

Dominika Cuper-Przybylska

## Przegląd modeli procesów spalania w cylindrze silnika tłokowego

JEL: L62, B16. DOI: 10.24136/atest.2018.020

Data zgłoszenia: 26.03.2018. Data akceptacji: 25.04.2018.

*W artykule znajduje się przegląd modeli wykorzystywanych do obliczenia parametrów procesu spalania w silnikach tłokowych. Jedną ze stosowanych technik jest modelowanie oparte na opisie matematycznym zjawisk fizycznych. Poziom złożoności takiego opisu uzależniony jest jednak od celu modelu, efektywności obliczeń i możliwości uzyskania wiarygodnych danych pomiarowych. W pracy przedstawiono różne metody modelowania zjawisk zachodzących w cylindrze silnika tłokowego o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono założenia i efekty modelowania z zastosowaniem modeli od 0-wymiarowych i jednostrefowych po złożone modele 3-wymiarowe, opisujące zjawiska turbulentnych ruchów mas z zastosowaniem komputerowej mechaniki płynów.*

**Słowa kluczowe:** silniki tłokowe, modele matematyczne, parametry procesu spalania.

### Wstęp

Rzeczony rozwój konstrukcji silników tłokowych zmierza w kierunku zwiększenia ich efektywności działania ale też ograniczenia emisji szkodliwych dla środowiska produktów spalania. Ograniczenie zużycia paliwa przy jednoczesnej redukcji emisji tlenków azotu do atmosfery oraz zwiększenie trwałości i niezawodności pracy silnika wymaga ciągłego rozwoju technik pomiarowych i szczegółowej analizy procesów zachodzących podczas pracy silnika. Standardowym rozwiązaniem w połowie XX wieku były analizy zjawisk oparte o techniki pomiarowe. Po analizie teoretycznej dokonywano modyfikacji konstrukcji silnika prototypowego i przeprowadzano żmudne i kosztowne pomiary laboratoryjne. Badania tego typu są szczególnie uciążliwe w przypadku silników o dużych gabarytach. Przykładowo 3 cylindrowy silnik okrętowy o średnicy tłoka 250mm spala do 75kg paliwa na godzinę przy obciążeniu około 250kW [1]. Z tego powodu poszukiwane są rozwiązania, które w znacznym stopniu ograniczą czas i koszty badań. Dokładne poznanie zjawisk, zachodzących podczas pracy silnika, oraz ich opis matematyczny pozwalają na zastosowanie obliczeń w miejsce pomiarów. Jednym z pierwszych rozwiązań były maszyny analogowe, jednak ze względu na złożoność zjawisk towarzyszących procesowi spalania miały one bardzo ograniczone zastosowanie. W dobie powszechnego wykorzystywania komputerów zastosowanie modeli matematycznych w pracach badawczych jest coraz powszechniejsze i tańsze. Wzrost mocy obliczeniowej komputerów pozwala na zastosowanie coraz bardziej zaawansowanych technik obliczeniowych w coraz krótszym czasie. Pozwala to na ograniczenie kosztów badań naukowych ale również kosztów projektowania wyrobów, prototypowania i wdrożenia wyrobów do produkcji seryjnej. Nie mniej jednak nawet najnowocześniejsze serwery obliczeniowe nie pozwalają w chwili obecnej na wierne odwzorowanie procesu spalania w cylindrze silnika.

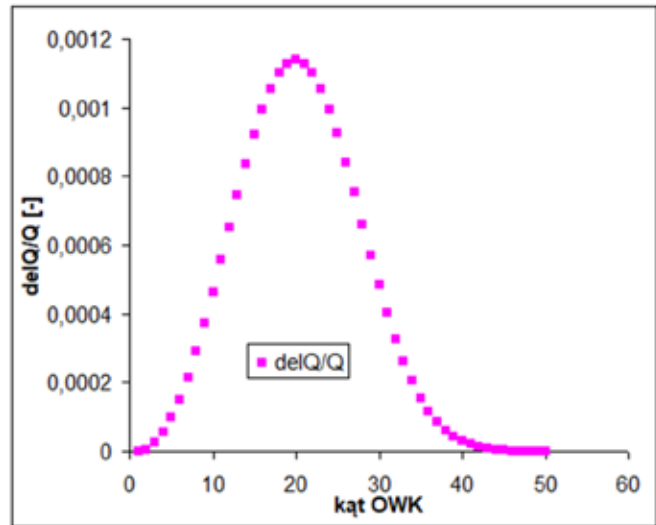
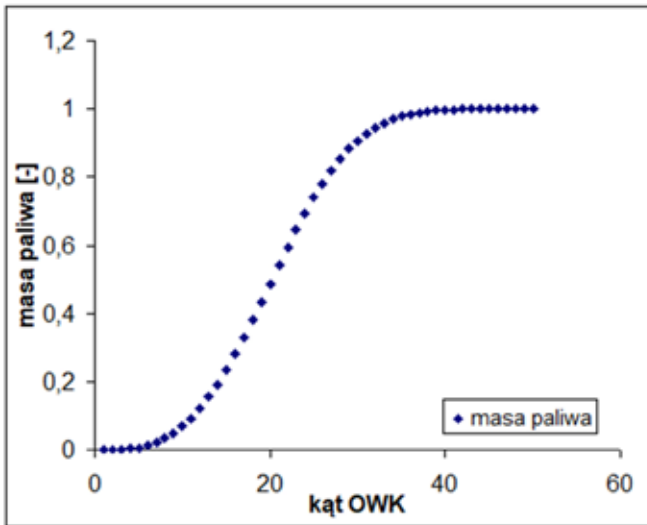
Na proces spalania składa się szereg procesów cząstkowych jak wtrysk paliwa do cylindra, rozpylenie i rozprzestrzenianie się kropeł paliwa w cylindrze, parowanie i mieszanie z powietrzem, samozapłon, rozprzestrzenianie się płomienia w cylindrze wraz

z turbulentnym ruchem mas i wymianą ciepła z elementami konstrukcyjnymi cylindra silnika oraz ruch tłoka wywołany wytworzonymi siłami. Wszystkie wymienione zjawiska występują równocześnie z różną intensywnością w różnych obszarach cylindra silnika. Należy również zwrócić uwagę, że proces spalania odbywa się w bardzo krótkim czasie, rzędu 1-10 ms, przy jednoczesnej zmianie objętości przestrzeni cylindrowej, wynikającej z ruchu tłoka, zmianie ciśnienia i temperatury. Dlatego też obliczenia parametrów wspomnianych zjawisk sprowadzają się zawsze do znacznych uproszczeń w opisie zjawisk, zastosowanego aparatu matematycznego i metod rozwiązywania równań. Ograniczenia te wynikają również z niedoskonałości urządzeń pomiarowych. Należy zaznaczyć, że model matematyczny zjawisk fizycznych zawsze wymaga zastosowania danych wejściowych, które zazwyczaj są rejestrowane podczas realizacji pomiarów na obiektach rzeczywistych. Z tego powodu zakres zastosowanych ograniczeń i uproszczeń modelu matematycznego zależy od założonego celu modelowania. I tak na przykład ocena energetyczna gotowej konstrukcji silnika może być zazwyczaj przeprowadzona w oparciu o najprostsze modele procesu spalania. Natomiast projektowanie kształtu komory spalania wymaga już zastosowania złożonych modeli, uwzględniających ruch mas w cylindrze silnika.

Przedstawione uwarunkowania skłaniają do przeprowadzenia analizy stosowanych metod obliczeniowych, pod kątem celu ich wykorzystania do analizy procesu spalania w cylindrze silnika tłokowego. Dlatego też celem pracy jest analiza modeli stosowanych w obliczeniach procesów zachodzących w cylindrze silnika podczas jego pracy.

### 1. Modele bezwymiarowe

Założeniem w bezwymiarowych modelach procesu spalania jest przyjęcie jednakowych parametrów termodynamicznych dla całej objętości przestrzeni cylindrowej. Oznacza to, że przyjmuje się spalanie mieszaniny jednorodnej w całej objętości przestrzeni cylindrowej. Pomijane są przy tym zjawiska wtrysku, rozpylenia i parowania paliwa oraz zjawiska towarzyszące wymianie ładunku w cylindrze. Proces spalania zobrazowany jest prostą funkcją wywiązywania się ciepła. Modele takie mogą posłużyć między innymi do analizy procesu spalania w oparciu o zmierzone przebiegi wartości ciśnienia w cylindrze [2], jako narzędzie do obliczenia temperatury gazów wylotowych [3], czasu spalania [4] czy średniej temperatury w cylindrze [5]. Na modele tego typu składa się prosty zapis matematyczny funkcji wywiązywania się ciepła podczas procesu spalania oraz politropowe sprężanie powietrza przed procesem spalania i politropowe rozprężanie po okresie spalania. Wykładniki politropy oraz pozostałe parametry procesu określane są na podstawie bilansu energetycznego. Model opiera się na danych wejściowych, które są zazwyczaj uzyskiwane na podstawie pomiarów bezpośrednich. Dane te to przede wszystkim parametry termodynamiczne powietrza, dane opisujące ruch układu tłokowo korbowego, ilość zużytego paliwa. W przypadku analizy procesu spalania w celach diagnostycznych wykorzystuje się również charakterystyki ciśnienia spalania i rzadziej charak-



Rys. 1. Krzywe wtrysku paliwa i wywiązywania się ciepła w modelu Vibe

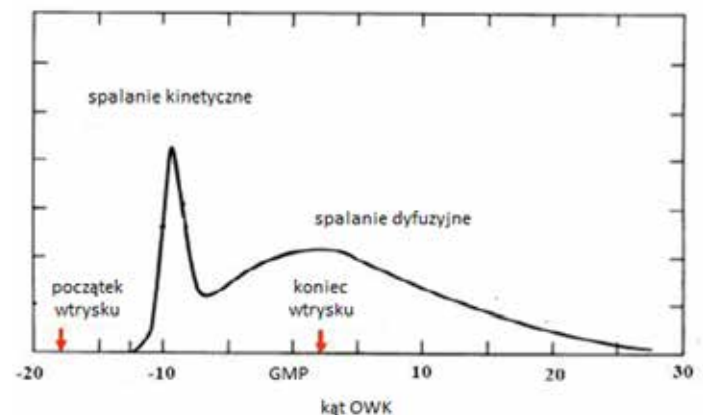
terystyki ciśnienia wtrysku paliwa w celu oszacowania natężenia przepływu paliwa do komory spalania.

Przykładem tego typu modelu jest model Vibe (również Wiebe) [6]. W modelu tym proces spalania opisany jest funkcją wywiązywania ciepła w stosunku do kąтового położenia wału korbowego oraz funkcją masy spalonego paliwa. Na Rys.1 zaprezentowano przykładowe krzywe wtrysku paliwa i wywiązywania się ciepła modelu Vibe.

W rzeczywistości krzywa wywiązywania się ciepła ma odmienny kształt. W chwili zapłonu paliwa w cylindrze silnika następuje gwałtowne spalanie części paliwa, które już odparowało do czasu zapłonu. Jest to okres bardzo burzliwego spalania, kontrolowany przez mechanizmy kinetyki chemicznej, w wyniku czego następuje bardzo gwałtowny przyrost strumienia energii i wzrost temperatury. Po wypaleniu par paliwa następuje gwałtowny spadek strumienia energii i rozpoczyna się spalanie paliwa, które dopiero ulega odparowaniu. Jest to etap spalania, kontrolowany przez zjawiska dyfuzji par paliwa z kropeł. W tym czasie następuje ponowny niewielki wzrost strumienia energii aż do chwili wypalenia się dawki paliwa. Przykładowy przebieg charakterystyki wywiązywania się ciepła zaprezentowano na Rys.2. Należy zaznaczyć, że pierwszy, kinetyczny etap spalania odpowiedzialny jest za wzrost temperatury procesu spalania a co za tym idzie wzrost emisji NOx do atmosfery. Dlatego jednym z kierunków rozwoju silników tłokowych jest ograniczenie kinetycznego etapu procesu spalania, np. poprzez zastosowanie wielowtrysku [7].

Rozwinięciem modelu Vibe jest model dwufunkcyjny, który pozwala na uzyskanie zbliżonej charakterystyki wywiązywania się ciepła. Model Vibe jest przykładem modelu jednostrefowego. Oznacza to, że zakłada się w nim uproszczenie, polegające na tym że przestrzeń cylindrowa stanowi jedną strefę w której odbywają się jednocześnie wszystkie zjawiska procesu a efektem jest dostarczenie do strefy energii. W rzeczywistości w przestrzeni cylindrowej podczas procesu spalania można wyróżnić w zasadzie przynajmniej dwie strefy. Pierwsza strefa (przed płomieniową) to ta w której odbywa się mieszanie nieopalonego paliwa z powietrzem. W strefie tej zachodzi również rozpylanie i parowanie paliwa. Druga strefa, zwana strefą po płomieniową, to obszar w przestrzeni cylindrowej w którym proces spalania już nastąpił. W strefie tej znajdują się produkty spalania. Strefy te mają zmienną objętość w czasie procesu spalania i rozdzielone

są warstwą płomienia. Wspomniana warstwa płonienia jest na tyle wąska, że w niektórych modelach spalania jest pomijana. W pozostałych wypadkach opisowi podlegają modele trzystrefowe. Przykładem takiego modelu jest 2 Zone Mixing Controlled Combustion model [8]. Podobnie jak w przypadku rozszerzonego modelu Vibe i w tym modelu proces spalania jest opisany równaniami, odpowiadającymi spalaniu kinetycznemu i dyfuzyjnemu, przy czym przebieg spalania zależy od funkcji ilości paliwa oraz funkcji gęstości kinetycznej energii turbulencji. Strefa przed płomieniową charakteryzuje się większą ilością paliwa i mniejszą gęstością kinetycznej energii turbulencji. Odwrotnie jest w przypadku strefy po płomieniowej. Model ten jest dodatkowo rozwinięty o opis matematyczny zwłoki samozapłonu. Na uwagę zasługują również modele wielostrefowe. W modelach tych obliczane są parametry procesu dla każdej ze stref, przy czym położenie i kształt strefy nie są z reguły określane. Dokonuje się natomiast podziału komory spalania na strefy, odpowiadające odpowiedniemu stężeniu mieszaniny paliwowo powietrznej lub np. strefy odpowiadające pewnym zakresom temperatur. Następnie dokonywane są obliczenia parametrów procesu spalania. Zakłada się przy tym często w takich modelach, że nie istnieje wymiana ciepła i masy między strefami. Przykładem takiego modelu jest wielostrefowy regeneracyjny model REMUZ [9], lub modele rozwijane przez Rakopoulosa [10, 11].



Rys. 2. Przykładowa charakterystyka wywiązywania się ciepła z procesu spalania w silniku tłokowym

## 2. Modele jednowymiarowe

Modele jednowymiarowe w praktyce nie są stosowane do modelowania procesów spalania w silnikach tłokowy. Są za to często wykorzystywane do modelowania przepływów w układzie wymiany ładunku a więc do modelowania przepływu przez kanały powietrzne i spalinowe. Modele takie pozwalają na określenie strat przepływu z uwzględnieniem wymiany ciepła na elementach konstrukcyjnych silnika. Modele te mają zastosowanie do określenia danych wejściowych w postaci parametrów termodynamicznych powietrza dostarczanego do cylindra silnika lub obliczenia energii gazów wylotowych w kanale wylotowym. Modele tego typu są implementowane do komercyjnego oprogramowania lub akademickich rozwiązań jak AVL Boost, GT-Suite, Ricardo Wave. Przykładem zastosowania kodu AVL Boost jest [12]. W pracy tej został przygotowany model stosunkowo niewielkiego 4-suwowego silnika 4-cylindrowego o zapłonie iskrowym. Model pozwolił na analizę parametrów procesu spalania w silniku mieszaniny benzyny z etanolem w 6 różnych proporcjach. Należy podkreślić, że ze względu na uproszczony zapis matematyczny model taki pozwala na obliczenie parametrów silnika dla kilkuset obrotów wału korbowego w przeciągu kilku minut z zastosowaniem przeciętnego komputera klasy PC.

## 3. Modele dwuwymiarowe

Dwuwymiarowe modele procesu spalania w cylindrze silnika tłokowego są pewnego rodzaju uproszczeniami modeli trójwymiarowych. Zaoszczędzona na wspomnianych uproszczeniach moc obliczeniowa komputerów może być w takich przypadkach wykorzystana do obliczeń równań kinetycznej chemii procesu spalania. W modelach tych przyjmuje się zazwyczaj jedno z dwóch założeń:

- ♦ cylinder silnika jest osiowoosymetryczny, a więc możliwe jest sprowadzenie modelowania zjawisk procesu spalania do powierzchni przekroju osiowego cylindra.
- ♦ cylinder silnika jest walcem, a więc możliwe jest modelowanie procesu spalania poprzez sprowadzenie objętości cylindra do przekroju poprzecznego walca na umownej wysokości.

Należy pamiętać, że w pierwszym przypadku układ współrzędnych cylindrycznych musi zostać przekształcony w układ współrzędnych kartezjańskich. Ponadto pomijane są zawirowania mas mieszanin. Przykładem takiego modelu jest praca prezentowana w [13]. Przedstawiono w niej model procesu spalania dla cylindra silnika o zapłonie iskrowym. Model został sporządzony w oprogramowaniu Fluent i zawiera ruchomą siatkę przestrzeni cylindrowej, obejmującą również ruch zaworów cylindrowych. Opis spalania sprowadza się do jednej zastępczej reakcji chemicznej spalania heptanu i pozwala na określenie temperatury, prędkości przepływów oraz stężenia heptanu w cylindrze silnika.

Modele dwuwymiarowe wykorzystywane są również jako modele cząstkowe do modelowania procesów spalania we wszystkich przypadkach, gdzie zachodzi osiowa symetryczność zjawisk. Przykładem takim jest wypływ paliwa z pojedynczego otworka wtryskiwacza, lub przepływ masy mieszaniny wzdłuż ścianek cylindra.

## 4. Modele trójwymiarowe

W dobie rozwijających się technik komputerowych coraz powszechniejsze zastosowanie mają modele trójwymiarowe. Są to zazwyczaj mniej lub bardziej rozbudowane modele oparte na ruchomej siatce przestrzennej, odwzorowującej przestrzeń cylindrową silnika wraz z poruszającymi się zaworami i tłokiem.

Modele te należą do rodziny modeli komputerowej mechaniki płynów (CFD *Computational Fluid Dynamics*). Stosowane są przy tym zazwyczaj metody elementów skończonych lub metody objętości skończonych. Wspomniana siatka przestrzenna jest podzielona na elementy lub objętości skończone na tyle małe, że możliwa jest linearyzacja równań opisujących zjawiska zachodzące w przestrzeni cylindrowej. Jest to o tyle istotne, że wspomniana siatka przestrzenna może składać się z milionów elementów skończonych z których w każdym może następować proces turbulentnego ruchu masy, rozpylania, parowania i samozapłonu paliwa i rozprzestrzeniania się płomienia. Opis matematyczny tych zjawisk zależy od przyjętego modelu i uproszczeń. Obliczenia w modelach CFD są przeprowadzane zazwyczaj metodą iteracyjną do momentu zmniejszenia błędów obliczeń do wartości założonej przez badacza. Wspomniany błąd jest obliczany w oparciu o wartości parametrów brzegowych (globalnych dla całej siatki przestrzennej ale również lokalnych dla poszczególnych elementów skończonych). Stosowane są przy tym 2 rodzaje opisu zjawisk; modele Eulera lub modele Lagrange'a. Modelowanie metodą Eulera polega na związaniu układu współrzędnych przestrzeni w której występuje modelowane zjawisko z poruszającą się masą. Przykładem zastosowania modelowania Eulera jest model parowania paliwa w cylindrze. Opis matematyczny procesu parowania sprowadza się do obliczenia strumienia masy pary, uwalnianej z pojedynczej kropli i strumienia energii dostarczanej do tej kropli. Strumień energii zależy między innymi od prędkości przepływów gazów a nie od położenia kropli w przestrzeni cylindrowej (dopóki ta nie natrafi na ściankę cylindra). Tak więc wygodniejszy w tym wypadku jest opis metodą Eulera. Opis Lagrange'a charakteryzują modele przepływu mas. W takim przypadku układ współrzędnych jest nieruchomy i związany z siatką przestrzenną. W przypadku obliczeń numerycznych kłopotliwy jest również fakt, że praca silnika wymusza ruch siatki przestrzennej, ponadto przebieg zjawisk nie jest stacjonarny. W związku z czym dokonuje się zazwyczaj obliczeń dla wybranych warunków początkowych (np. początek procesu wtrysku paliwa do cylindra, lub początek procesu sprężania w chwili zamknięcia zaworów cylindrowych), dla których znane są wartości parametrów procesów. Następnie dokonuje się obliczeń iteracyjnych aż do uzyskania zakładanych wartości błędów minimalnych oraz przechodzi się do obliczeń następnego kroku, w którym wał korbowy dokonał niewielkiego ruchu o założony kąt. Należy zaznaczyć, że podczas tego ruchu elementy siatki przestrzennej ulegają deformacji ze względu na ruch tłoka. Z tego samego powodu następuje również zmiana ciśnienia, temperatury i innych parametrów mieszaniny znajdującej się w cylindrze silnika.

Wymienione uwarunkowania sprawiają, że modelowanie w przestrzeni trójwymiarowej procesu spalania wymaga dużych mocy obliczeniowych komputerów. Z tego powodu stosuje się modele cząstkowe procesów rozpylania, parowania, samozapłonu i spalania oraz turbulentnych przepływów i wymiany ciepła z elementami konstrukcyjnymi cylindra silnika, które zawierają w sobie wiele uproszczeń. Uproszczenia te wynikają również z celu modelowania. W zależności od spodziewanych wyników upraszcza się matematyczny opis tych zjawisk, które w minimalny sposób wpływają na spodziewany wynik i rozbudowuje się opis matematyczny procesów istotnych dla celu modelowania. Przykładem może tu być opis kinetyczny procesu spalania, który w przypadku obliczeń emisji spalin będzie rozbudowany, składający się z setek równań chemicznych, natomiast w przypadku analizy energetycznej procesu spalania wspomniany opis może

sprowadzić się do jednego chemicznego równania bilansowego. Istotne z poznawczego punktu widzenia są modele procesu spalania paliwa. W modelach tych zakłada się, że paliwo jest rozpylone, odparowane i wymieszane z powietrzem w różnych proporcjach w zależności od rozpatrywanego obszaru przestrzeni cylindrowej. Najpopularniejsze modele to model spalania kontrolowany przez zjawiska turbulencji, modele koherentne (Coherent Flame Models) oraz modele probabilistyczne (Probability Density Functions).

#### 4.1. Model spalania kontrolowany zjawiskami turbulencji

Magnusen i Hjertager [14] zaproponowali model spalania oparty o równania kinetyki chemicznej. Model bazuje na równaniach reakcji chemicznych procesu spalania. Skala czasowa przebiegu reakcji chemicznych jest dużo mniejsza niż skala czasowa zjawisk związanych z turbulentnym przepływem mieszaniny w cylindrze. Dlatego też w modelu tym współczynnik szybkości reakcji chemicznych jest określony zależnością funkcyjną, wyznaczoną w oparciu o wyniki eksperymentu.

#### 4.2. Modele koherentne

W modelach tego typu zakłada się, podobnie jak w modelu z wcześniejszego rozdziału, że szybkość przebiegu reakcji chemicznych procesu spalania jest wielokrotnie większa od zjawisk mieszania turbulentnego. A więc proces spalania odbywa się w bardzo wąskiej warstewce w sposób laminarny (*laminar flamelet concept*), ponieważ szybkość rozchodzenia się płomienia jest znacznie wolniejsza od przebiegu procesu spalania w warstewce. Prędkość rozprzestrzeniania się i grubość warstewki płomienia ciśnienia, temperatury i składu chemicznego mieszaniny. Najmniej rozbudowanym modelem z rodziny modeli koherentnych jest model CFM-2A w którym to szybkość rozprzestrzeniania się płomienia obliczana jest tylko dla pewnego zakresu współczynnika nadmiaru powietrza, wynoszącego dla oleju napędowego od 0,59 do 1,66. Jeżeli wartość wspomnianego współczynnika wykracza poza zakres to prędkość płomienia przyjęta jest zero. Grubość warstewki płomienia ustalana jest w oparciu o rozkład temperatury przed płomieniem. W modelu MCFM rozbudowany został zakres obliczeń dla mieszanin paliwa z powietrzem bardzo ubogich i bardzo bogatych, a więc wybiegających poza wspomniany zakres wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Model 3Z-ECFM (*Three Zone Extender Coherent Flame Model*), zaprezentowany w [15], został zintegrowany z modelem samozapłonu paliwa oraz równaniami reakcji chemicznych procesu spalania. W modelu tym przyjęto, że spalanie przebiega w objętościach skończonych, które zawierają homogeniczną mieszaninę paliwa i powietrza. Proporcje mieszaniny ustalone są na podstawie równań turbulentnego mieszania odparowanego paliwa z powietrzem i produktami spalania. Samozapłon mieszaniny następuje po czasie opóźnienia samozapłonu, zależnym od wartości temperatury, gęstości mieszaniny i stężenia molowego tlenu i paliwa.

#### 4.3. Modele probabilistyczne

W modelach probabilistycznych [16] (*Probability Density Function – PDF*) zjawiska związane z turbulentnym mieszaniem i kinetycznym spalaniem określone są funkcjami prawdopodobieństwa. Funkcje te budowane są niezależnie od fizycznej natury zjawisk i mają na celu uzyskanie wynikowych wartości zmiennych, jak udział poszczególnych substancji chemicznych czy, ental-

pia tworzenia związków chemicznych. Utworzone równania mogą być następnie obliczone dowolną metodą.

#### Podsumowanie

Modelowanie procesów zachodzących w cylindrze silnika tłokowego jest tanią i skuteczną alternatywą dla badań eksperymentalnych. Złożoność zjawisk, zachodzących podczas procesu spalania nie pozwala na wierne odtworzenie całego procesu spalania w modelu, dlatego dąży się do uproszczeń. Należy jednak zwrócić uwagę, że zakres i dokładność modelowania zależą w głównej mierze od celu jaki zamierza uzyskać modelujący. Można przyjąć ogólne założenie, że bardziej złożony model będzie wymagał określenia wartości zmiennych (często na drodze eksperymentu), które są trudniejsze lub kosztowniejsze do uzyskania. W pewnych przypadkach konieczne jest doboranie wielu zmiennych metodą prób i błędów w oparciu o konstrukcje podobne. Istotny jest również fakt, że każdy model, ze względu na zastosowane uproszczenia wymaga walidacji uzyskanych wyników obliczeń z danymi, pochodzącymi z obiektu rzeczywistego.

#### Bibliografia:

1. Pawletko, R. Polanowski, S., *Research of the influence of Marine diesel engine Sulzer AL. 25/30 load on TDC position on the indication graph*, „Journal of KONES” 2010, Vol. 17, No. 3.
2. Jeongwoo Lee, Sanghyun Chu, Kyoungdoug Min, Minjae Kim, Hyunsung Jung, Hyounghyun Kim, Yohan Chi, *Classification of diesel and gasoline dual-fuel combustion modes by the analysis of heat release rate shapes in a compression ignition engine*, In Fuel, Volume 209, 2017,
3. C. Guardiola, P. Olmeda, B. Pla, P. Bares, *In-cylinder pressure based model for exhaust temperature estimation in internal combustion engines*, In Applied Thermal Engineering, Volume 115, 2017,
4. Sokratis Demesoukas, Pierre Brequigny, Christian Caillol, Fabien Halter, Christine Mounaïm-Rousselle, *OD modeling aspects of flame stretch in spark ignition engines and comparison with experimental results*, In Applied Energy, Volume 179, 2016,
5. Jerzy Kowalski, Wiesław Tarelko, *NOx emission from a two-stroke ship engine. Part 1: Modeling aspect*, In Applied Thermal Engineering, Volume 29, Issues 11–12, 2009,
6. Melih Yıldız, Bilge Albayrak Çeper, *Zero-dimensional single zone engine modeling of an SI engine fuelled with methane and methane-hydrogen blend using single and double Wiebe Function: A comparative study*, In International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 40, 2017,
7. Zhang, Q., Hao, Z., Zheng, X., Yang, W. *Characteristics and effect factors of pressure oscillation in multi-injection DI diesel engine at high-load conditions* (2017) Applied Energy, 195, pp. 52-66.
8. P.G. Dowell, S. Akehurst, R.D. Burke, *A real-time capable mixing controlled combustion model for highly diluted conditions*, In Energy, Volume 133, 2017,
9. Khizer Saeed, *A novel regenerative multiple zones model for modelling the premixed charge stirred chemical reactor based combustion engines*, In Journal of the Energy Institute, Volume 90, Issue 5, 2017,
10. C.D. Rakopoulos, K.A. Antonopoulos, D.C. Rakopoulos, *Development and application of multi-zone model for combustion and pollutants formation in direct injection diesel engine*

- running with vegetable oil or its bio-diesel*, Energy Conversion and Management 48 (2007) 1881–1901.
11. C.D. Rakopoulos, K.A. Antonopoulos, D.C. Rakopoulos, *Multi-zone modeling of Diesel engine fuel spray development with vegetable oil, bio-diesel or Diesel Fuels*, Energy Conversion and Management 47 (2006) 1550–1573,
  12. Simeon Penchev Iliev, *Developing of a 1-D Combustion Model and Study of Engine Characteristics Using EthanolGasoline Blends*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol II, WCE 2014,
  13. Z.F. Tian, J. Abraham, *Development of a two-dimensional internal combustion engines model using CFD for education purpose*, 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 2013,
  14. Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H., *On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion*. Sixteenth International Symposium on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1977,
  15. Colin O., Benkeida A., *The 3-Zones Extended Coherent Flame Model (ECFM3Z) for Computing Premixed/Diffusion Combustion*. Oil & Gas Science and Technology. 2004; 59-6: 593–609.
  16. B. Fiorina, O. Gicquel, L. Vervisch, S. Carpentier, N. Darabiha, *Premixed turbulent combustion modeling using tabulated detailed chemistry and PDF*, In Proceedings of the Combustion Institute, 30, 1, 2005.
  17. Luft S., Skrzek T., *Współczesny silnik autobusowy : cechy charakterystyczne*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 12.
  18. Filipowicz J., *Czas i metody rozgrzewania silnika spalinowego w aspekcie zużycia jego elementów*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2013, nr 3.

---

## Overview of combustion process models in a cylinder of piston engine

The article presents an overview of models used to calculate combustion process parameters in piston engines. One of the applied techniques is modeling based on the mathematical description of physical phenomena. The level of complexity of such a description depends, however, on the purpose of the model, the efficiency of calculations and the possibility of obtaining reliable measurement data. The paper presents various methods of modeling phenomena occurring in the cylinder of a Diesel engine. Presented are assumptions and effects of modeling using models from 0-dimensional and single-zone to complex 3-dimensional models, describing the phenomena of turbulent mass movements using computer fluid mechanics.

---

**Keywords:** piston engines, mathematical models, combustion process parameters.

### Autorka:

mgr inż. **Dominika Cuper Przybylska** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, Katedra Siłowni Okrętowych d.cuperprzybylska@wm.am.gdynia.pl