

Wyniki badań laboratoryjnych i przemysłowych dyfuzyjnego palnika gazowego

Results of the laboratory and industrial tests of diffusion gas burner

MARIUSZ WNĘK, ROBERT ŁUDZIENI, STANISŁAW GIL, MACIEJ ROZPONDEK

DOI 10.36119/15.2023.9.2

W Polsce paliwa kopalne wykorzystywane są do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Kluczowym aspektem przemysłowego wykorzystania urządzeń cieplnych jest emisja dwutlenku węgla do atmosfery, co może wpływać na efekt cieplarniany prowadzący do globalnego ocieplenia. Spalanie paliw gazowych również szkodzi środowisku, szczególnie w aspekcie emisji NO_x . Głównym celem pracy była analiza wyników testów badanego palnika dyfuzyjnego. Przeanalizowano również warunki, w których możliwe jest obniżenie poziomu stężeń NO_x . W artykule przedstawiono wyniki badań procesów spalania w gazowym palniku dyfuzyjnym stosowanym w przemysłowych urządzeniach cieplnych oraz w warunkach laboratoryjnych. Scharakteryzowano i przeanalizowano parametry techniczne, energetyczne i eksploatacyjne komór spalania w urządzeniach cieplnych. Określono wpływ stopnia zawirowania substratów spalania na stężenia NO_x w spalinach. Poszukiwano rozwiązania, które powinno być zastosowane w celu obniżenia poziomu stężeń NO_x , ponieważ może to prowadzić do innowacyjnego rozwiązania o pozytywnym wpływie na środowisko. W części dyskusyjnej wskazano, które rozwiązania analizowane w artykule są innowacyjne i podzielono je na innowacje procesowe i produktowe. W testowanym palniku dyfuzyjnym kąt zawirowania powietrza wynoszący 60° zapewnia najlepsze efekty ekologiczne w zakresie minimalizacji emisji NO_x . W typowych palnikach dyfuzyjnych preferowane są wysokie prędkości wypływu substratów (zwykle do 60 m/s). Większe prędkości wypływu (np. w palnikach szybkołamiennych) mogą prowadzić do nadmiernej emisji wibroakustycznej, która jest szkodliwa dla pracy i trwałości urządzenia. Efekty proekologiczne prezentowanej technologii są bardzo ważnym efektem praktycznym. Szczególnie w dzisiejszych czasach, gdy istnieje bardzo silna potrzeba zmniejszania negatywnego wpływu procesów produkcyjnych na środowisko, innowacje prowadzące do obniżenia stężeń NO_x mogą być postrzegane jako bardzo ważne dla biznesu.
Słowa kluczowe: spalanie paliw, komora paleniskowa, urządzenie cieplne, palniki gazowe, stężenie NO_x .

In Poland, fossil fuels are used to produce electricity and heat. A key aspect of the industrial use of thermal equipment is the emission of carbon dioxide into the atmosphere, which can affect the greenhouse effect leading to global warming. The combustion of gaseous fuels also harms the environment, particularly in terms of NO_x emissions. The main aim of the study was to analyze the test results of the innovative burner. The conditions under which NO_x concentrations can be reduced were also analyzed. The article presents the results of research on combustion processes in laboratory and operating conditions (hearth systems) in industrial thermal devices. Combustion planes of several categories of diffusion gas burners were studied under laboratory conditions. The technical, energetic and operational parameters of combustion chambers in thermal devices were characterized and analyzed. The influence of the degree of turbulence of the combustion substrates on NO_x concentrations in the flue gas was determined. They were looking for a solution that should be used to reduce NO_x concentrations, as this could lead to an innovative solution with a positive environmental impact. The discussion part indicates which solutions analyzed in the article are innovative and divides them into process and product innovations. In the diffusion burner tested, an air swirl angle of 60° provides the best environmental results in terms of minimizing NO_x emissions. In typical diffusion burners, high substrates discharge velocities (usually up to 60 m/s) are preferred. Higher outflow velocities (e.g., in fast-flame burners) can lead to excessive vibro-acoustic emissions, which are detrimental to the operation and durability of the device. The environmental effects of the presented technology are a very important practical effect. Especially nowadays, when there is a very strong need to reduce the negative impact of production processes on the environment. Innovations leading to lower NO_x concentrations can be seen as very important for the business.
Keywords: fuel combustion, combustion chamber, thermal device, gas burners, NO_x concentration.

Wprowadzenie

Komory spalania w urządzeniach cieplnych stanowią przeważnie przestrzeń zamkniętą, w których zachodzi konwersja energii chemicznej paliwa. Jeżeli w urz-

czeniu cieplnym komora spalania jest także komorą roboczą, to wówczas konwersja energii chemicznej paliw zachodzi jednocześnie z przepływem ciepła. W niektórych urządzeniach cieplnych w komorach spalania przebiega tylko proces kon-

wersji energii chemicznej, a produkty spalania o wymaganych parametrach termochemicznych, przepływają następnie do przestrzeni, w której są realizowane procesy technologiczne. W specjalnych konstrukcjach urządzeń cieplnych stosuje się

Dr inż. Mariusz Wnęk, <https://orcid.org/0000-0003-2485-7765> – Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska, Katowice

Dr inż. Robert Łudziński – AUMA Polska, Sosnowiec;

Dr hab. inż. Stanisław Gil, prof. PŚ, <https://orcid.org/0000-0003-3397-0620> – Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska, Katowice

Dr inż. Maciej Rozpondek – emerytowany pracownik Politechniki Śląskiej.

Adres do korespondencji / Corresponding author: Mariusz.wnek@polsl.pl

nawet kilka stref technologicznych o zróżnicowanych parametrach termodynamicznych komór spalania. Taka realizacja procesu technologicznego umożliwia również spełnienie wymogów ekologicznych m.in. przez dopalanie substancji palnych przed wypływem spalin z urządzenia ciepłego. W specjalnych technologiach np. pokrywania blach trapezowych stosuje się komory dopalania gazów i substancji z procesów technologicznych w celu ochrony środowiska przed ich nadmierną emisją do atmosfery. Podobną rolę spełniają także tzw. świece dopalające usytuowane w kominach, których zadaniem jest spalanie nadmiarowych ilości paliw odpadowych z procesów technologicznych. Do opalania kotłów energetycznych stosowanych w ciepłownictwie stosuje się przede wszystkim paliwa stałe – węgiel kamienny i brunatny oraz paliwa gazowe i znacznie rzadziej paliwa ciekłe. W przypadkach, gdy elektrownie lub ciepłownie znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie źródeł pozyskiwania niskokalorycznych gazów odpadowych lub gazu ziemnego z odmetanowywania kopalń można dotychczasowe kotły, w których spalano węgiel kamienny przystosować do ich spalania. Sposób adaptacji kotła rusztowego WR-10, w którym uprzednio był spalany węgiel kamienny, do opalania gazem ziemnym z odmetanowywania kopalń – praktycznie bez dokonywania większych zmian konstrukcyjnych został przedstawiony w literaturze [1]. W Polsce liczbę kotłów z rusztem mechanicznym, w których spala się węgiel kamienny, szacowano na ponad 10 000 sztuk. Dla zaspokojenia potrzeb grzewczych użytkowników stosowane są także kotły z rusztem stałym, których liczbę trudno jest określić. Wynika to z relatywnie niskiej i stabilnej ceny węgla kamiennego i prostej obsługi kotłów rusztowych. Przy zmniejszającym się wydobyciu węgla kamiennego i konieczności spełnienia coraz ostrzejszych kryteriów ekologicznych celowym jest, w przejściowym okresie transformacji energetycznej, przystosowanie tradycyjnych kotłów rusztowych (spalających węgiel kamienny) do opalania paliwami gazowymi, głównie gazem ziemnym. Taka zamiana paliwa jest wykonywana przy relatywnie niewielkich nakładach finansowych, powodując wymierne korzyści energetyczne i ekologiczne. Dzięki istniejącej infrastrukturze i wsparciu instytucji państwowych dla ciepła systemowego jest możliwe podłączenie do sieci ciepłowniczych nowych budynków, w tym głównie budynków wielorodzinnych. Systemowe zapewnienie dostaw ciepła sieciowego jest preferowane

w rozdziale środków rozwoju w Polityce Energetycznej Polski do roku 2040 – PEP2040. W przygotowywanym projekcie rozwoju ciepłownictwa w Polsce zakłada się zmianę sposobu opalania kotłów energetycznych z paliwa stałego, głównie węgla kamiennego, na paliwa gazowe i odnawialne źródła energii [2]. W sektorze ciepłowniczym zużywa się w ciągu roku od około 24 do 26 mln ton węgla, po 12 mln ton w systemach ciepłowniczych i w budynkach indywidualnie ogrzewanych [3]. Udział ciepła wytwarzanego z węgla kamiennego wynosił w 2019 roku około 75% [4]. Według szacunków GUS w Polsce jest około 14 mln gospodarstw domowych, które zużywają dla celów grzewczych około 66-70% energii końcowej ciepła, w tym ogrzewanie wody wynosi 15% [5]. Cechą charakterystyczną sektora ciepłowniczego jest jego lokalny charakter. Preferowanie odnawialnych źródeł energii w sieciach ciepłowniczych jest zgodne z przyjętą w 2018 roku Dyrektywą RED II (Renewable Energy Directive II) oraz w odniesieniu do RED III [6]. Zmiana sposobu opalania urządzeń energetycznych wytwarzających ciepło jest spowodowana przez wzrost cen uprawnień do emisji CO₂ i konieczność dostosowania się do implementacji dyrektywy MCP (Medium Combustion Plants Directive), która nakłada na źródła wytwórcze średniej mocy od 1 do 50 MW spełnienie rygorystycznych wskaźników dopuszczalnych emisji do atmosfery SO₂, NO_x oraz pyłów. W Polsce w 2016 roku działało 529 systemów ciepłowniczych, z których 86% było zasilanych węglem, 9% gazem ziemnym, 3% olejem i innymi paliwami oraz 1% biomasą [7]. Ciekawe badania działania systemu ciepłowniczego dla różnych warunków pracy zaprezentowano w [8]. W 2019 roku w Polsce wytworzało ciepło 375 przedsiębiorstw. W całkowitym zużyciu ciepła na cele grzewcze ciepło systemowe stanowi 25%, a 75% niesystemowe źródła ciepła – indywidualne ogrzewanie gospodarstw domowych, handel, usługi, przemysł i budownictwo. W koncepcji transformacji energetycznej w Europejskim Zielonym Ładzie rola gazu ziemnego nie została sprecyzowana, a jedynie wskazano na konieczność obniżenia emisyjności z sektora gazowego. Pomimo takiego stanowiska UE w założeniach strategicznych w procesie transformacji energetycznej w Polsce i w większości krajów środkowoeuropejskich uznaje się istotne znaczenie gazu ziemnego, jako paliwa bilansującego energię opartą o wciąż niestabilne źródła odnawialne. Tak więc w Polsce gaz ziemny będzie w okresie przejściowym częściowo zastępować węgiel kamienny i brunatny,

spełniając jednocześnie funkcję stabilizatora krajowego systemu energetycznego. Zużycie gazu ziemnego w Polsce systematycznie rośnie i w 2019 roku jego zapotrzebowanie wynosiło 209,9 TWh i było wyższe od zużycia z roku 2018 o 5,56% [5].

Charakterystyka eksploatacyjna układów opalania wybranych urządzeń ciepłych

W badaniach eksploatacyjnych stwierdzono zwiększenie sprawności cieplnej kotła WR-10 o około 15% przy jego opalaniu gazem ziemnym z odmetanowania kopalń. Zastąpienie opalania kotła gazem ziemnym powoduje także wymierny efekt ekologiczny, gdyż przykładowo emisja względna diitlenku węgla z palenisk opalanych węglem kamiennym wynosi 96 g CO₂/MJ, podczas gdy ze spalania gazu ziemnego jedynie 54 CO₂/MJ. Inny przykład zachodzi, gdy dotychczasowa konstrukcja kotła, np. OP-230 przewidziana do spalania pyłu węglowego jest dostosowywana do spalania nadmiarowych ilości odpadowych gazów niskokalorycznych z procesów technologicznych, czyli tak jak to jest realizowane w kotłach OPG-230 [9]. Priorytetem jest wówczas pełne zagospodarowanie gazu niskokalorycznego w kotłach elektrociepłowni, a kotły spełniają funkcję bufora w gospodarce gazowej przedsiębiorstwa. Odpadowy gaz niskokaloryczny przeważnie jest spalany w komorze paleniskowej łącznie z węglem kamiennym, pomimo znaczącego obniżenia sprawności cieplnej kotła. W sytuacjach braku możliwości zagospodarowania gazu odpadowego w innych urządzeniach ciepłych, kotły mogą być opalane tylko gazem niskokalorycznym. Powoduje to jednak dodatkowe obniżenie sprawności cieplnej kotła. Konstrukcje dwupaliwowych kotłów energetycznych są wyposażone w oddzielne systemy spalania dwóch paliw, w których stosuje się usytuowanie palników gazowych i pyłowych w różnych konfiguracjach.

Niskokaloryczny gaz odpadowy, ze względu jego niską wartość opałową, najczęściej jest mieszany z gazowym paliwem bogatym dla zwiększenia jego kaloryczności [9]. W urządzeniach ciepłych, a szczególnie w piecach obrotowych, stosuje się zintegrowane konstrukcje palników wielopaliwowych, praktycznie dwupaliwowych. Przeważnie stosuje się do opalania alternatywnie dwa paliwa – wysokometanowy gaz ziemny lub olej opałowy i pył węglowy. Konstrukcje palników dwupaliwowych są najczęściej dwu-, trój- lub czteroprzewodowe. W palnikach dwu-

przewodowych stosuje się rozdzielanie powietrza tj. zewnętrznym przewodem doprowadzany jest aerozol pyłu węglowego i powietrza pierwotnego, a pozostałą część – powietrze wtórne – dostarcza się centralnie. Na rys. 1 przedstawiono schemat palnika dwupaliwowego pyłowo-gazowego, a na rys. 2 – zmodernizowaną wersję dysz palnikowych, poprawiającą warunki tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej przed wypływem do komory spalania.

Z analizy działania palników dwupaliwowych wynika, że palniki dwuprzewodowe stwarzają mniejsze możliwości regulacji płomienia w stosunku do konstrukcji wieloprzewodowych. Układy opalania w urządzeniach cieplnych powinny być

lania urządzeń cieplnych zalicza się przede wszystkim [9]:

- wartości objętościowego i powierzchniowego strumienia ciepłego \dot{q}_V i \dot{q}_A ,
- stosunek zasięgu (długości) płomienia do długości komory paleniskowej,
- stopień zawirowania strumieni powietrza i paliwa gazowego S – wypływających do komory spalania.

Wartości stosowanych strumieni cieplnych objętościowych \dot{q}_V i powierzchniowych \dot{q}_A zależą głównie od wydajności i parametrów termicznych realizowanych procesów technologicznych. W oparciu o te wskaźniki przyjmuje się wymiary komór spalania urządzeń cieplnych. W tab. 2 zamieszczono zalecane wartości

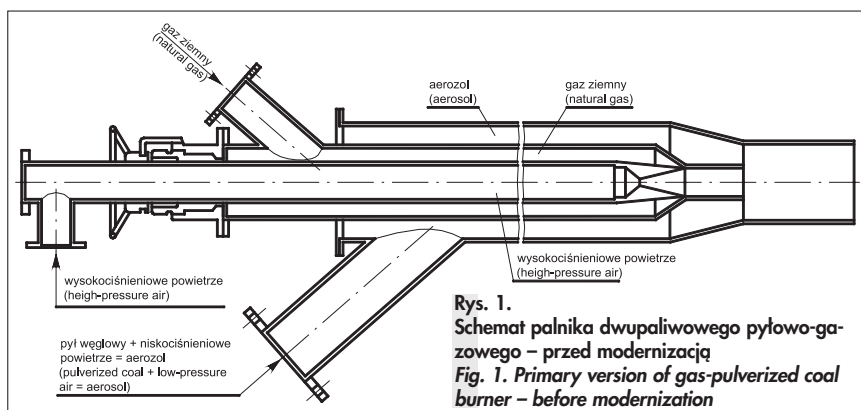
ściej założonej temperatury, następuje wyłączenie palnika i jego ponowne załączenie, gdy wartość temperatury obniży się do zadanej wartości,

- b) „duża moc – mała moc” (*full power/low power*), czyli palnik działa w dwóch zakresach, tj. przy całkowitej i obniżonej mocy cieplnej, która przeważnie wynosi od 30 do 50% i wówczas nie następuje jego cykliczne wyłączenie,
- c) płynna zmiana mocy cieplnej (*smooth change of heat power*), czyli realizacja procesu nagrzewania zgodnie z przyjętą charakterystyką termiczną.

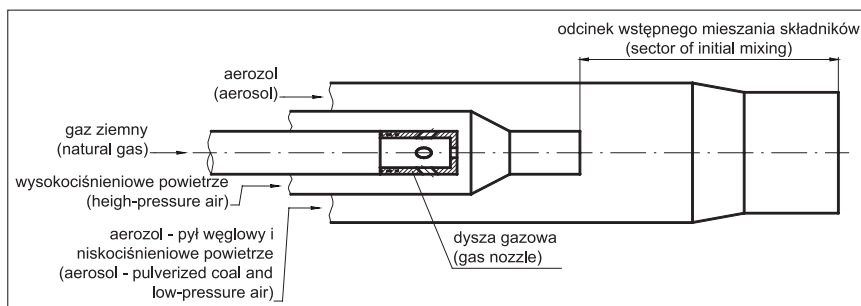
Przedstawione sposoby działania palników gazowych umożliwiają w różnym stopniu, w zależności od przyjętego systemu, m.in.: zwiększenie recyrkulacji i wyrównania temperatury w komorze paleniskowej – głównie systemy (a) i (b), dokładny przebieg założonego sposobu nagrzewania czynnika – systemy (a) i (b) oraz szczególnie (c), obniżenie emisji zanieczyszczeń gazowych – wszystkie sposoby działania.

Decydującym czynnikiem w usytuowaniu palników w komorach paleniskowych jest zapewnienie wymaganych wartości strumieni przepływu ciepła. Najczęściej w założeniach projektowych palników dyfuzyjnych przyjmuje się wartości prędkości paliwa gazowego i powietrza $w_{g,a} = 20 \div 50$ m/s i stosunek prędkości powietrza do paliwa gazowego w_a/w_g równy około 1,2. Optymalne działanie palników w przedstawionych systemach wymaga zastosowania złożonych konstrukcji układów opalania – ścieżek gazowych i powietrznych, ich odpowiedniego opomiarowania dla zapewnienia właściwej regulacji automatycznej procesów doprowadzenia substratów i kontroli parametrów cieplnych komór paleniskowych.

Charakterystycznym parametrem w komorze jest stosunek średniej do maksymalnej entalpii spalin. Przy założeniu stałej wartości pojemności cieplnej właściwej spalin, można ją wyrazić stosunkiem temperatury średniej T_{sr} do temperatury maksymalnej T_{max} spalin. Dla optymalnego, wyrównanego rozkładu temperatury w płomieniu wartość $T_{sr}/T_{max} \rightarrow 1$. Przestrzeń zamknięta – komora paleniskowa urządzeń cieplnych – w istotny sposób zmienia warunki procesu spalania, ponieważ niemal nie występuje w niej niekontrolowany dopływ utleniacza z otoczenia a jednocześnie zachodzi recyrkulacja spalin. Powoduje to zwiększenie długości płomienia w porównaniu z przestrzenią otwartą. W urządzeniach cieplnych zasięg turbulentnego płomienia, ze względu na występujące fluktuacje, powinien wynosić maksymalnie 0,9 długości komory spalania. Dla danej konstrukcji palnika na



Rys. 1. Schemat palnika dwupaliwowego pyłowo-gazowego – przed modernizacją
Fig. 1. Primary version of gas-pulverized coal burner – before modernization



Rys. 2. Propozycja modernizacji końcowego odcinka konstrukcji palnika dwupaliwowego pyłowo-gazowego
Fig. 2. The modernization proposal of the construction final section of the dual-fuel dust-gas burner

zaprojektowane z uwzględnieniem możliwych zmian w podaży paliw przy zapewnieniu optymalnej realizacji procesu technologicznego. W warunkach zmiennej podaży paliw, powinny być osiągane założone standardy jakościowe produktu finalnego przy spełnieniu kryteriów ekonomicznych i ekologicznych. Parametry techniczno-eksploatacyjne urządzeń cieplnych, powinny spełniać standardy energetyczno-ekologiczne określone w wymaganiach Najlepszych Dostępnych Technik – BAT.

Parametry techniczno-energetyczne komór spalania

Do podstawowych parametrów energetycznych i eksploatacyjnych komór spa-

objętościowych i powierzchniowych strumieni cieplnych – \dot{q}_V i \dot{q}_A dla typowych komór spalania.

Do pełnej charakterystyki eksploatacyjnej komór paleniskowych są konieczne także dane dotyczące wartości parametrów energetycznych i gazodynamicznych palników oraz płomienia. Na jakość realizowanych procesów spalania i przepływu ciepła decydujący wpływ wywiera dobór liczby i mocy palników oraz ich usytuowanie w komorze paleniskowej. W ostatnim okresie stosuje się na szeroką skalę nowoczesne sposoby sterowania palnikami zwykle działające w systemach:

- a) „załącz/wyłącz” (*on/off*), tj. całkowita moc i po osiągnięciu założonej wartości parametru sterującego, najczę-

dlugość płomienia wpływają wartości prędkości wypływu paliwa gazowego i powietrza, liczba nadmiaru powietrza, temperatura substratów i rodzaj przestrzeni spalania – otwarta czy zamknięta. Przedstawiana w literaturze zależność analityczna stosunku długości płomienia dyfuzyjnego w przestrzeni zamkniętej L_{pt-z} do długości płomienia w przestrzeni otwartej L_{pt-o} jest funkcją parametru recyrkulacji Thringa-Newby – Θ [10].

sunku do badań własnych spalania gazu ziemnego w tych samych warunkach – rys. 3. Proces spalania prowadzono przy wartości objętościowego strumienia cieplnego komory zawierającego się w typowym zakresie działania urządzeń grzewczych, tj. $\dot{q}_V = 106 \text{ kW/m}^3$. Charakter oddziaływania gazów spalinowych na bryłę płomienia oprócz parametru Θ , zależy także od parametrów wypływowych substratów z dyszy palnika. Efektywność obniżenia

recyrkulujących gazów (spalin) można określić analitycznie. Jeżeli wartość stosunku d_e/L jest zbliżona do 0,1, to wówczas błąd obliczania recyrkulującego strumienia gazów może dochodzić do kilkunastu procent [10].

Ekologiczne aspekty użytkowania paliw gazowych w urządzeniach ciepłych

W dyfuzyjnych palnikach gazowych bardzo często stosuje się zawirowanie substratów, które powoduje m.in. intensyfikację ich mieszania. W przypadku zawirowania wypływających strumieni substratów pojawiają się promieniowe i osiowe gradienty ciśnienia wpływające na pole prędkości. Parametrem opisującym ilościowo zjawisko zawirowania jest stopień zawirowania strugi S zdefiniowany wyrażeniem stosunku strumienia pędu liniowego i średnicy wypływowej strugi [10]. Ze względu na wartość bezwymiarowego kryterium S , wyróżnia się następujące rodzaje zawirowania strug substratów spalania: słabe – $S \leq 0,2$; umiarkowane – $S < 0,6$; silne – $S \geq 0,6$. Przy stopniu zawirowania $S > 0,6$ pojawia się przepływ recyrkulacyjny w osi strugi. Takie zjawisko przepływu „zwrotnego” dla $S \geq 0,6$ zostało wykorzystane m.in. w konstrukcjach palników płaskopłomienych o niskiej emisji tlenków azotu. W przeprowadzonych badaniach procesów spalania gazu ziemnego przy wysokich temperaturach podgrzewu powietrza wykazano, że zwiększenie stopnia zawirowania powietrza $S_{q1} = 5,9$ do $S_{q2} = 7,7$ wpływa na istotne obniżenie stężenia tlenków azotu NO_x w spalinach – rys. 4.

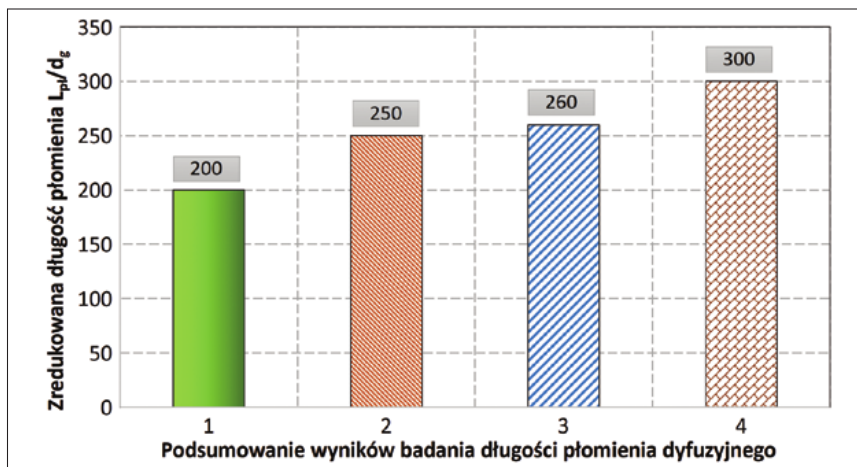
Przyszłościowym rozwiązaniem w ciepłownictwie może być zastosowanie gazu z podziemnego zgazowania węgla GPZW. Zgazowanie podziemne jest procesem, w którym węgiel kamienny po zapłonie podlega pirolizie i zgazowaniu w przemieszczającej się strefie reakcji. Zgazowanie podziemne jest szczególnie atrakcyjne w przypadku konieczności pozyskiwania węgla z pokładów głębokich, z których jego wydobycie wymaga stosowania bardzo dużych nakładów inwestycyjnych. Podziemne zgazowanie węgla prowadzone w sposób ciągły (jednofazowy) przy semistabilnym zasilaniu medium zgazowującego, umożliwia uzyskanie gazu niskokalorycznego z przeznaczeniem dla potrzeb energetycznych. Przy tzw. „dwufazowym” zgazowaniu podziemnym węgla polegającym na okresowej zmianie utleniacza można zwiększyć zawartość wodoru w produkowanym gazie do powyżej 40%

Tab. 1. Zalecane wartości strumieni cieplnych w komorach paleniskowych – \dot{q}_V i \dot{q}_A
Table 1. Recommended values of heat fluxes in combustion chambers – \dot{q}_V and \dot{q}_A

Komora spalania urządzenia cieplnego – typ paleniska	Objętościowy strumień cieplny \dot{q}_V	Powierzchniowy strumień cieplny \dot{q}_A	Uwagi
	kW/m^3	kW/m^2	
Kotłowe, warstwowe z mechanicznym rusztem taśmowym	250-300	1000-2000	dopuszczalne obciążenie masowe rusztu węglem kamiennym – $\dot{q}_{ruszt} = 80-500 \text{ kg w.k./m}^2\text{h}$
Kotłowe pyłowe	150-250	2000-4000	
Kotłowe na gaz ziemny lub mazut	300-350	2000-5000	
Kotły odzysknicowe**	200-230	8000-9000	**radiacyjno-konwekcyjne
Piece grzewcze	100-300	*	*zależnie od strefy urządzenia cieplnego

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań własnych zredukowanej długości płomienia dyfuzyjnych, tj. stosunku długości płomienia L_{pt} do średnicy dyszy gazowej d_g przy spalaniu gazu ziemnego – 3 i ich porównanie z danymi literaturowymi – 2. W przypadku wypływu symulacyjnego gazu ziemnego zaazotowanego (32% N_2) – 4, nastąpiło zwiększenie zredukowanej długości płomienia o około 15,4%, w sto-

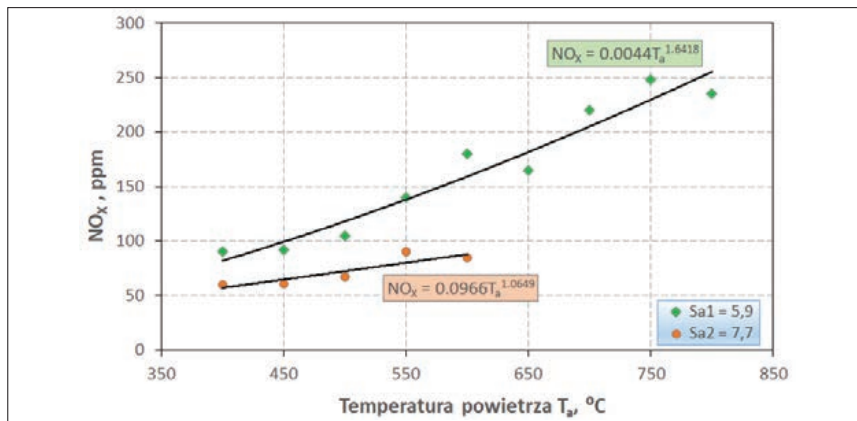
maksymalnej temperatury w płomieniu jest zależna nie tylko od stopnia recyrkulacji, ale również od miejsca kontaktu recyrkulujących strug spalin ze strefą reakcji chemicznych płomienia. W przypadku małych wartości stosunku średnicy ekwiwalentnej d_{ek} (funkcji średnicy dyszy paliwa gazowego i powietrza) palnika dyfuzyjnego do połowy wysokości ściany „palnikowej” L , czyli dla $d_e/L \leq 0,05$ strumień masy



Rys. 3.

Porównanie wyników badań własnych zredukowanej długości płomienia dyfuzyjnego w przestrzeni otwartej i zamkniętej z danymi literaturowymi: 1 – przestrzeń otwarta, dla spalania CH_4 wg Güenthera [10], 2 – przestrzeń zamknięta: proponowana relacja wg Güenthera dla spalania gazu ziemnego [10], 3 – przestrzeń zamknięta: badania własne dla spalania gazu ziemnego, 4 – przestrzeń zamknięta: badania własne symulujące proces spalania zaazotowanego gazu ziemnego o zawartości azotu – $\text{N}_2=32\%$ obj., (wypływ azotu N_2 w osi strugi)

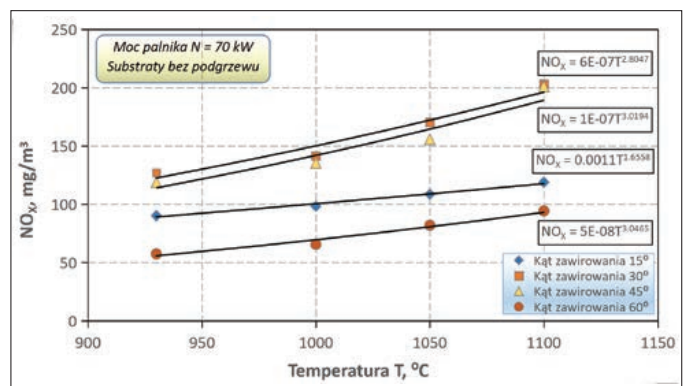
Fig. 3. Comparison of own test results of reduced diffusion flame length in open and confined space with literature data: 1 – open space, for CH_4 combustion according to Güenther [10], 2 – confined space: suggested ratio according to Güenther for natural gas combustion [10], 3 – confined space: author's own research relating to natural gas combustion, 4 – confined space: in-house tests simulating combustion of nitrogen-rich natural gas with $\text{N}_2=32\%$ by volume, (N_2 outflow in the stream axis)



Rys. 4. Stężenia NO_x w spalinach w funkcji temperatury powietrza spalania T_a i stopnia zawirowania powietrza S w palniku płaskopłomiennym w wersji standard dla: $N = 50$ kW, $\lambda = 1,14$, przy temperaturze ścian komory paleniskowej $T_{sc} = 1000^\circ\text{C}$
 Fig. 4. NO_x concentrations in flue gases as a function of air temperature T_a and air swirl degree S in a flat-flame burner in the standard version for: $N=50$ kW, $\lambda=1,14$, at the combustion chamber wall temperature $T_{sc}=1000^\circ\text{C}$

w fazie zgazowania parą wodną. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że zgazowanie powietrzem pozwala uzyskać wartość opałową produkowanego gazu suchego wynoszącą około $3\div 5$ MJ/m³, zaś podczas zgazowania tlenem pod wysokim ciśnieniem do około 13 MJ/m³ [11]. Wartość opałowa produkowanego gazu z podziemnego zgazowania węgla GPZW może zmieniać się w zakresie $\pm 50\%$ względem wartości średniej $W_d \approx 4220$ kJ/m³, co powoduje szczególne trudności podczas spalania tego gazu, głównie w kotłach energetycznych. Zastosowanie techniczne GPZW wymaga zatem stabilizacji jego parametrów poprzez kontrolowane mieszanie z wysokokalorycznym gazem sieciowym lub skierowanie go do zbiornika wyrównawczego o dużej objętości w celu jego częściowej stabilizacji przed podaniem do instalacji kotłowej. Przyjmując następnie dopuszczalny zakres zmienności $\pm 25\%$ otrzymuje się przedział wartości opałowej, dla których powinny być zaprojektowane palniki gazowe $W_{dGPZW} = 2850\div 5400$ kJ/m³. Zakres ten jest relatywnie szeroki co stwarza wysokie wymagania konstrukcyjne palnikom oraz systemom regulacji kotła. W przypadku spalania gazu z podziemnego zgazowania węgla struga powinna być silnie zawirowana, tj. $S \gg 0,6$. W przedstawionej konstrukcji palnika do spalania GPZW przyjęto większą wartość stopnia zawirowania strugi powietrznej od strugi paliwa – gazu z podziemnego zgazowania węgla paliwa, czyli $S_a > S_g$ [12]. Zawirowanie strug substratów zwiększa również bezpieczeństwo eksploatacyjne, szczególnie w warunkach zapłonu i rozruchu palników w urządzeniu cieplnym. W przeprowadzonych badaniach własnych procesu spalania gazu ziemnego w komorze spalania określono wpływ kątów zawirowania

Rys. 5. Wartości stężeń NO_x w zależności od kąta zawirowania powietrza i temperatury w komorze przy spalaniu gazu ziemnego
 Fig. 5. Values of NO_x concentrations depending on the angle of swirl of the exhaust air stream and on the temperature for natural gas combustion



Tab. 2. Wartości stopnia zawirowania S dla wybranych konstrukcji palników dyfuzyjnych do spalania paliw gazowych
 Table 2. Values of the degree of swirl S for selected designs of diffusion burners for gaseous fuels

Konstrukcja palnika dyfuzyjnego	Stopień zawirowania strumieni substratów – $S_{a,g}$		Uwagi
	Paliwo gazowe, S_g	Powietrze, S_a	
Typowa – $N=70$ kW, kąt zawirowania powietrza $\varphi=15^\circ$	0 (prostostoiowy wypływ gazu ziemnego)	1,11	gaz ziemny i powietrze – temperatura 20°C ; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,1$
Typowa – moc cieplna 70 kW, kąt zawirowania powietrza $\varphi=30^\circ$	0 (prostostoiowy wypływ gazu ziemnego)	1,24	gaz ziemny i powietrze – temperatura 20°C ; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,1$
Typowa – $N=70$ kW, kąt zawirowania powietrza $\varphi=45^\circ$	0 (prostostoiowy wypływ gazu ziemnego)	1,51	gaz ziemny i powietrze – temperatura 20°C ; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,1$
Typowa – $N=70$ kW, kąt zawirowania powietrza $\varphi=60^\circ$	0 (prostostoiowy wypływ gazu ziemnego)	2,14	gaz ziemny i powietrze – temperatura 20°C ; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,1$
Palnik płaskopłomienny – $N=50$ kW – wersja standard – konstrukcji Katedry Energetyki Procesowej (KEP) Politechniki Śląskiej	0 (prostostoiowy wypływ gazu ziemnego)	$S_{a1} = 5,9$ $S_{a2} = 7,7$	gaz ziemny – temperatura 20°C i powietrze – temperatury 400 800°C ; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,14$ temperatura ścian komory paleniskowej – 1000°C
Projekt palnika do spalania GPZW – $N=3000$ kW – konstrukcji Katedry Energetyki Procesowej Politechniki Śląskiej (KEP)	1,4	2,0	GPZW – gaz z podziemnego zgazowania węgla kamiennego; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,1$; palnik pilot – $N=300$ kW
Palnik rekuperacyjny – $N=300$ kW – konstrukcji Katedry Energetyki Procesowej (KEP) Politechniki Śląskiej	0 (prostostoiowy wypływ gazu ziemnego)	0 (prostostoiowy wypływ powietrza)	gaz ziemny – temperatura 20°C , temperatura podgrzewu powietrza jest funkcją temperatury spalin wylotowych; liczba nadmiaru powietrza – $\lambda=1,1$

powietrza wynoszących odpowiednio 15, 30, 45 i 60° na wartości stężeń NO_x – rys. 5. W badaniach tych powietrze spalania nie było podgrzewane. Na wartości stężeń

NO_x w spalinach wpływają korzystnie zwiększenie przewlekłości płomienia i recyrkulacja spalin, które zależą od stopnia zawirowania substratów. Silne zawirowanie strumienia wypływającego powietrza dla kąta 60° powoduje wystąpienie wirów charakterystycznych dla zwrotnego przepływu recyrkulacyjnego, rozcieńczenie reagentów i zdecydowane obniżenie stężeń NO_x w spalinach wylotowych. Maksymalne stężenia NO_x w spalinach otrzymane dla kątów zawirowania powietrza wynoszących 30 i 45° są zbliżone do danych literaturowych, w których największe stężenia NO_x występowały dla kątów zawirowania powietrza wynoszących $22,5^\circ$ przy $Re_g < 5 \cdot 10^4$ i 45° dla $Re_g > 5 \cdot 10^4$.

W tab. 2 przedstawiono porównanie wartości stopnia zawirowania substratów

spalania dla wybranych konstrukcji dyfuzyjnych palników gazowych.

W urządzeniach cieplnych opalanych średnio – i wysokokalorycznymi paliwami

stosuje się głównie zawirowanie strumienia powietrza spalania. Dla zapewnienia stabilnego płomienia przy spalaniu gazów niskokalorycznych wykorzystuje się dodatkowo zawirowanie strugi paliwa. Taki mechanizm stabilizacji zastosowano w projekcie konstrukcji palnika do spalania GPZW [12]. Spośród przedstawionych w tab. 2 konstrukcji palników zawirowanie substratów nie występowało tylko w palniku rekuperacyjnym. Wynika to ze specyfiki działania palnika, w którym zastosowano odciąg spalin na zewnątrz strefy wypływającego strumienia powietrza spalania. W palniku rekuperacyjnym zastosowano specjalny system stabilizacji płomienia co jest spowodowane niezastosowaniem zawirowania substratów spalania.

Podsumowanie

Techniczne, energetyczne i ekologiczne parametry eksploatacyjne procesów spalania w urządzeniach ciepłych powinny gwarantować stabilną pracę urządzenia w warunkach zakłóceń dostaw paliwa. Dostosowanie metod analizy i prognozowania tych parametrów może być postrzegane jako rozwiązanie innowacyjne, w szczególności jako innowacja procesowa. Wykorzystanie tego rozwiązania jest możliwe w przypadku stosowania wielopaliwowych systemów spalania, głównie pyłowo-węglowych lub dostarczających paliwo gazowe i ciekłe (olej opałowy).

Techniczno-energetyczne i ekologiczne parametry eksploatacyjne procesów spalania paliw w urządzeniach ciepłych powinny uwzględniać przede wszystkim:

- dobór zalecanych wartości objętościowych \dot{q}_V i powierzchniowych \dot{q}_A strumieni ciepłych do określonych komór spalania,
- dostosowanie zakresu parametrów gazodynamicznych substratów i reagentów procesu spalania, takich jak:

prędkość wypływu, stopień zawirowania, długość i stosunek średniej do maksymalnej entalpii spalin oraz przyjęcie odpowiedniego sposobu działania palników do realizacji założonego procesu technologicznego,

- walidację eksploatacyjną doboru nowych układów opalania w aspektach spełnienia wymogów procesów przepływu ciepła i jakości spalania, tj. głównie stężeń NO_x w spalinach.

W testowanym palniku dyfuzyjnym kąt zawirowania powietrza wynoszący 60° zapewnia najlepsze efekty ekologiczne w zakresie minimalizacji emisji NO_x . W typowych gazowych palnikach dyfuzyjnych preferowane są wysokie prędkości wypływu substratu (zwykle do 60 m/s), jednakże może to prowadzić do nadmiernej emisji wibroakustycznej, która jest szkodliwa dla działania i trwałości urządzenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie odpowiednich zakresów parametrów gazodynamicznych substratów i reagentów spalania (takich jak: prędkość wypływu, stopień zawirowania i długość płomienia) jest niezbędne do zapewnienia optymalnych warunków pracy. Dodatkowo na jakość czynników energetycznych i ekologicznych wpływa zastosowanie odpowiedniej metody eksploatacji palników w odniesieniu do założonego procesu technologicznego oraz walidacja eksploatacyjna doboru nowego systemu spalania w aspekcie spełnienia wymagań dla procesów przepływu ciepła i jakości spalania (głównie stężenia NO_x w spalinach).

LITERATURA

- [1] Tomeczek J., Góral J., Ochman J., Ryrko S.: Przystosowanie rusztowego kotła węglowego do opalania gazem z odmetanowania kopalni. *Energetyka*, 2007, s. 796-800.
- [2] Raport: Rynek urządzeń grzewczych w Polsce w 2020 roku. Stowarzyszenie producen-

tów i importerów urządzeń grzewczych w Polsce. Warszawa, kwiecień 2021.

- [3] Raport branżowy. Wytwarzanie i zaopatrywanie w parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych na dzień 31 grudnia 2019. Bank Ochrony Środowiska, Warszawa 2020.
- [4] <https://www.cire.pl/item,144484,5,0,0,0,0,0,srednie-ceny-sprzedazy-ciepla-wytworzonego-w-jednostkach-wytworczych-niebedacych-jednostkamikogeneracji.html> [dostęp 22.04.2023]
- [5] Gaz ziemny w procesie transformacji energetycznej w Polsce. Dolnośląski Instytut Studiów Energetycznych. Wrocław, listopad 2020. <https://www.teraz-srodowisko.pl/media/pdf/aktualnosci/9514-Raport-DISE-Gaz-Ziemny.pdf> [dostęp 22.04.2023]
- [6] https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en [dostęp 22.04.2023]
- [7] Mirowski T., Mokrzycki E., Filipowicz M., Sornek K.: Charakterystyka wybranych technologii produkcji z biomasy w energetyce rozproszonej. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*. 2018, nr 105, s. 63-74. https://se.min-pan.krakow.pl/pelne_teksty/32/k32_zn105/k32zn105_mirowski-i-inni.pdf [dostęp 22.04.2023]
- [8] Xu M., Azevedo J. L. T., Carvalho M. G.: Modeling of a front wall fired utility boiler for different operating conditions. *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering* 2021, 190 (28), s. 3581–3590.
- [9] Rozpondek M., Siudek M.: Pollution control technologies applied coal-fired power plant operation. *Acta Montanistica Slovaca. Ročník 14 (2009) číslo 2*, s. 156-160.
- [10] Tomeczek J.: Zasady modelowania procesów ciepłno-przepływowych. Matematyczne i fizyczne modelowanie zjawisk w procesach technologicznych. Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej, Katowice 2006, s. 171-188.
- [11] Rozpondek M., Góral J.: Aspekty energetyczne zastosowania gazu z podziemnego zgazowania węgla. *Przegląd Górniczy*, 1/2014, s. 16-22.
- [12] Tomeczek J., Rozpondek M., Góral J.: Projekt strategiczny PBS-6/RIE6/2010 p.t.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”. Zadanie badawcze nr 5: „Opracowanie technologii pozyskiwania węgla dla wysoceefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”.