

Szymon Smółka<sup>1)</sup>

## Numeryczne wyznaczanie rozkładu temperatur w komorze paleniskowej kotła energetycznego

Jedną z istotnych cech obserwowanego obecnie postępu technologii produkcji, bardzo istotną fazą produkcji kotłów energetycznych oraz niezbędnego do niego osprzętu, jest symulacja komputerowa poprzedzona szeregiem skrupulatnych obliczeń. Na tym etapie powinny wyniknąć wszelkie nieprawidłowości konstrukcyjne budowanego urządzenia. Ewentualne nieprawidłowości mogą wystąpić w dwóch zasadniczych grupach problemów.

Pierwsza jest związana z wynikami wszelkiego rodzaju obliczeń z dziedziny mechaniki płynów oraz wymiany ciepła, które to wyniki powinny gwarantować, że nie dojdzie do niespodziewanego uszkodzenia danego elementu lub całkowitego zniszczenia urządzenia, co może w skrajnych przypadkach pociągnąć za sobą nawet ofiary śmiertelne.

Druga dotyczy prawidłowego planowania rozmieszczenia elementów urządzenia oraz wizualizacji zachodzących w nim zjawisk na podstawie wcześniej wykonanych obliczeń, czyli krótko mówiąc optymalizacji. Posługiwanie się znanymi już w technice licznymi programami – w tym przypadku mowa jest o programie FLUENT – jest niezbędne w dzisiejszych czasach przy projektowaniu, o czym przekonany jest każdy, kto już skorzystał z pomocy tego nie zastąpionego w pracy narzędzia.

Celem opisanej w niniejszym artykule symulacji było uzyskanie rozkładu temperatur w komorze paleniskowej kotła energetycznego OP-380 opalanego mieszkanką pyłowo-węglową, spotykanego dość często w polskich elektrowniach. Na początku wykonano obliczenia algebraiczne, w których wykorzystano dwie z ogólnie znanych metod obliczeniowych, tj. metodę CKTI oraz metodę strefową [1, 4, 6, 7, 9].

Po przeprowadzonych obliczeniach komory paleniskowej wcześniej wspomnianą metodą CKTI, otrzymane wyniki porównano z obliczeniami dokonanymi za pomocą programu napisanego w programie ANSYS, korzystającego z identycznych teoretycznych metod obliczeniowych. Wyniki były bardzo zbliżone, co świadczyło o niepopelnieniu błędów.

Ostatni etap obliczeń wymagał zamodelowania w programie komercyjnym FLUENT rozkładu temperatur w komorze paleniskowej z uwzględnieniem wszelkich istotnych czynników wchodzących w skład procesu spalania.

<sup>1)</sup> Pan mgr inż. Szymon Smółka jest doktorantem Politechniki Krakowskiej.

### Program Fluent

Program Fluent jest kompleksowym pakietem, który należy do tak zwanej grupy CFD (Computational Fluid Dynamics – Numeryczna Dynamika Płynów). Umożliwia on szczegółową analizę zagadnień związanych z przepływem płynów, eliminując konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji urządzeń. Program pozwala uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pole ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i masy (w tym reakcje chemiczne). Osiąga się to poprzez numeryczne rozwiązania równań opisujących wymianę pędu, energii i masy.

Dużą zaletą tej metody jest to, że w eksperymencie numerycznym eliminowane są niedokładności związane z błędem pomiaru. Równocześnie dostępna staje się informacja o rozkładzie wszystkich wielkości fizycznych w całym obszarze przepływu. Obliczenia wykonywane za pomocą pakietu FLUENT wykorzystują metodę objętości skończonych. Polega ona na całkowaniu równań opisujących zagadnienie po każdej objętości kontrolnej, w wyniku czego otrzymuje się równania dyskretne, spełniające prawa zachowania w obrębie elementu [2,8].

Tabela 1

Program FLUENT

ETAPY W PROCESIE SYMULACJI		Program FLUENT
ETAPY W PROCESIE SYMULACJI	Preprocessing	<b>GAMBIT – preprocesor</b> ⇨ tworzenie geometrii modelu ⇨ sformułowanie modelu matematycznego, generacja siatki obliczeniowej, która może być strukturalna lub niestructuralna. W przypadku 2D mamy do czynienia z trójkątną lub czworokątną natomiast w 3D: czworosienna, sześcienna, tetragonalna, klinowa i hybrydowa ⇨ przypisanie typów materiałów oraz typów warunków brzegowych
	Processing	<b>FLUENT – procesor – wprowadzanie danych</b> ⇨ import i adaptacja siatki ⇨ określenie materiałów (parametry materiałowe) ⇨ określenie warunków brzegowych ⇨ przeprowadzenie obliczeń
	Postprocessing	<b>FLUENT – postprocesor</b> ⇨ rozwiązanie problemu przy pomocy solwera i opracowanie wyników w postaci obrazów pól temperatur, ciśnień, prędkości itd. ⇨ uzyskanie wartości np. pól temperatur, ciśnień, prędkości w każdym elemencie siatki numerycznej

## Wykorzystane teoretyczne metody obliczeniowe

W programie Fluent wykorzystano dwie znane metody obliczeniowe CKTI oraz metodę strefową. Metoda CKTI daje największe teoretyczne podstawy do obliczeń kotłów energetycznych, jest oparta na pracach nie żyjącego już prof. Gurowicza i jego współpracowników z Centralnego Kotłowno-Turbinowego Instytutu w b. Leningradzie oraz WTI w Moskwie.

Obliczenia tymi metodami dokonano dla komory paleniskowej kotła OP-380 o parametrach [5]:

$D$	= 380, t/h	wydajność kotła
$p_n$	= 162, at	ciśnienie nominalne
$p_w$	= 148, at	ciśnienie w walczaku
$p_p$	= 135, at	ciśnienie za przegrzewem
$t_p$	= 540, °C	temp. pary przegrzanej
$t_w$	= 230, °C	temp. wody zasilającej
$t_{swyl}$	= 160, °C	temp. spalin wylotowych
$t_{pow1}$	= 70, °C	temp. powietrza przed podgrzewaczem powietrza
$t_{pow2}$	= 335, °C	temp. powietrza za podgrzewaczem powietrza

Natomiast skład chemiczny paliwa, jakim opalano rozpatrywany model, był następujący:

C = 55,75, %	O = 9,5, %	S = 0,63, %	W <sup>r</sup> = 10,19, %
H = 2,92, %	N = 0,92, %	A <sup>r</sup> = 21,84, %	

gdzie:

C, O, S, H, N – procentowy udział poszczególnych pierwiastków w paliwie,

W<sup>r</sup> – wilgotność paliwa,

A<sup>r</sup> – zawartość popiołu w paliwie.

Na podstawie dokonanej analizy spalin [6] oraz obliczeń komory paleniskowej [1, 3, 4, 7, 9] otrzymano w efekcie końcowym przede wszystkim wzory określające poszczególne wielkości charakterystyczne.

### Sprawność obliczeniowa kotła

$$\eta = 100 - \Sigma S = 100 - (S_2 + S_3 + S_4 + S_5) = 93,36, \% \quad (1)$$

gdzie:

$$S_2 = \frac{(I_{spwyl} - \lambda_{wyl} \times I_{ps}^t) \times (100 - S_4)}{Q_i} \% \quad (2)$$

$\lambda_{wyl}$  – współcz. nadmiaru pow. na wylocie z komory,

$S_2$  – wielkość straty wylotowej,

$Q_i$  – wartość opałowa paliwa, kJ/kg,

$S_3$  – strata niezupełnego spalania,

$I_{spwyl}$  – entalpia spalin, kJ/kg,

$S_4$  – strata niecałkowitego spalania,

$I_{ps}^t$  – entalpia powietrza, kJ/kg,

$S_5$  – strata promieniowania.

Wartości  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$  odczytano z tablic oraz wykresów.

### Temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej

$$t'' = \frac{T_t}{M \times \left[ \frac{4,9 \times \psi \times H_{opr} \times a_p \times T_t^3}{10^8 \times \varphi \times B_{obl} \times V_{sp} \times c_{psr}} \right]^{0,6} + 1} - 273 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

gdzie:

$B_{obl}$  – ilość paliwa rzeczzyw. spalonego, kg/h,

$H_{opr}$  – powierzchnia opromieniowana, m<sup>2</sup>,

$c_{psr}$  – ciepło właściwe spalin, kcal/m<sup>3</sup> K,

$\varphi$  – współcz. strat promieniowania w komorze,

$T_t$  – teoretyczna temperatura spalania, °C,

$V_{sp}$  – rzeczzyw. obj. spalin wilgotnych, m<sup>3</sup>/kg,

$\psi$  – współcz. sprawności cieplnej ekranów,

$M$  – parametr charakt. miejsce występowania max temp. płomienia w komorze,

$a_p$  – stopień czerni paleniska.

Przyjęto, że średnia temperatura spalin w komorze paleniskowej  $t_{spsp} = 1400^\circ\text{C}$  oraz  $t'' = 1100^\circ\text{C}$ . Po podstawieniu do powyższego wzoru otrzymano  $t'' = 1093^\circ\text{C}$ .

Ponieważ temperatura mięknięcia popiołu  $t_1 = 1200^\circ\text{C}$ , uznano wartość  $t'' = 1093^\circ\text{C}$ . Natomiast gdyby temperatura początku mięknięcia popiołu byłaby niższa, wówczas należałoby zwiększyć powierzchnię opromieniowaną w komorze paleniskowej. Dodatkowo sprawdzono pozostałe kryteria, takie jak kryterium Boltzmana oraz wskaźniki w postaci obciążenia cieplnego objętości i przekroju komory paleniskowej i zbadano czy ich wartości mieszczą się w zalecanych granicach. Obliczono również ciepło promieniowania przyjęte przez powierzchnię opromieniowaną w komorze paleniskowej, średnie natężenie cieplne powierzchni opromieniowanej oraz ilość ciepła wypromieniowanego z komory paleniskowej przez okno wylotowe spalin (feston) do kanału międzyciągu oraz ciepło przejęte przez parownik w komorze paleniskowej drogą promieniowania.

Druga metoda, którą wykorzystano w obliczeniach, to metoda strefowa [4], która w porównaniu z metodą CKTI dostarcza dodatkowych informacji odnośnie do rozkładu obciążenia cieplnego ekranów oraz temperatury spalin wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Pozwala to dokładniej ocenić wpływ położenia palników i ilość paliwa doprowadzanego do poszczególnych rzędów palników na temperaturę spalin i rozkład strumieni cieplnych przyjmowanych przez ściany komory paleniskowej.

W przypadku metody strefowej komorę paleniskową dzieli się na strefy (rys. 1), a równanie bilansu ciepła dla każdej z nich ma postać:

$$\dot{Q}_{RG,i} + \dot{Q}_{B,i} + \dot{Q}_{Li} - \dot{Q}_{S,i} - \dot{Q}_{K,i} - \dot{Q}_{RG,i} + 1 = 0$$

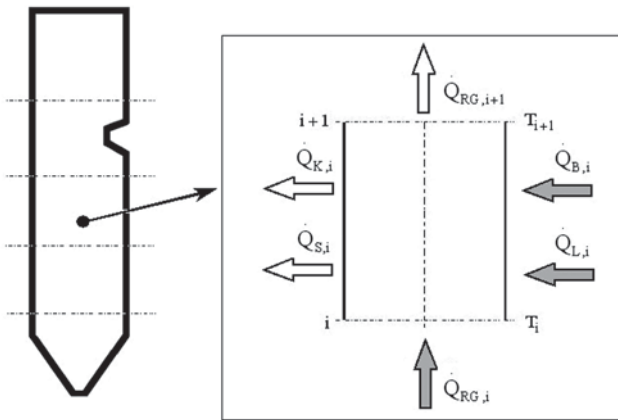
We wzorze przyjęto następujące oznaczenia strumieni ciepła:

$\dot{Q}_{RG,i}$  – doprowadzony z gazem spalinowym ze strefy położonej poniżej,

$\dot{Q}_{B,i}$  – doprowadzony ze spalaniem w strefie paliwem,

$\dot{Q}_{Li}$  – doprowadzony z dostarczonym powietrzem,

- $\dot{Q}_{S,i}$  – odprowadzony na drodze promieniowania,
- $\dot{Q}_{K,i}$  – odprowadzony na drodze konwekcji do ekranów komory paleniskowej,
- $\dot{Q}_{RG,i+1}$  – odprowadzony w spalinach przepływających w strefie powyżej.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy pojedynczej strefy

W bilansie pominięto strumień ciepła przekazywany na drodze promieniowania wzdłuż komory paleniskowej z uwagi na jego małą wartość. Stopień czerni strefy jest określany osobno dla każdej ze stref. Po podstawieniu odpowiednich zależności do przedstawionego powyżej bilansu strefy i przekształceniach otrzymuje się nieliniowe równanie algebraiczne, po rozwiązaniu którego otrzymuje się temperaturę spalin na wylocie z rozpatrywanej strefy. Z uwagi na zależność ciepła właściwego spalin i stopnia czerni strefy od temperatury, równanie to można rozwiązać tylko numerycznie. Dodatkowo obliczyć można gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez ścianę komory w danej strefie.

Równania, z których korzysta się do wcześniej wspomnianych obliczeń, mają charakter ogólny i obowiązują zarówno dla stref, w których zachodzi spalanie, jak i dla stref, w których zachodzi tylko schładzanie spalin. W ostatnim przypadku w równaniu należy przyjąć masowe natężenia przepływu paliwa spalanego w strefie za równe zero, tak samo jak dla pierwszej strefy, do której nie dopływają spaliny.

## Rozwiązywanie zagadnienia w programie Fluent 6.0

Proces modelowania ciepłno-przepływowego przeprowadzono dla komory paleniskowej kotła energetycznego OP-380.

### Etapy modelowania komory paleniskowej (model dwuwymiarowy 2D)

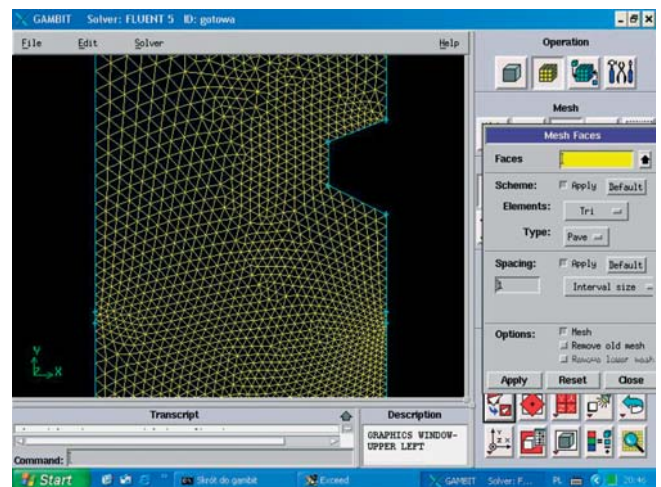
#### Powstawanie modelu

Rozpoczęto od zadania współrzędnych punktów charakterystycznych, czyli wierzchołków w celu stworzenia tzw.

modelu uproszczonego, dalej poprzez krawędzie, aż do stworzenia powierzchni. W projektowanym modelu należy wybrać wszystkie krawędzie tak, aby utworzyły one tylko jedną powierzchnię. Model komory w tym przypadku stanowić będzie całość.

#### Generowanie siatki obliczeniowej (objętości skończonych)

W następnej kolejności, na podstawie uzyskanego kształtu geometrycznego stworzonego poprzez powierzchnie i krawędzie, generuje się siatkę obliczeniową (rys. 2).



Rys. 2. Generowanie siatki obliczeniowej na powierzchni modelu

Generując siatkę numeryczną należy przede wszystkim dbać o jej jakość oraz o to, aby w najbardziej charakterystycznych miejscach modelu, tj. w rejonach większych gradientów (prędkości, temperatur, itd.) była możliwie gęstsza niż w pozostałych fragmentach. W tym przypadku tymi charakterystycznymi obszarami są otwory reprezentowane przez palniki i dysze OFA.

Najpierw generuje się siatkę na krawędziach, a następnie na powierzchniach. Później dokonywana jest dyskretyzacja krawędzi, czyli określany jest sposób rozmieszczenia na niej węzłów siatki. W przedstawionym modelu uproszczonym rozmieszczenie węzłów na poszczególnych krawędziach jest rozpatrywane odrębnie. Należy pamiętać o tym, aby utrzymywać te same kierunki tworzenia siatki na poszczególnych krawędziach.

Dyskretyzacja ścianek umożliwia wygenerowanie siatki na dowolnych ściankach w określonym modelu geometrycznym. W celu dokonania podziału wymagane jest określenie dwóch parametrów: rodzaju elementu, który definiuje kształt elementu oraz typu określającego algorytm wykorzystany w dyskretyzacji. W rozpatrywanym przypadku użyto siatki złożonej tylko z elementów trójkątnych, a typ wybrany to tworzona niestrukturalnie siatka (ang. PAVE).

## Przypisanie typów warunków brzegowych oraz typów materiałów

W tym celu w GAMBICIE (preprocesor) wybierany jest procesor (solver), którym jest oczywiście FLUENT. Przypisanie określonych typów warunków brzegowych wiąże się przede wszystkim ze zdefiniowaniem ścianek, które w dalszym procesie modelowania będą charakteryzowały się tymi samymi wartościami zadawanych warunków brzegowych.

Następnie należy zdefiniować warunki brzegowe w komorze. W tym celu należy określić dodatkowe ścianki, które tworzą wlot (palniki + OFA) i wylot (festion) mieszanki spalnego pyłu węglowego – w naszym przypadku został określony jako mieszanina gazów.

Po zdefiniowaniu typów warunków brzegowych przejdziemy do zdefiniowania typów materiałów. Rozróżnia się dwa rodzaje: ścianki – ciało stałe oraz mieszanina gazów wewnątrz komory – płyn. Końcowy krok tego etapu polega na wyeksportowaniu siatki do Fluentu.

## Obliczenia numeryczne w programie Fluent 6.0

Najpierw należy zaimportować stworzoną wcześniej w GAMBICIE geometrię do programu FLUENT. Pierwszy krok stanowi sprawdzenie siatki numerycznej. Następnie musimy dokonać przeskalowania, ponieważ w programie domyślnie ustawione są metry, a geometria siatki była stworzona w milimetrach. W rozważanym zagadnieniu rozpatrywany proces opisywany jest przez rozwiązywanie w programie równania, takie jak: FLOW, ENERGY, AIR, TURBULENCE oraz DISCRETE ORDINATES. Oczywiście równania te definiuje się w taki sposób, aby dostosować je do panujących warunków w komorze, a w dalszym ciągu definiujemy materiały. Ponieważ domyślnymi materiałami są tylko powietrze oraz aluminium, należy własności materiałowe pozostałych materiałów i czynników zaimportować z bazy danych. Może się zdarzyć tak, że opisujące dany materiał lub czynnik wielkości są inne niż wymagane lub charakteryzowane są poprzez niepożądane wielkości. Wówczas należy dokonać korekty w zapisie danych dodając własne wielkości, lecz nie zapisywać na już istniejące.

## Przypisanie dla poszczególnych elementów warunków brzegowych

W rozpatrywanym przypadku materiał ścian nie ma większego znaczenia, ponieważ zadano im stałą temperaturę 700 K. Natomiast gazy zdefiniowano wg ich własności pod hasłami: AIR, OXYGEN, SPALINY – jako mieszaninę, VAPOUR i zadano określony skład oraz parametry.

## Zadawanie liczby wykonywanych iteracji oraz definiowanie warunków początkowych

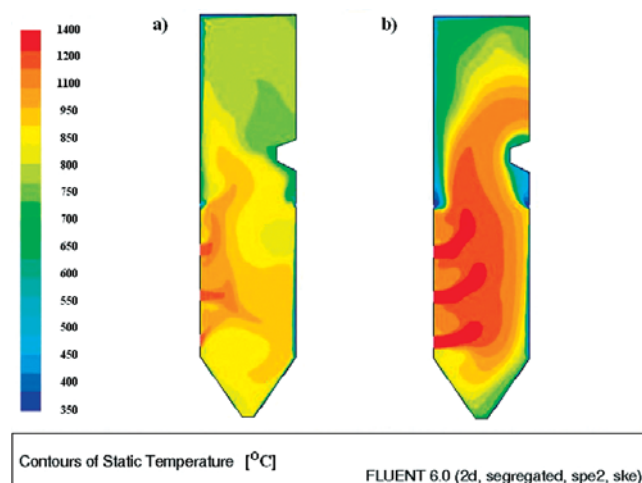
Rozwiązanie problemu polega na przekształceniu równań różniczkowych cząstkowych w równania algebraiczne lub równania różniczkowe zwyczajne.

Równania te są rozwiązywane przy pomocy solvera z określoną dokładnością (wartość domyślna i przyjęta 0.1% – błąd względny dla zmiennej wzięty z poprzedniej i aktualnej iteracji). Badany przepływ traktowany jest jako turbulentny (K-EPSILON).

Na tym etapie modelowania należy ustalić warunki brzegowe. W pierwszej kolejności definiowane są wlot i wylot kanału. Następnie określając warunki początkowe należy wybrać odcinki stanowiące wloty powietrza (dysze OFA) oraz mieszanki pyłowo-powietrznej (palniki), zadając jednocześnie wartość prędkości oraz temperatury powietrza na wlocie. Natomiast dla odcinka wylotowego ustala się wartości sugerowane przez program. W rozpatrywanym przypadku liczba zadawanych kroków iteracyjnych jest znacznie większa i ustala się ją na poziomie ok. 1000 iteracji.

## Rezultaty obliczeń – rozkład temperatury

Opracowanie i wizualizacja wyników są możliwe dzięki użyciu postprocesora, który tworzy wykresy i obrazy rozkładów wartości żądanego parametru, czyli temperatury (rys. 3).



Rys. 3. Rozkład temperatury w modelu uproszczonym: a) początek iteracji; b) koniec iteracji

## Analiza wyników

Otrzymane rezultaty na modelu uproszczonym nie odzwierciedlają idealnie rzeczywistych warunków panujących w kotle, a jedynie pozwalają na określenie orientacyjnego rozkładu temperatury. Obliczenia modelu uproszczonego przeprowadzone zostały tylko dla jednego przypadku określonych warunków początkowych. Jest to wystarczające dla poznania ogólnego charakteru rozkładu interesującej nas wielkości.

Najwyższy wzrost temperatury można zaobserwować w środkowej części komory, gdzie zachodzi proces spalania (rys. 3), co jest zjawiskiem jak najbardziej prawidłowym. Następnie jej wartość zmniejsza się stopniowo w kierunku festona, a zdecydowanie najniższą wartość temperatury

obserwuje się na narożach komory. Należy również zauważyć, iż zwiększenie prędkości przepływu ma duży wpływ na przesunięcie strefy maksymalnych temperatur w stronę przepływu, co zaobserwowano podczas kolejnych symulacji.

## Podsumowanie

Opisane w artykule metody obliczeniowe pozwalają na obliczenia komór paleniskowych kotłów energetycznych i ustalenie w nich temperatury w sposób w miarę dokładny. Na szczególną uwagę zasługuje uzyskany rozkład temperatur przy wykorzystaniu programu FLUENT, który jest bardziej dokładny i daje pełny obraz rozkładu temperatury w komorze paleniskowej kotła. Dużą zaletą metody jest to, że w eksperymencie numerycznym eliminowane są niedokładności związane z błędem pomiaru oraz równocześnie dostępna staje się informacja o rozkładzie wszystkich wielkości fizycznych w całym obszarze przepływu. Dodatkowo bardzo istotne jest skrócenie czasu uzyskania wyników, a przeprowadzona symulacja pracy kotła bezpośrednio przekłada się na optymalizację jego pracy i uniknięcie ewentualnego uszkodzenia poprzez właściwy dobór parametrów pracy. Natomiast w fazie projektowej lub przy modernizacji urządzenia wpływa bezpośrednio na uniknięcie kosztownych błędów. Warto zauważyć, że jest tutaj również możliwość współpracy z innymi programami graficznymi.

Uzyskane w pracy wyniki, zarówno z wykorzystaniem programów komputerowych jak i obliczeń algebraicznych, w wystarczającym stopniu pokrywają się ze sobą, zwłaszcza jeśli uwzględni się złożoność rozpatrywanego zagadnienia. Natomiast powstałe różnice w poszczególnych obliczeniach wynikają z dokładności przyjmowanych wielkości oraz samych obliczeń.

## LITERATURA

- [1] Orłowski P., Dobrzański W., Szwarc E.: Kotły parowe. Konstrukcja i obliczenia. WNT, Warszawa 1979
- [2] Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. WNT, Warszawa 2003
- [3] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektronie. WNT, Warszawa 1999
- [4] Grądziel S., Zima W.: Obliczanie komór paleniskowych kotłów energetycznych. Czasopismo techniczne mechanika. Politechnika Krakowska, zeszyt 5-M/2001
- [5] Dokumentacja techniczna kotła OP-380 (materiał niepublikowany)
- [6] Grądziel S.: Skład chemiczny paliwa (materiał niepublikowany)
- [7] Kruczek S.: Kotły. Konstrukcja i obliczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001
- [8] Rup K.: Mechanika płynów w środowisku naturalnym. Politechnika Krakowska, Kraków 2003
- [9] Polska Norma PN – 72/M-34128. Kotły parowe. Wymagania i badania odbiorcze