



Produkcja i wykorzystanie syntez-gazu z niskowartościowych gatunków paliwa

*Vladimir Kolienko, Anatolij Kolienko
Połtawski Narodowy Uniwersytet Techniczny, Ukraina*

1. Wprowadzenie

Gaz ziemny i ropa są głównymi rodzajami paliwa na Ukrainie. W roku 2009 poziom wykorzystania gazu ziemnego w kraju wyniósł 67 miliardów m³ w tym do 18 miliardów m³ zużyto przez ludność na cele grzewcze. Udział paliwa stałego w paliwowo-energetycznym bilansie kraju nie przekraczał 18% [2]. Sytuacja komplikuje się w związku z nadchodzącym w ciągu najbliższych lat wzrostem cen za nośniki energii. Zgodnie z prognozami do roku 2010 cena za gaz ziemny, wykorzystywany przez ludność na cele ogrzewania, może wzrosnąć do poziomu 3100÷5000 hrywien (ok. 1150÷1850 zł) za tys. m³ czyli 3,6÷5,7 razy w porównaniu z dniem dzisiejszym.

Zmniejszenie wykorzystania gazu ziemnego i przejście na alternatywne niskokaloryczne gatunki paliwa stałego w tych warunkach będzie nieuniknionym i prawie jedynie możliwym sposobem zasilenia mieszkań energią cieplną, zwłaszcza w miejscowościach wiejskich.

Poza bezpośrednim spalaniem takiego paliwa w indywidualnych kotłach grzewczych możliwa jest także przeróbka niskowartościowych

gatunków paliwa stałego na paliwa gazowe (tzw. syntez-gazy) na drodze całkowitego lub częściowego odgazowania.

Bezpośrednie spalanie niskokalorycznego paliwa stałego i odpadów związane jest z całym szeregiem problemów, które powodują obniżenie sprawności kotłów, pogorszenie ekologicznych wskaźników i znacznie komplikują proces eksploatacji urządzeń.

Do tych problemów zalicza się:

- zwiększenie strat ciepła wskutek chemicznego i mechanicznego niedopału paliwa,
- szlakowanie rusztów,
- zanieczyszczenie spalin popiołem lotnym,
- konieczność stałej obsługi kotłów, zwłaszcza na paliwach niskokalorycznych,
- niska sprawność urządzeń grzewczych, pogarszająca się wraz ze wzrostem wilgotności paliwa, zawartością popiołów i występowaniem związków siarki.

Wymienione problemy całkowicie lub częściowo eliminowane są w przypadku przejścia na inny sposób wykorzystania niskowartościowych gatunków paliwa stałego – poprzez wstępne odgazowanie z otrzymaniem syntez-gazu i jego następne spalanie w płomieniu gazowym.

Jedną z ważniejszych kwestii w takim przypadku jest porównanie istniejącego potencjału cieplnego lokalnych niskokalorycznych gatunków paliwa i odpadów gospodarki rolniczej, z jednej strony, oraz ilości energii wymaganej do celów grzewczych, z drugiej strony. Autorzy proponują przykład takiego porównania dla jednego ze środkowych obwodów Ukrainy – Połtawskiego, które może być również przydatne w przypadku podobnej analizy na terenie Polski.

Za podstawowy rodzaj surowca do produkcji syntez-gazu na terenie obwodu Połtawskiego uznano odnawialne gatunki paliwa: odpady hodowli roślin (słomę, żdźbła i liście gryki, kukurydzy i słonecznika), a także odpady wyrębów lasu i zakładów przeróbki drewna.

Według danych statystycznych uzasadniony ekonomicznie potencjał istniejącej biomasy, który może być wykorzystany do odgazowania i produkcji syntez-gazu opiewa obecnie na 765 tys. Mg. W tym 720 tys. Mg stanowi słoma upraw zbożowych.

Bilans cieplny biomasy określony według znanych wskaźników wartości opałowej paliwa i jego ilości zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Potencjał cieplny biomasy pod względem produkcji syntezy-gazu
Table. 1. Thermal potential of biomass for the generation of synthesis gas

Surowiec	Wartość opałowa, kcal/kg	Potencja cieplny, Gcal
Słoma upraw zbożowych	3000	2160000
Wytłoczyny roślin oleistych	3500	100800
Odpady zakładów leśniczych	2500	32500
Odpady przemysłu przeróbki drewna	2500	5500
Razem		2 298 800

Biorąc pod uwagę średnią sprawność procesu odgazowania, wynoszącą ok. 78%, potencjał cieplny syntezy-gazu, który może być otrzymany z odnawialnych rodzajów paliwa stałego, wynosi dla obwodu Połtawskiego Ukrainy około 1 800 tys. Gcal.

Natomiast zapotrzebowanie ciepła na cele energetyki grzewczej w obwodzie Połtawskim wynosi około 2210 tys. Gcal. Zatem potencjał energetyczny syntezy-gazu pozwala zastąpić ok. 81% gazu ziemnego, który obecnie wykorzystywany jest w komunalnej gospodarce obwodu, co jest równoznaczne zmniejszeniu wydatków na paliwo o ok. 330 milionów hrywien.

2. Definicja zagadnienia i jego rozwiązanie

Jednym z ważniejszych problemów procesu odgazowania jest potrzeba stałego doprowadzania ciepła do strefy egzotermicznych reakcji stanowiących rdzeń tego procesu. W najbardziej rozpowszechnionych gazogeneratorach z wewnętrznym podgrzaniem ciepło to uzyskuje się w wyniku bezpośredniego kontaktu gazu generatorowego z paliwem stałym. Istotną wadą tego sposobu podgrzania jest obecność w produkowanym gazie znacznej ilości stałych i smolistych frakcji, co utrudnia jego dalsze transportowanie i wykorzystanie.

Autorzy zaproponowali zasadniczą budowę generatora z podgrzaniem zewnętrznym, w którym paliwo stałe podgrzewane jest nie wykorzystując bezpośredniego kontaktu z gorącymi gazami. To daje możliwość ułatwienia procesu dalszego wykorzystania syntez-gazu i zmniejszenia kosztów własnych jego produkcji.

2.1. Opracowanie technologii produkcji syntez-geazu

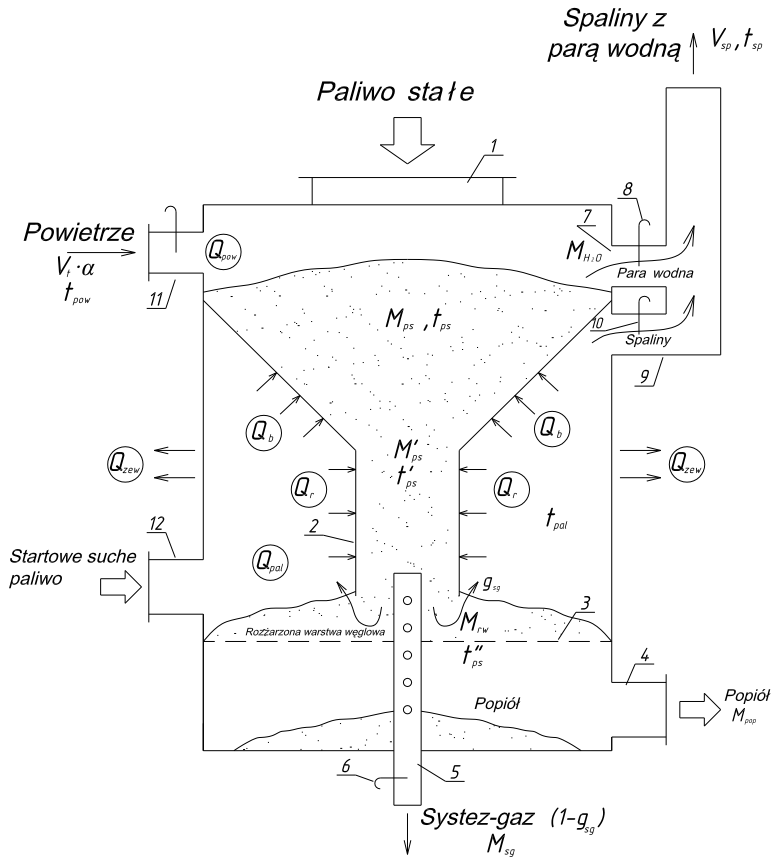
Zasadniczy schemat technologiczny gazogeneratora przedstawiono na rys. 1. Paliwo załadowuje się do bunkra (1), gdzie zachodzi jego wysuszenie do wymaganej wilgotności. W rurze pirolitycznej (2) odbywa się termiczna destrukcja paliwa. Na ruszcie (3) gromadzi się rozżarzona warstwa niespalonego węgla. W tej warstwie odbywają się reakcje redukcji z powstawaniem syntez-gazu. Popiół usuwany jest przez otwór (4), a syntez-gaz rurą (5) z przepustnicą (6) odprowadzany jest do sieci gazowej.

Odprowadzanie pary wodnej powstającej w procesie suszenia paliwa wykonuje się przez króciec (7) z przepustnicą (8), natomiast produkty całkowitego spalania odprowadzane są króćcem (9) z przepustnicą (10). Cały proces odgazowania reulowany jest przy pomocy przepustnic (6), (8) i (10).

Potrzebne dla procesu powietrze dopływa przez króciec (11). Paliwo startowe potrzebne do zapłonu podstawowego paliwa i pierwotnego rozgrzania konstrukcji generatora ładowane jest przez króciec (12).

Analiza całego zespołu fizyko-chemicznych procesów odgazowania wykazała, że główny wpływ na efektywność procesu powstawania syntez-gazu wywiera stosunek pomiędzy ilością ciepła doprowadzaną do generatora a ilością ciepła odprowadzaną do otoczenia.

W pracy podjęto próbę określenia bilansu cieplnego gazogeneratora i jego rury pirolitycznej. Na podstawie tych bilansów otrzymano zależności do obliczeń wymiarów głównych elementów konstrukcyjnych generatora, które zapewniają maksymalną możliwą sprawność urządzenia i zminimalizowane straty ciepła.



Rys. 1. Zasadniczy schemat generatora syntez-gazu

Fig. 1. Structural scheme of the gas-generator

Podstawowe równanie bilansowe przewiduje, że ciepło uzyskane od spalania części wyprodukowanego syntez-gazu Q_{sp} [kW] wykorzystuje się:

- na podgrzanie powietrza dostarczanego na cele spalania części produkowanego gazu i utlenianie paliwa stałego $Q_{pow.}$,
- na podgrzanie i suszenie paliwa stałego w bunkrze Q_b ,
- na podgrzanie, destrukcję termiczną i odgazowanie paliwa w rurze pirolitycznej $Q_{r.p.}$,
- w postaci strat ciepła przez obudowę $Q_{zew.}$:

$$Q_{sp} = Q_{r.p.} + Q_{pow.} + Q_b + Q_{zew.} \quad (1)$$

Poszczególne składowe tego bilansu określono w następujący sposób:

$$Q_{sp} = g \cdot B_{s.g.} \cdot Q_{s.g.}^{rob.} \quad (2)$$

$$Q_{pow.} = \left[(M'_{p.s.} - M_{r.w.}) V_{pow.}^{ud.} + \alpha V_{pow.}^{sp.} g \cdot B_{s.g.} \right] \rho_{pow.} c_{pow.} (t''_{p.s.} - t_{pow.}) \quad (3)$$

$$Q_b = k_b F_b (t_{sp} - \bar{t}_{p.s.}^b) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_{r.p.} &= M'_{p.s.} c_{p.s.} (t''_{p.s.} - t'_{p.s.}) + (M'_{p.s.} - M_{r.w.}) q_{ud.} + (M_{r.w.} - M_{pop.}) q_{red.} = \\ &= k_{r.p.} F_{r.p.} (t_{sp} - \bar{t}_{p.s.}^{r.p.}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q_{zew.} = k_{zew.} F_{zew.} (t_{sp} - t_{pow.}) \quad (6)$$

gdzie:

g – względna część wyprodukowanego syntez-gazu, która została spalona w generatorze na cele technologii odgazowania,

$B_{s.g.}$ – całkowita produkcja syntez-gazu [m^3/s],

$Q_{s.g.}^{rob.}$ – wartość opałowa syntez-gazu w składzie roboczym (wilgotnym) [kJ/m^3],

$M'_{p.s.}$ – strumień masy paliwa stałego na wejściu do rury pirolitycznej [kg/s],

$M_{r.w.}$ – strumień masy reszty węglowej na wyjściu z rury pirolitycznej [kg/s],

$V_{pow.}^{ud.}$ – zapotrzebowanie powietrza na cele utleniania paliwa stałego [m^3/kg],

- α – współczynnik nadmiaru powietrza dostarczanego do generatora,
 $V_{pow.}^{sp}$ – zapotrzebowanie powietrza na spalanie syntez-gazu [m^3/m^3],
 $\rho_{pow.}$ – gęstość powietrza [kg/m^3],
 $c_{pow.}$ – średnie masowe ciepło właściwe powietrza [$kJ/(kg \cdot K)$],
 $t''_{p.s.}$ – temperatura paliwa stałego na wyjściu z rury pirolitycznej [$^{\circ}C$],
 $t_{pow.}$ – temperatura powietrza zewnętrznego [$^{\circ}C$],
 $k_b.$ – współczynnik przenikania ciepła konstrukcji bunkra [$kW/(m^2 \cdot K)$],
 $F_b.$ – powierzchnia zewnętrzna obudowy bunkra [m^2],
 t_{sp} – temperatura spalania syntez-gazu [$^{\circ}C$],
 $\bar{t}_{p.s.}^b.$ – średnia temperatura paliwa stałego w bunkrze [$^{\circ}C$],
 $c_{p.s.}$ – średnie masowe ciepło właściwe paliwa stałego [$kJ/(kg \cdot K)$],
 $t'_{p.s.}$ – temperatura paliwa stałego na wejściu do rury pirolitycznej [$^{\circ}C$],
 $q_{util.}$ – jednostkowe ciepło destrukcji (utleniania) paliwa stałego [kJ/kg],
 $M_{pop.}$ – strumień masy popiołu na wyjściu z generatora [kg/s],
 $q_{red.}$ – jednostkowe ciepło redukcji (odgazowania) paliwa stałego [kJ/kg],
 $k_{r.p.}$ – współczynnik przenikania ciepła konstrukcji rury pirolitycznej [$kW/(m^2 \cdot K)$],
 $F_{r.p.}$ – powierzchnia zewnętrzna rury pirolitycznej [m^2],
 $\bar{t}_{p.s.}^{r.p.}$ – średnia temperatura paliwa stałego w rurze pirolitycznej [$^{\circ}C$],
 $k_{zew.}$ – współczynnik przenikania ciepła zewnętrznej obudowy gazogeneratora [$kW/(m^2 \cdot K)$],
 $F_{zew.}$ – powierzchnia zewnętrznej obudowy gazogeneratora [m^2].

2.2. Metoda inżynierska konstruowania gazogeneratora

Dalsze badania teoretyczne i obliczenia bilansu cieplnego urządzenia pozwoliły otrzymać zależność do doboru ważniejszej konstrukcyjnej charakterystyki generatora – wymaganej powierzchni rury pirolitycznej:

$$F_{r.p.} = \frac{[(1-\beta)q_{util.} + \beta \cdot q_{red.} + c_{p.s.} (t''_{p.s.} - t'_{p.s.})] M'_{p.s.}}{\left(t_{sp} - \frac{t'_{p.s.} + t''_{p.s.}}{2} \right) k_{r.p.}}, \quad (7)$$

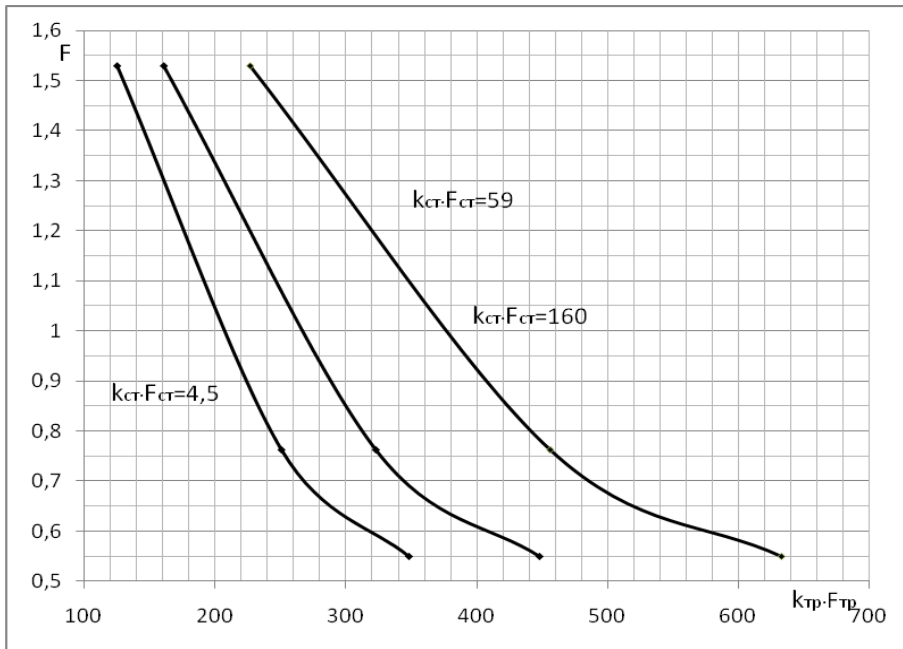
gdzie współczynnik $\beta = (1 - k_{lot.})$ określa udział suchej reszty węglowej w składzie paliwa stałego w zależności od udziału substancji lotnych $k_{lot.}$

Otrzymane rozwiązanie (7) wykazuje bardzo złożony wieloczynnikowy charakter współzależności między temperaturą spalania produkowanego gazu, właściwościami pierwotnego paliwa stałego, jego strumieniem masy, czyli wydajnością generatora oraz konstrukcyjnymi charakterystykami urządzenia.

Zwiększenie wilgotności paliwa, za mała powierzchnia wymiany ciepła rury pirolitycznej lub niedostateczne ciepłoizolacyjne charakterystyki zewnętrznej obudowy i wynikający z tego wzrost strat ciepła do otoczenia mogą spowodować krytyczne zmniejszenie intensywności procesu aż do zatrzymania gazyfikacji paliwa i otrzymania syntez-gazu.

Wyniki badań teoretycznych i rozwiązanie powyższego układu równań (1÷7) pozwoliło opracować graficzne narzędzie (rys. 2) do optymalnego konstruowania gazogeneratora z wykorzystaniem parametru F , który uwzględnia zespół danych wejściowych, takich jak: wartość opałowa syntez-gazu, jego inne właściwości fizyko-chemiczne, wymagana wydajność cieplna agregatu, objętość bunkra do załadowania paliwa stałego itp.

Wykresy pozwalają określić wymaganą powierzchnię rury pirolitycznej $F_{r.p.}$, zakładając wartość powierzchni zewnętrznej obudowy generatora $F_{zew.}$ a także właściwości ciepłoizolacyjne konstrukcji przegród $k_{zew.}$



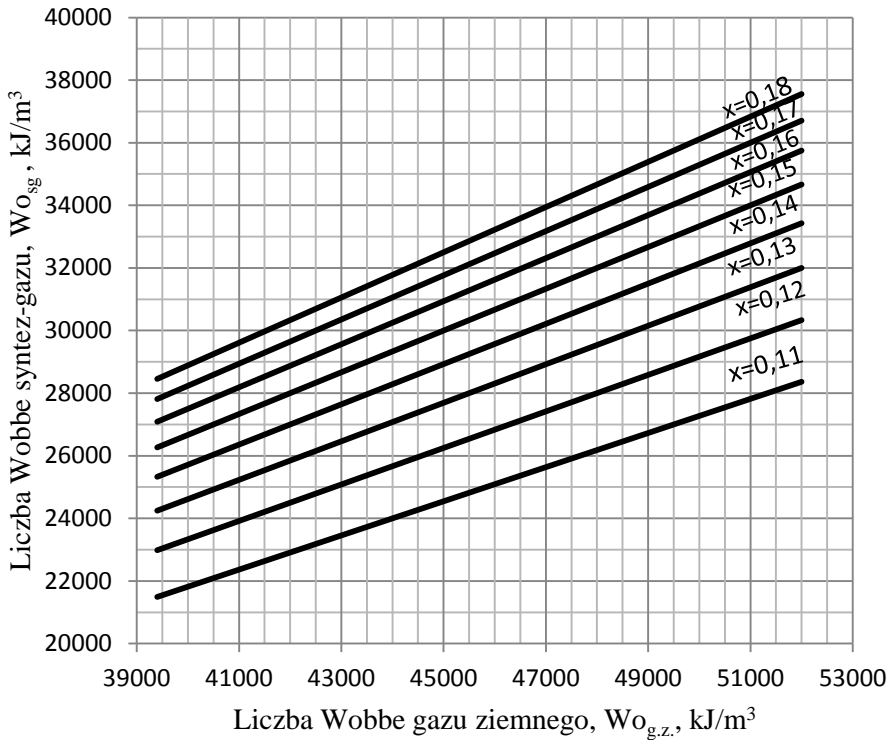
Rys. 2. Wykresy do określania głównych konstrukcyjnych wymiarów gazogeneratora

Fig. 2. Diagram for determination of main construction dimensions of the gas-generator

3. Rozwiązanie problemów wykorzystania syntez-gazu

Walory użytkowe syntez-gazu, jako alternatywy gazu ziemnego nie zostałyby zrealizowane bez rozwiązania problemu jego małokosztownego wykorzystania, czyli bez potrzeby wymiany palników i rekonstrukcji urządzeń paleniskowych. W tym celu otrzymano zależności i opracowano nomogramy do określenia maksymalnej zawartości syntez-gazu w mieszaninie z gazem ziemnym dla zapewnienia wymaganej wartości wskaźnika zamienności gazów palnych – liczby Wobbe.

Na rys. 3 przedstawiono nomogram do określania maksymalnego udziału objętościowego x syntez-gazu w mieszaninie z gazem ziemnym, który pozwala na sprawne i bezpieczne spalanie takiej mieszaniny przy pomocy istniejących palników.



Rys. 3. Nomogram do określania udziału objętościowego syntez-gazu w mieszaninie z gazem ziemnym w przedziałach kryterium zamienności
Fig. 3. The nomogram for determination of a part by volume of synthesis-gas in a mix with natural gas within criterion of interchangeability

Również opracowano konstrukcję zespolonego palnika do spalania syntez-gazu i gazu ziemnego poza granicami dopuszczalnych wahań kryterium zamienności. Opracowano rozwiązania inżynierskie, zapewniające kompleksowe projektowanie kotłowni pracującej na mieszaninie syntez-gazu z gazem ziemnym. Przykładowo określono podstawowe wskaźniki techniczno-ekonomiczne pracy kotłowni w przypadku produkcji gazu z wycłoczyn słonecznika.

4. Wnioski

1. Wykorzystanie niskowartościowych odnawialnych lokalnych paliw w postaci syntez-gazu, produkowanego z nich na drodze odgazowania może być skutecznym sposobem dywersyfikacji komunalnej energetyki. To pozwala na spalanie niskowartościowych gatunków stałego paliwa ze sprawnością i ekologicznością, która osiągalna jest tylko w przypadku paliw gazowych. Nie bez znaczenia jest również znacznie mniejsza częstotliwość ładowania gazogeneratorów w porównaniu z kotłami bezpośredniego spalania paliwa stałego. Spalanie 100 tys. m³ syntez-gazu pozwala zaoszczędzić 18 tys. m³ gazu ziemnego.
2. Wysoka temperatura i prędkość spalania syntez-gazu daje możliwość zmniejszyć wskaźniki jednostkowego zużycia paliwa na jednostkę wyprodukowanej energii 1,3÷1,5 raza w porównaniu z pierwotnym paliwem stałym. Nawet biorąc pod uwagę, że produkcja biogazu z paliwa stałego nie przekracza 80% jego masy, taki sposób spalania niskowartościowych gatunków paliwa jest ekonomicznie uzasadniony. Przykładowo produkcja 1000 Gcal ciepła w kotle wodnym z bezpośrednim spalaniem paliwa stałego wymaga ok. 243 t umownego paliwa. Po odgazowaniu i spalaniu syntez-gazu zapotrzebowanie zmniejsza się do 187 t umownego paliwa, czyli zysk wynosi 23%.
3. Badania teoretyczne procesów wymiany ciepła na roboczych powierzchniach gazogeneratorskich pozwoliły otrzymać równanie do określania jego konstrukcyjnych parametrów, współczynnika przenikania ciepła i wymaganej powierzchni rury pirolitycznej. Otrzymano również zależności i wykresy do określania charakterystyk fizykochemicznych mieszaniny gazu ziemnego i syntez-gazu w całym przedziale dopuszczalnych zmian jego zawartości.
4. Spalanie syntez-gazu odbywa się ze wskaźnikami ekologicznymi zbliżonymi do gazu ziemnego. A zatem wykorzystanie niskowartościowych gatunków paliwa stałego po wstępnym odgazowaniu nie powoduje pogorszenia stanu środowiska, a przy zamianie urządzeń bezpośredniego spalania nawet poprawia go. Jednym z ważniejszych zalet wykorzystania syntez-gazu jest zmniejszenie emisji do atmosfery lotnego popiołu i produktów niedopału chemicznego.

5. Wykorzystanie odnawialnych rodzajów paliwa pozwala istotnie zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych do atmosfery: z 277 kg CO₂ na 1 MW·rok pierwotnej energii paliwa dla gazu ziemnego do 20 kg dla drewna gatunków iglastych (uwzględniając pochłanianie CO₂ z atmosfery przez rośliny podczas wegetacji).
6. Wykorzystanie torfu i biomasy pozwala opalać syntez-gazem kotły grzewcze w miejscowościach wiejskich. W odróżnieniu od dostarczanego gazu ziemnego wykorzystanie lokalnych gatunków paliwa stanowi przesłanki do rozwoju lokalnej gospodarki i stworzenia dodatkowych miejsc pracy.

Literatura

1. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження у житлово-комунальному господарстві на 2010÷2014 рр. Затверджена наказом Міністерства житлово-комунального господарства 10.11.2009, № 352.
2. **Сухін Ю.:** Синтез-газ для України. Ринок інсталяцій, 2008. № 1.
3. **Пецух Т., Домбровски Т., Пекарски Я., Домбровски Я.:** *Использование отходов органической химии для производства пиролизного газа.* Инженерные системы, 2008. №3(36).
4. Програма Полтавської обласної державної адміністрації «Збережемо енергоресурси Полтавщини», третій етап, 2009÷2011 роки. Полтава, 2009.

Generation and Use of Synthesis Gas from Low Grade Types of Fuel

Abstract

Increase of cost and limited actual reserves of natural gas and oil lead to necessity of diversification of fuel and utilization of low grade domestic types of fuel.

Utilization of such types of fuel by their preliminary gasification with the receipt of synthetic gas and its subsequent burning gives a possibility to avoid many problems which are pertinent of burning low grade solid fuels. These problems include emission of fuel dust and chemical products of incomplete burning, low efficiency of heat generators.

The paper discusses the heat balance of gas generator with external heating up for receipt of synthetic gas. There has been received a solution of a set of equations which gives an opportunity to identify constructive dimensions of a gas generator for different types of solid fuel and productivity of the installation.

Dependencies and monographic charts have been developed for identification of share of synthetic gas in the mixture with the natural gas to allow burning of synthetic gas without any changes in the design of furnace burners used to burn natural gas.

Design of a combined gas burning installation for burning mixture of synthetic gas and natural gas was also developed below allowable changes of interchangeability criterion of Wobbe. It has been demonstrated that the saving of fuel by applying synthetic gas, for example sunflower pellets, reaches 14 tons of fuel equivalent (fuel with burning heat around 29.4 MJ/kg) for every 1,000 GJ of heat produced.

Ecological effect of utilizing synthetic gas from low grade types of domestic solid fuels and agricultural production waste has been demonstrated.

