

Leszek Chybowski

Rozcieńczenie oleju paliwem jako czynnik ryzyka eksplozji

**w skrzyniach korbowych okrętowych
bezwodzikowych silników spalinowych**

*Pracę niniejszą dedykuję
wszystkim mechanikom okrętowym
w uznaniu ich ciężkiej i niebezpiecznej pracy
na pokładach statków eksploatowanych
w różnych zakątkach świata*

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych w związku z realizacją tematów badawczych 1/S/KPBMIM/21, 1/S/KPBMIM/22 i 1/S/KPBMIM/23 prowadzonych w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn i Materiałoznawstwa na Wydziale Mechanicznym Politechniki Morskiej w Szczecinie.

Leszek Chybowski

Rozcieńczenie oleju paliwem jako czynnik ryzyka eksplozji

**w skrzyniach korbowych okrętowych
bezwodzikowych silników spalinowych**

**Wydawnictwo Naukowe Politechniki Morskiej w Szczecinie
Szczecin 2023**

Leszek Chybowski

Rozcieńczenie oleju paliwem jako czynnik ryzyka eksplozji w skrzyniach korbowych okrętowych bezwodzikowych silników spalinowych

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego
Politechniki Morskiej w Szczecinie



Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Kazimierz Baczewski

prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk

© Copyright by Leszek Chybowski & Politechnika Morska w Szczecinie 2023

Na okładce wykorzystano elementy rysunku aparatu CEA (ang. *crankcase explosion apparatus*) służącego do symulacji eksplozji mieszanin oleju smarowego z paliwem destylacyjnym – opracowanego i wykorzystanego przez G.W. Fergusona ok. 1950 roku.

Opracowanie wydawnicze: Paulina Mańkowska

Projekt okładki: Tomasz Kwiatkowski

Skład komputerowy: Irena Hajdasz

ISBN 978-83-64434-56-3

Wydawnictwo Naukowe Politechniki Morskiej w Szczecinie
70-506 Szczecin, ul. T. Starzyńskiego 8, www.wydawnictwo.pm.szczecin.pl

Wydanie I. Nakład 150 egz. Format B5. Objętość 10,5 ark. wyd.

Druk: Print Profit sp. z o.o., Koźmin 27, 59-900 Zgorzelec

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
Od Autora	13
1. Zagadnienia podstawowe.....	17
1.1. Aktualność tematyki badań	17
1.2. Metody wykrywania zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem.....	23
1.3. Tworzenie się i detekcja mgły olejowej w skrzyni korbowej	27
1.4. Geneza podjęcia tematu badawczego	30
1.5. Ocena badań Fergusona dotyczących rozcieńczenia oleju smarowego	35
1.6. Konsekwencje rozcieńczania silnikowego oleju smarowego paliwem	40
2. Metodyka badań.....	44
2.1. Hipoteza badawcza i założenia wstępne	44
2.2. Badane oleje smarowe i olej napędowy	48
2.3. Gęstość i lepkość mieszanin oleju smarowego z olejem napędowym oraz ich zmienność temperaturowa.....	50
2.4. Właściwości smarnościowe mieszanin oleju smarowego z olejem napędowym	53
2.5. Właściwości zapłonowe i lotność mieszanin oleju smarowego z olejem napędowym	58
2.6. Morfologia kropeł mechanicznie wygenerowanej mgły olejowej	65
3. Wyniki badań	77
3.1. Właściwości reologiczne mieszanin oleju smarowego z olejem napędowym	77
3.2. Właściwości smarnościowe mieszanin oleju smarowego z olejem napędowym	92
3.3. Lotność i właściwości zapłonowe mieszanin oleju smarowego z olejem napędowym	98
3.4. Charakterystyka mgły olejowej generowanej mechanicznie	104
4. Wnioski	111
Załączniki.....	119

Piśmiennictwo cytowane	141
Wykaz rysunków	159
Wykaz tabel	162
Streszczenie.....	163
Abstract.....	165

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

- $\%m(D)$ – procentowy udział masowy kropeł o średnicy $\leq D$
- $\%V(D)$ – procentowy udział objętościowy kropeł o średnicy $\leq D$
- A – powierzchnia wymiany ciepła
- a_1, a_2 – współczynniki równania aproksymującego
- AC – prąd przemienny (ang. *alternating current*)
- A_p – całkowite pole powierzchni zewnętrznej kropeł
- API – Amerykański Instytut Naftowy (ang. *American Petroleum Institute*)
- A_T – całkowite pole powierzchni zewnętrznej kropeł
- ASME – Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników (ang. *American Society of Mechanical Engineers*)
- ASTM – mająca siedzibę w USA międzynarodowa organizacja normalizacyjna (ang. *ASTM International, American Society for Testing and Materials*)
- AVP – średnie bezwzględne ciśnienie par oleju podczas testu HFFR
- AVP_1 – średnie bezwzględne ciśnienie par oleju na początku testu HFFR
- AVP_2 – średnie bezwzględne ciśnienie par oleju na końcu testu HFFR
- B – długość stożka rozpylanej strugi
- BASF – niemieckie przedsiębiorstwo chemiczne (niem. *Badische Anilin- und Soda-Fabrik*)
- BHP – Bezpieczeństwo i Higiena Pracy
- BP – brytyjski koncern petrochemiczny (ang. *British Petroleum*)
- C – procentowy udział masowy oleju napędowego w mieszaninie z olejem smarowym
- CD, CF – zdefiniowane przez API klasy jakościowe olejów smarowych do silników o zapłonie samoczynnym
- C_v – objętościowa procentowa zawartość oleju napędowego w mieszaninie
- CEA – aparat do symulacji eksplozji w skrzyni korbowej (ang. *crankcase explosion apparatus*)
- CEC – Europejska Rada Koordynująca ds. rozwoju metod testowych paliw, środków smarowych i innych płynów (ang. *Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Transportation Fuels, Lubricants and Other Fluids*)
- CFR – producent silników testowych (ang. *Cooperative Fuel Research*)
- CID – miernik (wskaźnik) cetanowy opóźnienia zapłonu (ang. *cetane ignition delay*)

CIMAC	– Międzynarodowa Rada ds. Silników Spalinowych (fr. <i>Conseil International des Machines à Combustion</i>)
CCAI	– obliczeniowy wskaźnik aromatyczności węgla (ang. <i>calculated carbon aromaticity index</i>)
CCI	– obliczeniowy wskaźnik cetanowy (ang. <i>calculated cetane index</i>)
CCP	– detektor ciśnienia w skrzyni korbowej (ang. <i>crankcase pressure detector</i>)
CI	– wskaźnik cetanowy (ang. <i>cetane index</i>)
CII	– obliczeniowy wskaźnik zapłonowy (ang. <i>calculated ignition index</i>)
C_m	– średnia prędkość ślizgania
CN	– liczba cetanowa (ang. <i>cetane number</i>)
cov(X, Y)	– kowariancja zmiennych X i Y
CVCC	– komora spalania o stałej objętości (ang. <i>constant volume combustion chamber</i>)
D	– średnica kropli
d	– grubość ścianki przewodnika ciepła
$D_{[2,0]}, D_s$	– średnica powierzchniowa kropli
$D_{[3,0]}, D_{vol}$	– średnica objętościowa kropli
$D_{[3,2]}$	– średnica Sautera kropli
$\bar{D}_{[3,2]}$	– średnia średnica Sautera kropeł
$\bar{D}_{[4,3]}$	– średnica De Bruckere kropli
$\bar{D}_{[4,3]}$	– średnia średnica De Bruckere kropeł
$\bar{D}_{[p,q]}$	– średnia średnica kropeł w notacji stosunku momentów
d	– działka elementarna wagi
d_0	– średnica otworu rozpylacza
d_1	– średnica tulei po stronie cieplejszej
d_2	– średnica tulei po stronie chłodniejszej
DCN	– pochodna liczba cetanowa (ang. <i>derived cetane number</i>)
D_{CR}	– krytyczna średnica kropeł mgły olejowej
DO	– olej napędowy lekki (ang. <i>diesel oil</i>)
$D_v(< 10\% \text{ obj.}), D_v(< 50\% \text{ obj.}), D_v(< 90\% \text{ obj.})$	– percentyle rozkładu objętościowego wielkości kropeł
E_{70}	– procentowy udział objętościowy benzyny oddestylowującej do temp. 70 °C
ECP	– elektryczny potencjał stykowy (ang. <i>electrical contact potential</i>)
ESR	– spektroskopia elektronowego rezonansu spinowego (ang. <i>electron spin resonance spectroscopy</i>)
F	– siła tarcia
F_0	– ilość światła wyemitowanego przez laser
F_1	– ilość światła zarejestrowanego przez odbiornik
FAME	– estry metylowe kwasów tłuszczowych (ang. <i>Fatty Acid Methyl Esters</i>)

FDM	– miernik rozcieńczenia oleju smarowego paliwem (ang. <i>fuel dilution meter</i>)
F_f	– siła tarcia rejestrowana w trakcie pomiaru tribometrem HFFR
FID	– detektor płomieniowo-jonizacyjny (ang. <i>flame ionization detector</i>)
FILM	– procentowa grubość filmu olejowego (procentowa rezystancja filmu olejowego)
FIT	– tester zapłonności paliwa (ang. <i>fuel ignition tester</i>)
FP	– temperatura (punkt) zapłonu (ang. <i>flash point</i>)
FTIR	– spektrometria w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. <i>FTIR spectrometry, Fourier-transform infrared spectrometry</i>)
FVI	– indeks lotności benzyn (ang. <i>flexible volatility index</i>)
GC	– chromatografia gazowa (ang. <i>gas chromatography</i>)
GC-MS	– chromatografia gazowa sprzężona ze spektrometrią mas (ang. <i>gas chromatography–mass spectrometry</i>)
h_1	– wilgotność powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym na początku testu HFFR
h_2	– wilgotność powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym na końcu testu HFFR
HCF	– współczynnik proporcjonalności do przeliczenia wyników testu HFFR
HFO	– ciężki olej napędowy (ang. <i>heavy fuel oil</i>)
HFR	– tribometr (aparat) o ruchu posuwisto-zwrotnym wysokiej częstotliwości (ang. <i>high frequency reciprocating rig</i>)
i	– numer klasy wielkości kropeł o średnicach o górnej wartości D_i
IACS	– Międzynarodowe Stowarzyszenie Towarzystw Klasyfikacyjnych (ang. <i>International Association of Classification Societies</i>)
IBP	– temperatura (punkt) początku wrzenia (ang. <i>Initial boiling point</i>)
IEC	– Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna – organizacja normalizacyjna (ang. <i>International Electrotechnical Commission</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>)
IMarEST	– międzynarodowe stowarzyszenie specjalistów branży okrętowej (ang. <i>Institute of Marine Engineering, Science and Technology</i>)
IMO	– Międzynarodowa Organizacja Morska (ang. <i>International Maritime Organization</i>)
IP	– oznaczenie norm dotyczących testowania produktów ropopochodnych wydanych przez brytyjską organizację zawodową pn. Instytut Energii (ang. <i>Institute of Energy</i>), która przed 2003 r. nosiła nazwę Instytut Nafty (ang. <i>Institute of Petroleum</i>)

IQT	– tester jakości zapłonu (ang. <i>ignition quality tester</i>)
ISO	– Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ang. <i>International Organization for Standardization</i>)
JCGM	– Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii (ang. <i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>)
JPI	– Japoński Instytut Nafty (ang. <i>The Japan Petroleum Institute</i>)
K	– stała obliczeniowa wskazująca uśrednioną różnicę temperatury
l	– długość (wysokość) tulei cylindrowej
l_0	– długość kanału dyszy rozpylacza
LEL	– dolna granica zapalności / wybuchowości (ang. <i>lower explosive limit</i>)
m	– masa substancji
m_{DO}	– masa oleju napędowego w mieszaninie
m_{LO}	– masa oleju smarowego w mieszaninie
MGO	– olej napędowy lekki (ang. <i>marine gas oil</i>)
MDO	– olej napędowy średni (ang. <i>marine diesel oil</i>)
m/t	– tankowiec o napędzie spalinowym (ang. <i>motor tanker</i>)
m/v	– statek o napędzie spalinowym (ang. <i>motor vessel</i>)
n	– liczba kropeł przynależnych do i -tej klasy
N	– liczba klas wielkości kropeł
NMR	– spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego (ang. <i>nuclear magnetic resonance spectroscopy</i>)
OMD	– detector mgły olejowej (ang. <i>oil mist detector</i>)
P	– siła nacisku
p	– nacisk jednostkowy
P_C	– dystans emitera lasera od środka pochodni rozpylanej cieczy
PN	– polska norma
p_r	– ciśnienie referencyjne do określania smerności tribometrem HFFR
PRS	– Polski Rejestr Statków
p_v	– ciśnienie prężności par cieczy
Q	– energia cieplna
$\dot{Q}$	– strumień ciepła
$\dot{q}$	– jednostkowy strumień ciepła
QMI	– skrótowa nazwa producenta detektorów mgły olejowej (ang. <i>Quality Monitoring Instruments</i>)
R_1	– rezystancja filmu olejowego na początku testu HFFR
R_2	– rezystancja filmu olejowego na końcu testu HFFR
R^2	– współczynnik determinacji
RES	– procentowa różnica dopasowania danych pomiarowych do modelu
RFD	– opracowana przez firmę ExxonMobil metoda wykrywania rozcieńczenia olejów smarowych paliwem pozostałościowym (ang. <i>residual fuel detection</i>)

RMG	– rozporządzenie ministra gospodarki w sprawie wymagań jakościowych dla paliw ciekłych
r_{XY}	– współczynnik korelacji liniowej Pearsona zmiennych X i Y
SAB	– skrótowa nazwa producenta detektorów mgły olejowej (ang. <i>Schaller Automation Blieskastel</i>).
SAE	– mające siedzibę w USA międzynarodowe stowarzyszenie inżynierów samochodowych (ang. <i>SAE International, Society of Automotive Engineers</i>)
SAE 30, SAE 40	– klasy lepkości olejów smarowych według lepkościowej klasyfikacji SAE J300
SAW	– wykrywanie akustycznych fal powierzchniowych (ang. <i>SAW sensing, surface acoustic wave sensing</i>)
S_C	– objętościowe stężenie aerozolu
S_{gr}	– współczynnik opisujący warunki zużycia w trakcie zacierania
SHD	– zatrzymanie silnika (ang. <i>shut down</i>)
SLD	– zmniejszenie prędkości/obciążenia silnika (ang. <i>slow down</i>)
SOLAS	– Konwencja o ochronie życia na morzu (ang. <i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>)
SSA	– właściwe pole powierzchni kropel mgły olejowej
T	– temperatura bezwzględna
t	– temperatura substancji w warunkach eksploatacyjnych
t_0	– stała temperatura powierzchni w układzie wymiany ciepła
t_1	– temperatura powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym na początku testu HFFR
t_2	– temperatura powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym na końcu testu HFFR
t_{10}, t_{50}, t_{90}	– temperatury oddestylowania (odbioru) odpowiednio 10, 50 i 90% substancji podczas destylacji
t_A, t_B	– temperatura powierzchni odpowiednio A, B
t_{CFP}	– obliczona temperatura zapłonu
t_{FP}	– zmierzona temperatura zapłonu
t_{IBP}	– początkowa temperatura wrzenia
TRANS	– przepuszczalność światła przez mgłę olejową
t_{top}	– temperatura topnienia materiału
TVI	– (temperaturowy) wskaźnik lotności (ang. <i>volatility index</i>)
U_1	– potencjał kontaktowy w pomiarze grubości filmu olejowego na początku testu HFFR
U_2	– potencjał kontaktowy w pomiarze grubości filmu olejowego na końcu testu HFFR
u_C	– procentowy udział objętościowy cetanu w paliwie wzorcowym
u_{IC}	– procentowy udział objętościowy izocetanu w paliwie wzorcowym
u_m	– niepewność pomiarowa wyznaczonej masy

UV	– promieniowanie ultrafioletowe (ang. <i>ultraviolet</i>)
u_w	– niepewność standardowa typu B udziału masowego oleju napędowego w mieszaninie z olejem smarowym
V	– objętość substancji
VI	– wskaźnik lepkości (ang. <i>viscosity index</i>)
V_k	– całkowita objętość cieczy
VLI	– indeks lotności benzyn (ang. <i>vapor lock index</i>)
V_p	– objętość kropli
$WS_{1,4}$	– smarność wyrażona jako skorygowana średnia średnica śladu zużycia przy ciśnieniu referencyjnym 1,4 kPa (ang. <i>Wear Scar at 1.4 kPa</i>)
WSD	– średnia średnica śladu zużycia (ang. <i>mean wear scar diameter</i>)
X, Y	– porównywane zmienne
x, y	– średnia wielkość śladu zużycia mierzona odpowiednio w kierunku prostopadłym i równoległym do osi oscylacji tribometru HFFR
Z	– dystans między soczewką a środkiem pochodni rozpylanej cieczy
α	– kąt stożka rozpylanej strugi
$\dot{\gamma}$	– prędkość ścinania
Δt	– różnica temperatury
δ	– błąd bezwzględny wskazań wagi
ε	– współczynnik temperaturowej zmiany gęstości substancji przy podgrzaniu o 1 °C
η	– lepkość dynamiczna substancji
η_t	– lepkość dynamiczna substancji w temperaturze t
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła
μ	– współczynnik tarcia
ν	– lepkość kinematyczna substancji
ν_{40}	– lepkość kinematyczna badanego oleju w temperaturze 40 °C
ν_{100}	– lepkość kinematyczna badanego oleju w temperaturze 100 °C
ν_L	– lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C oleju wzorcowego o $VI = 0$, mającego w temperaturze 100 °C taką samą lepkość kinematyczną jak badany olej
ν_H	– lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C oleju wzorcowego o $VI = 100$, mającego w temperaturze 100 °C taką samą lepkość kinematyczną jak badany olej
ν_t	– lepkość kinematyczna substancji w temperaturze t
ρ	– gęstość substancji
ρ_{15}	– gęstość substancji w temperaturze 15 °C
ρ_{DO}	– gęstość oleju napędowego
ρ_t	– gęstość substancji w temperaturze t
σ_X i σ_Y	– odchylenia standardowe odpowiednio zmiennej X i Y
τ	– czas
τ_F	– naprężenia ścinające

OD AUTORA

Książka niniejsza w założeniu przeznaczona jest dla mechaników okrętowych oraz studentów wydziałów mechanicznych uczelni technicznych. Stanowi ona podsumowanie szeregu prowadzonych przeze mnie w ostatnich latach prac badawczych związanych z prewencją i minimalizacją skutków pożarów i eksplozji występujących podczas eksploatacji okrętowych silników spalinowych. Wykaz moich publikacji w tym obszarze czytelnik znajdzie w bibliografii zamieszczonej na końcu książki.

Monografia jest trzecią z cyklu pozycją poświęconą bezpieczeństwu eksploatacji silników spalinowych po wydanych w 2022 r. przez Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie książkach pt. „Eksplozje w skrzyniach korbowych silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków” oraz „Eksplozje w układach powietrza rozruchowego silników okrętowych – przyczyny, zapobieganie i minimalizacja skutków”.

Przyczynkiem do napisania monografii była lektura rekomendacji wydanych przez Międzynarodową Radę ds. Silników Spalinowych CIMAC w 2013 r. oraz wcześniejsze prace badawcze dotyczące wyjaśnienia przyczyn eksplozji w skrzyniach korbowych silników przemysłowych i okrętowych, za których pioniera można uznać G.W. Fergusona. W jego pracy z 1951/52 r. znalazły się informacje, że rozcieńczenie oleju smarowego olejem napędowym nawet w dużych ilościach (do 20% obj.) nie wpływa na zwiększenie prawdopodobieństwa eksplozji w skrzyniach korbowych. Natomiast stowarzyszenie CIMAC w swojej rekomendacji podaje wprost, że wykorzystywanie pomiaru temperatury zapłonu oleju jako miary ryzyka wybuchu w skrzyni korbowej nie jest dłużej zalecane.

Wymienione źródła przedstawiają wnioski stojące w sprzeczności z innymi publikacjami potwierdzającymi wpływ rozcieńczenia oleju smarowego paliwem na zwiększenie ryzyka eksplozji w skrzyni korbowej. Przykładowo istnienie takiego wpływu wskazano w referatach zamieszczonych w materiałach z dwudniowej konferencji „Crankcase explosions” (pol. Eksplozje skrzyń korbowych) zorganizowanej przez prestiżowe stowarzyszenie IMarEST w Londynie w 2002 r. Odnośniki do tych prac zawarłem we wprowadzeniu do monografii.

Wymienione rozbieżne stanowiska odnośnie do wpływu rozcieńczenia oleju paliwem destylacyjnym na ryzyko eksplozji w skrzyni korbowej silnika stanowiły dla mnie motywację do przeprowadzenia możliwie szczegółowych badań wpływu rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym na zmianę charakterystyk zapłonowych, reologicznych i tribologicznych oleju smarowego.

Wyniki tych badań przedstawiłem w niniejszej monografii. W oparciu o nie wyprowadziłem zagregowane wnioski. Można zgodzić się z tym, że temperatura zapłonu nie jest bezpośrednią miarą ryzyka eksplozji w skrzyni korbowej, natomiast powszechnie znany jest fakt obniżenia temperatury zapłonu oleju smarowego w wyniku rozcieńczenia go olejem napędowym. Z kolei rozcieńczenie, wpływając na właściwości oleju, może pośrednio przyczyniać się do zwiększenia ryzyka zatarcia silnika i wystąpienia eksplozji w skrzyni korbowej.

Wyniki przedstawione w monografii integrują liczne obserwacje, które przedstawiłem w szeregu wcześniejszych artykułów naukowych. Jako najważniejsze należy wymienić trzy prace opublikowane na łamach czasopisma *Energies* zatytułowane „The Initial Boiling Point of Lubricating Oil as an Indicator for the Assessment of the Possible Contamination of Lubricating Oil with Diesel Oil” (pol. „Początkowa temperatura wrzenia oleju smarowego jako wskaźnik oceny możliwego zanieczyszczenia oleju smarowego olejem napędowym”), „Study of the Relationship between the Level of Lubricating Oil Contamination with Distillation Fuel and the Risk of Explosion in the Crankcase of a Marine Trunk Type Engine” (pol. „Studium zależności między poziomem zanieczyszczenia oleju smarowego paliwem destylacyjnym a ryzykiem eksplozji w skrzyni korbowej okrętowego silnika bezwodzikowego”) oraz „Particles Morphology of Mechanically Generated Oil Mist Mixtures of SAE 40 Grade Lubricating Oil with Diesel Oil in the Context of Explosion Risk in the Crankcase of a Marine Engine” (pol. „Morfologia cząstek mechanicznie wytworzonej mgły olejowej mieszanin oleju smarowego klasy SAE 40 i oleju napędowego w kontekście ryzyka eksplozji w skrzyni korbowej silnika okrętowego”). Dwie pierwsze z wymienionych prac są moimi samodzielnymi publikacjami, natomiast praca trzecia powstała we współpracy z kolegami z Wydziału Mechanicznego Politechniki Morskiej w Szczecinie.

Książka stanowi też uzupełnienie publikacji prezentujących wyniki wcześniejszych badań w zakresie wieloaspektowej oceny wpływu zanieczyszczenia obiegowego oleju smarowego paliwem destylacyjnym w kontekście wpływu tego zanieczyszczenia na ryzyko powstania eksplozji w skrzyni korbowej silnika okrętowego. W tym dotyczy to szerokiego wprowadzenia do tematu, odniesień do dodatkowych źródeł literatury rozbudowanej analizy procesów, prezentacji metod wykrywania zanieczyszczeń olejów oraz opisu procesów tworzenia się i detekcji mgły olejowej w skrzyni korbowej. Rozbudowałem i zmodyfikowałem też dyskusję dotyczącą uzyskanych wyników badań. Poprawiłem też dostrzeżone błędy techniczne i językowe. Treść książki podzieliłem i przedstawiłem w czterech rozdziałach.

W rozdziale pierwszym dokonałem wprowadzenia do tematyki eksplozji w skrzyniach korbowych silników okrętowych, przedstawiłem genezę podjęcia tematu badawczego oraz stan wiedzy w zakresie konsekwencji i zapobiegania rozcieńczeniu oleju smarowego olejem napędowym w kontekście niezawodnej pracy spalinowych silników bezwodzikowych.

Rozdział pierwszy zawiera też porównanie metod wykrywania zanieczyszczenia olejów smarowych olejem napędowym oraz omówienie procesu tworzenia się mgły olejowej w skrzyni korbowej podczas pracy silnika.

W rozdziale drugim przedstawiłem założenia przeprowadzonych badań oraz hipotezy badawcze. Opisałem także metodykę badań, wykorzystane narzędzia i metody, a także scharakteryzowałem oleje smarowe i olej napędowy (DO) służące do wykonania mieszanin i będące przedmiotem badań. Dla poprawy jakości komunikacji w rozdziale tym zawarłem również wzory opisujące relacje pomiędzy różnymi wskaźnikami opisującymi właściwości fizykochemiczne olejów smarowych i paliw. Pomimo, że część z przedstawionych wzorów oraz prezentacja aparatów pomiarowych są dobrze znane specjalistom i mogłaby zostać opuszczona, postanowiłem je pozostawić jako element umożliwiający studentom lepsze zrozumienie zagadnień ujętych w książce.

W rozdziale kolejnym, trzecim, zawarłem szczegółowe wyniki badań mieszanin olejów smarowych z olejem napędowym, w tym ich właściwości reologiczne, zapłonowe i smarnościowe, a także morfologii kropel mgły olejowej wygenerowanej mechanicznie w wyniku rozpylenia badanych mieszanin. Poszczególne wyniki zostały opatrzone szczegółową dyskusją.

W rozdziale czwartym czytelnik znajdzie podsumowanie uzyskanych wyników oraz odniesienie do postawionej hipotezy badawczej.

Pracę uzupełniają załączniki A–F prezentujące uzupełniające informacje oraz wyniki przeprowadzonych badań, które mogą zostać wykorzystane do powtórzenia eksperymentów przedstawionych w monografii oraz do realizacji dalszych badań związanych z tematyką pracy.

Na koniec chciałbym podziękować osobom i instytucjom, dzięki którym niniejsza praca przybrała obecną postać. Bardzo dziękuję pracownikom Centrum Badania Paliw, Cieczy Roboczych i Ochrony Środowiska (CBPCRiOS), dr inż. Magdalenie Szmukale oraz mgr Barbarze Żurańskiej za sprawną realizację zleconych prac laboratoryjnych. Bardzo dziękuję moim współpracownikom, którzy współuczestniczyli w badaniu morfologii kropel mgły olejowej analizowanych mieszanin: dr inż. Marcinowi Szczepankowi, prof. dr hab. inż. Katarzynie Gawdzińskiej i prof. dr hab. inż. Olehowi Klyusowi. Dziękuję też dr inż. Przemysławowi Kowalakowi za wyprowadzenie zależności matematycznej i wykonanie na tej podstawie arkusza kalkulacyjnego obliczającego niepewność założonego udziału masowego oleju napędowego w badanych mieszaninach z olejem smarowym. Bardzo dziękuję recenzentom monografii prof. dr hab. inż. Kazimierzowi Baczewskiemu i prof. dr hab. inż. Andrzejowi Teodorczykowi za cenne uwagi,

które istotnie przyczyniły się do poprawy jakości niniejszej pracy. Dziękuję także p. redaktor Paulinie Mańkowskiej za opracowanie wydawnicze oraz p. Irenie Hajdasz i p. Tomaszowi Kwiatkowskiemu za pomoc w opracowaniu strony graficznej pracy. Szczególne podziękowania kieruję jednak do Żony – za pierwszą recenzję pracy, inspirację, motywację, cierpliwość i wsparcie.

Testy laboratoryjne zostały wykonane w CBPCRiOS. Zakup materiałów do badań sfinansowano ze źródeł kierowanych przeze mnie tematów badawczych 1/S/KPBMiM/21, 1/S/KPBMiM/22 oraz 1/S/KPMBiM/23 realizowanych w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn i Materiałoznawstwa Wydziału Mechanicznego Politechniki Morskiej w Szczecinie. Koszty wydania trzech wymienionych powyżej publikacji naukowych na łamach czasopisma *Energies* zostały w całości pokryte przez wydawnictwo MDPI.

W związku z małą liczebnością polskojęzycznych poradników dla mechaników okrętowych poświęconych różnego rodzaju zagrożeniom występującym podczas eksploatacji silników spalinowych wyrażam przekonanie, że książka będzie stanowiła praktyczne narzędzie w tym zakresie dla wszystkich zainteresowanych oraz uzupełnienie do wcześniejszych, często rozbieżnych wyników uzyskanych na przełomie ostatniego stulecia przez wielu badaczy.

Z góry dziękuję za wszelkie uwagi i komentarze pod adresem niniejszej publikacji, które proszę kierować bezpośrednio do mnie lub na adres redakcji. Na koniec chciałbym wskazać, iż pracę niniejszą dedykuję wszystkim mechanikom okrętowym.

Leszek Chybowski

STRESZCZENIE

Rozcieńczenie oleju paliwem jako czynnik ryzyka eksplozji w skrzyniach korbowych okrętowych bezwodzikowych silników spalinowych

W monografii w holistyczny sposób przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym w kontekście zmian właściwości fizykochemicznych oleju smarowego oraz właściwości mgły olejowej wytworzonej z mieszaniny oleju smarowego z olejem napędowym. W związku z rozbieżnymi opiniami w literaturze naukowej dotyczącymi wpływu lub braku wpływu rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym na ryzyko eksplozji w skrzyni korbowej, postawiona została hipoteza, że olej napędowy stanowiący zanieczyszczenie oleju smarowego zwiększa ryzyko powstania eksplozji w skrzyni korbowej bezwodzikowego silnika spalinowego w związku z niezależnym oddziaływaniem szeregu czynników, takich jak: (1) pogorszenie względem czystego oleju właściwości smarnościowych oleju rozcieńczonego paliwem, (2) zwiększenie względem czystego oleju lotności i poprawa właściwości zapłonowych oleju rozcieńczonego paliwem, (3) zwiększenie względem czystego oleju udziału kropeł o najmniejszych średnicach we mgle olejowej wytworzonej z oleju rozcieńczonego. W celu weryfikacji hipotezy zrealizowano wieloelementowy plan badawczy mający na celu wszechstronne opisanie wpływu rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym na powstawanie gorących miejsc w skrzyni korbowej, które są elementem koniecznym do zainicjowania procesu tworzenia wybuchowej (białej) mgły olejowej w skrzyni korbowej oraz dla inicjacji zapłonu mieszaniny palnej. Badaniom poddano mieszaniny oleju smarowego z olejem napędowym w różnym stężeniu oleju smarowego w mieszaninie (0%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% i 100% wag.). Jako oleje smarowe do wytworzenia tych mieszanin wykorzystano dwa najpowszechniejsze w okrętowych instalacjach smarowania obiegowego silników bezwodzikowych jednogatunkowe oleje smarowe należące do klas lepkościowych SAE 30 i SAE 40. Jako olej napędowy wybrano paliwo spełniające wymagania kategorii dla paliw żeglugowych DMX. Dla pełnego zakresu stężeń oleju napędowego w badanych olejach smarowych określono właściwości reologiczne, tribologiczne i zapłonowe tych

mieszanin. Dodatkowo badaniu poddano mgłą olejową wygenerowaną mechanicznie z mieszanin 0%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50% i 100% wag. oleju napędowego w oleju smarowym należącym do klasy lepkościowej SAE 40. Określono charakterystykę morfologiczną kropeł mgły olejowej, w tym przepuszczalność światła, rozkład wielkości kropeł, wybrane średnice percentylowe kropeł, wybrane średnie średnice ważone kropeł oraz udział procentowy kropeł o średnicach istotnych dla powstania białej mgły olejowej ($\leq 5 \mu\text{m}$), odpowiedzialnej za eksplozję w skrzyniach korbowych silników spalinyowych. Dla określonych poszczególnych parametrów fizykochemicznych mieszanin oraz wskaźników opisujących charakterystykę morfologiczną mgły olejowej dokonano oceny zmienności tych wielkości oraz przeanalizowano korelację pomiędzy poszczególnymi wartościami a poziomem rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym. Wyciągnięto szereg wniosków, a przeprowadzone badania potwierdziły istnienie szeregu związków między rosnącym poziomem rozcieńczenia oleju smarowego olejem napędowym a czynnikami wpływającymi na zwiększenie ryzyka wystąpienia eksplozji w skrzyni korbowej, takimi jak intensyfikacja zacierania się współpracujących elementów (wzrost sił tarcia w parach tribologicznych), szybsze odparowywanie oleju (zwiększenie lotności, obniżenie temperatury zapłonu oleju) czy intensyfikacja tworzenia się kropeł mgły olejowej o najmniejszych średnicach kropeł (zwiększenie liczby kropeł i zmniejszenie ich średnic). Uzyskane wyniki badań potwierdziły prawdziwość postawionej hipotezy badawczej.

ABSTRACT

Oil dilution with fuel as a risk factor of an explosion in the crankcase of the trunk-piston marine internal combustion engine

This monograph presents, using a holistic method, the results of research on the effect of dilution of lubricating oil with diesel oil in the context of changes in the physicochemical properties of the lubricating oil and the properties of the oil mist produced from a mixture of lubricating oil and diesel oil. Due to divergent opinions in the scientific literature regarding the impact or lack of effects of dilution of lubricating oil with diesel oil on the risk of explosion in the crankcase, a hypothesis was put forward that diesel oil constituting contamination of the lubricating oil increases the risk of explosion in the crankcase of a trunk-piston internal combustion engine due to the influence of several independent factors. These include (1) the deterioration of the lubricating properties of the oil diluted with fuel in relation to the pure oil, (2) the increase in volatility and improvement of the ignition properties of the oil diluted with fuel with respect to the pure oil, and (3) the increase in the proportion of droplets with the smallest diameters in the oil mist compared to pure oil made from diluted oil. To verify the hypothesis, a multi-element research plan was performed to comprehensively describe the effect of dilution of lubricating oil with diesel oil on the formation of hot spots in the crankcase, which are an element necessary to initiate the process of creating an explosive (white) oil mist in the crankcase and for the initiation of ignition of an explosive mixture. Mixtures of lubricating oil with diesel fuel in various concentrations of lubricating oil in the mixture (i.e., 0%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75%, and 100%) were tested. Single-season (single-grade) lubricating oils belonging to the SAE 30 and SAE 40 viscosity classes were used to produce these mixtures. These are the two most common oils in marine circulatory lubrication systems of trunk-beam engines. Diesel fuel was selected, i.e., a fuel that meets the requirements of the category for DMX marine fuels. The rheological, tribological, and ignition properties of these mixtures were determined for the full range of diesel oil concentrations in the tested lubricating oils. In addition, the oil mist was generated mechanically from mixtures of 0%,

2%, 5%, 10%, 20%, 50%, and 100% of diesel fuel in the lubricating oil of the SAE 40 viscosity grade and then tested. The morphological characteristics of the oil mist droplets were determined, including the light transmission, droplet size distribution, selected percentile diameters of droplets, selected weighted average droplet diameters, and the percentage of droplets with diameters significant for the formation of the white oil mist (i.e., $\leq 5 \mu\text{m}$) that are responsible for explosions in the crankcases of the combustion engines. For specific physicochemical parameters of the mixtures and indices describing the morphological characteristics of the oil mist, the variability of these values was assessed, and the correlation between individual values and the level of dilution of the lubricating oil with diesel oil was analyzed. A number of conclusions were drawn; the conducted research confirmed the existence of several relationships between the increasing level of dilution of lubricating oil with diesel oil and factors influencing the increase in the risk of explosion in the crankcase, such as the intensification of the seizing of the cooperating elements (i.e., an increase in friction forces in the tribological pairs), faster oil evaporation (increasing the volatility and lowering the oil ignition temperature), or intensifying the formation of oil mist droplets with the smallest droplet diameters (increasing the number of droplets and reducing their diameters). The obtained research results confirmed the accuracy of the research hypothesis.