

Antoni Nazarewicz*, Marcin Szlachetka*, Mirosław Wendeker*

WYKORZYSTANIE PROGRAMU STAR – CD DO MODELOWANIA ZJAWISK W SILNIKACH SPALINOWYCH

WSTĘP

Zwiększające się wymogi ekologiczne stawiane silnikom spalinowym obejmujące głównie obniżenie toksyczności spalin wymagają ciągłego unowocześnienia konstrukcji i sterowania. Taka optymalizacja dotyczy przebiegu procesu spalania.

Do przeprowadzenia takiej optymalizacji konieczna jest głęboka wiedza dotycząca zjawisk zachodzących w czasie spalania oraz wewnątrz cylindra silnika. Zdobywanie tej wiedzy opierało się głównie o rozważania teoretyczne zjawisk fizycznych potwierdzone przez badania eksperymentalne (pomiar ciśnienia, analiza sygnałów optycznych, metody laserowe).

Jednak nawet przy tak dogłębnej wiedzy przeprowadzenie optymalizacji wymaga opracowania rozwiązania a następnie jego przedstawienia. Zatem prace prowadzone są metodą prób i analizy błędów. Przez co konieczne jest tu zbudowanie prototypu.

Metody te są bardzo kosztowne ze względu na zakup aparatury badawczej i budowę stanowiska doświadczalnego. Istotna jest także czasochłonność takich eksperymentów.

W takiej sytuacji modelowanie komputerowe zaczęło zyskiwać coraz większe uznanie zarówno w zespołach inżynierów, naukowców jak i dydaktyków. Przy badaniu skomplikowanych procesów silnikowych, obejmujących przepływy różnych czynników, wymianę ciepła pomiędzy poszczególnymi elementami, proces spalania itd., badania symulacyjne są często jedynym sposobem wiodącym do przeprowadzenia skutecznej analizy. Badania takie dodatkowo znacznie zmniejszają koszt eksperymentu i pozwalają na precyzyjną analizę, która nie zależy od czynników zakłócających trudnych do wyeliminowania na stanowisku badawczym.

PROGRAM STAR – CD

Przykładem programu specjalizowanego do modelowania i analizy zjawisk zachodzących w cieczech jest program Star – CD. Program ten wykorzystując analizę CFD (Computational Fluid Dynamics) umożliwia stworzenie dowolnej geometrii trójwymiarowej i poprzez nadanie odpowiednich warunków brzegowych, przeprowadze-

* Antoni NAZAREWICZ, Marcin SZLACHETKA, Mirosław WENDEKER – Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

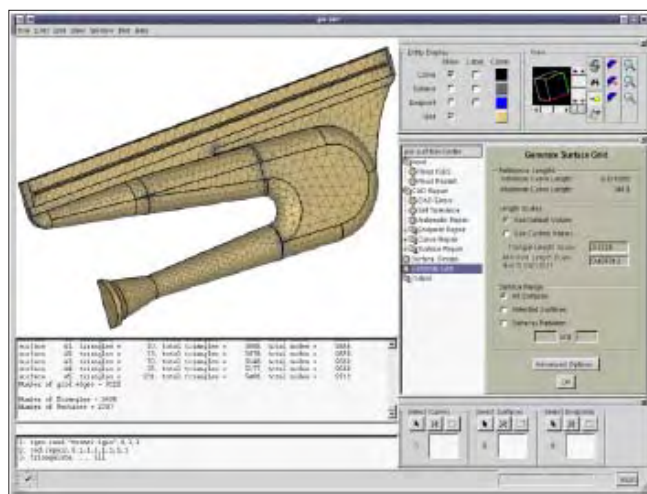
nia wewnątrz niej dowolnego procesu chociażby: przepływu czynnika, wymiany ciepła, spalania itd. Analiza CFD jest oparta na metodzie objętości skończonych i pozwala na symulowanie zjawisk związanych z przepływami.

W celu wykonania obliczeń konieczne jest wykonanie następujących kroków:

1) Opracowanie geometrii przedmiotu:

Program Star-CD umożliwia budowanie własnych modeli przestrzennych. Wymaga to zbudowania dokładnego modelu geometrycznego przestrzeni wypełnionej płynem. Jest to bardzo pracochłonne. W tym programie lepszym rozwiązaniem jest import geometrii 3D wykonanej za pomocą zaawansowanego oprogramowania CAD i zapisanego w pliku wymiany danych rozpoznawanego przez Star-CD. Modułem umożliwiającym import jest Pro-Surf (rys. 1). Posiada on możliwość otwierania plików o rozszerzeniu *.iges. Tak zaimportowany plik ma postać powierzchni.

2) Wygenerowanie siatki objętościowej na uprzednio przygotowanej powierzchni.

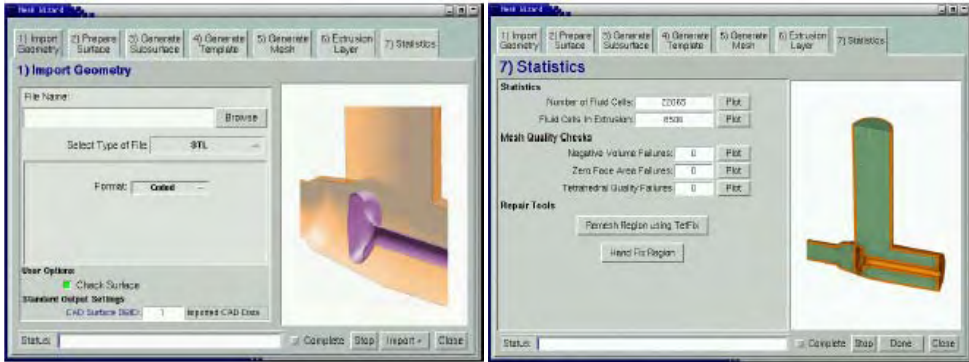


Rys. 1. Moduł Pro-Surf programu Star-CD

Wykonane jest to w tym module Proam. Odpowiednie przygotowanie siatki ma decydujące znaczenie przy późniejszych obliczeniach. Zbyt mała liczba elementów siatki skutkuje małą dokładnością przeprowadzanych analiz. Z drugiej strony zbyt duża liczba elementów zwiększa czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń.

3) Przygotowanie do analizy obejmujące:

- Określenie właściwości płynów (ciśnienie, gęstość, właściwości fizyczne i chemiczne,...),
- Nadanie warunków brzegowych (wejście, wyjście, interakcja ze ściankami,...),
- Określenie typu analizy (stany ustalone lub stany dynamiczne),
- Uwzględnienie zjawisk (turbulencje, mieszanie płynów, wtrysk, spalanie, film paliwowy,...).



Rys. 2. Okno modułu Proam

- 4) Uruchomienie analizy.
- 5) Wizualizacja i analiza wyników w module post-processing.

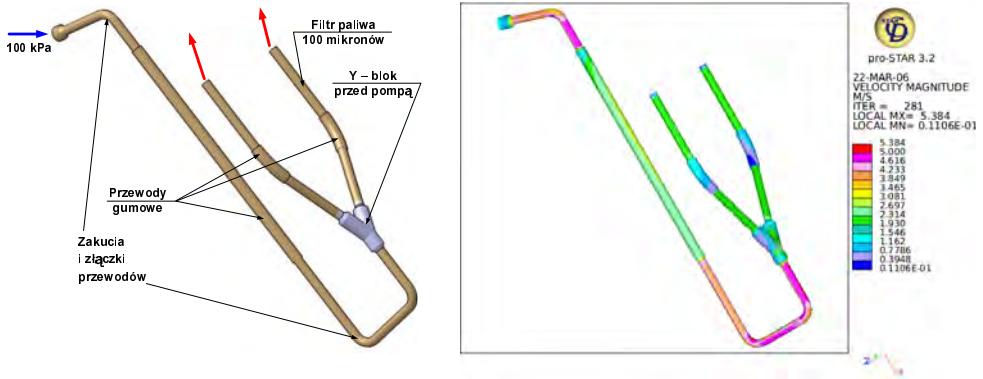
Post-procesor posiada szeroką gamę metod prezentacji wyników. Możliwe jest prezentowanie przebiegów (ciśnien, temperatur, prędkości, gęstości, ...) zarówno w przekrojach jak i bryłach objętościowych za pomocą warstwic lub wektorów. Można tworzyć wykresy powyższych zmiennych w funkcji czasu lub określonych punktów geometrii.

MODELOWANIE PRZEPIŁYWU PALIWA

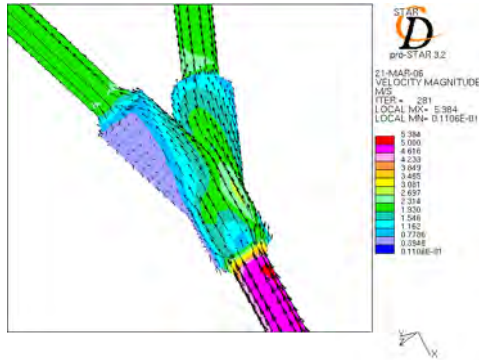
Star-CD umożliwia modelowanie zarówno pojedynczych obiektów jak i bardzo skomplikowanych układów zawierających przewody proste, przewody gięte, zawory, przewężenia itd. Przykładem takiego układu może być prototypowy układ zasilania w paliwo silnika lotniczego K9E (rysunek 3). Dla części układu, znajdującej się pomiędzy zbiornikiem paliwa i stroną ssącą pompy paliwowej, wykonano analizę prędkości przepływu paliwa [2].

Rozbudowany moduł wyświetlania wyników obliczeń umożliwia prezentację wyników za pomocą kolorów powiązanych ze skalą lub za pomocą długości wektorów (rysunek 4). Na podstawie takiej wizualizacji w łatwy sposób można zaobserwować jak zmienia się prędkość w poszczególnych miejscach charakterystycznych i czy występują lokalne spiętrzenia na elementach rozdzielających.

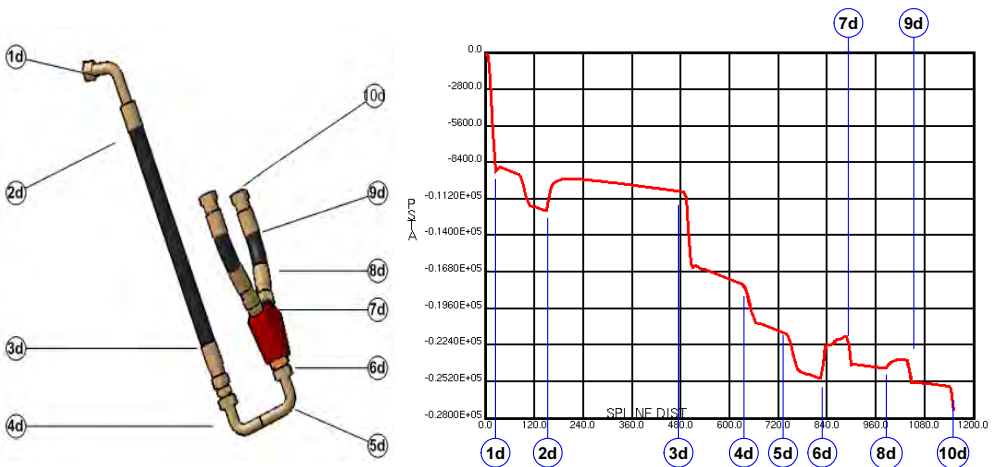
Dzięki wykorzystaniu programu Star-CD możliwe było sprawdzenie, bez potrzeby budowania stanowiska, jakie wartości spadku ciśnień występują na poszczególnych elementach układu (rysunek 5). Pozwala to na dowolne modyfikacje układu już w fazie projektowania jeszcze przed zakupem poszczególnych elementów.



Rys. 3. Części układu zasilania w paliwo silnika lotniczego K9E



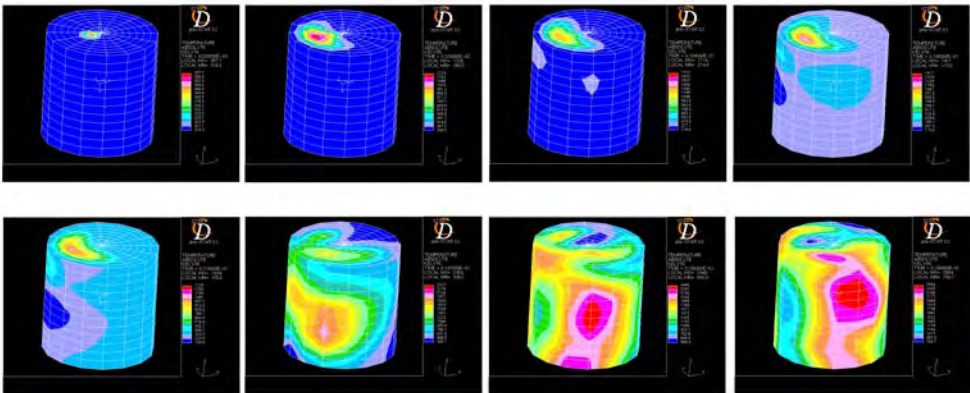
Rys. 4. Możliwości wyświetlania wyników obliczeń



Rys. 5. Wartości ciśnień na poszczególnych odcinkach układu

MODELOWANIE PROCESU SPALANIA W SILNIKU ZI

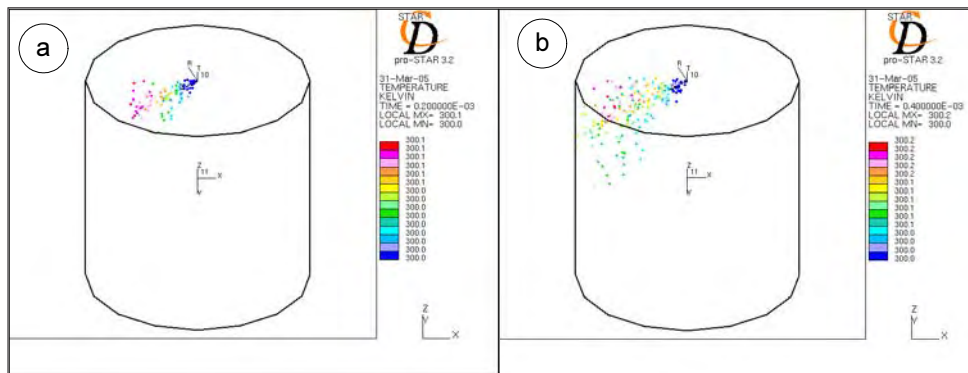
Kolejnym rodzajem symulacji możliwych do wykonania w programie Star-CD jest modelowanie przestrzeni roboczych silnika. Rysunek 6 przedstawia kolejne fazy płomienia podczas spalania się gazu widoczny jako zmiany temperatury wewnątrz cylindra. Symulacja została wykonana dla bezpośredniego wtrysku paliwa do komory spalania. Jest to jeden z wielu rodzajów modeli spalania oferowanych przez program. Paliwem wykorzystywanym w tego typu obliczeniach jest wzorcowy oktan C_8H_{18} . Na podstawie tych wyników można bardzo dokładnie prześledzić proces spalania począwszy od punktu inicjalizacji (początek zapłonu od świecy zapłonowej) do jego końca. Możliwe jest również bezpośrednie odczytanie temperatury spalin w czasie początku procesu wylotu. Całkowity czas trwania symulacji procesu spalania wynosił 20 ms. Wykonanie podobnych symulacji dla różnych warunków pracy silnika (zmiennie obciążenie i prędkość obrotowa) pozwala na uzyskanie typowych charakterystyk silnikowych (krzywa mocy i momentu) z uwzględnieniem emisji typowych składników toksycznych spalin. Opcjonalny moduł spalania stukowego pozwala na wykrycie i analizę tego typu anomalii.



Rys. 6. Rozprzestrzenianie się temperatury w cylindrze w procesie spalania (model silnika z komorą walcową)

Symulacja wtrysku paliwa wykorzystuje model torów kropli Lagrange'a. Krople paliwa mają możliwość wymiany ciepła z najbliższym otoczeniem, a także wymiany momentu pędu z fazą gazową. Stopień odparowania paliwa, ilość napływającego powietrza a także skład spalin mogą zostać wyznaczone przy użyciu modeli transportu. Bogate biblioteki zawierają rozbudowane modele:

- odparowania kropli paliwa,
- chemicznych i termicznych hipotez przebiegu procesu spalania,
- reakcji powstawania składników toksycznych spalin.



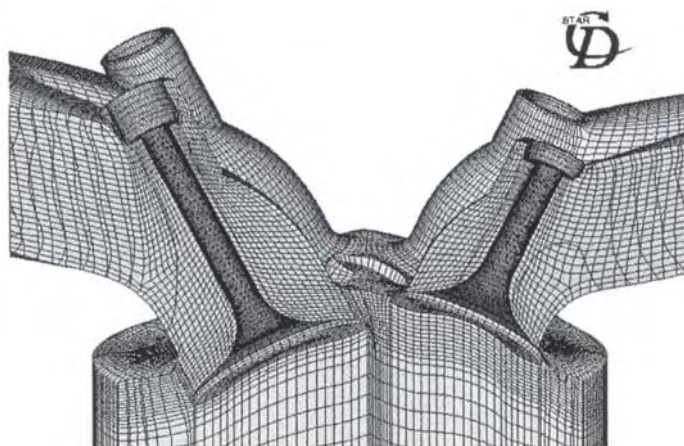
Rys. 7. Modelowanie wtrysku benzyny MPI (model silnika z komorą walcową)

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg bezpośredniego wtrysku paliwa do cylindra dla dwóch chwil przesuniętych o 2 ms. Możemy zaobserwować nawet pojedyncze krople, których kolor świadczy o ich aktualnej temperaturze, na podstawie której możemy wnioskować o stopniu ich odparowania. Badania takie mogą być użyteczne do optymalizacji sterowania procesem spalania ze względu na interesujące nas strategie.

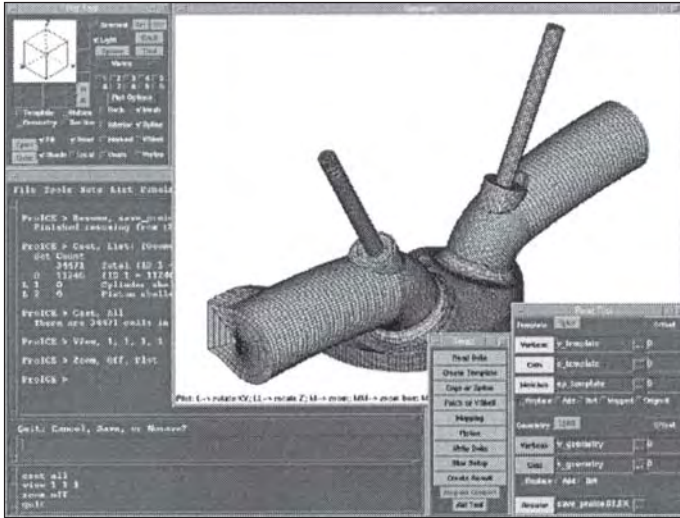
Star-CD poza możliwościami prowadzenia prostych obliczeń na modelach z siatką nieruchomą, pozwala również na analizę w zmieniającej się topologii obszaru (rys. 8).

Działanie programu w takim przypadku polega na pracy w stanach nieustalonych gdzie w każdym kolejnym kroku na początku zmienna jest geometria siatki a następnie wykonywane są obliczenia CFD.

W przypadku silników spalinowych opracowana została specjalna nakładka przygotowująca „ruchomą siatkę”. Jest to moduł ES-ICE (rys. 9)

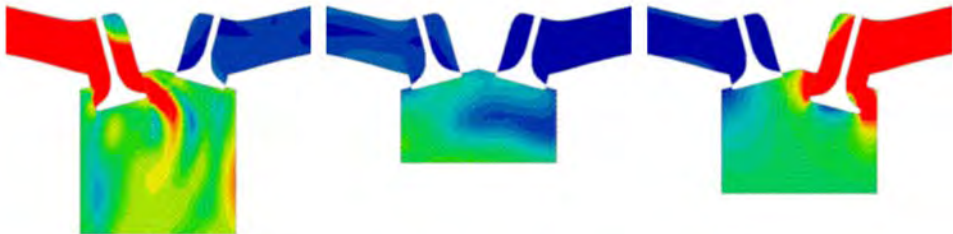


Rys. 8. Przekrój przez siatkę w 440° OWK po GMP



Rys. 9. Okno ProICE

Nakładka ta przygotowana jest do opracowania ruchu zaworów i tłoka w układzie. Pozwala to na przeprowadzenie modelowania całego cyklu pracy silnika z uwzględnieniem wymiany ładunku.



Rys. 10. Prędkość przepływu w czasie. Wymiana ładunku uzyskana przy zastosowaniu programu Star-CD z podprogramem ES-ICE

WNIOSKI

Na podstawie opisu poszczególnych modułów, możliwości obliczeniowych i oferowanych sposobów wizualizacji uzyskanych wyników można stwierdzić, że program Star-CD jest efektywnym narzędziem do modelowania zjawisk występujących w tłokowych silnikach spalinowych. Modele oparte są na zjawiskach fizycznych i chemicznych opisanych za pomocą znanych wzorów czy hipotez. Stanowią one podstawę bardzo rozbudowanych bibliotek programu.

Przedstawione w referacie przykłady wykorzystania programu do rozwiązywania rzeczywistych problemów występujących podczas projektowania silników spalinyowych, pozwalają wnioskować, że badania symulacyjne z wykorzystaniem tego typu programów powinny być nieodzownym elementem fazy projektowania, pozwalającym zaoszczędzić czas i środki.

Program stanowi także doskonałe narzędzie dydaktyczne. Posiada możliwość łatwej zmiany ustawień warunków brzegowych, szybkiego dodawania i wyłączania poszczególnych modułów jak i możliwość śledzenia on-line wyników analizy. Wszystko to może pomóc studentom jak i młodym pracownikom nauki zrozumieć fenomen zjawisk fizycznych zachodzących w tłokowych silnikach spalinowych.

LITERATURA

1. METHODOLOGY Star-CD version 3.24. Materiały szkoleniowe firmy ADAPCO. 2004 CD adapco Group.
2. Raport z projektu celowego 03605/CT-12/6/2005. Lublin 2006.
3. www.adapco-online.com materiały internetowe.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wykorzystanie programu Star – CD do modelowania zjawisk w silnikach spalinowych. Pokróćce zostało przedstawione środowisko programu. Opisano również ogólną budowę środowiska programu wraz z podstawowymi jego funkcjami oraz stosowanymi modułami. Przedstawiono również etapy tworzenia trójwymiarowego modelu i sposoby odczytywania wyników.

APPLICATION OF STAR – CD PROGRAM TO MODELING PHENOMENA IN COMBUSTION ENGINES

Summary

This article presents the way how to use Star – CD program for modeling phenomena in combustion engines. The environment of this program is briefly introduced. It also describes the general constructions and applied modules. This paper also illustrates the steps of creating three-dimensional models and ways of reading the results.