

Temperatura wybuchu gazu generatorowego

Temperature of generator gas explosion

mgr inż. SŁAWOMIR JANISZEWSKI



W KILKU SŁOWACH

W artykule przedstawiono możliwość obliczeniowego określenia temperatur wybuchu mieszaniny gazu generatorowego z powietrzem oraz określono ich wielkości zależne od składu gazu, jego temperatury roboczej i warunków wystąpienia wybuchu. Celem artykułu jest zapoznanie Czytelników z zagrożeniami mogącymi wystąpić w procesie eksploatacji urządzeń zgazowujących biomasę i inne substancje palne.



SUMMARY

Article presents calculus for explosion temperature determination for process gas from solid fuel gasification as a mixture with air. Authors compare height of explosion temperature with gas composition, its working temperature and conditions of explosion. Goal of the article is to acquaint readers with risk factors with may exist during exploitation of solid fuel gasifiers.

Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze
kontakt: janiszewski@ichpw.zabrze.pl
Opisane badania były finansowane z budżetu Zadania Badawczego nr 4 pt. "Opracowanie zintegrowanych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych" w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: "Zaawansowane technologie pozyskiwania energii" realizowanego ze środków NCBiR.

Wstęp

Obecnie technologiczne wykorzystanie biomasy do celów energetycznych polega na jej bezpośrednim spalaniu w różnego rodzaju kotłach. Istnieją również inne - znane od dawna - metody konwersji biomasy. Jedną z nich jest zgazowanie. Gaz wytwarzany z termicznego rozkładu biomasy zwiększa zakres zastosowania tego pierwotnego nośnika energii. Palny gaz może być paliwem zasilającym różnorodne urządzenia energetyczne, np. kotły wodne oraz parowe, silniki tłokowe, turbiny gazowe i ogniwa paliwowe. W zakresie średniej i małej energetyki urządzenia zgazowujące tworzą duże możliwości optymalizacji technicznej i ekonomicznej wytwórczych układów energetycznych. [1]

Coraz większe zainteresowanie praktycznym wykorzystaniem technologii zgazowania biomasy, która obejmuje cały cykl procesów jej termicznej przeróbki prowadzących do wytworzenia gazu generatorowego, wywołuje zarazem zwiększone ryzyko wystąpienia różnych zagrożeń. Wynikają one po części z braku do-

statecznej wiedzy i doświadczenia wśród części wytwórców i eksploatorów urządzeń do produkcji i wykorzystania gazów palnych. Autor w swojej pracy zawodowej spotkał się z przypadkami budowy i prób eksploatacji urządzeń zgazowujących (najczęściej drewno) przez osoby uzdolnione manualnie lecz nie posiadające dostatecznej wiedzy w tej dziedzinie i bagatelizujących związane z tym zagrożenia. Jednym z takich zagrożeń jest możliwość wybuchu palnej mieszaniny gazów z powietrzem i związanych z tym gwałtownych przyrostów temperatury oraz ciśnienia w instalacji. Wybuch taki może nastąpić bezpośrednio w reaktorze lub w instalacji oczyszczania i odbioru gazu, a także w przypadku wypływu gazu - w pomieszczeniach, w którym zostały posadowione te urządzenia.

Niniejszy artykuł poświęcono metodyce technicznego wyznaczania temperatury wybuchu mieszaniny gazowo - powietrznej. Celem jego powstania była chęć przybliżenia szerokiej rzeszy czytelników kompendium wiedzy o poziomach temperatur mogących wystąpić w przypadku wybuchu mieszaniny gazowej





z powietrzem i skutkach ich oddziaływania na organizmy żywe.

Ponieważ nie dysponowano danymi doświadczalnymi dotyczącymi parametrów fizycznych wybuchu mieszaniny gazowej występującej w urządzeniu zgazowującym, dlatego do określenia wysokości temperatury wybuchu zastosowano metody obliczeniowe oparte na składzie chemicznym gazu generatorowego oraz jego temperaturze roboczej.

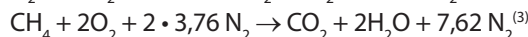
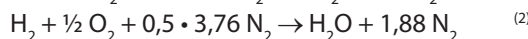
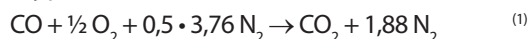
Do rozważań przyjęto cztery różniące się składem mieszaniny gazowe otrzymane w trakcie rzeczywistych testów zgazowania biomasy drzewnej (zrębki drzewne o różnym stopniu wilgotności i rozdrobnienia) wykonywane w ramach prac badawczych generatora mającego w czasie eksploatacji zapewniać gaz do zasilania tłokowego silnika spalinowego sprzężonego z prądnicą. Udziały poszczególnych składników zostały określone za pomocą aparatury analitycznej. Zestawienie składów mieszanek zawarto w tablicy nr 1.

nr mieszanki	(y1)	(y2)	(y3)	(y4)	(y5)	(y6)	(y7)	(y8)	(y9)	(y10)	Tg [K]
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	
	udział cząstkowy SUBSTRATY						udział cząstkowy PRODUKTY *				
1.	0,1988	0,0429	0,0279	0,1196	0,4600	0,1490	0,1767 *	0,3463	1,1556	0,2477	893
2.	0,1505	0,0820	0,0194	0,1168	0,5050	0,1250	0,1551 *	0,2867	1,088	0,2458	870
3.	0,1386	0,0552	0,0487	0,1398	0,4450	0,1710	0,1943 *	0,3271	1,1756	0,3236	883
4.	0,1252	0,0904	0,0167	0,1301	0,4180	0,2140	0,1412 *	0,2720	0,9489	0,3378	888

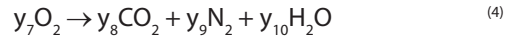
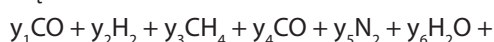
Tablica nr 1 Skład i temperatura gazu generatorowego oraz produktów spalania
* obliczony wg równania (4)

Różnice w składzie gazu wynikają między innymi z rodzaju materiału wsadowego, stopnia rozdrobnienia, jego wilgotności i temperatury oraz ciśnienia i rozkładu temperatur w generatorze.

Cząstkowe równania bilansowe dla gazów palnych zawartych w tablicy nr 1 spalanych z powietrzem można przedstawić w następującej postaci:



Równanie spalania dla mieszanki gazowej z powietrzem przyjmuje poniższą postać końcową:



gdzie: y_i – udział cząstkowy substratów i produktów.

W metodzie obliczeniowej temperatury wybuchu niezbędną jest również znajomość wartości ciepła spalania, ciepła molowego oraz masy molowej substratów i produktów. Zestawiono je w tablicy nr 2.

X	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂ O	(y8)	(y9)	(y10)
indeks	1	2	3	4	5	6	CO ₂	N ₂	H ₂ O
ciepło spalania Qp [kJ·kg ⁻¹]	10.200	120.000	48.000	.	.	.	0,3463	1,1556	0,2477
ciepło molowe C [kJ·(k-mol ⁻¹ ·deg ⁻¹)]	0,0820	0,0194	0,1168	0,5050	0,1250	0,1551 *	0,2867	1,088	0,2458
przy 873 K	.	.	.	45,753	30,149	36,195	0,3271	1,1756	0,3236
masa molowa M [kg·k-mol ⁻¹]	28	2	16	.	.	.	0,2720	0,9489	0,3378

Tablica nr 2 Parametry fizyczne substratów [2] [3] [6]

Korzystając z definicji w poniższym brzmieniu: "Temperatura wybuchu mieszanki gazu palnego z powietrzem to proporcja iloczynu udziału procentowego gazu palnego y_n , jego ciepła spalania Q_p i masy molowej M do iloczynu udziału procentowego produktu y_m i jego ciepła molowego C powiększona o wartość temperatury roboczej gazu T_g " można ustalić wzór ogólny do obliczeń technicznych wartości temperatury wybuchu mieszanki gazu palnego z powietrzem. [5]

Wzór ogólny na wysokość temperatury wybuchu uwzględniający symbolikę używaną powyżej przyjmie zatem poniższą postać:

$$T_w = \frac{y_1 \cdot Q_{p1} \cdot M_1 + y_2 \cdot Q_{p2} \cdot M_2 + y_3 \cdot Q_{p3} \cdot M_3}{y_8 \cdot C_4 + y_9 \cdot C_5 + y_{10} \cdot C_6} + T_g \quad (5)$$

gdzie: y_i – udział cząstkowy substratów i produktów; Q_{pi} – ciepło spalania; M_i – masa molowa; C_i – ciepło molowe;

Obliczeniowe wartości temperatury wybuchu dla mieszanek gazowych o składzie przedstawionym w tablicy 1 przedstawiają się następująco: mieszanka nr 1 \approx 2376 K, mieszanka nr 2 \approx 2285 K, mieszanka nr 3 \approx 2336 K, mieszanka nr 4 \approx 2207 K.

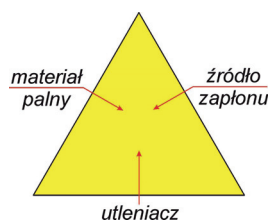


Dla porównania w tablicy nr 3 zestawiono wyniki uzyskane z obliczeń dla mieszanek gazowych (maksymalne wartości udziałowe gazów palnych) ze zgaszania biomasy w reaktorach: przeciwprądowym, współprądowym oraz ciśnieniowym podanych w literaturze.

	Reaktor ze złożem stałym		
	przeciwprądowy	współprądowy	ciśnieniowy
CO	0,20	0,22	0,13
H ₂	0,14	0,21	0,45
CH ₄	0,03	0,05	0,07
CO ₂	0,10	0,13	0,10
N ₂	0,33	0,19	0,02
H ₂ O	0,20	0,20	0,23
T _g	~ 873 K	~ 873 K	~ 873 K
T _w	~ 2753 K	~ 3262 K	~ 3438 K

Tablica nr 3 Skład gazów generatorowych i temperatury wybuchu [1]

Samo istnienie mieszanki gazów palnych w stanie wysokiej temperatury nie stanowi dostatecznej przesłanki do zaistnienia wybuchu. Aby nastąpił jej wybuch muszą zaistnieć dodatkowe dwa czynniki. Mieszanka musi tworzyć atmosferę wybuchową, mieć kontakt z dostateczną ilością utleniacza (np. powietrza) oraz musi istnieć źródło zapłonu o dostatecznej energii zapłonu. Zbiór tych czynników reakcyjnych o co najmniej dostatecznym poziomie efektywności nazywany jest potocznie trójkątem wybuchowości – rys. 1. [4]



Rysunek nr 1 Trójkąt wybuchowości (rys. autora)

Należy zatem rozróżnić pojęcia: substancja palna i atmosfera wybuchowa.

Substancja palna może występować w postaci mieszaniny gazowej, cieczy, oparów cieczy, mgły lub pyłu. Substancja taka posiada zdolność wchodzenia w reakcję egzotermiczną po zapaleniu.

Atmosfera wybuchowa jest mieszaniną substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł lub pyłów z powietrzem w warunkach atmosferycznych, w której po osiągnięciu energii aktywacji spalanie następuje w całej objętości mieszaniny.

Jak wynika z powyższych definicji, główną cechą atmosfery wybuchowej, wyróżniającą ją z grupy substancji palnych, jest samoistne zachodzenie procesu spalania w całej objętości.

Warunek obecności tlenu jako drugiego czynnika niezbędnego do wystąpienia wybuchu w powietrzu atmosferycznym jest zawsze spełniony. Trzeci czynnik, czyli źródło zapłonu, może być bardzo różny. Może nim być np. otwarty płomień, iskra, wysoka temperatura powierzchni urządzenia lub wyładowanie elektrostatyczne. [5]

Terminem "wybuchowość" można zatem określić podatność atmosfery wybuchowej na czynniki prowadzące do zapłonu, a tym samym i do wybuchu. Podatność ta zależy od stężenia gazu palnego lub palnych oparów cieczy oraz od rodzaju atmosfery.

W celu wymiernej oceny podatności gazowych substancji palnych na wybuch, stosuje się dwa podstawowe pojęcia: dolna granica wybuchowości (DGW) i górna granica wybuchowości (GGW). Wartości dolnej i górnej granicy wybuchowości nie są wartościami stałymi. Zależą one bowiem od ciśnienia i temperatury mieszaniny oraz jej składu. Domieszki innych składników mogą wpływać na właściwości mieszaniny palnej.

Dolna granica wybuchowości określa stężenie gazu palnego lub palnej pary w powietrzu, poniżej którego atmosfera gazowa nie jest wybuchowa. Wartość DGW podawana jest zwykle procentowo. Poniżej dolnej granicy wybuchowości, mieszanina zawiera zbyt mało substancji palnej aby możliwym było samoistne podtrzymanie procesu spalania.

Górna granica wybuchowości określa stężenie gazu palnego lub palnej pary w powietrzu, powyżej którego atmosfera gazowa nie jest wybuchowa. Wartość GGW podawana jest zwykle procentowo. Górna granica wybuchowości określa największe stężenie paliwa, przy którym mieszanina zawiera wystarczającą ilość utleniacza, aby po zapaleniu wystąpiła propagacja płomienia. [3]

Przedział stężeń między DGW i GGW nazywany jest przedziałem wybuchowości. Przykładowe wartości stężeń granicznych oraz temperatury samozapłonu zawiera tablica nr 4.

Rozważając możliwość wybuchu powodowaną przez palną substancję gazową, należy wziąć również pod uwagę temperaturę zapłonu tej





substancji oraz temperaturę samozapłonu tworzonej przez nią atmosfery wybuchowej.

substancja palna	dolna granica wybuchowości [%] *	górną granicę wybuchowości [%] *	temperatura samozapłonu Tz [OC] *	minimalna energia zapłonu E _{min} [mJ]
metan CH ₄	4,1 (5)	15,0 (15,4)	650 (535)	0,28 - 0,47
wodór H ₂	4,0	75,0	580 (500)	8,0
tlenek węgla CO	12,5	75,0 (74,2)	651 (605)	0,011 - 0,02

Tablica nr 4 DGW i GGW oraz temperatury samozapłonu atmosfery wybuchowej [4] [5] * w zależności od źródła danych

Temperatura zapłonu jest to minimalna temperatura, przy której w określonych warunkach z cieczy wydziela się palny gaz lub para w ilości wystarczającej do natychmiastowego zapłonu.

Temperatura samozapłonu atmosfery wybuchowej jest to najniższa temperatura, w której następuje zapalenie palnej substancji w postaci mieszaniny gazu lub pary z powietrzem. Temperatury samozapłonu Tz mieszanin gazowo - powietrznych oscylują w zakresie 600 – 950 K. [4]

Zmienność temperatury zapłonu i samozapłonu wynika z wielu przyczyn. Na przykład:

- wzrost ciśnienia mieszanki powoduje obniżenie temperatury samozapłonu,
- działania katalizujące niektórych substancji mogą obniżyć temperaturę samozapłonu,
- zwiększenie wymiarów naczynia powoduje obniżenie temperatury samozapłonu,
- wzrost stężenia tlenu powoduje obniżenie temperatury samozapłonu; odwrotnie natomiast wpływa zmniejszenie jego stężenia. [5]

Wszystko, co znajduje się w strefie wybuchu narażone jest na działanie fali uderzeniowej oraz promieniowania termicznego, a organizmy żywe dodatkowo na niedomiar lub nawet całkowity brak tlenu.

Średnie wartości promieniowania przy wybuchach gazowych osiągają najczęściej wartości 50 – 75 kW•m² przy temperaturze ok. 1200 – 1300 °C.

W tabeli nr 4 zestawiono skutki oddziaływania promieniowania cieplnego na organizmy żywe i materię nieożywioną. [7]

Głównym zagrożeniem dla ludzi są odłamki, zaważenia się całych konstrukcji lub ich przemieszczenia podmuchem fali uderzeniowej. Wypadki śmiertelne i uszkodzenia ciała bezpośrednio w wyniku działania podmuchu oraz wielkości strumienia cieplnego zależą od pozycji ciała ludzkiego i jego usytuowania w stosun-

ku do miejsca wybuchu oraz obiektów odbijających falę ciśnieniową i termiczną.

Strumień cieplny kW•m ⁻²	Skutki dla ludności	Skutki dla materii nieożywionej
35	<ul style="list-style-type: none"> • znaczne prawdopodobieństwo natychmiastowych ofiar śmiertelnych, • duże prawdopodobieństwo ofiar śmiertelnych w sytuacji długotrwałej ekspozycji, • 100% zgonów w ciągu 1 min. • 1% zgonów w ciągu 10 sek. 	<ul style="list-style-type: none"> • uszkodzenie urządzeń instalacji procesowych, • elementy wykonane z materiałów palnych zapalają się w ciągu 1 min.
23	<ul style="list-style-type: none"> • możliwość ofiar śmiertelnych w sytuacji ekspozycji natychmiastowych, • 100% zgonów w ciągu 1 min. • znaczne urazy w ciągu 10 sek. 	<ul style="list-style-type: none"> • spontaniczne zapalenie się drewna, • stal niezabezpieczona osiąga temperaturę naprężenia termicznego mogącego spowodować uszkodzenia
12,6	<ul style="list-style-type: none"> • możliwość ofiar śmiertelnych w sytuacji długotrwałej ekspozycji, • duże prawdopodobieństwo ciężkich uszkodzeń ciała, • 1% zgonów w ciągu 1 min. • oparzenia pierwszego stopnia 	<ul style="list-style-type: none"> • minimalna energia dla zapłonu drewna, • topienie się rur z tworzywa sztucznego, • cienka stal, izolowana po stronie oddalonej od źródła ciepła może osiągnąć poziom naprężeń termicznych dostatecznie wysoki aby spowodować uszkodzenie strukturalne
2,1	<ul style="list-style-type: none"> • wartość minimalna do wywołania bólu po 1 min. 	
1,2	<ul style="list-style-type: none"> • nie stwarza dyskomfortu w sytuacji długich ekspozycji 	

Tablica nr 4 Skutki skutki oddziaływania promieniowania cieplnego na organizmy żywe i materię nieożywioną

Podsumowanie:

1. Znaczący wpływ na wysokość temperatury wybuchu mieszanki gazowo - powietrznej mają przede wszystkim:

- udziały cząstkowe gazów palnych w mieszaninie,
- sumaryczny udział cząstkowy gazów inertnych w mieszaninie,
- temperatura robocza gazu,
- wielkość strumienia utleniacza.

2. Wysokość temperatur wybuchu stanowi może realne zagrożenie dla konstrukcji generatora, instalacji czyszczenia i odbioru gazu, a przede wszystkim dla zdrowia i życia osób znajdujących się w strefie niebezpiecznej.

3. Znajomość wartości temperatur mogących wystąpić przy wybuchu oraz warunków jego wystąpienia umożliwia podjęcie środków zaradczych już w fazie projektowania instalacji opartej na procesie zgazowania.

3. Skutki wybuchu nawet niewielkiej ilości mieszanki gazowo – powietrznej mogą być tragiczne w skutkach nie tylko w stosunku do materii nieożywionej, ale przede wszystkim dla ludzi.

Bibliografia:
 1. Chmielniak T.; Skorek J.; Kalina J.; Lepczyński S.; Układy energetyczne zintegrowane ze zgazowaniem biomasy; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej; Gliwice 2008
 2. Cieśliński J.; Grudziński D.; Jasiński W.; Pudlik W.; Termodynamika, zadania i przykłady obliczeniowe; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej; Gdańsk 2007
 3. Pudlik W.; Termodynamika; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej; Gdańsk 2011
 4. Sawicki T.; Wybuchy przemysłowe; Bezpieczeństwo Pracy; 11/2005
 5. Smoleński D.; Teoria materiałów wybuchowych; Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej; Warszawa 1957
 6. Wybrane tablice cieplne; Politechnika Krakowska; Kraków 2006
 7. Dodatek B - Ocena skutków uwolnień substancji palnych i wybuchowych; www.Manhaz.cyf.gov.pl 2014

