

**AKADEMIA MORSKA w SZCZECINIE**



**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**MODEL EKSPLOATACJI  
OKRĘTOWYCH POMOCNICZYCH  
KOTŁÓW OPALANYCH  
Z UWZGLĘDNIENIEM WYMAGAŃ  
OCHRONY ŚRODOWISKA MORSKIEGO**

mgr inż. Krzysztof Kołwzan

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Adamkiewicz  
prof. AM w Szczecinie

SZCZECIN 2020

## Spis treści

WYKAZ ZASTOSOWANYCH POJEĆ I SKRÓTÓW .....	6
OZNACZENIA I SYMBOLE.....	6
INDEKSY .....	7
WSTĘP .....	9
<b>1. ISTNIEJĄCY STAN WIEDZY W ZAKRESIE PROBLEMATYKI EKSPLOATACJI KOTŁÓW PAROWYCH NA STATKACH MORSKICH.....</b>	<b>13</b>
1.1. Zastosowanie okrętowych pomocniczych kotłów opalanych w układach energetycznych statków morskich .....	14
1.2. Konsekwencje techniczne procesu spalania w kotłach.....	15
1.2.1. Zanieczyszczanie powierzchni ogrzewalnych kotłów od strony spalin.....	17
1.2.2. Zmiany stanu technicznego powierzchni ogrzewalnych kotłów od strony wody .....	18
1.2.3. Niesprawności, uszkodzenia i awarie okrętowych pomocniczych kotłów opalanych w wyniku stosowania paliw niskosiarkowych .....	19
1.3. Ekologiczne konsekwencje procesu spalania w pomocniczych opalanych kotłach na statkach morskich .....	19
1.4. Analiza stanu eksploatacji okrętowych pomocniczych kotłów opalanych.....	22
1.4.1. Dotychczasowe strategie eksploatacji okrętowych kotłów parowych.....	23
1.4.2. Zmodyfikowana strategia eksploatacji okrętowych pomocniczych kotłów opalanych uwzględniająca wymagania ochrony środowiska morskiego .....	25
1.5. Analiza stanu wiedzy/problematyki.....	31
1.6. Podsumowanie .....	38
<b>2. UTRZYMANIE OKRĘTOWYCH POMOCNICZYCH KOTŁÓW OPALANYCH W ŚWIETLE OBOWIĄZUJĄCYCH AKTÓW NORMATYWNYCH I PRZEPISÓW .....</b>	<b>40</b>
2.1. Rola towarzystw klasyfikacyjnych w utrzymaniu bezpieczeństwa eksploatacji i spełniania wymagań ochrony środowiska morskiego przez okrętowe pomocnicze kotły opalane .....	40
2.2. Bezpieczeństwo eksploatacji okrętowych pomocniczych kotłów opalanych w świetle obowiązujących przepisów i wymagań.....	42
2.3. Zapobieganie zanieczyszczeniu powietrza przez okrętowe pomocnicze kotły opalane.....	43
2.3.1. Międzynarodowe wymagania w zakresie kontroli emisji szkodliwych związków spalania paliw ze statków .....	44
2.3.2. Ewolucja wymagań ochrony powietrza przed zanieczyszczeniem ze statków .....	44
2.4. Efektywność energetyczna statków z uwzględnieniem okrętowych pomocniczych kotłów opalanych.....	46

2.4.1. Zarządzanie efektywnością energetyczną kotłów opalanych .....	47
2.4.2. Miary oceny eksploatacyjnej efektywności energetycznej statku .....	47
2.4.3. Wymagania UE i IMO w zakresie gromadzenia danych służących ocenie emisji CO <sub>2</sub> w wyniku spalania paliw na statkach .....	49
2.5. Podsumowanie .....	49
3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO .....	51
3.1. Modelowanie procesu eksploatacji okrętowego pomocniczego kotła opalanego.....	51
3.2. Propozycja modyfikacji strategii eksploatacji kotła opalanego – funkcja celu modelu .....	55
3.2.1. Opis matematyczny bezpieczeństwa kotła opalanego .....	55
3.2.2. Opis matematyczny ochrony powietrza przed emisją zanieczyszczeń z kotła opalanego na statku.....	56
3.2.3. Opis matematyczny efektywności energetycznej kotła opalanego.....	56
3.2.4. Funkcja celu modelu eksploatacji kotła opalanego .....	57
3.3. Cel i zakres pracy .....	58
4. ANALIZA MATEMATYCZNA SYGNAŁÓW KRYTERIALNYCH MODELU STRATEGII EKSPLOATACJI .....	60
4.1. Wybór obiektu badań eksperymentalnych .....	60
4.2. Model kryterium bezpieczeństwa technicznego kotła opalanego .....	61
4.2.1. Parametry sygnału ciepłno-przepływowego .....	62
4.2.2. Parametry dopuszczalne i graniczne sygnału ciepłno-przepływowego.....	65
4.3. Model kryterium bezpieczeństwa ekologicznego kotła opalanego.....	66
4.4. Model kryterium eksploatacyjnej efektywności energetycznej .....	69
4.4.1. Model kryterium eksploatacyjnej efektywności energetycznej kotła opalanego .....	69
4.4.2. Model kryterium eksploatacyjnej efektywności energetycznej statku .....	71
4.5. Relacje pomiędzy sygnałami kryterialnymi modelu eksploatacji kotła opalanego ...	72
4.6. Podsumowanie – postulaty poprawności modelu .....	73
5. EKSPERYMENTALNA IDENTYFIKACJA SYGNAŁÓW PARAMETRÓW MODELU EKSPLOATACJI .....	75
5.1. Metodyka i program badań .....	75
5.2. Badania parametrów sygnału ciepłno-przepływowego kotła .....	75
5.2.1. Zastosowana aparatura kontrolno-pomiarowa .....	75
5.2.2. Program badań sygnału ciepłno-przepływowego .....	77
5.2.3. Wyniki badań i ich dyskusja .....	78
5.3. Badania parametrów sygnału szkodliwych produktów spalania .....	82
5.3.1. Zastosowana aparatura pomiarowa.....	82
5.3.2. Program badań sygnału emisji szkodliwych produktów spalania .....	83

5.3.3. Wyniki badań i ich dyskusja .....	84
5.4. Badania parametrów sygnału efektywności energetycznej.....	95
5.4.1. Pomiary emisji CO <sub>2</sub> parametrów efektywności energetycznej poprzez określenie emisji .....	96
5.4.2. Badania parametrów eksploatacyjnej efektywności energetycznej .....	96
5.4.3. Program badań parametrów efektywności energetycznej.....	96
5.4.4. Wyniki badań i ich dyskusja .....	98
5.5. Analiza wyników badań.....	106
6. WALIDACJA MODELU EKSPLOATACJI OKRĘTOWEGO POMOCNICZEGO KOTŁA OPALANEGO .....	108
6.1. Propozycja strategii eksploatacji opartej na bezpieczeństwie technicznym i ekologicznym z uwzględnieniem efektywności energetycznej .....	108
6.2. Oszacowanie trafności eksperymentu .....	111
6.3. Ocena adekwatności modelu .....	112
6.3.1. Weryfikacja kryterium jakości modelu Q dla parametrów sygnału cieplno-przepływowego.....	114
6.3.2. Weryfikacja kryterium jakości modelu Q dla parametrów sygnału emisji szkodliwych produktów spalania.....	115
6.3.3. Ocena przydatności EEOI jako wskaźnika jakości modelu sygnału kryterialnego efektywności energetycznej .....	118
6.4. Zgodność wniosków z przeprowadzonych badań z postulatami poprawności modelu .....	119
6.5. Podsumowanie .....	121
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE.....	122
STRESZCZENIE .....	130
ABSTRACT .....	133
LITERATURA.....	135
Załącznik 1. Podstawowe dane techniczne okrętowych kotłów pomocniczych.....	151
Załącznik 2. Wyniki pomiarów parametrów sygnału cieplno-przepływowego i sygnału szkodliwych produktów spalania z kotła opalanego przeprowadzonych na statku pasażersko-samochodowym.....	152
Załącznik 3. Wyniki obliczeń EEOI dla statku pasażersko-samochodowego z uwzględnieniem efektywności energetycznej kotła pomocniczego opalanego PARAT .....	170
Załącznik 4. Wielkości charakteryzujące podróże oraz parametry efektywności energetycznej w ramach MRV obliczone dla 3. kontenerowców.....	173
Załącznik 5. Zestawienie parametrów wybranych sygnałów i wyniki obliczeń kryterium jakości modelu Q .....	177

## STRESZCZENIE

### MODEL EKSPLOATACJI OKRĘTOWYCH POMOCNICZYCH KOTŁÓW OPALANYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WYMAGAŃ OCHRONY ŚRODOWISKA MORSKIEGO

W rozprawie przedstawiono model eksploatacji okrętowych pomocniczych kotłów opalanych z uwzględnieniem wymagań ochrony środowiska morskiego. Zasadność podjęcia tego tematu wynikała z rozwijającego się postępu cywilizacyjnego i technologicznego w okrętownictwie. Wprowadził on ograniczenia w zakresie bezpieczeństwa technicznego i zapewnienia ochrony środowiska morskiego, przy jednoczesnej konieczności poprawy eksploatacyjnej efektywności energetycznej statków i ich układów energetycznych w trakcie wykonywanych zadań transportowych.

Praca składa się z 7. rozdziałów poprzedzonych wstępem. Wykonano ją zgodnie z ogólnym planem badawczym oraz w oparciu o szczegółowe plany opisane w poszczególnych rozdziałach. W każdym rozdziale dokonano szczegółowego podsumowania rezultatów badań i analiz, formułując na ich podstawie wnioski użyteczne. W ostatnim 7. rozdziale rozprawy zaprezentowano syntetyczne opracowanie *Podsumowanie i wnioski końcowe*.

W rozdziale 1. dokonano analizy i syntezy degradacji stanu technicznego kotłów okrętowych, w wyniku procesów spalania i zanieczyszczania powierzchni grzewczych. Przedstawiono wpływ szkodliwych produktów spalania na zanieczyszczanie powietrza ze statków. Omówiono współcześnie stosowane na statkach morskich strategie utrzymania urządzeń maszynowych i stosowania diagnostyki sygnałów procesu spalania. Przeprowadzono analizę stanu eksploatacji okrętowych pomocniczych opalanych kotłów na statkach morskich. Przeanalizowano stan eksploatacji kotłów i zaprezentowano dwa algorytmy podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Przedstawiono zmodyfikowaną w wyniku wprowadzenia wymagań Załącznika VI do międzynarodowej konwencji MARPOL, strategię eksploatacji okrętowych pomocniczych kotłów opalanych z zastosowaniem diagnozowania.

Rozdział 2. prezentuje współcześnie stosowane metody utrzymania stanu kotłów zgodne z obowiązującymi przepisami, zaleceniami producentów i strategią eksploatacji armatorów, zmierzającą przede wszystkim do zmniejszania zużycia paliwa, jako podstawowego składnika kosztów eksploatacji. Podkreślono konieczność spełnienia przez okrętowe pomocnicze kotły opalane zarówno wymagań bezpieczeństwa, jak i wymagań w zakresie ochrony środowiska morskiego konwencji MARPOL o ochronie środowiska morskiego i zapobieganiu

zanieczyszczania powietrza, uzupełnionych o najnowsze wymagania w zakresie poprawy efektywności energetycznej statków.

W rozdziale 3. podkreślono, że zanieczyszczania środowiska morskiego i poprawy efektywności energetycznej przez okrętowe kotły opalane stało się ważnym problemem badawczym. Sformułowano w związku z tym problem badawczy oraz zidentyfikowano parametry sygnałów generowanych przez pomocnicze okrętowe kotły opalane.

W rozdziale 4. przedstawiono analizę matematyczną sygnałów kryterialnych modelu strategii eksploatacji. Zbudowano model matematyczny kryterium bezpieczeństwa technicznego kotła oparty na parametrach ciepłno-przepływowych, a następnie dla sygnału emisji szkodliwych produktów spalania paliwa zbudowano model kryterium bezpieczeństwa ekologicznego kotła i model matematyczny kryterium efektywności energetycznej. W rozdziale 4. skojarzono sterowanie eksploatacją kotła opalanego z parametrami wpływającymi na zanieczyszczenie powietrza z wykorzystaniem metod diagnostyki technicznej. Dla potrzeb sformułowania problemu badawczego, rozpoznano parametry sygnałów generowanych przez okrętowe pomocnicze kotły opalane (podrozdz. 4.2.1). W tym celu zbudowano modele funkcjonalne kotła i relacji diagnostycznych, wykorzystywanych w procesie jego użytkowania.

W rozdziale 5. dokonano eksperymentalnej identyfikacji sygnałów parametrów modelu eksploatacji. W oparciu o wyniki pomiarów parametrów pracy kotłów na statkach, podczas eksperymentu biernego, zweryfikowano parametry modeli i opracowaną strategię dynamicznego utrzymania kotłów.

W rozdziale 6 dokonano walidacji modelu eksploatacji okrętowego pomocniczego kotła opalanego, z uwzględnieniem wskaźnika eksploatacyjnego efektywności energetycznej EEOI, wykorzystując modele matematyczne zbudowane w rozdziale 4.

W rozdziale 7 rozprawy podsumowano wyniki rozważań i ich rezultaty. Synteza wniosków potwierdza, iż sformułowana w rozdziale 3. w pkt. 3.2.4. funkcja celu modelu eksploatacji okrętowego pomocniczego kotła opalanego jest w opracowanym modelu eksploatacji kotła zdefiniowana poprawnie i zwalidowana w pracy. Dowiodła tego przeprowadzona w rozdz. 6., pozytywnie zakończona procedura walidacji modelu. W konsekwencji, określone w podrozdziale 3.3 *Cel i zakres pracy*, cel główny, poznawczy i użytkowy rozprawy zostały osiągnięte. W rozdziale 7. przedstawiono walory opracowanego modelu eksploatacji okrętowego pomocniczego kotła opalanego oraz możliwości wdrożenia proponowanego modelu w ramach autorskiej strategii eksploatacji kotłów. Rozdział 7. sugeruje

również kierunki ewentualnych dalszych badań i przewidywane korzyści z zastosowania opracowanego modelu postępowania eksploatacyjnego, które wychodzą naprzeciw współczesnym kierunkom rozwoju strategii/metod eksploatacji systemów/układów energetycznych statków morskich i wymaganiom ochrony środowiska sformułowanym przez Międzynarodową Organizację Morską.

## **ABSTRACT**

### **OPERATION MODEL OF MARINE AUXILIARY FIRED BOILERS WITH REGARD TO THE REQUIREMENTS OF THE PROTECTION OF THE MARINE ENVIRONMENT**

This dissertation presents the model of operation of marine auxiliary fired boilers considering protection of the marine environment. This issue has been chosen with a view to civilizational and technological progress in shipbuilding. This progress implied introduction of restrictions concerning technical safety and marine environment protection, having regard to improvement of operational energy efficiency of ships and their power systems during performed transportation activities.

The dissertation consists of 7 chapters and an introduction. It has been prepared based on general research plan and detailed plans described in particular chapters. Each chapter contains a detailed summary of research and analyses results, as well as utilitarian conclusions formulated based on the results. In the last Chapter 7 of the dissertation, a synthetic summary and final conclusions have been presented.

In Chapter 1, the analysis and synthesis of ship boilers technical condition degradation, due to combustion and heating surfaces pollution processes, has been made. Effect of harmful combustion products on air pollution from ships has been presented. Machinery maintenance strategies today applied onboard sea-going ships and the need for diagnosis of combustion process signals have been discussed. An analysis of operational condition of auxiliary fired boilers onboard sea-going ships has been performed. Boilers operation has been analysed and two algorithms of making operational decisions have been presented. An account of the auxiliary fired boilers operational strategy modified due to implementation of MARPOL Annex VI requirements, using diagnostic processes, has been given.

Chapter 2 presents today applied methods of maintaining boilers condition, conforming to valid rules, manufacturers' recommendations and Owners' operational strategy, which mainly aim at reducing fuel consumption as the basic component of operational costs. Necessity of marine auxiliary fired boilers compliance both with safety requirements and marine environment protection in the scope of air pollution prevention requirements, included in the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL Convention), supplemented by contemporary ships energy efficiency improvement requirements, has been highlighted.



In Chapter 3, it has been stressed that marine environment pollution and improvement of energy efficiency of the marine auxiliary fired boilers became an important research problem. This research problem has been therefore formulated and parameters of signals generated by marine auxiliary fired boilers have been identified.

Chapter 4 contains a mathematical analysis of criterion signals of the operational strategy model. The mathematical model of boiler technical safety based on heat-flow parameters has been constructed and then, for the emission signal of fuel combustion harmful products, a boiler ecological safety model and energy efficiency mathematical models have been developed. In Chapter 4, fired boiler operation control has been related to air pollution contributing parameters, using technical diagnosis methods. For the needs of formulation of the research problem, the parameters of signals generated by the marine auxiliary fired boilers have been identified (subchapter 4.2.1). To this purpose, functional models of the boiler and diagnostic relations applied in the boiler operational process have been constructed.

In Chapter 5, experimental identification of operational model parameter signals has been performed. Based on the results of shipboard boilers operational parameters measurement, made during a passive experiment, parameters of models and developed strategy of dynamical maintenance of boilers have been verified.

In Chapter 6, validation of operational model of the marine auxiliary fired boiler has been performed, taking into account the energy efficiency operational indicator (EEOI), using mathematical models constructed in Chapter 4.

Chapter 7 of the dissertation summarizes the results of the considerations and their conclusions. The synthesized conclusions confirm that the function of operational model purpose of the marine auxiliary fired boiler, formulated in paragraph 3.2.4, is correctly defined in the developed boiler operational model and validated in operation. It is proved by positively completed model validation procedure, executed in Chapter 6. Consequently, the main, cognitive and utilitarian objectives of the dissertation defined in subchapter 3.3 *Dissertation objective and scope*, have been achieved. In Chapter 7, values of the developed operational model of the marine auxiliary fired boiler and possibilities of implementation of the proposed model within an author's operational strategy of boilers have been presented. Chapter 7 suggests also directions of further research and expected benefits connected with the application of developed operational model, which respond to contemporary International Maritime Organization formulated directions of operational strategy/method development for sea-going ships energy systems and marine environment protection requirements.