

+4,50 m, niezbędnego do wstawiania nowego stalowego przewodu kominowego do wnętrza trzonu żelbetowego. Ponadto przewiduje się wyburzenie komina powyżej poziomu +115 m, usunięcie wymurówki i izolacji na całej wysokości komina oraz oczyszczenie wewnętrznej powierzchni trzonu komina. Wykonanie rusztu wzmacniającego dolny odcinek trzonu komina oraz nowego żelbetowego trzonu powyżej poziomu +16 m jest możliwe do realizacji na czynnym kominie. Natomiast pozostałe prace należy wykonać po jego wyłączeniu. W trakcie przebudowy zmieniają się dosyć istotnie warunki obciążenia konstrukcji komina. W związku z tym przeprowadzono szczegółową analizę statyczno-wytrzymałościową komina w fazie przebudowy.

Analiza statyczno-wytrzymałościowa trzonu i fundamentu komina w fazie przebudowy

Normowe warunki stanu granicznego nośności trzonu komina są spełnione: $w_{\max} = N/N_{Rd} = 0,663 < 1,0$. Warunek ograniczonej szerokości rozwarcia rys w stanie granicznej użyteczności trzonu komina przyjęto jako domyślnie spełniony, ponieważ warunki

pracy konstrukcji są korzystniejsze od aktualnych warunków pracy komina. Analiza statyczno-wytrzymałościowa dolnego wzmocnionego odcinka trzonu komina wykazała, że naprężenia występujące w konstrukcji nie przekraczają wytrzymałości dopuszczalnej betonu, a tym samym warunki wytrzymałościowe są spełnione. W przypadku fundamentu stwierdzono, że warunki dopuszczalnego mimośrodru oraz granicznej nośności są spełnione z dużym zapasem: $e_{\max}/e_{\text{dop}} = 0,26 < 1,0$, oraz $N_r^{\max}/m \cdot \min\{Q_{fNBx}, Q_{fNBz}\} = 0,20 < 1,0$. Jeśli chodzi o płytę fundamentową, to warunek jej sprawdzenia na przebicie jest spełniony: $V_{Sd} = 8493 \text{ kN} < V_{Rd} = 17038 \text{ kN}$. Na prawie całej powierzchni stopy fundamentowej jej nośność z uwagi na zginanie jest wystarczająca. Jedyne na linii połączenia trzonu ze stopą fundamentową ilość wymaganego zbrojenia nieznacznie przewyższa ilość zbrojenia wbudowanego.

W sytuacji, w której ze względu na stan techniczny komin należałoby wyburzyć, zaproponowany sposób jego remontu umożliwi przywrócenie konstrukcji zdolności eksploatacyjnych. Do robót wewnątrz komina wykorzystana zostanie przerwa technologiczna związana z remontem urządzeń energetycznych.

mgr inż. Tomasz Kasprzak*
prof. dr hab. inż. Piotr Konderla*
dr inż. Krzysztof Patralski**
dr inż. Grzegorz Waśniewski*

Modelowanie procesu odprowadzania mokrych spalin w kominach przemysłowych

Modelling of wet fumes expulsion process in industrial stacks

Streszczenie. Mokre spaliny powstające w wyniku odsiarczania spalin są potencjalnie agresywne dla konstrukcji komina oraz środowiska w przypadku ich niewłaściwego odprowadzania do atmosfery. Odprowadzanie mokrych spalin jest złożonym zagadnieniem mechaniki gazu, przepływu ciepła i masy. W artykule przedstawiono ogólną koncepcję modelowania tego zagadnienia, wyróżniając kilka elementarnych procesów. W szczególności praca zawiera wyniki modelowania i numerycznej analizy pierwszych dwóch wyróżnionych procesów dla kilku typowych schematów przewodu kominowego stosowanych w praktyce.

Słowa kluczowe: komin przemysłowy, odsiarczanie spalin, mechanika gazu i cieczy, transport masy i ciepła.

Abstract. Wet fumes exhausted from desulfurization system are potentially aggressive for chimney concrete shell and natural environment when gases are emitted to atmosphere not properly.

Wet gases expulsion is a complex problem of fluid mechanics, heat transfer and mass transport. A general idea for modelling the problem mentioned above, which splits phenomenon into elementary processes, is presented in the paper. In particular the paper contains modelling description and numerical analysis results of fluid flow and heat transfer processes for typical stack liner geometries installed in power-generation industry chimneys.

Keywords: industrial chimney, gas desulfurization, fluid mechanics, mass transport, heat transfer.

Przepisy dotyczące ochrony środowiska w odniesieniu do SO_2 zmuszają elektrownie węglowe do instalowania systemów odsiarczania spalin. Na ogół stosuje się technologię mokrego od-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

** Dolnośląskie Centrum Chorób Serca Medinet we Wrocławiu

siarczania spalin (w skrócie WFGD – *Wet Flue Gas Desulfurization*), co pociąga za sobą występowanie wielu niekorzystnych zjawisk i procesów, które muszą być brane pod uwagę przy projektowaniu i późniejszej eksploatacji instalacji WFGD [1].

Spaliny po wyjściu z absorbera mają temperaturę $+50 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ i wilgot-

ność do 25%. Ze względu na niską temperaturę spalin następuje kondensacja wodnego roztworu na ściankach przewodu kominowego. Kondensat o odczynie kwaśnym ($\text{pH} = 1,5 \div 4,0$) agresywnie oddziałuje na przewody kominowe oraz na środowisko otaczające komin [2, 3]. Podstawowym problemem, z jakim musi zmierzyć się pro-

jektant instalacji WFGD, jest ograniczenie do minimum skażenia otoczenia przez krople kwaśnego kondensatu wydostającego się z kominu, które nie zdołają odparować przed upadkiem na powierzchnię terenu (w skrócie SLD – *stack liquid discharge*). Proces SLD jest bardzo złożony i zależy od wielu parametrów [1]. Jego poznanie i opis jest niezbędnym warunkiem poprawnego i optymalnego projektowania instalacji WFGD.

Artykuł jest próbą zdefiniowania i zamodelowania procesu SLD w kategoriach termodynamiki gazów i cieczy z uwzględnieniem przepływu masy i ciepła. Zamieszczone wyniki analiz dotyczą wyłącznie podstawowego procesu laminarnego i turbulentnego przepływu spalin przez przewody kominowe w przypadku kilku stosowanych w praktyce rozwiązań konstrukcyjnych instalacji odprowadzania spalin. Analizy numeryczne MES wykonano przy użyciu systemów Abaqus i Ansys.

Charakterystyczne procesy przepływu i odprowadzania mokrych spalin

Analizując zagadnienie odprowadzania mokrych spalin, można wyróżnić kilka charakterystycznych, elementarnych procesów, które w pierwszym przybliżeniu można modelować i analizować niezależnie. W kolejnym etapie należy uwzględnić sprzężenia pomiędzy poszczególnymi procesami. Omawiając elementarne procesy analizowanego zagadnienia, oznaczono je P1, P2, P3 i P4.

P1. Proces przepływu gazu przez przewód kominowy (czopuch + odcinek liniowy) o zadanej geometrii. Rozważa się proces izotermiczny przepływu laminarnego gazu przez przewód kominowy. Modelem ośrodka jest płyn newtonowski, ośrodek nieściśliwy o zadanej lepkości. Zadany jest stały profil prędkości na wlocie do przewodu oraz stałe ciśnienie (atmosferyczne) na wylocie kominu. W chwili początkowej prędkość w obszarze zagadnienia są pola prędkości oraz pole ciśnienia. Proces początkowo niestacjonarny szybko stabilizuje się i osiąga stan stacjonarny.

P2. Proces termodynamiczny przepływu gazu przez przewód kominowy. Jest to rozszerzenie procesu P1. Rozważa się proces termodynamiczny gazu przez przewód kominowy. W tym przypadku modelem gazu jest gaz idealny – ośrodek nielepki, ściśliwy. Zadany jest stały profil prędkości na wlocie do przewodu oraz stałe ciśnienie (atmosferyczne) na wylocie kominu. W chwili początkowej prędkość w obszarze wynosi zero. Temperatura na wlocie do przewodu jest stała, wyższa od temperatury otoczenia. Na poboczniczy ścianek przewodu występuje konwekcja ciepła, zadany jest współczynnik przyjmowania ciepła. Rozwiązaniem zagadnienia są pola prędkości i ciśnienia gazu oraz pola temperatury w funkcji czasu. Proces początkowo niestacjonarny szybko stabilizuje się i osiąga stan stacjonarny.

P3. Proces transportu masy. Na skutek różnicy temperatury pomiędzy gazem i otoczeniem następuje wypływ ciepła z obszaru gazu oraz obniżenie temperatury gazu, czemu towarzyszy intensywna kondensacja termiczna. Efektem tego procesu jest wykraplanie się kondensatu wodnego na ściankach przewodu i tworzenie filmu wodnego. Jest to proces transportu masy w mieszaninie. Gaz wprowadzony do przewodu ma zadane stężenie C kondensatu wodnego. Przyjmuje się model kondensacji termicznej określającej intensywność wykraplania się masy kondensatu wodnego na jednostkę powierzchni ścianki μ (∇T , C , ∇p) w zależności od gradientów temperatury i ciśnienia oraz stężenia w warstwie przypowierzchniowej ścianki kominu. Proces P2 dostarcza informacji o polach temperatury i ciśnienia. Poszukiwanymi polami są: pole stężenia pary wodnej w objętości gazu $C(x)$ oraz pole intensywności produkcji kondensatu na ściankach

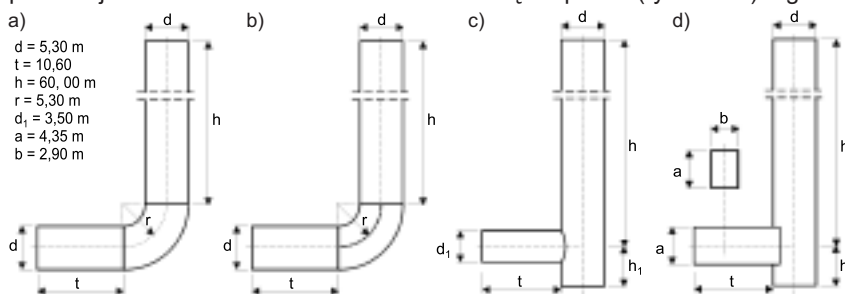
przewodu. Kluczowym problemem jest przyjęcie właściwego modelu kondensacji.

P4. Proces ruchu filmu wodnego. Kondensat wodny tworzy film o zmiennej grubości na ściankach przewodu. Ruch cieczy filmu determinują siły ciężkości oraz siły tarcia wywołane ruchem gazu. Na ruch cieczy ma istotny wpływ stan powierzchni ścianki kominu. Jeżeli prędkość gazu jest dostatecznie duża, to siła tarcia wywołana przepływającym gazem może kierować cząsteczkę kondensatu w górę do wylotu przewodu. Ponadto fluktuacja ciśnienia cieczy na film kondensatu może wywołać zjawisko odrywania się kropelek kondensatu filmu, a następnie wyrzut tych kropelek z kominu.

Ruch cieczy na ściankach przewodu może być opisany analitycznie. Wykorzystując wyniki procesów P2 i P3, można wyznaczyć rozkład kondensatu gromadzącego się na ściankach przewodu. Aby nie dopuścić do wystąpienia warunków wydostawania się dużych kropelek kondensatu na zewnątrz, należy zaprojektować system odprowadzania kondensatu ze ścianek. System ten w postaci rynien i kanałów ma przede wszystkim zapobiegać powstawaniu zbyt grubego filmu koncentratu.

Analiza przepływu spalin w zależności od geometrii czopucha

Jedną z głównych przyczyn kondensacji na ściankach przewodu jest nierównomierny przepływ spalin w przewodzie. Na zaburzenia i fluktuacje tego przepływu ma wpływ geometria przewodu, głównie w obszarze połączenia czopucha z odcinkiem liniowym przewodu. W ramach założeń procesu P1 analizowano przepływ spalin przez 4 przewody różniące się geometrią czopucha (rysunek 1). Zgodnie



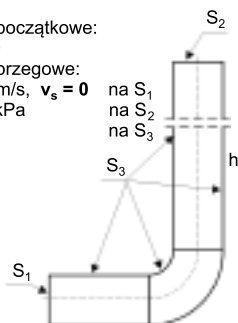
Rys. 1. Schematy przewodów kominowych o zróżnicowanej geometrii czopucha

z założeniami dotyczącymi procesu P1 analizowano proces izotermiczny, przyjmując następujące dane:

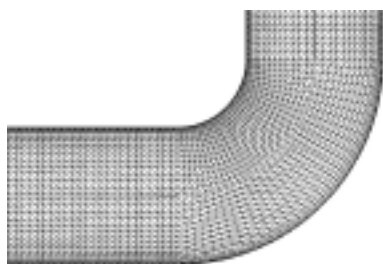
- gęstość gazu $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$;
- współczynnik lepkości dynamicznej $\mu_d = 1,708 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;
- warunki początkowo-brzegowe pokazane na rysunku 2;
- średni wymiar boku elementu skończonego równy 0,27 m;
- liczbę czworociennych elementów skończonych modelu MES ponad 81000 (rysunek 3).

Jako wynik analizy dynamicznej przepływu gazu otrzymano pola prędkości i ciśnienia. Przykładowe rozkłady tych pól na odcinku czopucha pokazano na rysunku 4. Analiza wskazuje na duży wpływ geometrii czopucha na rozkłady prędkości i ciśnienia w początkowym odcinku przewodu kominowego.

warunki początkowe:
 $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = 0$
warunki brzegowe:
 $v_n = -17 \text{ m/s}$, $\mathbf{v}_s = \mathbf{0}$
 $p = 100 \text{ kPa}$
 $v_n = 0$



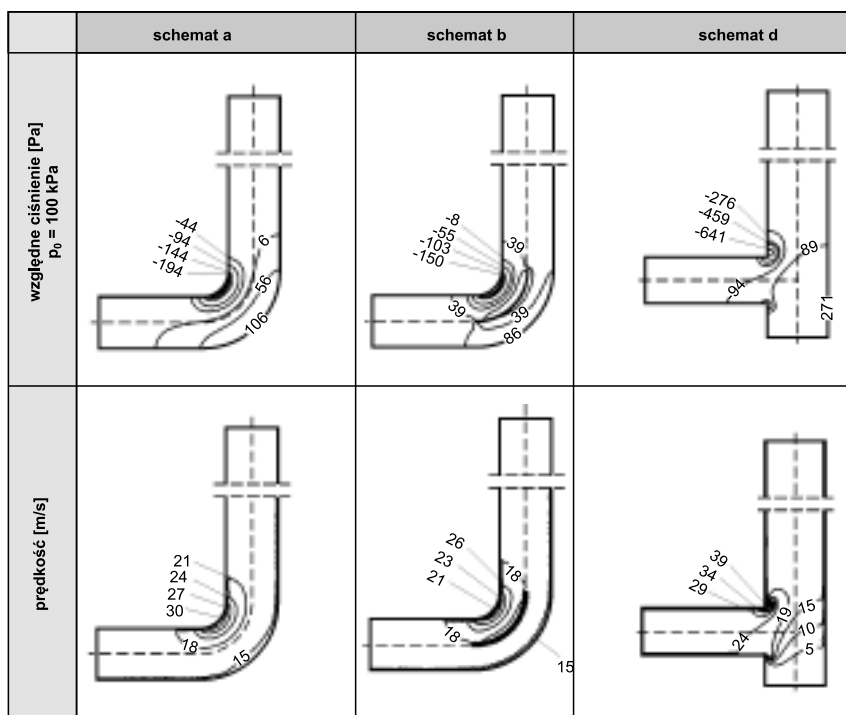
Rys. 2. Warunki początkowo-brzegowe



Rys. 3. Fragment modelu dyskretnego MES

Termodynamika przepływu spalin w przewodzie kominowym

Naturalnym rozszerzeniem analizy procesu P1 przepływu spalin było uwzględnienie wpływu na ten proces efektów cieplnych. Analizowano termodynamiczny proces przepływu gazu ściśliwego (proces P2) dla schematu (a) przewodu o parametrach jak na rysunkach 1 i 5. Przyjęto następujące parametry związane z zagadnieniem cieplnym:



Rys. 4. Pola ciśnienia i prędkości dla poszczególnych schematów przewodu kominowego

- współczynnik przewodnictwa cieplnego gazu $k = 0,025 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$;
- ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu $c_p = 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$;
- współczynnik przejmowania ciepła (przy konwekcji) $\theta = 0,20 \text{ W/(K} \cdot \text{m}^2)$.

W chwili początkowej spalin są tłoczone do przewodu. Analizowano przepływ przez pierwsze 10 s – po tym czasie proces stawał się quasi-ustalony. Kilka charakterystycznych wyników analizy pokazano na rysunku 5.

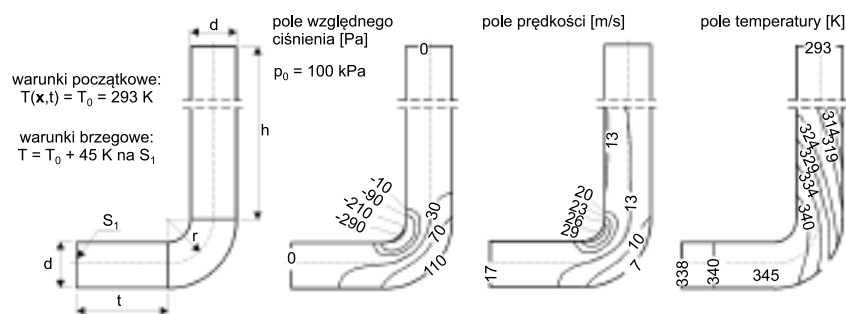
Podsumowanie

W artykule przedstawiono ogólną koncepcję analizy zagadnienia odprowadzania mokrych spalin oraz problemu kwaśnego kondensatu związanego nieodłącznie ze spalinami niskotemperaturowymi. Pokazano, na poziomie modelowania numerycznego, wyniki analizy dwóch pierwszych cha-

rakterystycznych procesów: izotermicznego i termodynamicznego przepływu spalin przez przewody kominowe o kilku typowych kształtach geometrycznych. Już na tym etapie analizy można szacować jakościowo strefy intensywnej kondensacji na ściankach przewodu i wykorzystać je w projektowaniu systemu drenażu kondensatu.

Literatura

- [1] Revised Wet Stacks Design Guide. EPRI edited by C. Dene, Palo Alto, TR-1026742, 2012.
- [2] Anderson D.: The planning and design of effective wet duct/stack system for cool fired utility power plants, CICIND Raport, Vol. 24, No 2, 2008.
- [3] Oruba R., Hawro L.: Wpływ instalacji odsiarczania spalin na rozwiązania techniczne żelbetonowych kominów przemysłowych, XI Konf. Nauk.-Techn. „Energia 2010”, Van Gardena.



Rys. 5. Proces P2: dane analizy; pola ciśnienia, prędkości i temperatury po 2 s