodzikowego silnika szybkoobrotowego	32
3.6.	Zapłon mgły olejowej na zewnątrz silnika	32
3.7.	Elementy silnika bezwodzikowego rzędowego i jego otoczenia mogące być przyczyną eksplozji w skrzyni korbowej	33
3.8.	Elementy silnika bezwodzikowego widlastego i jego otoczenia mogące być przyczyną eksplozji w skrzyni korbowej	34
3.9.	Procentowy udział przyczyn uszkodzeń łożysk ślizgowych silników spaliniowych	35
3.10.	Widok silnika po eksplozji skrzyni korbowej wywołanej niewłaściwym smarowaniem łożysk	36
3.11.	Elementy silnika wodzikowego i jego otoczenia mogące być przyczyną eksplozji w skrzyni korbowej	37
3.12.	Skutki eksplozji skrzyni korbowej silnika wodzikowego podczas prób silnika na hamowni	38
3.13.	Sposoby doprowadzenia oleju smarującego krzyżulce	39
4.1.	Tłok wodzik i korbowód silnika wodzikowego Sulzer	42
4.2.	Tłok i korbowód rzędowego silnika bezwodzikowego	42
4.3.	Wał korbowy wolnoobrotowego bezwodzikowego silnika okrętowego Buckau Wolf R8VD-136	43

4.4.	Zależność pomiędzy ciśnieniem maksymalnym sprężania a ciśnieniem powietrza doładowującego	45
4.5.	Zamknięty wykres sprężania	45
4.6.	Wykresy indykatorowe	46
4.7.	Schemat przyrządu pomiarowego do oceny szczelności komory spalania	46
4.8.	Dławica trzonu tłoka	48
4.9.	Przykładowa tabliczka informacyjna instalowana na włączach inspekcyjnych skrzyni korbowej – po jednej tabliczce z każdej burty silnika	52
4.10.	Pirometr laserowy VOLTcraft IR 2201-50D USB	52
5.1.	Procentowy udział w rynku najważniejszych dostawców detektorów mgły olejowej	53
5.2.	Schemat absorpcyjnego detektora mgły olejowej pierwszej generacji	54
5.3.	Budowa absorpcyjnego komparatorowego detektora mgły olejowej	55
5.4.	Budowa absorpcyjnego niwelacyjnego detektora mgły olejowej	55
5.5.	Widok aksonometryczny wnętrza detektora absorpcyjnego na przykładzie urządzenia Graviner Typ 4	56
5.6.	Schemat absorpcyjnego detektora mgły olejowej wykorzystującego podczerwień	57
5.7.	Przykładowa zależność rejestrowanego zaciemnienia źródła światła od stężenia mgły olejowej	58
5.8.	Zasada działania detektorów nefelometrycznych	59
5.9.	Charakterystyka detektora nefelometrycznego	59
5.10.	Schemat nefelometrycznego detektora mgły olejowej z wentylatorem zasysającym	60
6.1.	Schemat systemu poboru próbek detektorów Visatron VN 115/87 i Visatron 116/87	64
6.2.	Schemat systemu poboru próbek detektorów Visatron VN 215/87	64
6.3.	Schemat systemu pomiarowego Visatron VN301 Plus	65
6.4.	Widok detektorów serii Visatron w wersji podstawowej	66
6.5.	Widok detektorów serii Visatron w wersji rozbudowanej	68
6.6.	Widok detektora Visatron VN115/87 Plus EX	68
6.7.	Widok elementów systemu Visatron VN301 Plus EX	69
6.8.	Widok detektora Daihatsu MD-9M	70
6.9.	Podstawowe elementy OMD firmy Daihatsu	71
6.10.	Zalecane lokalizacje czujników na skrzyniach korbowych silników bezwładkowych	71
6.11.	Podstawowe elementy systemu OMD Graviner MK6	73
6.12.	Czujnik nefelometryczny detektorów Graviner serii MK	73
6.13.	Schemat poglądowy instalacji detektora Kidde-Graviner MK7	74
6.14.	Widok najważniejszych elementów systemu detekcji mgły olejowej Kidde-Graviner MK7	75
6.15.	Zasadnicze elementy systemów OMD firmy Specs	77
6.16.	Elementy systemu QMI Multiplex zainstalowane na silniku	78
6.17.	Zasadnicze elementy systemu detekcji mgły olejowej QMI Multiplex	79
6.18.	Charakterystyki kalibracji systemu detekcji mgły olejowej QMI Multiplex	80

7.1.	Przebieg zmian temperatury łożyska głównego oraz stężenia mgły olejowej w stowarzyszonym przedziale skrzyni korbowej po odcięciu smarowania tego łożyska	82
7.2.	Schemat rozmieszczenia termopar do pomiaru temperatury łożysk	82
7.3.	Ilustracja koncepcji systemu Kongsberg BearingMaster	83
7.4.	Elementy funkcjonalne systemu Kongsberg BearingMaster	84
7.5.	Czujniki temperatury systemu Kongsberg BearingMaster i sposób ich przyłączenia do systemu	85
7.6.	Widok czujników systemu BWM	86
7.7.	Rozlokowanie czujników BWM dla poszczególnych układów cylindrowych ..	86
7.8.	Integracja systemów diagnostycznych firmy Kongsberg	87
7.9.	Wykres zmiany ciśnienia w skrzyni korbowej silnika dwusuwowego	88
7.10.	Widok detektora ciśnienia w skrzyni korbowej na silniku	89
8.1.	Zawory eksplozyjne	92
8.2.	Zawór eksplozyjny Hoerbiger EVN	92
8.3.	Schemat membranowej instalacji wytwarzania azotu	93
8.4.	Przebieg ciśnienia w trakcie eksplozji w zbiorniku testowym o objętości 10 m ³ i powierzchni czynnej zaworu eksplozyjnego 0,126 m ²	94
8.5.	Wtrysk wody do oleju smarnego	95
9.1.	Parametry pracy układu napędowego statku	98
9.2.	Widok panelu sterowania układem napędowym statku i pomieszczenie maszynowni widziane z CMK	99
9.3.	Widok paneli urządzeń i pomieszczenie CMK widziane z maszynowni	99
9.4.	Parametry pracy układu tłokowo-korbowego – warunki początkowe	102
9.5.	Przebieg temperatury łożyska głównego nr 1 w trakcie realizacji scenariusza I	104
9.6.	Parametry pracy układu tłokowo-korbowego – stan ostrzeżenia o zbliżającym się uruchomieniu funkcji SLD	105
9.7.	Lista alarmów podczas realizacji scenariusza I	105
9.8.	Przebieg temperatury analizowanych łożysk głównych w trakcie realizacji scenariusza II	107
9.9.	Parametry pracy układu tłokowo-korbowego – aktywowana sygnalizacja wysokiego stężenia mgły olejowej w skrzyni korbowej w przedziałach łożysk głównych nr 1, 2 i 5	108
9.10.	Lista alarmów podczas realizacji scenariusza II	108

WYKAZ TABEL

1.1. Zestawienie wybranych eksplozji w skrzyniach korbowych silników wodorowych, dla których zidentyfikowano przyczynę źródłową	19
1.2. Zestawienie wybranych uszkodzeń układu korbowo-tłokowego skutkujących eksplozją silnika i/lub pożarem w maszynowni	19
3.1. Fazy rozwoju mieszaniny wybuchowej w skrzyni korbowej	30
4.1. Wybrane związki pomiędzy parametrami fizykochemicznymi obiegowego oleju smarnego a zmianą stanu technicznego silnika zwiększającą ryzyko eksplozji w skrzyni korbowej	49
6.1. Dane techniczne wybranych detektorów serii Visatron w wersji podstawowej ...	66
6.2. Dane techniczne wybranych detektorów serii Visatron w wersji rozbudowanej ..	67
6.3. Dane techniczne detektorów firmy Daihatsu serii MD-SX	70
6.4. Dane techniczne wybranych detektorów firmy Kidde-Graviner	72
6.5. Dane techniczne wybranych detektorów firmy Spec	76
6.6. Dane techniczne wybranych detektorów firmy QMI	78
7.1. Dane techniczne systemu Kongsberg BearingMaster	84
8.1. Dane techniczne zaworów eksplozyjnych firmy Hoerbiger	92

STRESZCZENIE

Eksplozje w skrzyniach korbowych silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków

W pracy przedstawiono syntezę zagadnień związanych z wybuchami w skrzyniach korbowo-tłokowych spalinowych silników okrętowych. Zagadnienia przedstawiono w odniesieniu do silników głównych i pomocniczych, dwusuwowych i czterosuwowych, wodzikowych i bezwodzikowych, jednopaliwowych i dwupaliwowych oraz rzędowych i widlastych.

Dla realizacji tego celu zaprezentowano kolejno: 1) wprowadzenie do tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych silników okrętowych, 2) konstrukcję skrzyń korbowych, 3) przyczyny eksplozji, 4) minimalizację ryzyka eksplozji, 5) detekcję mgły olejowej, 6) budowę i działanie detektorów mgły olejowej, 7) budowę i zasadę działania systemów diagnostyczno-pomiarowych, 8) minimalizację skutków eksplozji oraz 9) szkolenie mechaników okrętowych.

Dokonano wprowadzenia do tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych silników okrętowych. Przedstawiono podstawowe informacje statystyczne dotyczące wypadków związanych z eksploatacją silników okrętowych i ich zidentyfikowanych przyczyn w podziale na źródło zagrożenia.

Przedstawiono podstawowe informacje na temat skrzyń korbowych, ich budowy, zadań i rozwiązań konstrukcyjnych w podziale na typ układu korbowo-tłokowego silnika.

Omówiono przyczyny eksplozji w skrzyniach korbowych. Dokonano wprowadzenia w zagadnienia procesów palenia, pożarów i eksplozji. Opisano sekwencję zdarzeń prowadzących do zajścia eksplozji w skrzyni korbowej oraz scharakteryzowano główne przyczyny źródłowe tych eksplozji w silnikach wodzikowych i bezwodzikowych.

Zaprezentowano możliwości dotyczące minimalizacji zagrożenia eksplozją w skrzyni korbowej i zalecenia ogólne oraz szczegółowo omówiono zagadnienia kontrolowania stanu technicznego układów korbowo-tłokowych, szczelności komór spalania i stanu technicznego dławic trzonu tłokowego. Omówiono również

parametry oleju obiegowego silnika, których zmiana może stanowić informację o stanie technicznym elementów przyczyniających się do powstania wybuchu w skrzyni korbowej. Przedstawiono postępowanie w przypadku alarmu ostrzegającego przed możliwą eksplozją.

Scharakteryzowano budowę i zasadę działania detektorów mgły olejowej w podziale na detektory absorpcyjne i nefelometryczne, tj. typy detektorów spotykane w rozwiązaniach okrętowych. Przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne i podstawowe parametry techniczne detektorów mgły olejowej najpopularniejszych dostawców tych urządzeń.

Przedstawiono budowę, zasadę działania i podstawowe rozwiązania konstrukcyjne systemów diagnostyczno-pomiarowych zwiększających bezpieczeństwo eksploatacji silnika w zakresie prewencji eksplozyjnej skrzyń korbowych. Scharakteryzowano systemy monitoringu temperatury łożysk układu korbowo-tłokowego, monitoringu zużycia łożysk, czujniki gazu oraz detektory ciśnienia w skrzyni korbowej.

Zaprezentowano działania prewencyjne w zakresie minimalizacji skutków potencjalnej eksplozji w skrzyni korbowej silnika. Opisano zawory eksplozyjne, inertowanie skrzyń korbowych oraz wykorzystanie wody do modyfikacji atmosfery skrzyni korbowej.

Dokonano przeglądu i przedstawiono propozycje dotyczące kształcenia inżynierów mechaników okrętowych w zakresie tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych. Pokazano możliwości wykorzystania symulatorów siłowni okrętowych w zakresie szkoleń poświęconych analizie przebiegu eksplozji i czynników do niej prowadzących oraz działania systemu zabezpieczeń silnika.

Pracę wieńczy podsumowanie oraz załączniki w postaci wyimków z wybranych przepisów dotyczących bezpieczeństwa eksploatacji skrzyń korbowych.

ABSTRACT

Explosions in the crankcases of marine engines – causes, prevention and minimization of effects

This book reviews the issues related to explosions in the crankcases of internal combustion piston engines, in order to minimize the effects of potential explosions and ensure proper training thereof. The issues were addressed for the following type of engines: main and auxiliary, two-stroke and four-stroke, crosshead and trunk piston, single-fuel and dual-fuel, inline and V-engines.

A logical multi-step process was undertaken to achieve this aim: 1) introduction of explosions in crankcases of marine engines, 2) construction of crankcases, 3) causes for explosions, 4) minimizing explosion risk, 5) oil mist detection, 6) design and operation of oil mist detectors, 7) design and operation of diagnostic and measurement systems, 8) preventative actions to minimize explosions, and 9) ship engineer training.

Firstly, the subject of explosions in crankcases of marine engines was introduced. Basic statistical information concerning accidents during the operation of marine engines and identified accident causes were presented with a breakdown per source of danger.

Basic information on crankcases, their construction, tasks and design solutions were presented, broken down per engine crank-and-piston system type.

Secondly, the causes of explosions in crankcases were then discussed. The processes of burning, fire and explosions were introduced. The sequence of events leading to an explosion in a crankcase was described and the main root causes of these explosions in crosshead engines and trunk piston engines were characterized.

Following on, possibilities of minimizing the risk of explosions in a crankcase were presented. General recommendations were presented and the issues for inspecting the technical condition of crank-and-piston systems, combustion chamber tightness and the technical condition of piston rod stuffing boxes were discussed in detail. The parameters of the oil circulating in an engine, the change

of which can provide information on the technical condition of the elements contributing to an explosion in the crankcase, were also discussed. The response procedure to be followed in the case of an alarm warning of a possible explosion was also presented.

Subsequently, the designs and the operating principles of oil mist detectors, broken down into absorption and nephelometric detectors (i.e., the types of detectors used in marine solutions), were characterized. The design solutions and basic technical parameters of oil mist detectors available with the most popular suppliers were demonstrated.

Next, the design, operation principles and basic design features of diagnostic and measurement systems that improve the safety of engine operation in terms of preventing crankcase explosions were discussed. Systems for monitoring the temperature of a crank-and-piston system and monitoring the wear of bearings, gas sensors and pressure detectors in a crankcase were characterized.

Preventive actions that minimize the effects of a potential explosion in an engine's crankcase were then presented. The paper described explosion relief valves, the inerting the crankcases, and the use of water to modify the crankcase atmosphere.

The education of ship engineers in the field of crankcase explosions was also reviewed and relevant proposals for the matter were presented. The paper highlighted the possibilities of using the marine engine room simulators for training devoted to the analysis of the course of an explosion, the factors leading to it and the operation of engine protective devices.

Finally, the paper ends with a summary and attached excerpts from selected regulations on crankcase operational safety.