

WYKORZYSTANIE CFD DO MODELOWANIA UKŁADU DCIĄGU GAZÓW Z ELEKTRYCZNEGO PIECA ŁUKOWEGO

MIROSLAW KARBOWNICZEK, MARCIN KAWALKOWSKI

USE OF CFD MODELING TO SIMULATE EAF OFF-GAS DUCT FLOW

Abstract

This article includes basic information about working of electric arc furnace (EAF) and modern research method - Computational Fluid Dynamics (CFD) - used among other things in metallurgy fields. Paper also contains few samples how CFD helped to solve and analyse problems strictly combined with work of EAF. Example computer model of off-gas duct was defined for this article. Based on this model series of numerical simulations were conducted. These calculations aim at solve problem of fumes flow inside of cooling duct taking into account CO combustion process. Results of described above CFD simulations and their brief analysis were included into this article.methods). The obtained results show good agreement with both experimental and ab initio data.

1. WSTĘP

Nowoczesny stalowniczy piec łukowy wyposażony jest w różne urządzenia intensyfikujące jego pracę. W połączeniu z technologią intensyfikującą przebieg procesu stalowniczego powoduje to wydzielanie znacznych ilości gazów i pyłów odlotowych. Aby spełnić wymagania ochrony środowiska naturalnego konstrukcja kotła pieca musi być wyposażona w skuteczny układ odciągu gazów i pyłów. Zadaniem układu jest maksymalne „wyłapanie” powstających gazów i pyłów z przestrzeni roboczej, dopalenie CO, ochłodzenie oraz odfiltrowanie. Dobór konstrukcji układu odpylania oraz parametrów jego pracy decyduje o skuteczności, czyli zawartości niepożądanych gazów i pyłów wydzielanych poza układ, do atmosfery środowiska naturalnego.

Modelowanie pracy układu umożliwia dobór konstrukcji i dobór parametrów technologicznych pracy. Jedną z metod modelowania jest zastosowanie numerycznej mechaniki płynów (CFD). W oparciu o parametry konstrukcyjne układu odciągu gazów zdefiniowano komputerowy model kanału. Zdefiniowany model wykorzystano w szeregu analizach symulacyjnych parametrów technologicznych przepływających gazów. Zakładając zmienne temperatury, prędkości przepływu oraz składy chemiczne gazów na wejściu do układu obliczano rozkład temperatury, prędkość przepływu i zawartość tlenku węgla w przekroju poprzecznym i wzdłużnym zamodelowanego kanału. Wyniki symulacji mogą posłużyć do optymalizacji pracy układu odciągowego gazów z pieca łukowego.

2. IDEA CFD

Oprogramowanie Computational Fluid Dynamics (CFD), czyli numeryczna mechanika płynów to nowa dynamicznie rozwijająca się metoda badań symulacyjno-wizualizacyjnych, znajdująca zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu. Użytkownikami oprogramowania wykorzystującego osiągnięcia CFD są naukowcy z ośrodków badawczych i uczelni, projektanci urządzeń przepływowych oraz inżynierowie, którzy w swojej praktyce zawodowej mają styczność z problematyką przepływów płynów. CFD jest powszechnie akceptowaną metodą numerycznego rozwiązywania fundamentalnych równań mechaniki płynów. Podstawowy układ równań dynamiki płynów tworzą równania zachowawcze pędu i masy. Równanie zachowania pędu dla cieczy nieściśliwych, w postaci wektorowej, można zapisać następująco (Fluent 6.1 User's Guide):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \vec{F} \quad (1)$$

Symbol p oznacza ciśnienie statyczne, $\vec{\tau}$ – tensor naprężeń, $\rho \vec{g}$ i \vec{F} – siły grawitacji i inne siły występujące w układzie. Równanie zachowania masy, zwane również równaniem ciągłości wyraża zasadę, że przez całkowite pole przekroju poprzecznego przestrzeni objętej ruchem przepływa w jednostce czasu ta sama masa płynu (Fluent 6.1 User's Guide):

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

W symulacjach poruszających zagadnienia wymiany energii poprzez konwekcję, przewodzenie i radiację, przy uwzględnieniu reakcji chemicznych rozwiązywane jest w sposób numeryczny, z zasady zachowania energii (Fluent 6.1 User's Guide):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{ef} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau} \cdot \vec{V}) \right) \quad (3)$$

Symbol k_{ef} oznacza przewodność efektywną, \vec{J}_j – energię dyfuzji związku chemicznego j . Pierwszy składnik prawej strony równania odpowiada za wymianę energii w wyniku przewodzenia, drugi w wyniku dyfuzji, a trzeci za rozproszenie energii tarcia wywołanego lepkością cieczy. Oprócz powyższych równań zachowania masy, pędu i energii rozwiązywane są również równania reakcji chemicznych oraz uwzględniania jest turbulencja przepływu. Jednym z najprostszych i najbardziej popularnym, a jednocześnie kompletnym modelem turbulentnego przepływu

jest model k - ϵ . Bazuje on na dwóch równaniach transportu energii kinetycznej (k) (4) i stopniu jej rozproszenia (ϵ) (5) i jest całkowicie słuszny dla przypadków typowo turbulentnych:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

Symbol k oznacza turbulentną energię kinetyczną, ϵ jest rozproszenie kinetycznej energii turbulencji, μT to lepkość turbulentna, u_i, u_j to składowe wektora prędkości, ρ jest gęstością, C_1, C_2, C_3 , są stałymi. G_b i G_k reprezentują kolejno generację turbulentnej energii kinetycznej spowodowanej lotnością i gradientami prędkości. σ_k i σ_ϵ są turbulentnymi liczbami Prandtl'a dla k i ϵ . Przy rozwiązywaniu tych równań dla konkretnego przepływu uwzględnia się także warunki brzegowe, a jeśli przepływ jest niestacjonarny – także warunki początkowe (Fluent 6.1 User's Guide).

Powyższe równania mają zapis ogólny. Dla konkretnego przypadku modelowania przepływu należy do równań wprowadzić parametry wymiarowe, rodzaju przepływu, dane charakteryzujące medium płynące. Zaprojektowany do obliczeń model obejmuje układ równań, którego rozwiązanie jest możliwe tylko przy użyciu techniki komputerowej. Rozwój oprogramowania oraz możliwości techniczne nowoczesnych komputerów powodują rozwój metod CFD, co doskonale uzupełnia eksperyment i teoretyczną mechanikę płynów poprzez wprowadzenie alternatywnych metod badania przepływów. Oprogramowanie CFD pozwala uzyskać niezbędne informacje o parametrach przepływu płynu, takich jak rozkład pola prędkości, ciśnienie oraz ruch ciepła i masy oraz reakcje chemiczne, także w skomplikowanych geometrycznie układach. Umożliwia modelowanie zjawisk fizycznych, które nie są łatwe do rozwiązania ani teoretycznie ani eksperymentalnie. Jest jednocześnie bardziej efektywne pod względem finansowym, co umożliwia szczegółową analizę zagadnień związanych z przepływem płynów, eliminując konieczność przeprowadzenia czasochłonnnych i kosztownych badań doświadczalnych na etapie wdrożenia nowych projektów, powiększania skali i modernizacji urządzeń. Dzięki tym możliwościom oprogramowanie to znajduje zastosowanie



w wielu dziedzinach nauki i przemysłu, takich jak badania kosmiczne, biomedyczne, chemiczne, a także w metalurgii, przemyśle motoryzacyjnym i energetycznym (<http://>).

W procesie komputerowej symulacji danego zagadnienia występuje kilka etapów; począwszy od sformułowania modelu geometrycznego, aż do opracowania wyników. Pierwszym krokiem jest zdefiniowanie modelu geometrycznego i wygenerowanie siatki obliczeniowej. Można zrealizować to zadanie na kilka sposobów. Jednym z nich jest wygenerowanie siatki obliczeniowej na podstawie wprowadzonego opisu kształtu geometrycznego (poprzez powierzchnię), pamiętając, że jej gęstość powinna być większa w rejonach dużych gradientów (prędkości, temperatur, itd.), a mniejsza w obszarach, gdzie wartości tych gradientów są małe. Po zdefiniowaniu geometrii i siatki obliczeniowej należy wprowadzić warunki brzegowe i początkowe. Następnie opisywany jest proces przez określenie równań modelu matematycznego i wybór metody ich rozwiązania. Po tym definiowane są właściwości fizykochemiczne materiałów oraz informacje dodatkowe takie jak: parametry źródeł ciepła i szybkości reakcji chemicznych oraz współczynniki wymiany masy. Drugim etapem jest rozwiązanie problemu polegające na przekształceniu równań różniczkowych cząstkowych w równania algebraiczne lub równania różniczkowe zwyczajne, które następnie są rozwiązywane z założoną dokładnością. Po rozwiązaniu realizowany jest etap analizy i walidacji. Zaprezentowanie wyników odbywa się przez wizualizację, przy użyciu różnych metod graficznych, dających możliwość obejrzenia pola przepływu. Wizualizacja pomaga zrozumieć naturę problemu i znaleźć potencjalne błędy w zamodelowanym układzie. Opracowanie i wizualizacja wyników jest możliwa dzięki tworzeniu wykresów i trójwymiarowych obrazów rozkładów wartości parametrów (prędkości, temperatury, ciśnień, itd.). Mogą być również generowane wykresy obrazujące zmiany wymienionych wyżej wartości w czasie i opisujące historie wybranych elementów płynu. Pełna trójwymiarowa grafika umożliwia dowolne obracanie i ustawienie obiektów na ekranie oraz analizę w dowolnych przekrojach (<http://>).

3. WYKORZYSTANIE CFD DO ANALIZY ZJAWISK ZACHODZĄCYCH W PIECACH ŁUKOWYCH

CFD znalazło zastosowanie również w analizie zjawisk zachodzących w piecach łukowych, w układach odprowadzających gazy i pyły odlotowe (Li 2003, Tang i in. 2002). Obliczenia symulacyjne pozwalają na precyzyjne określenie szerokiej gamy istotnych czynników biorących udział w procesach metalurgicz-

nych, a także parametry konstrukcyjne i fizykochemiczne przepływu gazów i pyłów w układzie, co ma wpływ na koszty produkcyjne oraz poprawę czystości środowiska naturalnego.

Głównymi problemami do rozwiązania, w których wykorzystuje się CFD jest szeroko pojęta kontrola gazów emitowanych przez piece łukowe do atmosfery, oraz optymalizacja pracy tych urządzeń. Za pomocą komputerowych metod obliczeniowych przeprowadza się również symulacje emisji gazów i reakcji chemicznych, którym te gazy podlegają. CFD jest używane do symulowania procesów powstawania tlenków azotu NO_x , które podobnie jak tlenek węgla czy związku siarki są wysoce niepożądane w gazach odlotowych z pieca łukowego. Mechanizmy powstawania tych szkodliwych związków są powszechnie znane od wielu lat, jednak złożoność tych procesów sprawia, że wymagają dalszych badań, celem obniżenia ich szkodliwości (Chan i in., 2003).

Korzystając z komputerowych metod obliczeniowych (CFD) przeprowadzono symulację znaczenia pewnych mechanizmów na powstawanie związków NO_x wewnątrz atmosfery pieca oraz znalezienia strategii ich kontrolowania. W trójwymiarowym modelu pieca i kanału odciągowego uwzględniono zmienny w czasie procentowy skład chemiczny mieszaniny gazów, reakcje spalania, radiację oraz przepływ gazów przez wnętrze pieca z uwzględnieniem modelu turbulencji. Otrzymane metodą komputerową wartości: prędkości przepływów, temperatur i koncentracji związków chemicznych pokrywają się z wynikami eksperymentalnymi. Analiza metodą CFD umożliwiła zmniejszenie emisji związków NO_x do atmosfery w czasie procesu wytopu stali (Chan i in., 2003).

Metody komputerowe znalazły również zastosowanie w analizie procesów spalania węglowodorów i dopalania tlenu węgla. W czasach rygorystycznych norm ochrony środowiska na szczególną uwagę zasługuje druga z nich. Symulacja dopalania CO pozwala precyzyjnie określić ilość gazu, która wzięła udział w reakcji, oraz daje możliwość znalezienia optymalnych warunków pracy pieca na dowolnym etapie wytopu stali. CFD pozwala przeprowadzić symulacje zjawisk zachodzących w takich układach jak: gorący kanał odciągowy, zewnętrzna komora dopalająca chłodzona wodą i komora dopalająca z dodatkowymi dyszami powietrznymi i źródłem energii. W powyższych układach można wyznaczyć wszystkie parametry przepływu spalin takie jak prędkość, temperatura oraz czas przebywania spalin w układzie przy uwzględnieniu chłodzenia ścian kanału i komory. Dzięki nim można obliczyć wydajność zastosowanych urządzeń w procesie zmniejszania zawartości CO w gazach wydzielanych do atmosfery. Analityczne, doświadczalne i pomiarowe metody określenia wielu parametrów procesu



metalurgicznego są bardzo skomplikowane lub często niewykonalne. CFD pozwala oszacować te wielkości w fazie projektowania urządzenia oraz eliminuje konieczność przeprowadzenia ich pomiaru na istniejącym obiekcie (Chan i in., 2003; Kicking i in., 2001; Li i Fruehan, 2003; Tang i in., 2002; Urson i in., 2001; <http://>).

Analiza CFD dzięki trójwymiarowemu modelowi pieca łukowego umożliwia lepiej poznać proces topienia złomu i oszacować ilość energii, która jest emitowana przez łuk elektryczny, oraz absorbowana przez wsad i elementy samego pieca. Otrzymane w ten sposób profile natężenia promieniowania wewnątrz pieca, pozwalają na dokładne określenie ilości energii wykorzystywanej w procesie topienia oraz ilości energii odbieranej przez ściany, sklepienie pieca i elektrody. Precyzyjne obliczenia pomagają przewidzieć szybkość procesu wytopu i dobrać optymalne parametry pracy urządzenia, zapewniając jego długotrwałość i niezawodność. Symulacje komputerowe pomagają ustalić parametry techniczne i eksploatacyjne systemu chłodzenia elementów pieca, które są narażone na wysokie temperatury (Guo i Irons, 2003).

Przykładem zastosowania oprogramowania mechaniki płynów jest symulacja pracy systemu dysz wtryskowych, które wprowadzają pod dużym ciśnieniem powietrze do układu odciągającego spaliny z pieca (Urson i in., 2001). Dzięki temu zabiegowi dopala się niepożądane związki zanim zostaną wyemitowane do atmosfery. Powyższy problem rozpatrzono pod dwoma kątami: optymalizacji procesu mieszania oraz wpływu stopnia wymieszania gazów na efektywność procesu dopalania. W pierwszym etapie zbadano wpływ przestrzennego rozmieszczenia dysz na obwodzie kanału i ich ilości na proces mieszania gazów. Następnie, po dobraniu optymalnych dla tego procesu wielkości geometrycznych układu, oraz określeniu odpowiedniej ilości i prędkości wdmuchiwanego powietrza, uwzględniono możliwość reagowania ze sobą gazów. W podobny sposób zbadano także układ mieszania kąpieli metalowej przez wdmuchiwanie gazu obojętnego poprzez kształtki gazoprzepuszczalne w trzonie pieca. Zadaniem powyższego układu jest zwiększenie wydajności procesu wytopu oraz poprawienie czystości metalurgicznej produkowanej stali (Guo i Irons, 2003; Li i Fruehan, 2003). Innym przykładem zastosowania metody CFD jest modelowanie pracy dysz w systemie lanc tlenowych wykorzystanych w procesie pienienia żużła. Efektem pienienia jest powstawanie warstwy tzw. spienionego żużła na powierzchni ciekłego metalu, która osłania płonący łuk elektryczny i w znacznym stopniu zapobiega stratom energii cieplnej zgromadzonej w kąpieli. Warstwa ta poprawia wydajność procesu i pozwala zmniejszyć ilość dostarczanej energii elektrycznej wymaganej do

wytopu. Oprogramowanie numerycznej mechaniki płynów zostało w tym przypadku zastosowane do określenia koncentracji tlenu węgla wewnątrz warstwy żużła i wyznaczenia jej grubości na powierzchni ciekłego metalu. Zbadano również rozkład pola prędkości metalu w całej objętości pieca i głębokość penetracji kąpieli przez strumień wdmuchiwanego gazu. Wszystkie otrzymane metodą komputerową wyniki przyczyniły się do lepszego poznania i zrozumienia tego procesu oraz pozwoliły przewidzieć, w których obszarach pieca będą zachodzić poszczególne procesy. Symulacja dostarczyła cennych informacji odnośnie wydajności procesu odwęglania stali i redukcji strat energii cieplnej (Guo i Irons 2003). We wszystkich powyższych przykładach otrzymano zgodność wyników symulacji i eksperymentu, a określone w ten sposób optymalne parametry pracy wykorzystano do projektowania tego typu układów.

W oparciu o wyniki symulacji komputerowych odbywa się projektowanie elementów infrastruktury technicznej związanej z piecami łukowymi. Przykładem jest zamodelowanie procesu wentylacji i odpylania hali stalowniczej, w której znajduje się piec łukowy. W trójwymiarowym modelu uwzględniono konstrukcje hali, piec łukowy z innymi większymi urządzeniami oraz układ odciągowy wraz z systemem wentylacyjnym. W symulacji zawarto zagadnienia konwekcji swobodnej i wymuszonej oraz przepływy wielofazowe, dzięki którym zbadano podatność różnej wielkości ziaren pyłu na cyrkulację powietrza wewnątrz hali. Zastosowano metodę obliczeń uwzględniającą przebieg procesu w czasie, co pozwoliło lepiej zrozumieć zachowanie się emitowanych frakcji o różnej wielkości przez urządzenie w dowolnym etapie wytopu stali. Wyniki pozwoliły na oszacowanie wydajności okapów i innych systemów odpylających oraz przewidzieć potencjalne obszary hali narażone na nadmierne zadymienie i osadzanie się pyłu (Kicking i in., 2001; Li i Fruehan, 2003).

Numeryczna mechanika płynów pozwala w precyzyjny sposób przewidzieć zjawiska zachodzące w piecach łukowych i dzięki temu zoptymalizować procesy metalurgiczne przy stosunkowo niewielkich kosztach. Nowoczesne metody numeryczne w znacznym stopniu minimalizują czasochłonność badań i pomiarów eksperymentalnych. CFD jest dziedziną nauki, która rozwija się w dynamicznym tempie. Poszczególne modele używane w tych programach są wciąż udoskonalane i rozwijane. Kilkuletnie obserwacje pozwalają stwierdzić, iż tego typu metody obliczeniowe w niedalekiej przyszłości wyprą droższe i czasochłonne badania eksperymentalne.



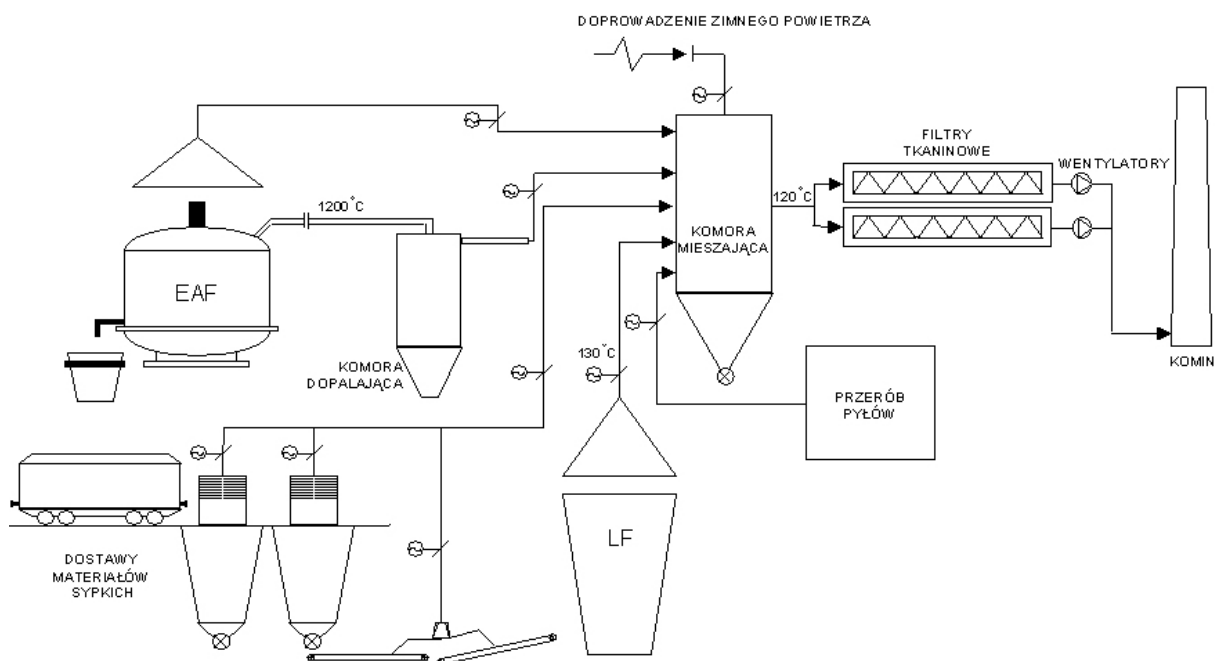
4. UKŁAD ODCIĄGU GAZÓW W PIECU ŁUKOWYM

Wydzielające się gazy podczas pracy elektrycznego pieca łukowego przejmowane są do układu odciągu. Zazwyczaj układ taki włączony jest do układu odpylania całej stalowni. Przykładowy, najczęściej stosowany, układ odpylania stalowni przedstawiono schematycznie na rysunku. 1. W stalowni źródłami powstawania gazów i pyłów są: elektryczny piec łukowy, piecokadz i miejsca dostawy i przeładunku materiałów sypkich. Główna część gazów i pyłów z elektrycznego pieca łukowego kierowana jest do specjalnego kolektora mającego początek w tak zwanym czwartym otworze sklepienia pieca. Jest to z reguły rurociąg stalowy wykonany jako element chłodzony wodą. W pobliżu pieca znajduje się komora dopalająca, do której kierowane są gorące gazy celem dopalenia zawartego w nich tlenu węgla do dwutlenku węgla. Gazy z komory dopalającej kierowane są poprzez chłodzony wodą rurociąg do komory mieszającej.

ny bezpośrednio z komorą mieszającą.

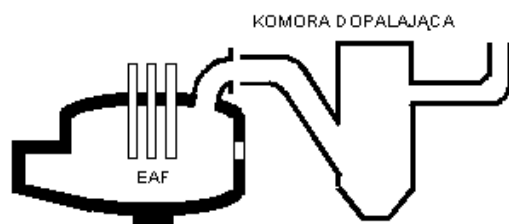
Zebrane ze wszystkich zapylnych miejsc w stalowni gazy i pyły ulegają zmieszaniu w komorze dopalającej i po ewentualnym dodaniu zimnego powietrza kierowane są do układu filtrów tkaninowych. Dodawanie zimnego powietrza związane jest z koniecznością schłodzenia gazów tak, aby temperatura gazów przy wejściu do układu filtrów nie przekraczała 120°C. Oczyszczone gazy kierowane są następnie do komina i przekazywane do atmosfery. Zebrane z filtrów pyły kierowane są do utylizacji. Podciśnienie umożliwiające wymuszony przepływ gazów i pyłów odlotowych wytwarzane jest poprzez układ wentylatorów, zainstalowany za filtrami tkaninowymi.

Schemat ujęcia gazów poprzez tak zwany czwarty otwór w sklepieniu elektrycznego pieca łukowego przedstawiono na rysunku 2. W górnej części pieca, tak zwanym sklepieniu znajdują się trzy otwory do wprowadzania elektrod grafitowych, będących ostatnim elementem układu elektrycznego, na końcach których płoną łuki elektryczne. Czwartym otworem jest



Rysunek 1. Schemat przykładowego układu odciągu gazów i odpylania stalowni z piecem łukowym i piecokadzią. (Schematic diagram of the steelplant off-gas exemplary with electric arc furnace and ladle furnace).

Część gazów i pyłów wydostaje się poza piec i nie jest przejmowana przez otwór w sklepieniu. Z tego powodu nad piecem stosuje się specjalny okap, który przejmuje pozostałe gazy i pyły. Gazy te mają znacznie niższe temperatury i poprzez rurociąg stalowy nie chłodzony wodą bezpośrednio kierowane są do komory mieszającej. W podobny sposób zbierane są gazy i pyły z piecokadzi, miejsc dostawy i przeładunku materiałów sypkich oraz przerobu pyłów – poprzez okap i nie chłodzony wodą rurociąg stalowy, połączo-



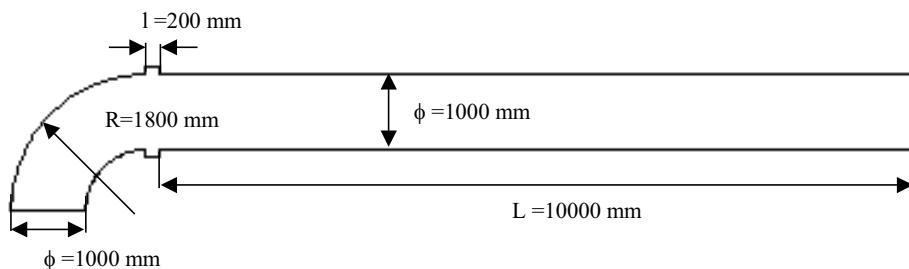
Rysunek 2. Piec łukowy z komorą dopalającą. (Electric arc furnace with post combustion chamber).



specjalnej konstrukcji kolektor w postaci króćca w kształcie kolana, będący bezpośrednio przymocowany do sklepienia pieca. Kolektor, ze względu na temperatury przepływających przez niego gazów (rzędu 1900÷2000 K) wykonywany jest z elementów stalowych, chłodzonych wodą. Średnica kolektora, zakończonego stalowym kołnierzem, dla pieca o pojemności 100 ton jest rzędu 1500÷2000 mm. Bezpośrednio za kołnierzem kolektora znajduje się komora dopalająca, w której wydzielający się w procesie metalurgicznym w piecu CO dopalany jest do CO₂. Pomiedzy kolektorem a komorą dopalającą istnieje szczelina, umożliwiająca zasysanie powietrza. Szczelina umożliwia także współpracę nieruchomej komory dopalającej z ruchomym (wykonuje obrót podczas spustu wyprodukowanej stali) piecem łukowym. Tlen zawarty w zasysanym powietrzu, przy wysokiej temperaturze gazów odlotowych, reaguje z tlenkiem węgla. Szerokość szczeliny powietrznej może być regulowana podczas pracy pieca, zależnie od potrzeb technologicznych. Komora dopalająca wykonywana jest zazwyczaj w postaci stalowego, również chłodzonego wodą walca o średnicy około 2000 mm i wysokości 3000 mm. Gazy po dopaleniu CO przepływają do dalszej części układu odciągowego, składającego się z rurociągu o długości kilkuset metrów, aby umożliwić zmniejszenie ich temperatury.

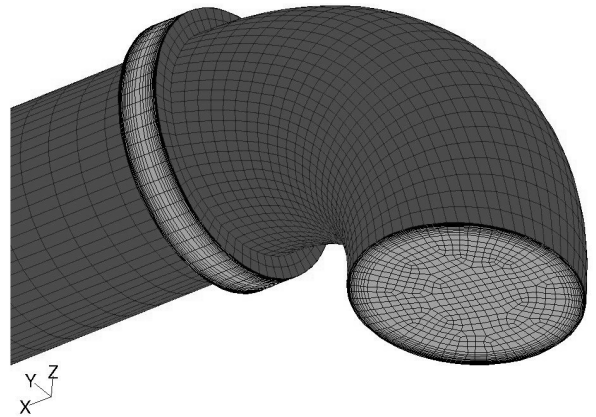
5. MODELOWANIE I ANALIZA UKŁADU ODCIĄGU GAZÓW Z PIECA ŁUKOWEGO

Jako przykład zastosowania oprogramowania CFD do modelowania pracy układu odciąg gazów z przestrzeni roboczej elektrycznego pieca łukowego przedstawiono trójwymiarowy model fragmentu układu obejmującego króciec odciągowy sklepienia pieca, szczelinę powietrzną oraz rurociąg doprowadzający do komory dopalającej. Przyjęte wymiary geometryczne układu przedstawiono na rysunku 3. Wymiary odpowiadają układowi odciągowemu dla pieca łukowego o pojemności 60 ton. Dla przyjętych wymiarów



Rysunek 3. Wymiary geometryczne układu odciągowego pieca łukowego, użyte do opracowania modelu obliczeniowego. (Geometrical dimensions of the EAF off-gas, used to elaborate the calculating model).

geometrycznych zdefiniowano siatkę obliczeniową zawierającą 174000 heksagonalnych trójwymiarowych elementów rozpiętych na węzłach, w których rozwiązywane są numerycznie równania mechaniki płynów. Siatka spełnia wymagania jakości oraz uwzględnia warstwę przyścienną potrzebną do prawidłowego modelowania przepływu i wymiany energii cieplnej pomiędzy gorącymi spalinami a chłodzonymi ścianami kanału odciągowego. Rozkład zdefiniowanej siatki obliczeniowej przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Siatka obliczeniowa wraz z warstwą przyścienną. (The calculating mesh with boundary layer).

Warunki brzegowe dotyczące parametrów przepływu oraz składu chemicznego gazów, użyte w kolejnych symulacjach zostały zawarte w tabelicy 1.

Temperatury ścian kanału, dla każdego z przypadków zostały wyznaczone na podstawie oszacowanych spadków temperatury spalin na poszczególnych odcinkach kanału oraz bilansu energii (Kirschen i in. 2004), według poniższego schematu obliczeniowego.

Temperatury ścian kanału, dla każdego z przypadków zostały wyznaczone na podstawie oszacowanych spadków temperatury spalin na poszczególnych odcinkach kanału oraz bilansu energii (Kirschen i in. 2004), według poniższego schematu obliczeniowego.

$$\dot{Q} = \frac{T_{spaliny, \dot{s}r} - T_{H_2O}}{\frac{1}{\alpha_{spaliny}} + \frac{S_{kanal}}{\lambda_{kanal}} + \frac{1}{\alpha_{H_2O}}} \cdot A_{kanal} \quad (6)$$

$T_{spaliny, \dot{s}r}$ jest średnią arytmetyczną z temperatury spalin na wlocie do odcinka kanału $T_{spaliny, wlot}$ i na wylocie $T_{spaliny, wylot}$. T_{H_2O} jest średnią temperaturą wody chłodzącej a S_{kanal} i λ_{kanal} są kolejno grubością ściany kanału oraz współczynnikiem przewodnictwa cieplnego materiału, z którego jest wykonany. A_{ka-}

Tablica 1. Warunki brzegowe używane w kolejnych obliczeniach symulacyjnych (The boundary conditions used in following simulation calculations)

Nr	WLOT KANAŁU						SZCZELINA POWIETRZNA					
	V _{wlot} [m/s]	T _{wlot} [K]	N ₂ [%]	CO [%]	CO ₂ [%]	H ₂ [%]	V _{szczelina} [m/s]	T _{szczelina} [K]	N ₂ [%]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	H ₂ [%]
1	10	1773	58,8	30	11,1	0,1	4,6	323	72,1	6	21,8	0,1
2	10	1873	58,8	30	11,1	0,1	4,3	323	72,1	6	21,8	0,1
3	10	1973	58,8	30	11,1	0,1	4,1	323	72,1	6	21,8	0,1
4	15	1873	58,8	30	11,1	0,1	6,4	323	72,1	6	21,8	0,1
5	20	1873	58,8	30	11,1	0,1	8,6	323	72,1	6	21,8	0,1
6	10	1873	55,9	20	24,0	0,1	4,3	323	72,1	6	21,8	0,1

nat jest całkowitą powierzchnią jego ścian bocznych a $\alpha_{spaliny}$ jest całkowitym współczynnikiem przekazywania ciepła od strony ścieżki spalin w kierunku ścian kanału. Współczynnik ten jest sumą konwekcyjnego i radiacyjnego współczynnika przekazywania ciepła (7). α_{H_2O} jest współczynnikiem przekazywania ciepła od strony wody w kierunku ścian kanału i wyliczono go korzystając ze wzoru (8), używając właściwości fizycznych wody i średnicy hydraulicznej D_{H_2O} .

$$\alpha_{spaliny} = \alpha_{konw.spaliny} + \alpha_{rad.spaliny} \quad (7)$$

Konwekcyjny współczynnik przyjmowania ciepła wyznaczono ze wzoru (8). $\lambda_{spaliny}$ jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego spalin a D_{kanal} jest średnicą hydrauliczną kanału. $Nu_{spaliny}$ jest liczbą Nusselta dla przepływającej ścieżki spalin wyliczoną z równania (9). $Pr_{spaliny}$ i $Re_{spaliny}$ to kolejno liczby Prandtl'a i Reynolds'a dla spalin (Incropera i Dewitt, 2002; Kreith i Bohn, 2000).

$$\alpha_{konw.spaliny} = \frac{Nu_{spaliny} \cdot \lambda_{spaliny}}{D_{kanal}} \quad (8)$$

$$Nu_{spaliny} = 0,023 \cdot \left(1 + 1,2 \cdot \frac{\lambda_{spaliny}}{D_{kanal}} \right) \cdot Re_{spaliny}^{0,8} \cdot Pr_{spaliny}^{0,333} \quad (9)$$

Radiacyjny współczynnik przekazywania ciepła otrzymano za pomocą wzoru (10), w którym σ jest stałą Stefana-Boltzmann'a, a $\epsilon_{spaliny}$ to współczynnik emisyjności spalin.

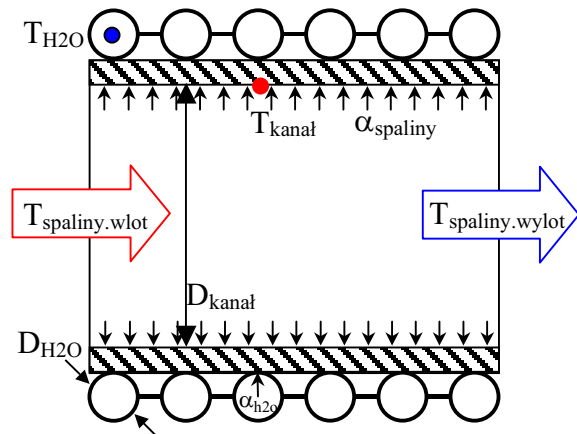
$$\alpha_{rad.spaliny} = \sigma \cdot \epsilon_{spaliny} \cdot \frac{T_{spaliny.sr}^4 - T_{ściany}^4}{T_{spaliny.sr} - T_{ściany}} \quad (10)$$

$T_{ściany}$ jest temperaturą ściany kanału wyznaczoną przy założeniu, że cała energia cieplna oddana przez spaliny została pochłonięta przez wodę oraz że ściany kanału są nieskończenie cienkie (Incropera i Dewitt 2002).

$$T_{ściany} = \frac{\alpha_{spaliny} \cdot T_{spaliny.sr} + \alpha_{H_2O} \cdot T_{H_2O}}{\alpha_{spaliny} + \alpha_{H_2O}} \quad (11)$$

Schemat zaproponowanego modelu wymiany ciepła w kanale odciągowym przedstawiono na rysunku 5.

Celem zbadania wpływu warunków brzegowych na wyniki obliczeń symulacyjnych przeprowadzono następujące warianty obliczeń (tablica 1):



Rysunek 5. Schemat wymiany energii cieplnej w kanale odciągowym pieca łukowego. (The scheme of heat transfer in EAF off-gas duct).

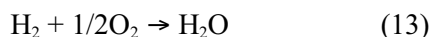
- wariant 1, 2, 3 – temperatura spalin na wlocie od strony pieca łukowego zmienia się w zakresie: $T_{wlot} = 1773 \text{ K}$, 1873 K i 1973 K , przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennych pozostałych warunków tj. prędkość gazów na wlocie kanału $V_{wlot} = 10 \text{ m/s}$ oraz stężeniu masowym tlenku węgla $m_{CO} = 30\%$. Temperaturę i skład chemiczny gazu (powietrza) zasysanego przez szczelinę powietrzną za kolanem napieczowym przyjęto jako stałe dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Dla każdego z wariantów założono, że objętość powietrza zasysanego przez szczelinę jest dwukrotnie większa od objętości zasysanych spalin.
- wariant 4 i 5 – prędkość spalin na wlocie od strony pieca łukowego zmienia się w zakresie: $V_{wlot} = 15$



m/s, 20 m/s, przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennych pozostałych warunków tj. temperatury gazów na wlocie kanału $T_{wlot} = 1873$ K oraz stężeniu masowym tlenu węgla $m_{CO} = 30\%$. Parametry gazów zasysanych przez szczelinę powietrzną za kolaniem napiecowym zmieniają się zgodnie z opisanymi wcześniej zasadami.

- wariant 6 – stężenie masowe tlenu węgla w spalinach na wlocie od strony pieca łukowego przyjęto $m_{CO} = 20\%$, przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennych pozostałych warunków tj. temperatury gazów na wlocie do kanału $T_{wlot} = 1873$ K oraz prędkości wejściowej gazów $V_{wlot} = 10$ m/s. Parametry gazów zasysanych przez szczelinę powietrzną za kolaniem napiecowym przyjęto takie same jak w wariantcie 2.

Przyjęto schemat utleniania CO i H₂, zawartych w gazach odlotowych, tlenem zasysanego przez szczelinę powietrza, według następujących reakcji chemicznych:



Reakcja (12) opisuje zjawisko dopalania tlenu węgla do dwutlenku węgla oraz reakcję rozkładu dwutlenku węgla. Reakcja ta została zamodelowana za pomocą pojęcia wirowego rozproszenia (Eddy-Dissipation Concept), właściwego dla przepływów typowo turbulentnych. Kinetykę reakcji opisano modelem tzw. skończonych szybkości reakcji (finite reaction rates). Reakcja (13) opisuje powstawanie pary wodnej zawartej w gazach odlotowych i zasysanym powietrzu w bardzo niewielkich ilościach. Uwzględnienie tej reakcji ułatwiło osiągnięcie zbieżności obliczeń numerycznych.

Opracowany model fragmentu układu odciągowego gazów odlotowych elektrycznego pieca łukowego został rozwiązany numerycznie z wykorzystaniem oprogramowania Fluent 6.1. Celem przeprowadzonych obliczeń komputerowych było prawidłowe określenie wielkości fizycznych i chemicznych związanych z przepływem gazów wewnątrz kanału odciągowego. Rozwiązania numeryczne opisanych powyżej przypadków zawierają wszystkie parametry przepływu gazów, co pozwala na prawidłowe określenie stopnia penetracji strugi gorących gazów przez zimny strumień zasysanego powietrza atmosferycznego. Proces mieszania się tych dwóch gazów ma kluczowe znaczenie dla zdefiniowanych w programie reakcji chemicznych (12 i 13), a tym samym dla poprawnego

wyznaczenia stężenia masowego składników gazów na wylocie z kanału.

Wykonano obliczenia dla wielu przypadków i wariantów parametrów wejściowych i warunków brzegowych. Do dalszej analizy wybrano tylko wyniki

Tablica 2. Wyniki obliczeń symulacyjnych parametrów przepływających gazów w kanale odlotowym. (The results of simulation calculations of off-gas flow in furnace outlet).

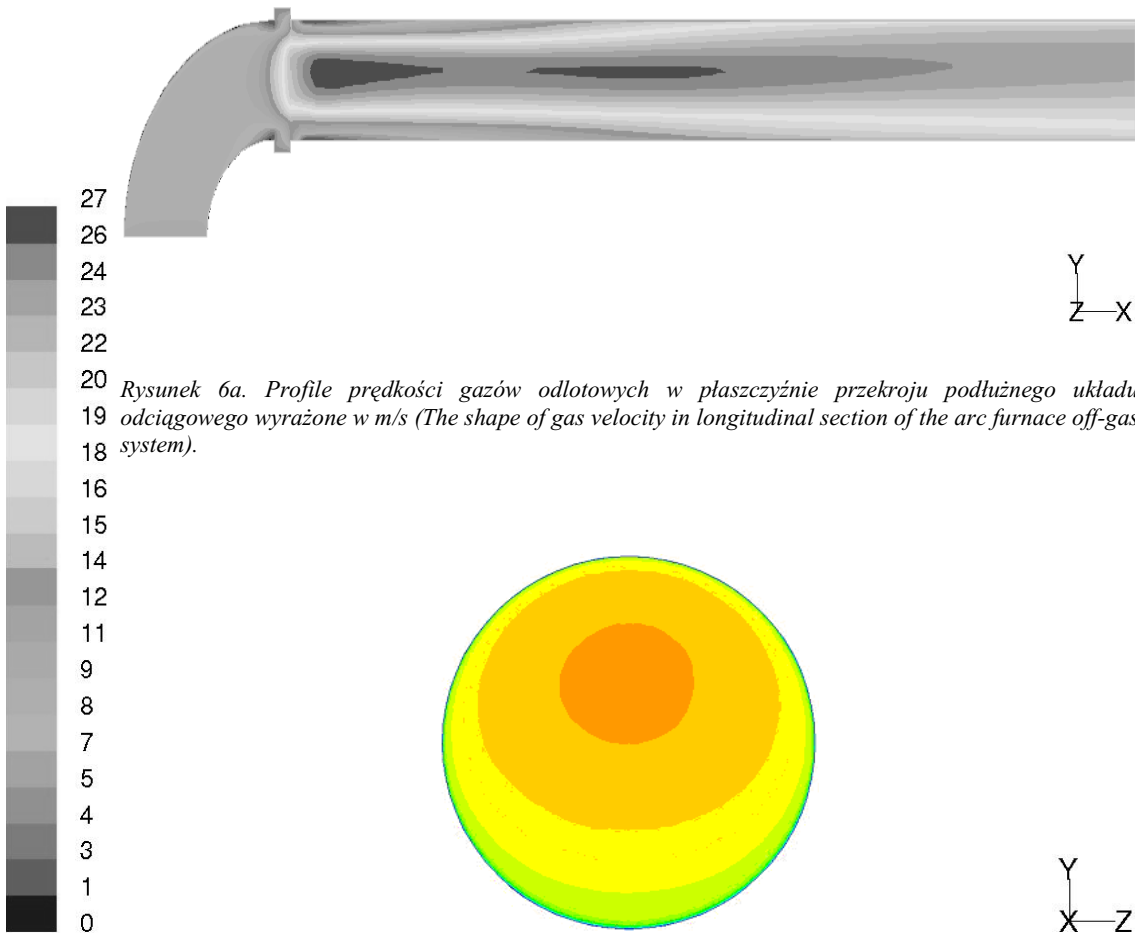
Nr	WLOT KANAŁU			SZCZELINA POWIETRZNA		WYLOT KANAŁU		
	V_{wlot} [m/s]	T_{wlot} [K]	CO [%]	$V_{szczelina}$ [m/s]	$T_{szczelina}$ [K]	V_{wylot} [m/s]	T_{wylot} [K]	CO [%]
1	10	1773	30	4,6	323	21,8	1146	4,8
2	10	1873	30	4,3	323	20,5	1150	5,2
3	10	1973	30	4,1	323	19,6	1152	5,4
4	15	1873	30	6,4	323	31,3	1178	5,2
5	20	1873	30	8,6	323	42,6	1197	5,1
6	10	1873	20	4,3	323	19,2	1082	3,5

obliczeń dotyczących prędkości przepływu i temperatury gazów przepływających przez kanał oraz zawartego w nich stężenia masowego tlenu węgla. Wyniki obliczeń dla wybranych trzech wielkości na wylocie z kanału przedstawiono w tabelicy 2.

Dla lepszego zobrazowania fizyki zjawiska silnie turbulentnego przepływu spalin zachodzącego wewnątrz kanału odciągowego przedstawiono profile prędkości w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego kanału i w płaszczyźnie przekroju poprzecznego, na jego wylocie (rysunek 6a oraz 6b). Przedstawione na rysunkach profile prędkości odnoszą się do wariantu nr 2. W pozostałych przypadkach uzyskano podobne pod względem charakteru profile prędkości – stąd nie zamieszczano ich w artykule. Obydwa rysunki są wykonane w tej samej skali barw, umieszczonej z lewej strony, a wartości prędkości wyrażone są w m/s. W płaszczyźnie przekroju widać wyraźne pole wysokich prędkości rozpoczynające się na początku prostego odcinka kanału w pobliżu szczeliny powietrznej. Jest ono wynikiem dopływu powietrza atmosferycznego wpadającego przez szczelinę, co powoduje zwiększenie ilości gazu przepływającego przez kanał przy jednoczesnym zachowaniu stałego pola przekroju poprzecznego rury. Zauważalny jest także lekko skośny przepływ strugi gazów w kierunku górnej części prostego odcinka kanału. Ta niezerowa pionowa składowa wektora prędkości wynika z geometrii kolana napiecowego. Potwierdza to profil prędkości na wylocie kanału z przesuniętym w kierunku górnej części polem maksymalnej prędkości (rysunek 6b).

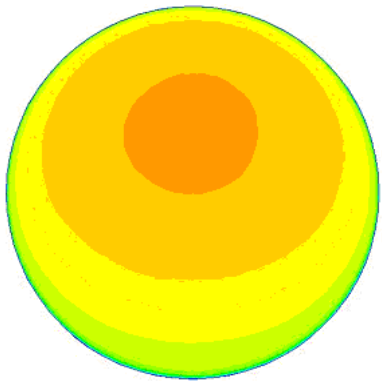
Dla zobrazowania wpływu warunków brzegowych na przepływ gazu naniesiono wartości wektora prędko-



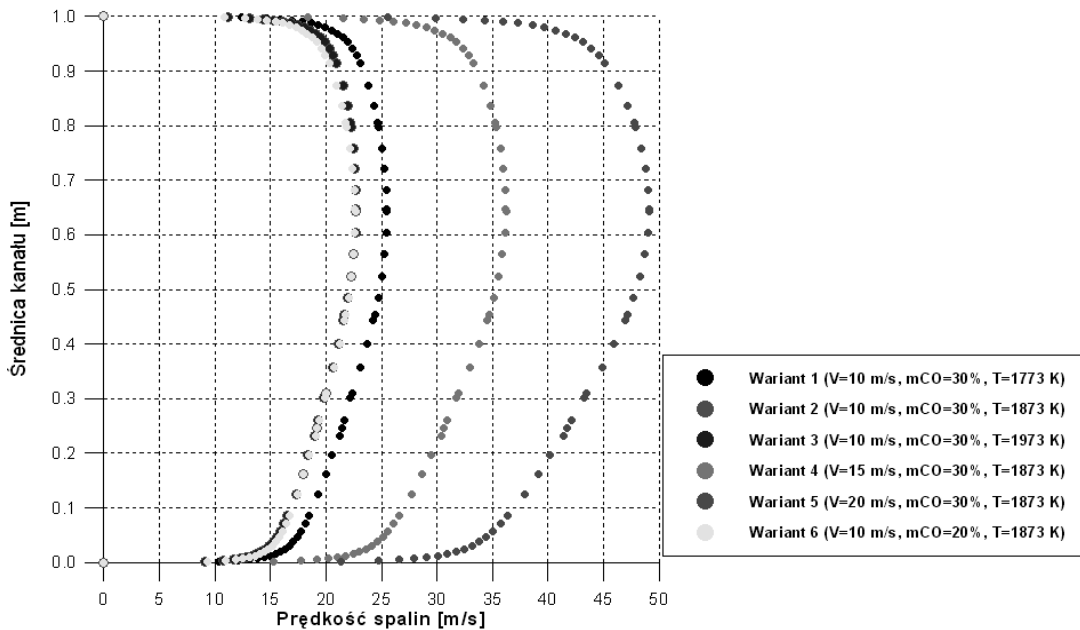


27
26
24
23
22
20
19
18
16
15
14
12
11
9
8
7
5
4
3
1
0

Rysunek 6a. Profile prędkości gazów odlotowych w płaszczyźnie przekroju podłużnego układu odciągowego wyrażone w m/s (The shape of gas velocity in longitudinal section of the arc furnace off-gas system).

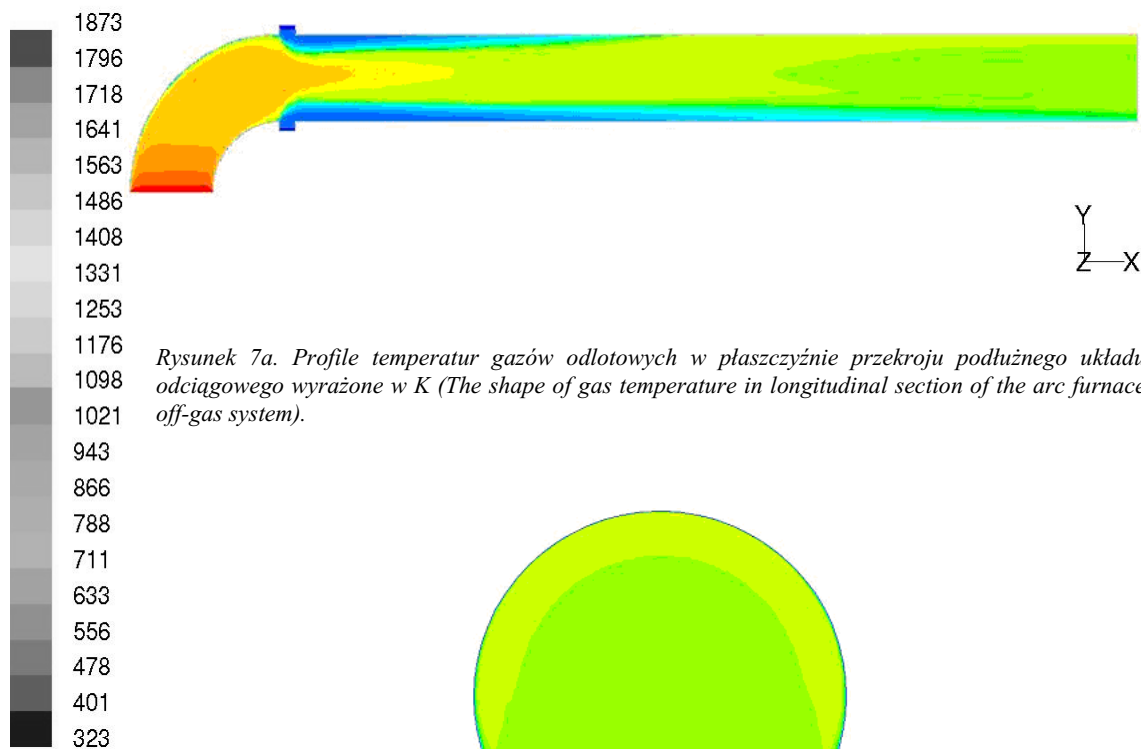


Rysunek 6b. Profile prędkości gazów odlotowych w płaszczyźnie przekroju poprzecznego układu odciągowego wyrażone w m/s (The shape of gas velocity in cross section of the arc furnace off-gas system).

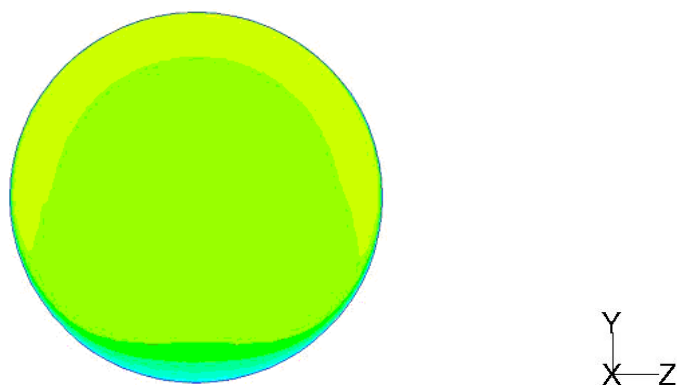


Rysunek 6c. Profile prędkości gazów odlotowych w przekroju poprzecznym na wylocie w funkcji odległości od ścian układu odciągowego. (The shape of gas velocity in outlet cross section of the arc furnace off-gas system).

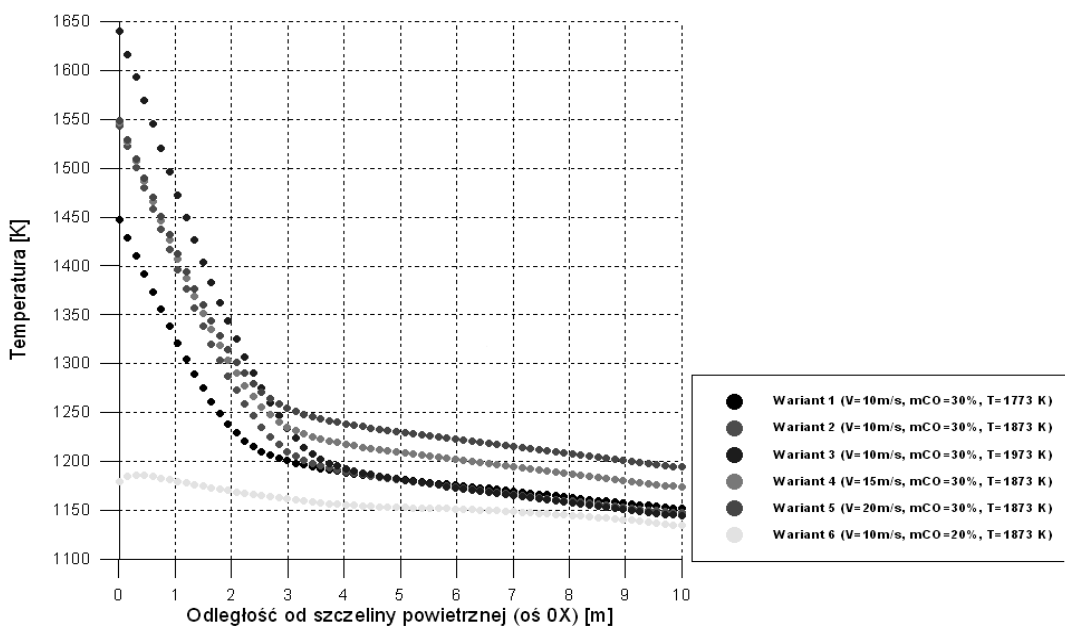




Rysunek 7a. Profile temperatur gazów odlotowych w płaszczyźnie przekroju podłużnego układu odciągowego wyrażone w K (The shape of gas temperature in longitudinal section of the arc furnace off-gas system).



Rysunek 7b. Profile temperatur gazów odlotowych w płaszczyźnie przekroju poprzecznego układu odciągowego wyrażone w K (The shape of gas temperature in cross section of the arc furnace off-gas system).



Rysunek 7c. Profile rozkładu temperatur gazów odlotowych w osi układu odciągowego od szczeliny powietrznej. (The shape of gas temperature distribution in axis of the arc furnace off-gas system from the air gap).

kości wzdłuż średnicy kanału odlotowego na końcu, dla wszystkich rozpatrywanych przypadków (rysunek 6c). Wszystkie wykresy przedstawiają typowy kształt przepływu turbulenta, blisko ścianek kanału prędkości są mniejsze, w pobliżu osi przepływu większe. Z rysunku wynika, w przypadku wariantów 2, 3 i 6 mających taką samą wartość prędkości na wlocie – na wlocie z kanału ich

profile prędkości są praktycznie takie same. Oznacza to, że zmiana składu chemicznego gazów odlotowych oraz ich temperatura w małym stopniu wpływają na



rozkład prędkości. Natomiast w przypadku wariantu 4 i 5, gdzie zwiększono prędkość gazów na wlocie uzyskano również znacznie większe prędkości na wylocie. Oznacza to, że dominujący wpływ na zmiany prędkość przepływu gazów wewnątrz kanału odlotowego ma zmiana prędkości gazów na wlocie do kanału.

Na rysunku 7a i 7b przedstawiono rozkład temperatury gazów w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego i poprzecznego na wylocie kanału odciągowego dla wariantu 2 warunków brzegowych. Na przekroju podłużnym widoczne jest wyraźnie szybsze ochładzanie się gazów w pobliżu ścianek kanału w początkowej części – kolanie napieczowym. Związane to jest z intensywnym odbieraniem ciepła przez chłodzone wodą elementy. W prostej części kanału, bezpośrednio za kołnierzem, gdzie następuje zasysanie „zimnego” powietrza atmosferycznego przez szczelinę następuje dodatkowe ochładzanie gazów. W drugiej części kanału odciągowego wyraźnie widoczna jest zmiana profilu temperatur, wyższe temperatury występują przy ściankach w górnej części a niższe, również przy ściankach, ale w dolnej części kanału. Jest to szczególnie widoczne w przekroju poprzecznym na rysunku 7b. Związane jest to z mieszaniem się gazów o wysokiej temperaturze wypływających z pieca z powietrzem atmosferycznym o dużo mniejszej temperaturze, z procesem chłodzenia ścian całego kanału oraz dodatkową energią cieplną pochodzącą z reakcji chemicznych (12) chemicznych (13). Na stosunkowo krótkim odcinku kanału przepływu gazów występują znaczne zmiany temperatur, co wskazuje na przepływ turbulentny.

Na rysunku 7c przedstawiono zestawienie wyników symulacji temperatur na długości układu odciągowego, dla wszystkich rozważanych wariantów. Analiza krzywych na wykresie wskazuje, że w przypadku wariantów 1, 2 i 3 (zwiększająca się temperatura wejściowa) temperatura gazów w początkowej części kanału, w odległości mniejszej niż 4 metry od szczeliny związana jest z temperaturą początkową, natomiast w dalszej części prostego odcinka kanału jest porównywalna we wszystkich przypadkach. Wpływ prędkości wlotowej gazów na temperaturę gazów wewnątrz kanału można przeanalizować na podstawie wariantów 2, 4 i 5. Prędkość wlotowa gazów przekłada się na czas ich przebywania w chłodzonym kanale a tym samym na ilość ciepła, która może zostać odebrana poprzez ściany kanału odciągowego. W kanale utrzymuje się wyższa temperatura niż mogłoby to wynikać z samego mieszania się dwóch mas gazu o różnych temperaturach. Jest to wynikiem egzotermicznej reakcji utleniania tlenku węgla. W wariantach 6, w którym zasympulowano mniejszą zawartość CO w gazach uzyskuje się znacznie mniejsze tem-

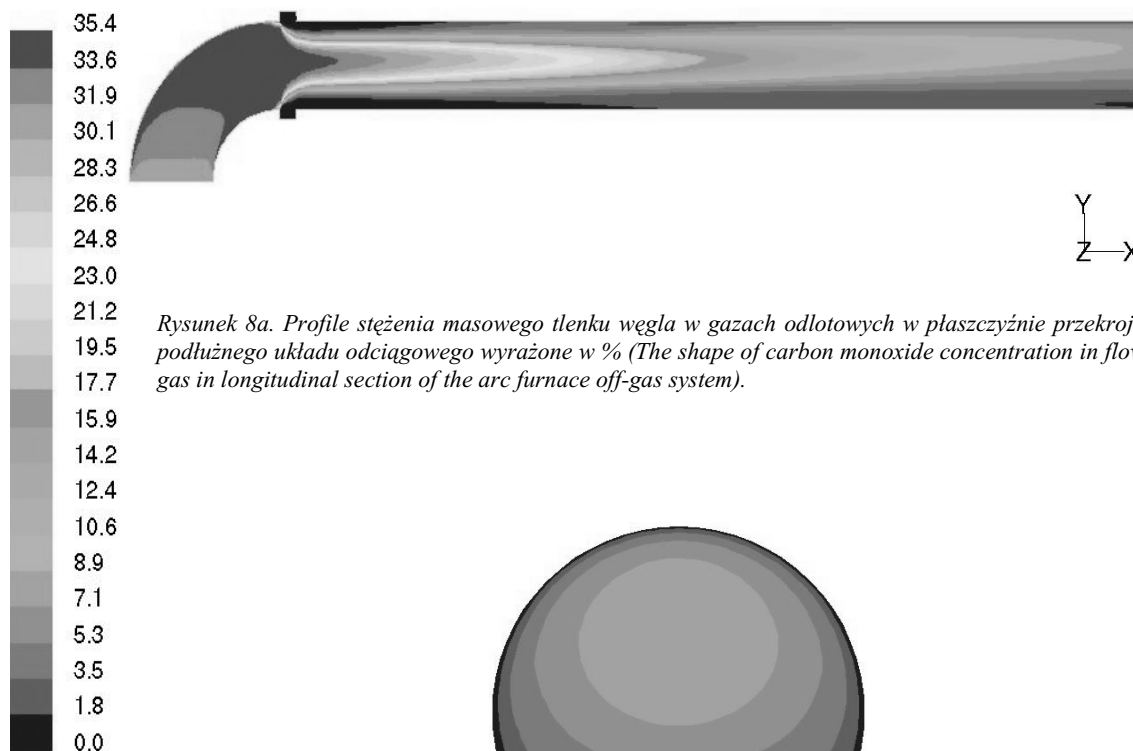
peratury niż w pozostałych wariantach. Z powyższego wynika, że skład chemiczny gazów wypływających z pieca łukowego jest parametrem mającym największy wpływ na temperaturę panującą w układzie odciągowym.

Profile stężenia masowego tlenku węgla wewnątrz układu odciągowego gazów z pieca łukowego, dla wariantu 2 przedstawiono na rysunku 8a i 8b. Jak wynika z rysunku 8a w początkowej części układu odciągowego - kolanie napieczowym obserwowany jest wzrost zawartości CO w gazach, w stosunku do zasympulowanej zawartości na wejściu do kanału. Zjawisko takie jest efektem domyślnej reakcji redukcji CO₂ zawartego w gazach uchodzących zawartym również w tych gazach wodorem. Produktami reakcji są tlenek węgla i para wodna. Bezpośrednio za szczeliną powietrzną następuje stosunkowo szybkie zmniejszanie zawartości CO, co wynika z utleniania tlenem z zasysanego powietrza. Na wylocie z kanału zawartość CO jest poniżej 5%. Charakterystyczny jest rozkład zawartości CO w przekroju poprzecznym na końcu układu odciągowego z rysunku 7b. Widoczne są większe stężenia CO w górnej części układu (rzędu 5%) oraz praktycznie zerowe stężenia przy dolnej ścianie. Efekt ten jest związany z temperaturą oraz turbulencją przepływu. W strefie niższych temperatur dopalenie CO do CO₂ następuje w większym zakresie.

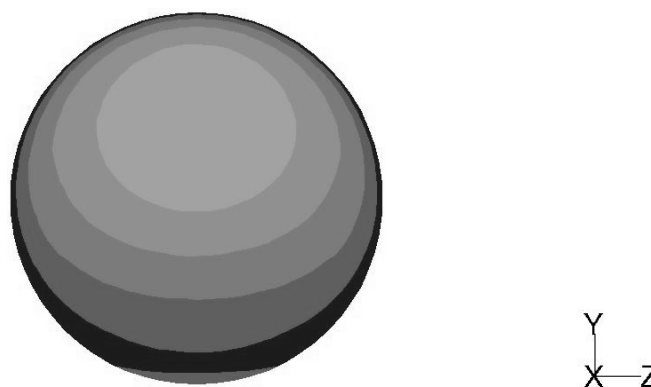
Na rysunku 8c przedstawiono zestawienie wyników symulacji stężenia masowego CO w gazach na długości układu odciągowego, dla wszystkich rozważanych wariantów. Analiza krzywych na wykresie wskazuje, że w przypadku wariantów 1÷5, czyli zmieniających się prędkości wlotowej gazów oraz ich temperatury uzyskuje się bardzo zbliżony rozkład zawartości CO na długo kanału odlotowego. Podobny charakter rozkładu zawartości CO, ale przy mniejszych zawartościach uzyskano dla mniejszej zawartości CO na wejściu. Z powyższego wynika, że skład chemiczny gazów wypływających z pieca łukowego jest parametrem mającym największy wpływ na rozkład zawartości CO w gazach przepływających w układzie odciągowym. Temperatura i prędkość gazów wejściowych wpływają na charakter rozkładu zawartości CO i CO₂ wzdłuż kanału odlotowego.

Rozpatrzone i opisane powyżej przypadki pozwoliły lepiej zrozumieć złożoność niektórych procesów fizykochemicznych jakie zachodzą wewnątrz kanału odciągowego gazów z pieca łukowego podczas pracy urządzenia. Na potrzeby artykułu opis otrzymanych metodą CFD wyników ograniczono do analizy rozkładu pól prędkości i temperatur spalin oraz skupiono się tylko na jednym ze składników chemicznych (CO) wchodzących w skład mieszaniny gazów tworzących gazy odciągowe. Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych zawierają również szereg parametrów

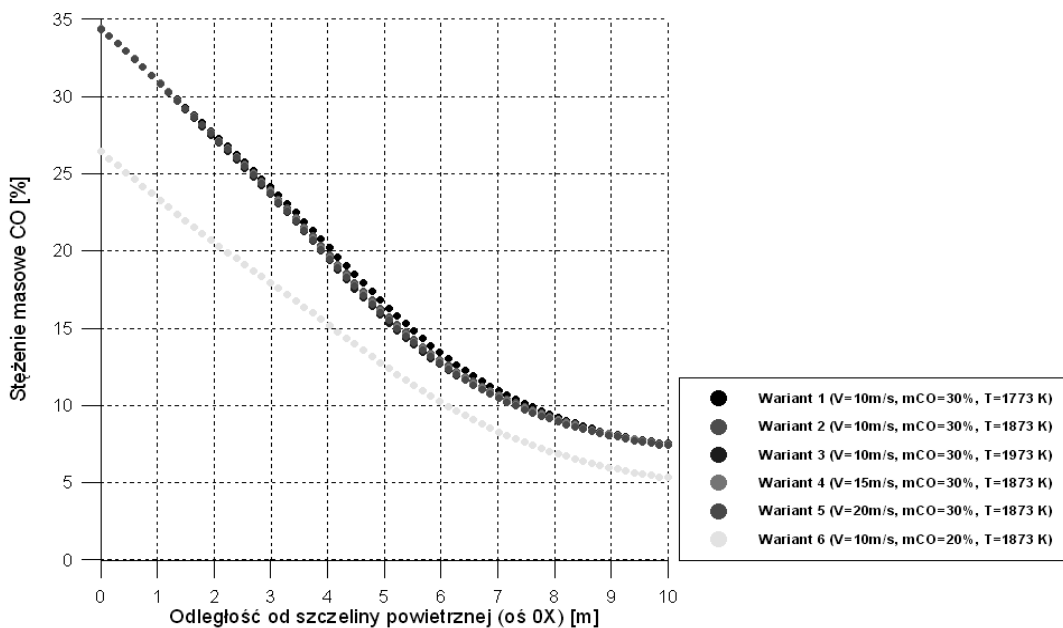




Rysunek 8a. Profile stężenia masowego tlenku węgla w gazach odlotowych w płaszczyźnie przekroju podłużnego układu odciągowego wyrażone w % (The shape of carbon monoxide concentration in flow gas in longitudinal section of the arc furnace off-gas system).



Rysunek 8b. Profile stężenia masowego tlenku węgla w gazach odlotowych w płaszczyźnie przekroju poprzecznego układu odciągowego wyrażone w % (The shape of carbon monoxide concentration in flow gas in cross section of the arc furnace off-gas system).



Rysunek 8c. Profile rozkładu stężenia masowego CO w gazach odlotowych w osi układu odciągowego od szczeliny powietrznej (The shape of CO mass concentration in gas distribution in axis of the arc furnace off-gas system from the air gap).

uwzględnionych w obliczeniach a nie opisanych w artykule, takich jak ciśnienie panujące w kanale, czy ilość energii cieplnej wydzielonej lub pochłoniętej w wyniku zachodzących reakcji chemicznych. Cały proces odprowadzania spalin z pieca łukowego przy jednoczesnym ich schładzaniu i eliminowaniu tlenku węgla jest wystarczająco skomplikowany, dlatego przy definicji problemu pominięto zjawisko radiacji i transportu fazy dyskretnej występującej w rzeczywistych gazach od-

blemu pominięto zjawisko radiacji i transportu fazy dyskretnej występującej w rzeczywistych gazach od-



ciągowych z pieca oraz zjawisko formowania tzw. związków NO_x .

Opracowanie modelu układu odciągu gazów z pieca łukowego, przy wykorzystaniu oprogramowania CFD umożliwia analizę jego pracy poprzez rozważenie różnych wariantów konstrukcyjnych i parametrów technologicznych układu. Dzięki temu znając wymogi odnośnie temperatury i składu chemicznego gazów na wlocie z układu można zaprojektować odpowiednio konstrukcję kanału odciągowego lub dostosować technologię procesu tak aby założone warunki spełnić. Przykładem może być dobór szerokości szczeliny powietrznej lub wielkości podciśnienia wytwarzanego przez wentylatory, wymuszającego odpowiednią prędkość przepływu tak aby temperatura gazów i zawartość CO była na zadanym poziomie w końcu kanału.

Analizując przytoczone przykłady wykorzystania CFD do optymalizacji procesów zachodzących w piecach łukowych można stwierdzić, że ta metoda badawcza może mieć znaczny wkład w rozwój przemysłu metalurgicznego. Korzyści płynące z zastosowania obliczeń symulacyjnych mogą obejmować usprawnienia parametrów technologicznych, zmniejszenie szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne oraz zmniejszenie kosztów produkcyjnych.

6. PODSUMOWANIE

Opracowano model fragmentu układu odciągu gazów z pieca łukowego, w oparciu o który przeprowadzono obliczenia numeryczne dzięki komercyjnemu oprogramowaniu CFD – Fluent 6.1. Obliczenia dotyczyły przepływu gorących gazów wewnątrz kanału odciągowego pieca łukowego, z uwzględnieniem zachodzących w nim reakcji utleniania CO i H_2 oraz redukcji CO_2 wodorem. Model umożliwił prognozowanie stopnia schłodzenia strugi gazów dzięki zdefiniowaniu wymiany energii cieplnej z otoczeniem układu. Wymiana energii w rzeczywistości ma miejsce poprzez chłodzone wodą ściany kanału. Opisane powyżej symulacje komputerowe wykazały przydatność oprogramowania CFD do modelowania i analizowania pracy pieca łukowego.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne, dla zdefiniowanego kształtu i wymiarów układu odciągu gazów z pieca łukowego oraz przyjętych warunków brzegowych zostały przedstawione graficznie w postaci profili prędkości przepływu, temperatury i zawartości CO wzdłuż kanału. Analiza otrzymanych wyników umożliwiła wyznaczenie ilościowego wpływu oraz charakteru badanych parametrów na rozkład prędkości i temperatury gazów oraz zawartości w nich CO podczas przepływu wewnątrz kanału odciągowego. Szczegółowe wyniki analiz przedstawiono powyżej. Podsumowując wnioski z obliczeń numerycznych

modelu fragmentu układu odciągu gazów z pieca łukowego są następujące:

- rozkład prędkości gazów wewnątrz kanału w największym stopniu uzależniony jest od prędkości gazów na wlocie (wpływ pozostałych parametrów jest znacznie mniejszy lub pomijalny),
- rozkład temperatury gazów wewnątrz kanału w największym stopniu uzależniony jest od składu chemicznego gazów na wlocie oraz geometrii szczeliny powietrznej (wpływ pozostałych parametrów jest znacznie mniejszy lub pomijalny),
- rozkład zawartości CO wewnątrz kanału w największym stopniu uzależniony jest od składu chemicznego gazów na wlocie (wpływ pozostałych parametrów jest znacznie mniejszy lub pomijalny).

7. LITERATURA

- Chan, E., Riley, M., Thomson, M.J., Evenson, E.J., 2003, Nitrogen oxides formation and control in EAF, *Iron and Steel Society/AIME, ISSTech Conference Proceedings, USA*, 613-620.
- Guo, D., Irons, D., 2003, Modeling of radiation intensity in an EAF, *3rd Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne.
- Fluent 6.1 User's Guide
http://www.cyfronet.krakow.pl/uslugi_obliczeniowe/?a=fluent
http://www.airproducts.co.uk/metals/production_meltingCasting.htm
- Incropera, F., Dewitt, D., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* - 5th edition.
- Irons, G., 1999, Developments in Modeling of gas injection and slag foaming, *2nd Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne.
- Kicking, R., Brummayer, M., Lehner, J., Atschreiter, F., Gittler, P., Noska, L., 2001, VAI-Vent: steel shop ventilation system, *Steel World (UK)*, 2, 30-34.
- Kirschen, M., Velikorodov, V., Pfeifer, H., Wahlers, F.-J., 2004, Modeling and optimization of EAF dedusting system, *2nd Int. Conf. and Exhibition on New Developments in Metallurgical Process Technology*, Riva del Garda, 2004, 1-9
- Kreith, F., Bohn, M., 2000, *Principles of Heat Transfer - 6th Edition*.
- Li, B., 2000, Fluid Flow and Mixing Process in a Bottom Stirring Electrical Arc Furnace with Multi-plug, *ISIJ International*, 40, 863-869.
- Li, J., Fruehan R.J., 2003, CFD calculation of post combustion in EAF, *Metall. Mater. Trans. B*, 34B, 333-343.
- Tang, X., Kirchen, M., Abel, M., Pfeifer, H., 2002, Modeling post combustion of EAF off-gasses using CFD, *Iron and Steel Society/AIME, 60th Electric Furnace Conference Proceedings, USA*, 10.
- Thomson, M., Evenson, E., Kempe, M., Goodfellow, H., 2000, Control of greenhouse gas emissions from electric arc furnace steelmaking: evaluation methodology with case studies, *Ironmaking and Steelmaking*, 27, 88-92.
- Urson, H., Lightstone, M., Thompson, M., 2001, Numerical study of jets in reacting crossflow, *Numerical Heat Transfer: Part A.*, 40, 689-714.

Artykuł otrzymano do druku





