

SPALANIE W NAPĘDACH LOTNICZYCH

LABORATORIUM

Ćwiczenie 4 - Aerodynamika płomieni i stabilność spalania

Wprowadzenie

W większości zastosowań procesy spalania zachodzą w warunkach przepływowych. Kształtowanie się pola przepływu w obszarze realcyjnym nazywane jest aerodynamiką spalin. Szybkość przebiegu reakcji chemicznych, efektywność przekazywania ciepła, stabilność płomienia, a także generacja niektórych zanieczyszczeń zależą od kształtowania się pól przepływu paliwa, utleniacza i produktów spalania. W większości urządzeń, w których zachodzą procesy spalania, paliwo i utleniacz są podawane przez palniki. Przestrzenie za palnikami, w których odbywa się spalanie, nazywane są komorami spalania bądź paleniskami.

Największy wpływ na formowanie się aerodynamiki spalania wywierają palniki, ich konstrukcja i usytuowanie. Zadaniem palników jest doprowadzenie paliwa i utleniacza w wymaganej proporcji do obszaru komory spalania lub paleniska, odpowiednie ich zmieszanie i zapewnienie stabilnego przebiegu procesu spalania. Palniki powinny także zapewnić ograniczenie emisji zanieczyszczeń w wymaganym zakresie, umożliwić optymalną dla danego procesu wymianę ciepła oraz bezpieczną obsługę.

Sposób podawania paliwa i utleniacza do komory paleniskowej zależy od stanu skupienia paliwa. Z zasady utleniaczem jest powietrze, jedynie w niektórych zastosowaniach przemysłowych używa się powietrza wzbogaconego w tlen lub technicznego tlenu (w takim przypadku objętość spalin mniejsza się o około 80%).

W zastosowaniach przemysłowych zwykle paliwo i powietrze podawane są oddzielnymi strumieniami lub do paliwa domieszana jest niewielka ilość powietrza, zwana powietrzem pierwotnym. Pozostała część powietrza, podawana w dalszych strefach, nazywana jest powietrzem wtórnym. Paliwo gazowe podawane jest bezpośrednio do płomienia, natomiast paliwo ciekłe wymaga wcześniejszego odparowania lub rozpylenia.

Na przestrzeni lat skonstruowano wiele rodzajów lotniczych (typów) komór spalania, znacznie różniących się rozmiarami. Koncepcją przepływu i metodami podawania paliwa. Jednak wszystkim tym komorom właściwe są ogólne cechy aerodynamiczne:

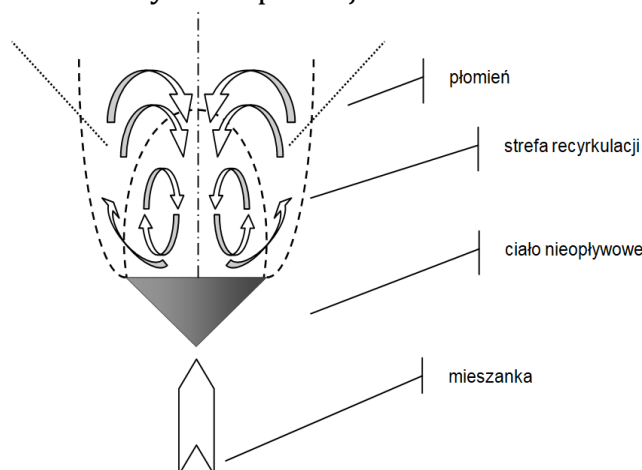
1. Zarówno w dyfuzorach jak i w kanałach pierścieniowych zmniejszana jest prędkość przepływu,
2. W kanałach pierścieniowych, powietrze rozprawdza się po wszystkich strefach spalania, w założonych ilościach, podtrzymując jednakowe warunki przepływu bez szkodliwych oderwań i związanych z nim strat ciśnienia,
3. Wewnątrz komory żarowej wytwarza się strefy recyrkulacji – dla stabilizacji płomieni i strefę efektywnego rozcieńczania produktów spalania,
4. Zapewnia się ekonomiczne wykorzystanie powietrza do chłodzenia ścianek.

„ZPR PWR – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Procesy wymieszania odgrywają szczególnie ważną rolę w strefach spalania i rozcieńczania. Odpowiednie wymieszanie paliwa z powietrzem w pierwotnej strefie spalania jest niezbędne do uzyskania dużych prędkości spalania i minimalizacji powstawania sadzy i tlenków azotu. Dobre wymieszanie spalin z powietrzem w strefie rozcieńczania jest istotne do wytworzenia odpowiedniego rozkładu temperatury gazów na wylocie z komory. Niestety, dobre wymieszanie gazów wymaga odpowiednio długiej komory, co może powodować znaczne straty ciśnienia. Skuteczne konstruowanie komory spalania wymaga znajomości struktury strefy recyrkulacji, głębokości przenikania strug oraz wielkości współczynników wydatku dla różnych rodzajów otworów, przez które przepływa powietrze (włączając szczeliny chłodzenia).

W większości systemów spalania prędkość strumienia mieszanki wielokrotnie przekracza prędkość rozprzestrzeniania się płomienia, dlatego niezbędne jest stosowanie różnych sposobów stabilizacji płomienia. W zagadnieniach dotyczących procesów spalania termin „stabilizacja” jest używany do określania zakresów stosunków mieszanin paliwowo-powietrznych, w których występuje stabilne spalanie lub w znaczeniu maksymalnej prędkości przepływu powietrza, przy której nie następuje jeszcze zerwanie płomienia. Rozróżnienie tych dwóch pojęć stabilizacji jest bardzo ważne. W komorach spalania, w których paliwo jest wstępnie wymieszane z powietrzem, głównym parametrem jest zazwyczaj prędkość zerwania płomienia. W komorach spalania silników turbinowych zwykle najbardziej istotny jest zakres stosunków paliwo-powietrze. Należy jednak pamiętać, że w szczególnych przypadkach działania komory spalania istotne znaczenie mogą mieć obie te wielkości. Wyróżnia się trzy sposoby stabilizacji płomienia: stabilizacja w warstwie przyściennej, stabilizacja ciałem nieopływowym oraz stabilizacja przez zawirowanie płomienia. Pierwszy z tych sposobów polega na lokalnym zmniejszeniu prędkości wypływu mieszanki palnej poniżej prędkości propagacji płomienia. Jest to możliwe, gdyż prędkość mieszanki na ścianie palnika jest zerowa i zwiększa się w kierunku osi palnika. W dwóch pozostałych metodach wytwarzana jest strefa recyrkulacji, w której spalanie ma w przybliżeniu charakter adiabatyczny. Stabilizujące oddziaływanie strefy recyrkulacji polega na przekazywaniu ciepła od gorących spalin z tej strefy do strumienia świeżej mieszanki.

Na skuteczność spalania w strefie pierwotnej decydujący wpływ ma struktura przepływu w tej strefie. Można tu stosować wiele rodzajów przepływu celem wytworzenia toroidalnego przepływu recyrkulacyjnego, który wciąga do wiru części produktów spalania i powoduje ich wymieszanie z napływającym świeżym paliwem i powietrzem. Schemat zjawiska recyrkulacji oraz działanie ciała nieopływowego przedstawiono na rysunku poniżej:



„ZPR PWR – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Zasadniczym wymaganiem stawianym wszystkim silnikom turbinowym jest poprawna stabilizacja płomienia w pełnym zakresie ich działania. Jednym z najbardziej skutecznych sposobów wytworzenia w strefie pierwotnej przepływu recyrkulacyjnego jest zamocowanie zawirowacza w kopule komory, wokół wtryskiwacza paliwa. Jeśli wytworzone zawirowanie jest odpowiednio duże, prowadzi to do rozpadu wiru i powstania, w centralnej części strumienia, strefy recyrkulacji.

Do celów stabilizacji mogą być wykorzystywane także tzw. ciała nieopływowe, zwane też ciałami o złym kształcie opływowym lub statecznikami mechanicznymi (z ang. bluff-body flameholder). Są to najczęściej stożki, dyski, czy pierścienie stożkowe. Tego typu stabilizatory płomienia stosuje się zazwyczaj w komorach spalania dopalaczy.

Cechą charakterystyczną stabilizacji płomienia za pomocą ciał nieopływowych jest istnienie w śladzie aerodynamicznym za tymi ciałami obszarów ze zmniejszonymi, a nawet z odwrotnie skierowanymi prędkościami przepływu mieszanki lub spalin. Aerodynamikę przepływu za statecznikiem płomienia można rozpatrywać conajmniej z kilku punktów widzenia: geometrii, dynamiki przepływu, stosunków energetycznych. Obszar za statecznikiem płomienia charakteryzuje się dużą intensywnością turbulencji, która może się zmieniać w bardzo szerokim zakresie.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem spalania paliw gazowych oraz badanie zachowania płomienia w zależności od prędkości wypływu paliwa z dyszy. Sprawdzana jest także skuteczność stabilizacji płomienia przy wykorzystaniu różnego typu stabilizatorów (obserwacja działania palników gazowych różnego typu). Sprawdzana jest też skuteczność działania stabilizacji płomienia za pomocą ciała nieopływowego.

Przebieg ćwiczenia

1. W trakcie pierwszej części ćwiczenia obserwuje się zachowanie płomienia gazowego w zależności od prędkości wypływu paliwa z dyszy palnika dyfuzyjnego. Mierzona jest wysokość płomienia oraz jego uniesienie ponad dyszę podczas zwiększania, a następnie zmniejszania prędkości wypływu. Określa się charakter spalania ze względu na wymieszanie gazu palnego z powietrzem i na rodzaj przepływu.
2. W trakcie drugiej części obserwuje się działanie palników gazowych wyposażonych w różnego rodzaju sposoby stabilizacji płomienia.
3. W trzeciej części zajęć badane jest zjawisko stabilizacji płomienia gazowego różnego rodzaju ciałami nieopływowymi.

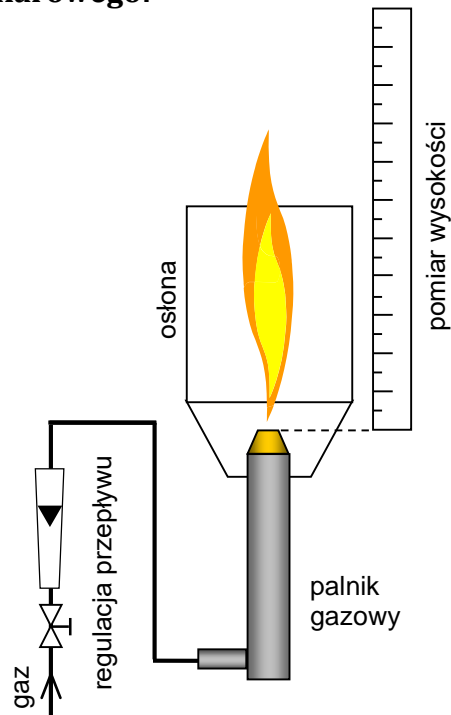
Schematy stanowisk pomiarowych oraz sposób wykonania pomiarów i opracowania wyników w sprawozdaniu

Ad. 1 Stanowisko pomiarowe wyposażone jest w palnik dyfuzyjny podłączony do miejskiej sieci gazowej. Dzięki rotametrom możliwe jest sterowanie strumieniem gazu dostarczanym do palnika, który ma wpływ na zachowanie się płomienia. Podczas zmian strumienia wypływu paliwa mierzona jest wysokość płomienia oraz uniesienia

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

płomienia. Odczytywane one są przy pomocy miar (o różnym zakresie skali) zamontowanych przy obudowie palnika.

Schemat stanowiska pomiarowego:



Ćwiczenie rozpoczyna się od uruchomienia palnika przy niskiej wartości przepływu gazu palnego (kilkadziesiąt dm³/h). Odczytuje się dokładny strumień objętości gazu oraz wysokość płomienia. Następnie zwiększany jest strumień wypływu (aż do sytuacji uzyskania maksymalnego, możliwego do uzyskania przy zamontowanej dyszy przepływu) oraz mierzone są: wysokość płomienia oraz uniesienia płomienia. Każdorazowo określone są też cechy charakterystyczne powstałego płomienia. W kolejnym kroku pomiary są powtarzane podczas zmniejszania strumienia gazu (dla tych samych wartości strumienia objętości). Obserwowane i odczytywane są różnice wysokości i cech charakterystycznych płomienia.

W sprawozdaniu należy umieścić wykres przedstawiający zależność wysokości płomienia (h_{pt}) oraz wysokość jego uniesienia (h_u) w funkcji liczby Reynoldsa (Re). Obie wielkości powinny być naniesione na jeden układ współrzędnych.

W celu wyznaczenia liczby Reynoldsa należy przeprowadzić następujące obliczenia:

Wyznaczenie prędkości wypływu gazu z dyszy palnika:

$$u = \frac{q'_{v \text{ gazu}}}{A}$$

gdzie: u – prędkość wypływu gazu z dyszy palnika, m/s,
 $q'_{v \text{ gazu}}$ – strumień objętości gazu palnego, m³/s,
 A – pole przekroju dyszy palnika, m².

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Ponieważ strumień objętości gazu palnego mierzony jest rotametrem wyskalowanym dla powietrza, należy dokonać korekty wyniku wg poniższego wzoru:

$$q'_{gaz} = q_{vgazu} \sqrt{\frac{\rho_{pow}}{\rho_{gazu}}}$$

gdzie: q'_{gazu} – rzeczywisty strumień objętości gazu palnego, dm^3/h ,
 q_{gazu} – zmierzony rotametrem dla powietrza strumień objętości gazu, dm^3/h ,
 ρ_{pow} – gęstość powietrza, kg/m^3 ,
 ρ_{gazu} – gęstość gazu palnego, kg/m^3 .

Wyznaczenie liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu}$$

gdzie: **Re – liczba Reynoldsa**, -
 u – prędkość wypływu gazu z dyszy palnika, m/s ,
 d – średnica dyszy palnika, m ,
 ν – kinematyczny współczynnik lepkości gazu, m^2/s , gdzie:

Kinematyczny współczynnik lepkości powinien zostać zaczerpnięty ze źródła literaturowego dla danych warunków panujących w laboratorium. W przypadku odnalezienia dynamicznego współczynnika lepkości skorzystać należy z poniższego przeliczenia:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

η – dynamiczny współczynnik lepkości gazu, $Pa \cdot s$,
 ρ – gęstość gazu, kg/m^3 .

Należy pamiętać o wyrażeniu używanych w obliczeniach wielkości we właściwych jednostkach układu SI.

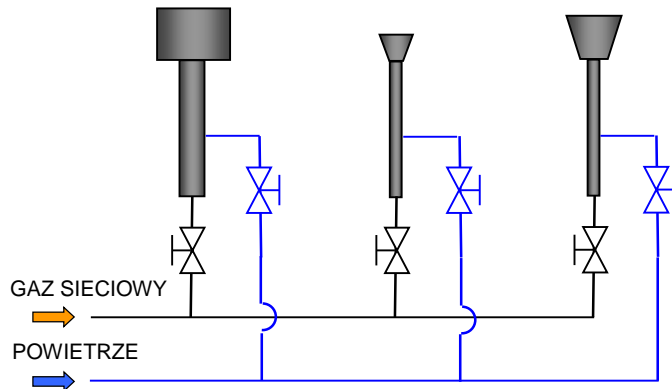
Zestawienie mierzonych podczas pomiarów wartości

numer pomiaru	strumień objętości gazu	wysokość płomienia	wysokość uniesienia płomienia	Uwagi dotyczące zachowania płomienia
	$q_{gaz}, dm^3/h$	h_{pl}, cm	h_{un}, cm	
1.				
2.				
3.				
...				

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Ad. 2 W dalszej części ćwiczenia prezentowane są trzy palniki gazowe (A, B, C), w których realizowane są różnego typu sposoby stabilizacji płomienia.

Schemat stanowiska pomiarowego:



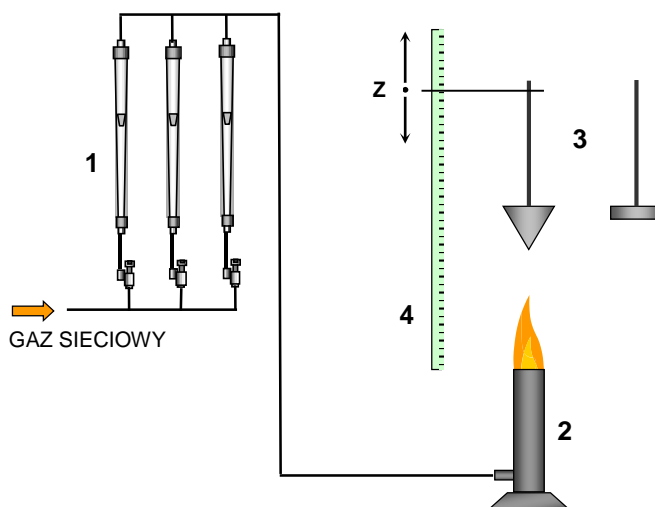
Stabilizacja płomienia za pomocą:

- A. spalania powierzchniowego
- B. ciała nieoptywowego
- C. zawirowywacza

W sprawozdaniu opisać należy obejrzone palniki oraz realizowane w nich sposoby stabilizowania płomienia. Opisane powinny zostać także typy płomieni, które były uzyskane.

Ad. 3 W ostatniej części ćwiczenia zbadane będzie działanie stabilizacji płomienia gazowego przy wykorzystaniu ciała nieoptywowego. Użyte będą do tego celu stabilizatory różnego kształtu (walec i stożek o różnych średnicach). Podczas prowadzonych badań sprawdzony zostanie wpływ typu ciała nieoptywowego oraz jego odległości od dyszy palnika na podatność płomienia na zerwanie przy zwiększaniu strumienia objętości wypływu gazu.

Schemat stanowiska pomiarowego:



Stabilizacja płomienia ciałem nieoptywowym

- 1. rotametry z zaworami do regulacji strumienia gazu sieciowego
- 2. palnik dyfuzyjny
- 3. ciała nieoptywowe
- 4. pomiar położenia ciała nieoptywowego



„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Literatura:

1. „Spalanie i paliwa”, pod red. W. Kordylewskiego, PWr, Wrocław 2008
2. „Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych – procesy, obliczenia, badania”, R. Łapucha, Warszawa 2004
3. „Komory spalania silników turbinowych – organizacja procesu spalania”, M. Gieras, Warszawa 2010