

Mgr inż. Anna GRZYMKOWSKA  
 Politechnika Gdańska  
 Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa

## NUMERYCZNA SYMULACJA PRACY GAZOWEGO KOTŁA WODNEGO ORAZ OCENA JEGO WPLYWU NA ŚRODOWISKO

*Streszczenie: Ilość dostarczanego powietrza oraz rozkład jego koncentracji w komorze paleniskowej mają istotny wpływ na prawidłowość przebiegu procesu spalania. Uzyskanie jednorodnego rozkładu jest praktycznie niemożliwe, dlatego powietrze dostarczane jest w nadmiarze. Konieczne jest jednak dobranie takiej wartości współczynnika nadmiaru powietrza, która pozwoli ograniczyć stratę wylotową, utrzymując przy tym wartości emisji na możliwie niskim poziomie.*

*Na podstawie analizy składu chemicznego spalin można dokonać oceny jakości procesu spalania. Stworzenie numerycznego modelu urządzenia oraz przeprowadzenie symulacji jego pracy umożliwiłoby zatem oszacowanie jego wpływu na środowisko naturalne już na etapie projektowym.*

## THE NUMERICAL SIMULATION OF GAS-SUPPLIED WATER BOILER WORKINGS AND THE ESTIMATION OF ITS INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT

*Abstract: The amount of delivered air and the distribution of its concentration have a relevant influence on combustion process correctness. Because a homogeneous distribution is almost impossible to obtain, the air is delivered in excess. However, it is necessary to match such a value of air excess factor, which will let us minimise outlet waste and simultaneously will keep emission down.*

*It is possible to rate a combustion process quality on the basis of an exhaust gases chemical composition analysis. Creating a device numerical model and carrying out its workings simulation could therefore make it possible to estimate its influence on the environment even in a phase of design.*

*Słowa kluczowe: proces spalania, kocioł wodny, symulacja numeryczna  
 Keywords: combustion proces, water boiler, numerical simulation*

### 1. WPROWADZENIE

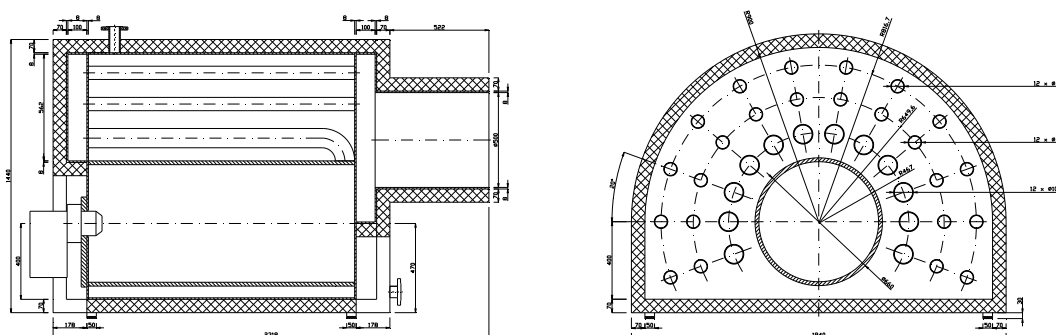
Prawidłowość przebiegu procesu spalania jest uzależniona od ilości dostarczanego powietrza oraz temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej, jednoznacznej z temperaturą zapłonu. Uzyskanie jednorodnego rozkładu koncentracji powietrza w komorze paleniskowej jest jednak praktycznie niemożliwe. Warunki odpowiednie dla prawidłowego przebiegu procesu

spalania zapewnia się zatem poprzez dostarczenie powietrza w nadmiarze. Przy zbyt dużym nadmiarze część dostarczanego powietrza pozostaje niewykorzystana, co skutkuje zwiększeniem ilości spalin, a w konsekwencji wzrostem straty wylotowej. Niewystarczający nadmiar uniemożliwia natomiast zupełne spalanie części lotnych, powodując wzrost zawartości tlenku węgla w spalinach. Konieczne jest więc dobranie takiej wartości współczynnika nadmiaru powietrza, która pozwoli zmniejszyć stratę wylotową do minimum, jednocześnie utrzymując wartości emisji na pożądanym poziomie.

Oceny jakości procesu spalania dokonuje się najczęściej poprzez analizę składu chemicznego spalin. Głównymi produktami procesu spalania są: para wodna i dwutlenek węgla. Podczas spalania gazu ziemnego powstają również związki toksyczne, takie jak tlenki węgla i azotu, które są emitowane do atmosfery. Możliwa jest jednak całkowita eliminacja emisji dwutlenku siarki, pyłów oraz węglowodorów aromatycznych, gdyż – w porównaniu z innymi paliwami – gaz ziemny w swoim składzie nie zawiera związków odpowiedzialnych za emisję tych zanieczyszczeń. Odpowiednia organizacja procesu spalania oraz konstrukcja palników pozwalają na osiągnięcie poziomu emisji znacznie niższego od poziomu narzuconego przez obowiązujące normy i przepisy dotyczące ochrony środowiska.

## 2. SYMULACJA PRACY KOTŁA

Obiektem modelowania jest niskotemperaturowy kocioł wodny o mocy 150 kW, zasilany gazem ziemnym. Zadaniem kotła jest podgrzewanie wody powrotnej od temperatury wynoszącej 70°C do temperatury równej 90°C. Powierzchnia ogrzewalna jest wykonana w układzie płomienicowo-płomieniówkowym. Komorę paleniskową kotła stanowi płomienica współpracująca z nawrotnym przepływem spalin. Komora nawrotna – pierwszy ciąg – składa się z 12 rurek rozmieszczonych na obwodzie górnej części dennicy. W sposób analogiczny są rozmieszczone 24 rurki tworzące drugi ciąg – pęczek konwekcyjny. Palnikiem odpowiednim przy założonej mocy cieplnej oraz przewidywanym zużyciu paliwa jest dwustopniowy modulowany palnik gazowy. Wymiary poszczególnych powierzchni ogrzewalnych, zilustrowane na rys. 1, uzyskano na drodze obliczeń analitycznych.



Rys. 1. Główne przekroje modelowanego kotła

### 2.1. Siatka geometryczna

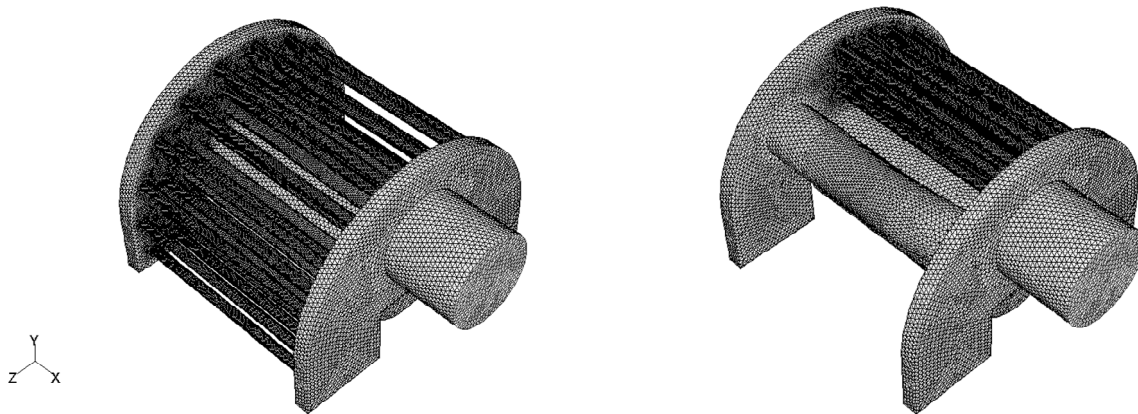
Trójwymiarową siatkę modelowanego kotła utworzono w preprocesorze Gambit 2.4.6, dla dwóch rozważanych koncepcji konstrukcji. Pierwsza z nich jest wiernym geometrycznym odzwierciedleniem wyników przeprowadzonych wcześniej obliczeń analitycznych. Druga



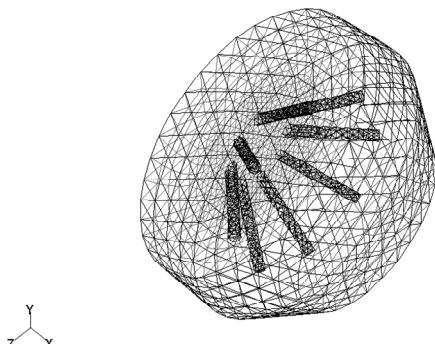
przewiduje natomiast zastąpienie 12 rurek komory nawrotnej jedną rurą o równoważnym przekroju.

Geometrię obu modeli utworzono, wprowadzając współrzędne kolejnych powierzchni i objętości oraz ich transformacje. Podczas generowania siatki zwrócono szczególną uwagę na dostosowanie jej zagęszczenia do przewidywanych warunków pracy kotła. Najbardziej charakterystycznymi rejonami siatki modelu są kolejno: dysze paliwowe oraz strefa okołopalnikowa, pęczek konwekcyjny i komora nawrotna. Poszczególne objętości podzielono na elementy skończone – począwszy od obszaru wymagającego największego zagęszczenia do obszaru o zagęszczeniu najmniejszym (komora paleniskowa, komory zbiorcze oraz komora wylotowa spalin) – przy użyciu elementów typu Tet/Hybrid (czworosiecznych, sześciennych, piramidalnych bądź pryzmatycznych) i opcji TGrid, narzucającej przewagę elementów czworosiecznych podczas generacji siatki. Sumaryczna liczba komórek siatki geometrycznej modelowanego kotła wynosi 1 105 197 dla pierwszej koncepcji i 961 315 dla koncepcji drugiej.

W kolejnym kroku każdej powierzchni i objętości tworzonego modelu przypisano odpowiednio typ warunku brzegowego lub rodzaj ośrodka ciągłości. Każdą z objętości modelowanego kotła wypełnia płyn w postaci spalin. Typy warunków brzegowych poszczególnych powierzchni różnią się natomiast w zależności od tego, czy dana powierzchnia stanowi ścianę, czy ma być niewidzialna dla przepływu. Określono również powierzchnie stanowiące wlot paliwa, wlot powietrza oraz wylot spalin z kotła. Wygenerowane siatki obu modeli kotła zamieszczono na rys. 2, rys. 3 przedstawia siatkę palnika.



Rys. 2. Siatki geometryczne obu koncepcji konstrukcji modelowanego kotła w widoku izometrycznym



Rys. 3. Widok izometryczny siatki geometrycznej palnika

## 2.2. Obliczenia numeryczne

Symulację pracy modelowanego kotła przeprowadzono przy użyciu procesora Fluent 6.3.26, dla trzech wartości obciążenia cieplnego, tj. 100, 75 i 50%.

Pierwszym krokiem było wczytanie utworzonej siatki, jej przeskalowanie i wygładzenie. Następnie, zdefiniowanym wcześniej warunkom brzegowym i ośrodkom ciągłości przypisano odpowiadające im substancje. Przyjęto, że poszczególne objętości kotła wypełnione są powietrzem oraz mieszaniną gazów palnych, a wszystkie powierzchnie wykonane są ze stali.

Kolejnym krokiem było zadanie warunków brzegowych, określonych uprzednio w sposób analityczny:

- zadano wartości natężenia przepływu powietrza i paliwa na wlocie, odpowiednio do założonego obciążenia cieplnego kotła;
- temperaturę dostarczanego powietrza przyjęto na poziomie 300 K, a zawartość tlenu wynoszącą 21%;
- każdej powierzchni ogrzewalnej przypisano odpowiadającą jej wartość współczynnika wnikania ciepła od spalin do ścianki.

Do obliczeń lepkości turbulentnej zastosowano model turbulencji k-epsilon. Uwzględniono także oddziaływanie siły grawitacyjnej, wprowadzając wartość przyspieszenia ziemskiego równą  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

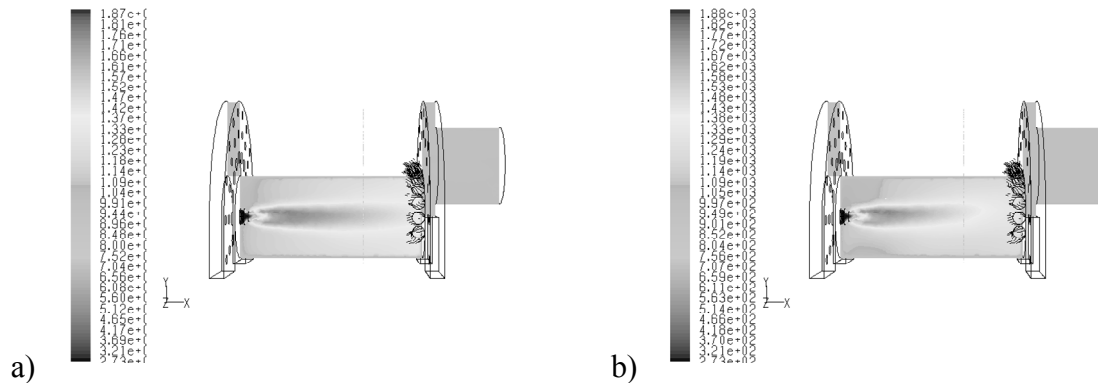
Podczas przygotowywania obliczeń numerycznych określono następujące parametry:

- równanie zachowania energii;
- model promieniowania typu P1;
- dwustopniowe spalanie mieszanki metan-powietrze jako model procesu spalania.

W celu zwiększenia dokładności przeprowadzonych obliczeń, model procesu spalania rozszerzono o równania reakcji spalania etanu i propanu. Temperaturę zapłonu przyjęto na poziomie 3000 K.

### 2.3. Wyniki analizy numerycznej

Rysunek 4 przedstawia wyniki obliczeń pola temperatury w osi symetrii kotła, dla wybranych wartości obciążenia cieplnego.

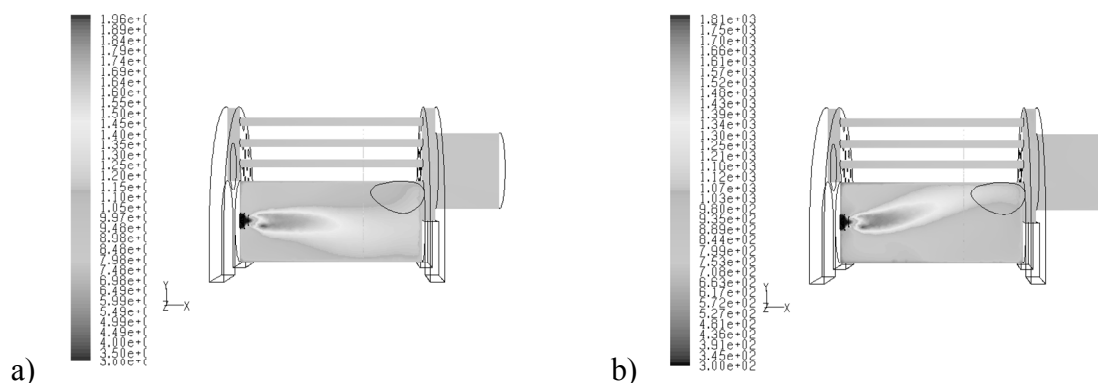


Rys. 4. Pole temperatury w osi symetrii dla pierwszej koncepcji konstrukcji kotła [K]:  
a) przy pełnym obciążeniu, b) przy obciążeniu częściowym 50%

Wraz z przepływem przez modelowany kocioł – ze względu na przekazywanie ciepła od spalin do kolejnych powierzchni ogrzewalnych – temperatura spalin spada, aż do osiągnięcia wartości wylotowej na poziomie ok. 1000 K. Tak wysoka wartość temperatury wylotowej wynika z faktu, iż podczas symulacji rozpatrywano jedynie zjawiska zachodzące po stronie spalin – nie uwzględniano ciepła przejmowanego przez wodę, wypełniającą wolną przestrzeń kotła.

Spadek obciążenia cieplnego powoduje zmniejszenie obszaru komory paleniskowej zajmowanego przez płomień, mimo to wartość temperatury procesu spalania utrzymuje się na podobnym poziomie.

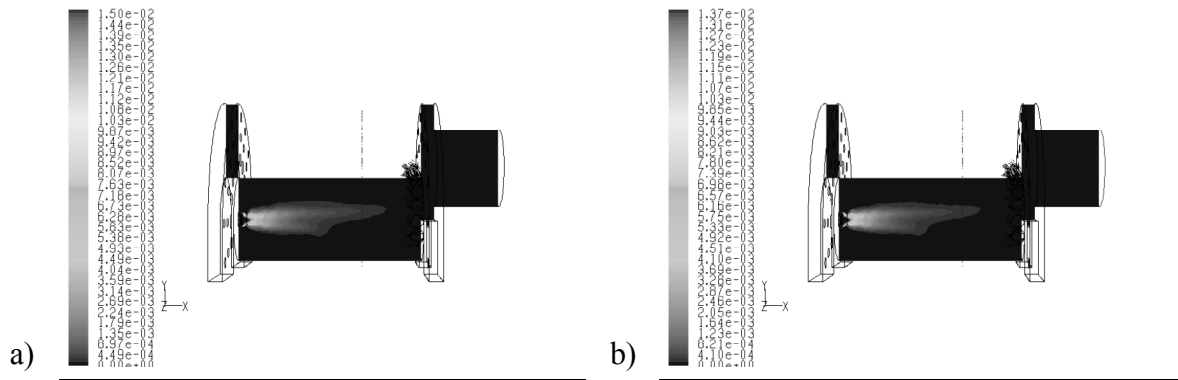
Na rysunku 5 zamieszczono pole temperatury w osi symetrii kotła dla drugiego rozwiązania konstrukcyjnego.



Rys. 5. Pole temperatury w osi symetrii dla pierwszej koncepcji konstrukcji kotła [K]:  
a) przy pełnym obciążeniu, b) przy obciążeniu częściowym 50%

Zarówno obszar komory paleniskowej zajmowany przez płomień, jak i maksymalna temperatura spalin, są mniejsze w drugim wariantcie. Wraz ze spadkiem obciążenia cieplnego wygląd płomienia zmienia się z uwagi na oddziaływanie komory nawrotnej na przepływ w komorze spalania – płomień odchyła się w kierunku pierwszego ciągu.

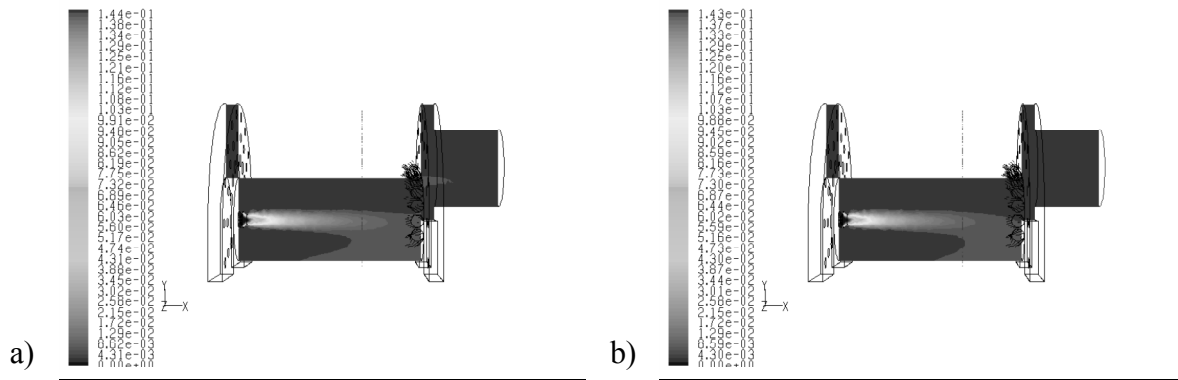
W każdym przypadku reakcje chemiczne zdefiniowane podczas symulacji numerycznej zapewniają zupełne spalanie substancji palnych zawartych w paliwie. Rysunek 6 ilustruje wyniki obliczeń koncentracji tlenu węgla w osi symetrii modelowanego kotła.



Rys. 6. Pole koncentracji tlenu węgla w osi symetrii kotła:  
a) przy pełnym obciążeniu, b) przy obciążeniu częściowym 50%

Dla poszczególnych wartości obciążenia cieplnego obszar komory paleniskowej zajmowany przez ten związek jest podobny. Największe ilości tlenu węgla powstają w strefie okołopalnikowej i są natychmiast utleniane do dwutlenku węgla, co jest wynikiem dostępności tlenu i poziomu temperatury w tym rejonie, który korzystnie wpływa na przebieg procesu utleniania CO.

Na rysunku 7 pokazano wyniki symulacji numerycznych koncentracji dwutlenku węgla w osi symetrii kotła.

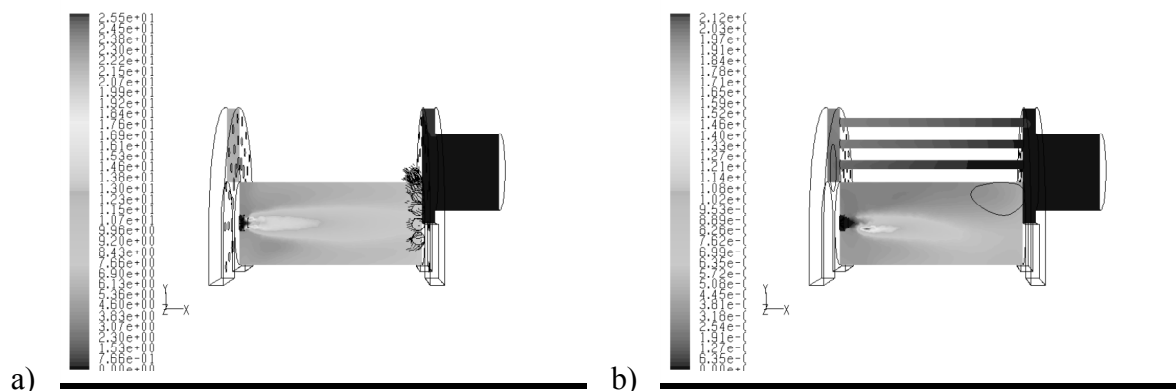


Rys. 7. Pole koncentracji dwutlenku węgla w osi symetrii kotła:  
a) przy pełnym obciążeniu, b) przy obciążeniu częściowym 50%

Zmiana obciążenia cieplnego nie wpływa w istotny sposób na maksymalne stężenie dwutlenku węgla, a pola koncentracji tego związku w poszczególnych przypadkach są podobne.

W celu sprawdzenia oddziaływania modelowanego kotła na środowisko naturalne, przeprowadzono obliczenia numeryczne powstawania tlenków azotu przy pełnym obciążeniu cieplnym. Wyniki dla obu rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rys. 2.8.

Maksymalna koncentracja tlenków azotu występuje w przypadku koncepcji pierwszej i wynosi ok. 25 ppm. W drugim przypadku koncentracja  $\text{NO}_x$  wynosi ok. 21 ppm. Emisja tlenków azotu w modelowanym kotle jest zatem znikoma.



Rys. 8. Pole koncentracji tlenków azotu w osi symetrii kotła [ppm], przy pełnym obciążeniu:  
a) dla pierwszej koncepcji konstrukcji, b) dla drugiej koncepcji konstrukcji

### 3. PODSUMOWANIE

Na drodze obliczeń analitycznych wyznaczono najważniejsze wielkości charakteryzujące pracę kotła oraz wymiary komory paleniskowej i pozostałych powierzchni ogrzewalnych. W oparciu o uzyskane dane utworzono model numeryczny kotła i przeprowadzono symulację dla dwóch rozwiązań konstrukcyjnych, w rozpatrywanym zakresie obciążenia cieplnego.

Wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej są zbliżone do wartości uzyskanych w sposób analityczny oraz do wartości występujących w rzeczywistych kotłach gazowych – o zbliżonej mocy cieplnej – co świadczy o poprawności modelu przyjętego podczas symulacji pracy kotła.

Przeprowadzona analiza umożliwiła oszacowanie składu spalin oraz ilości substancji szkodliwych emitowanych do atmosfery. Poprawnie utworzony model numeryczny może zatem służyć jako narzędzie oceny wpływu badanego urządzenia na środowisko naturalne.

### LITERATURA

- [1] Kowalski C.: *Kotły gazowe centralnego ogrzewania; wodne niskotemperaturowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1992.
- [2] Kruczek S.: *Kotły, konstrukcje i obliczenia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001.
- [3] Orłowski P., Dobrzański W., Szwarc E.: *Kotły parowe, konstrukcja i obliczenia*, Wyd. 3 zm., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979.
- [4] Piotrowski W.: *Wytwornice pary, projektowanie i obliczenia cieplne*, Wyd. 2, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1988.
- [5] Rokicki H.: *Badanie energetyczne grzewczego kotła wodnego opalanego gazem*, Wyd. 1, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1999.

- [6] Rokicki H.: *Urządzenia kotłowe, przykłady obliczeniowe*, Wyd. 1, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1996.
- [7] [www.cyf-kr.edu.pl](http://www.cyf-kr.edu.pl)
- [8] [www.hoval.pl](http://www.hoval.pl)
- [9] [www.itc.polspl.pl](http://www.itc.polspl.pl)
- [10] [www.mesco.com.pl](http://www.mesco.com.pl)
- [11] [www.psgaz.pl](http://www.psgaz.pl)
- [12] [www.rielloburners.com.pl](http://www.rielloburners.com.pl)
- [13] *Fluent User's Guide*, Fluent Inc., 2006.
- [14] *Gambit Modeling Guide*, Fluent Inc., 1988-2012.