ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1986
Seria: ENERGETYKA z. 94 Nr kol. 880

Stefan POSTRZEDNIK
Instytut Techniki Cieplnej
Politechniki Śląskiej

CZYNNIKI SAMOZAGRZEWANIA SIĘ PALIW STAŁYCH W OBRĘBIE URZĄDZEŃ KOTŁOWYCH

Streszczenie. W pracy podano główne czynniki determinujące powstanie i rozwój procesu samozagrzewania się paliw stałych oraz dokonano analizy niektórych z nich. Wymieniono typowe modele układów samozagrzewania się paliw, a także określono stany w jakich mogą się znajdować. Przedstawiono charakterystykę procesu samozagrzewania się paliwa w układzie nawęglania kotłów parowych.

1. Wprowadzenie

Od kilkunastu lat obserwuje się stały, ponowny wzrost znaczenia paliw stałych, jako podstawowych nośników energii. Równocześnie z tym dają znać o sobie nierozwiązane dotąd problemy dotyczące ich samozagrzewania się. Powstanie i rozwój procesu samozagrzewania się paliwa stałego, jest determinowane przebiegiem powierzchniowego zjawiska niskotemperaturowego utleniania się paliwa. Efekty energetyczne tego zjawiska mogą powodować znaczny, lokalny wzrost temperatury układu, który w skrajnym przypadku prowadzić może do samozapłonu paliwa i wybuchu gazów towarzyszących [1],[4]. Sytuacja taka może wystąpić w miejscach pozyskiwania paliwa (w kopalniach) podczas jego transportu, na składowiskach, a także w trakcie bezpośredniej utylizacji paliw.

Zasadniczym celem opracowania jest przedstawienie uproszczonej analizy czynników determinujących proces samozagrzewania się paliw stałych w obrębie układu przygotowania paliwa do jego bezpośredniej utylizacji w siłowni cieplnej. Niebezpieczeństwo samozagrzewania się paliwa obserwuje się dosyć często w miejscach jego składowania oraz w trakcie transportu do młynów węglowych. Rozważania dotyczą węgla kamiennego, jako jednego z najbardziej rozpowszechnionych paliw stałych.

2. Typowe modele układów samozagrzewania się paliw stałych

2.1. Podstawowe warunki dotyczące procesu

Do zasadniczych czynników determinujących powstanie i rozwój samozagrzewania się paliwa stałego należą [2],[3]:

a) istnienie w układzie rozdrobnionego paliwa, o odpowiedniej skłonności do utleniania się w zakresie niskich temperatur,
b) możliwość łatwego dopływu powietrza (tlenu) do miejsc zalegania tego paliwa,

e) utrudnione warunki odpływu ciepła z miejsc zachodzenia reakcji niskotemperaturowego utleniania się paliwa.

O ilości ciepła $\dot{q}_v$ generowanego w jednostce objętości paliwa decyduje iloczyn

$$\dot{q}_v = \dot{n}_{v,O_2} (MH_p) , \quad W/m^3 \tag{1}$$

gdzie:

$\dot{n}_{v,O_2}$ - kmol $O_2/(s\ m^3)$ - ilość tlenu pochłanianego w jednostce objętości paliwa,

(MH_p), J/kmol O_2 - molowa entalpia niskotemperaturowego utleniania paliwa,

Intensywność pochłaniania tlenu $\dot{n}_{v,O_2}$ zależy z kolei od takich czynników jak:

- lokalnej koncentracji tlenu c_{O_2}, kmol O_2/m^3,
- wielkości powierzchni reakcji niskotemperaturowego utleniania $A_{v,r}$, m^2/m^3
- lokalnej wartości temperatury T, K,
- parametrów równania kinetyki utleniania (energii aktywacji E, współczynnika częstości k_o).

Stopień rozdrobnienia paliwa (czynnik a.), charakteryzowany za pomocą średniej wartości średnicy ziaren d, wpływa bezpośrednio na wielkość powierzchni $A_{v,r}$ reakcji utleniania. Traktując ziarna w przybliżeniu jako kule o średnicach ekwiwalentnych d, określić można ich liczbę N w jednostce objętości złoża, wynoszącą

$$N = \frac{6}{\pi} \frac{(1-\varepsilon)}{d^3} , \quad \frac{\text{ziaren}}{m^3} \tag{2}$$

(np. dla d = 1 m, N = 1 , a dla d = 1 mm, $N = 10^9 \frac{\text{ziaren}}{m^3}$),

przy czym porowatość takiego złoża, przy kulach ułożonych w sposób kubiczny wynosi $\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6} \approx 0{,}4764$, podczas gdy wartości rzeczywiste są rzędu $\varepsilon = 0{,}35 - 0{,}45$.

Zewnętrzna powierzchnia złoża ziaren kulistych wyniesie wtedy

$$A_{v,o} = N \pi d^2$$

gdzie podstawiając wzór (2) uzyskuje się

$$A_{v,o} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} , \quad \frac{m^2}{m^3} \tag{3}$$

Na całkowitą wielkość powierzchni $A_{v,c}$ składa się powierzchnia $A_{v,o}$, a także powierzchnia wewnętrzna, zależna od mikrostruktury wewnętrznej poszczególnych ziaren. Zależność tę można ująć za pomocą równania

$$A_{v,c} = \varphi A_{v,o} = \varphi \frac{6(1-\varepsilon)}{d} , \quad \frac{m^2}{m^3} , \tag{4}$$

przy czym $\varphi > 1$ i może osiągać nawet bardzo duże wartości liczbowe [2], zależnie od rodzaju paliwa stałego.

Wzrost rozdrobnienia paliwa powoduje więc, zgodnie z równaniem (4), wzrost wielkości powierzchni, na której zachodzi reakcja.

Uwzględnić należy dodatkowo fakt, że paliwo stałe składa się najczęściej z substancji palnej oraz z niepalnej substancji mineralnej. Część powierzchni ziarna przynależna substancji mineralnej (internej) nie bierze więc udziału w reakcji niskotemperaturowego utleniania paliwa, chociaż bierze udział np. w procesie wymiany ciepła. Należy wprowadzić dlatego do równania (4) dodatkowy współczynnik korelacyjny ξ, związany z obecnością substancji internej w paliwie stałym. Ostatecznie więc

$$A_{v,r} = \xi \varphi \frac{6(1-\varepsilon)}{d}, \quad \frac{m^2}{m^3} \tag{5}$$

Znając udział objętościowy r_{in} substancji internej w paliwie, można orientacyjnie wartości współczynnika ξ wyznaczyć z równania

$$[3 - 2(1-\xi)](1-\xi)^2 - r_{in} = 0 \tag{6}$$

Równanie (6) spełniają między innymi następujące pary liczb

r_{in}	0,0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3
ξ	1,0	0,9411	0,9159	0,8646	0,8042	0,7129	0,6367

r_{in}	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ξ	0,5671	0,5	0,4329	0,3633	0,2871	0,1958	0,0

W trakcie zachodzenia procesu utleniania, ilość substancji palnej zmniejsza się, co oznacza, że udział objętościowy r_{in} substancji internej wzrasta, współczynnik ξ maleje, a tym samym zmniejsza się efektywna powierzchnia reakcji $A_{v,r}$.

Szybkość zmian temperatury w dowolnym miejscu zachodzenia reakcji utleniania analizować można w oparciu o równanie

$$(\varrho c)\frac{dT}{d\tau} = \dot{q}_v - \dot{q}_{v,ot} \tag{7}$$

będące uproszczonym zapisem bilansu energii dla jednostki objętości złoża węglowego.

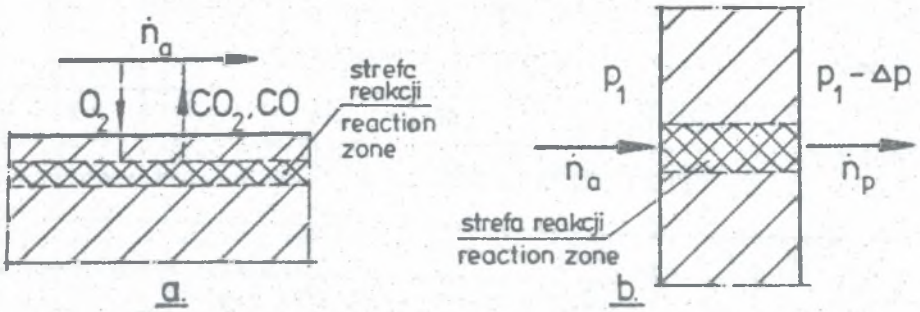
W równaniu (7) : (ϱc) - oznacza pojemność cieplną jednostki objętości złoża, $\dot{q}_v$ - wynika z wzoru (1), a $\dot{q}_{v,ot}$ - jest strumieniem ciepła odprowadzanym z jednostki objętości paliwa do miejsc sąsiednich układu, lub do jego otoczenia.

Z wzoru (7) wynika jasno, że lokalny wzrost temperatury $\frac{dT}{d\tau} > 0$ wystąpi wtedy, gdy spełniona będzie nierówność $\dot{q}_v > \dot{q}_{v,ot}$. W przeciwnym wypadku proces samozagrzewania się paliwa nie będzie się rozwijał. Oprócz tlenu istotną w samozagrzewaniu się paliwa stałego odgrywa także wilgoć. Kondensacja wilgoci na powierzchni paliwa powoduje uwolnienie entalpii parowania, co ma również istotne znaczenie w bilansie energii warstwy. Ponadto wilgoci przypisuje się także [1],[2] działanie katalityczne w reakcji niskotemperaturowego utleniania węgla.

2.2. Główne typy układów

Ze względu na uwarunkowania i mechanizm dopływu utleniacza (warunek b. pktu 2.1) do miejsc zachodzenia reakcji utleniania, wyróżnić można następujące typy układów:

- dyfuzyjny, gdzie dopływ tlenu i odpływ lotnych produktów utleniania odbywa się na drodze dyfuzyjnej wymiany masy,
- z przepływem wymuszonym, kiedy strumień powietrza penetruje przez usypane złoże węglowe, przy czym sam przepływ wymuszony jest istniejącą różnicą ciśnień po obu stronach warstwy.



Rys. 1. Podstawowe typy układów
a. dyfuzyjny, b. z przepływem wymuszonym

Fig. 1. Basic types of the systems, a. diffusive, b. forced flow

Zarówno w przypadku układu dyfuzyjnego, jak i układu z przepływem wymuszonym samo złoże węglowe może pozostawać w spoczynku, albo przemieszczać się. Szczególnie istotnym jest przypadek, kiedy zasadnicza struga utleniacza oraz warstwa paliwa znajdują się w ruchu, a względem siebie przemieszczają się w sposób przeciwprądowy.
Jednym z przypadków szczególnych jest układ dyfuzyjny-objętościowy, kiedy warstwa paliwa oraz utleniacz pozostają w spoczynku względem siebie. Sytuacja taka występuje np. podczas transportu pyłu węglowego w zamkniętych cysternach. W każdym z wymienionych typów układów różne są warunki wymiany substancji, a także przepływu ciepła.

2.3. Zasadnicze stany analizowanych układów

W historii przebiegu każdego procesu samozagrzewania się paliwa stałego wyodrębnić można następujące etapy:

- początkowy (inicjacji) procesu,
- rozwoju, względnie wygasania zjawisk,
- asymptotyczny (ustabilizowany).

W czasie obejmującym dwa pierwsze etapy układ pozostaje w stanie nieustalonym. Po dostatecznie długim okresie czasu, układ wchodzi w etap asymptotyczny, w którym pozostaje w stanie ustalonym. Stan ustalony charakteryzuje się tym, że w danym miejscu układu temperatura ustabilizowana na określonym poziomie nie ulega zmianom. Temperatury układu etapu asymptotycznego mogą ustabilizować się na odpowiednio wysokim poziomie wtedy, kiedy w układzie realizowany jest przeciwprądowy ruch paliwa i czynnika utleniającego. Sytuacja taka występuje np. w układzie nawęglania siłowni, w obrębie przemysłowych zasobników węgla. Bardzo istotną sprawą jest znajomość pełnego przebiegu zmian temperatury w układzie, obejmującego wszystkie etapy procesu samozagrzewania się paliwa.

3. Samozagrzewanie się paliwa w układzie nawęglania

3.1. Charakterystyka miejsc występowania zagrożeń

Największe niebezpieczeństwo powstania i rozwoju samozagrzewania się węgla występuje :

- na zewnętrznym składowisku paliwa,
- w obrębie ciągów transportowych,
- w objętości przymłynowych zasobników węgla.

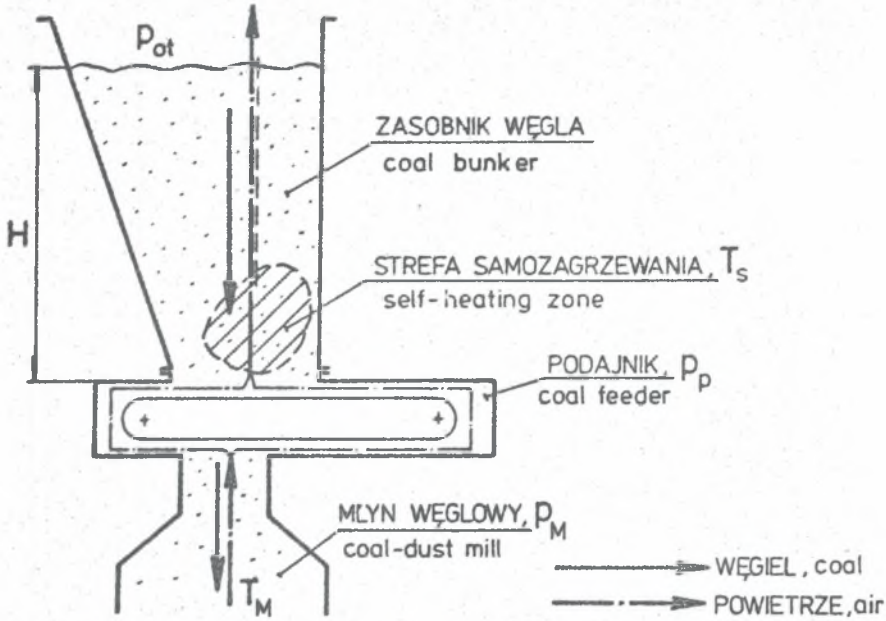
Paliwo, które uległo zagrzaniu na składowisku zewnętrznym może łatwo ulegać dalszemu samozagrzewaniu podczas transportu do młynów.

Szczególnie groźne może być dalsze samozagrzewanie się węgla w obrębie zasobników przedmłynowych [4]. Zewnętrzne składowisko węgla jest układem typu dyfuzyjnego, w którym strumień powietrza omywa z zewnątrz pozostającą w spoczynku warstwę paliwa. Układ ten pozostaje także pod silnym działaniem czynników atmosferycznych (częste zmiany wilgoci, silne nasłonecznienie), sprzyjających samozagrzewaniu się węgla. Ciągi transportowe są układami dyfuzyjnymi, z przemieszczającą się warstwą paliwa.

Najciekawszym miejscem są przedmłynowe zasobniki paliwa. Jest to najczęściej układ z przepływem wymuszonym, w którym strumień powietrza penetruje przez usypane i wypełniające zasobnik złoże węglowe - rys. 2]. Warstwa paliwa oraz strumień powietrza przemieszczają się względem siebie w sposób przeciwprądowy. Przyczyną penetracji gazów jest nadciśnienie panujące w młynie. Istnieją więc warunki do powstania tutaj ustabilizowanego obszaru samozagrzewania się węgla, przy czym poziom temperatury asymptotycznej stanu ustalonego, zależy od wielkości strumienia przepływającego powietrza oraz panujących warunków wymiany ciepła.

3.2. Poziom samozagrzewania się węgla w zasobniku

W obrębie zasobnika znajduje się dostatecznie duża ilość paliwa, dlatego wydajność wewnętrznych źródeł ciepła, pochodzącego od niskotemperaturowego utleniania się węgla zależeć będzie przede wszystkim od wielkości przepływającego strumienia powietrza i lokalnej temperatury. Każdy kmol tlenu O_2 reagując z węglem według schematu



Rys. 2. Schemat przepływu substancji w analizowanym układzie
Fig. 2. Scheme of mass transport in the analysed system

$$O_2 + C \longrightarrow CO_2$$

dostarcza energii w ilości

$$(MH_p)_{CO_2} = 393{,}77 \cdot 10^3 \ \text{kJ/kmol} \ CO_2.$$

Jeżeli znowu reakcja biegnie według zapisu

$$O_2 + 2\,C \longrightarrow 2\,CO$$

wtedy uzyskuje się

$$(MH_p)_{CO} = 110{,}62 \cdot 10^3 \ \text{kJ/kmol CO}.$$

Biorąc pod uwagę całkowitą ilość n_{O_2} kmol tlenu, z której tylko część s przereagowała na CO_2, w ilości $n_{CO_2} = s\, n_{O_2}$, wtedy ilość pozyskanego tlenku węgla wyniesie $n_{CO} = 2\,(1 - s)\, n_{O_2}$.

Efektywnie więc z 1 kmol O_2 uzyskuje się

$$(MH_p) = s\,(MH_p)_{CO_2} + 2\,(1 - s)(MH_p)_{CO}, \quad \text{kJ/kmol } O_2 \tag{8}$$

energii termicznej, przy czym $0 \leqslant s \leqslant 1$.

Dla dalszych rozważań przyjęto dane odnoszące się do instalacji kotłów OP-140, z młynami węglowymi typu EM-70:

- wydajność młyna $\dot{m}_p = 4{,}2$ kg/s,
- wentylacja jednostkowa $w_j = 1{,}4$ kg pow./kg pal.

Z całkowitego strumienia powietrza

$$\dot{m}_{a,o} = \dot{m}_p w_j = 4,2 \cdot 1,4 = 5,88 \text{ kg/s}$$

tylko nieznaczny ułamek α przepływa w kierunku zasobników węgla, podczas gdy zasadnicza część jego $(1 - \alpha)$ przepływa w formie mieszanki pyłowo-powietrznej do kotła.

Strumień powietrza

$$\dot{m}_a = \alpha \dot{m}_{a,o} = \alpha w_j \dot{m}_p \tag{9}$$

penetrujący przeciwprądowo przez złoże węgla w zasobniku, nie odgrywa praktycznie żadnej roli w ogólnym bilansie powietrza w układzie spalania, ale posiada istotny wpływ na zjawisko samozagrzewania się węgla w zasobnikach. Wydajność wewnętrznych źródeł ciepła może tam wynieść

$$\dot{Q}_V = \dot{n}_{O_2} (MH_p) = 0,21 \frac{\dot{m}_a}{M_a} (MH_p) \tag{10}$$

a po podstawieniu równań (8) i (9) do (10)

$$\dot{Q}_V = 7,24 \cdot 10^{-3} \alpha w_j \dot{m}_p \left[s (MH_p)_{CO_2} + 2 (1 - s)(MH_p)_{CO} \right] \tag{11}$$

Dla wyżej przytoczonych danych uzyskuje się

$$\dot{Q}_V = 0,0426 \alpha \left[s (MH_p)_{CO_2} + 2 (1 - s)(MH_p)_{CO} \right] \tag{12}$$

Zakładając, że $\alpha = 0,01$ wyznaczyć można dwie wartości skrajne

$$\dot{Q}_{V,s=1} = 167,7 \text{ kW}$$

oraz

$$\dot{Q}_{V,s=0} = 94,2 \text{ kW}$$

Gdyby założyć nawet, że tylko 10 % tlenu przereagowało (co jest wartością zaniżoną) to i tak wydajność wewnętrznych źródeł ciepła będzie znaczna. Rzeczywiste wartości współczynnika α zależą od nadciśnienia panującego w młynie węglowym oraz od wysokości warstwy paliwa w zasobniku.

4. Podsumowanie

Samozagrzewanie się paliw stałych jest złożonym procesem, na który składa się wiele zjawisk fizycznych oraz chemicznych. Proces ten rozwija się samorzutnie, niosąc ze sobą duże zagrożenie w wielu miejscach. Powstają dwa typy zagadnień z tym związanych:

a) w jaki sposób zapobiegać samozagrzewaniu się paliw stałych w określonych układach, a także jak organizować kontrolę tego procesu,

b) jak należy postępować na wypadek wystąpienia już nadmiernego samozagrzewania się paliwa, jak likwidować ognisko zarzewia, aby nie dopuścić do dalszego jego rozwoju.

Stwierdzić należy, że liczne współzależności tego procesu nie zostały dotąd w pełni określone, stąd istnieje potrzeba dalszych wszechstronnych badań w tym zakresie.

Szczególną uwagę należy zwrócić na jakościowo-ilościowy rozpływ powietrza w obrębie układów i wyznaczyć miejsca największego zagęszczenia jego strumienia. Rozpływy takie są zazwyczaj opisane za pomocą funkcji wielowymiarowych (przestrzennych), przy zmiennym położeniu brzegów obszaru wypełnionego materiałem usypanym. Uściślenia wymagają także sformułowania i algorytmy obliczeniowe dotyczące kinetyki niskotemperaturowego utleniania się paliw stałych. Zależności te mogą być określone jedynie na drodze doświadczalnej.

Projektując nowe układy należy:
- przeanalizować możliwość wystąpienia samozagrzewania się paliwa,
- określić miejsca pojawienia się przyszłego ogniska zarzewia ognia,
- opracować odpowiedni system pomiarowo-ostrzegawczy.

W omawianych układach nawęglania kotłów, pierwotne źródło samozagrzewania znajduje się najczęściej na zewnętrznych składowiskach paliwa i na to miejsce powinna być zwrócona szczególna uwaga obsługi.

LITERATURA

[1] Baum M.: On Predicting Spontaneous Combustion. Comb. and Flame, 41, 1981.

[2] Güney M.: Oxidation und Selbsterhitzung von Steinkohle. Glückauf-Forschh., 36, No 6, 1971.

[3] Maciejasz Z., Kruk F.: Pożary podziemne. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1977.

[4] Postrzednik S.: Mechanizm oraz analiza przyczyn wybuchu gazów w rejonie podajnika węgla. Energoprojekt, Gliwice 1983.

ФАКТОРЫ САМОСОГРЕВАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА
В КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ

Р е з ю м е

В статье приводится просмотр главных факторов детерминующих возникновение и развитие процесса самосогревания твердого топлива. Указывается на опастности связанные с этим процессом, а также места их возникновения.

Проведено анализ величины поверхности реакции низкотемпературного окисления топлива, указывая на значение наличия инертного вещества в топливе.

Выделено два главных модельных типа системы: диффузионный и с вынужденным течением, под влиянием разницы давления, летучих тел.

Выделено тоже основные состояния системы, в том начальный, неустановившийся этап и асимптоматический.

Особое внимание обращено на возможность самосогревания топлива в системе топливоподачи в котёл, в местах складирования топлива, в пределе транспортных линий, а также примельничных бункерах угля. Проведено оценку границ

производительности источников тепла связанных с низкотемпературным окислением угля в объёме бункера угля. В конкретной системе уровень самосогревания зависит от актуальной высоты слоя угля в бункере, а также от сверх давления существующего в мельнице.

В подведении итогов обращено внимание на необходимость продолжения исследования в этой области для лучшего изучения всего процесса.

MAIN FACTORS OF SOLID FUELS SELF - HEATING IN THE BOILER SYSTEMS

S u m m a r y

A review of main factors influencing the initiation and development of solid fuels self-heating has been presented. Dangers connected with this process and seates where self-heating can take place has been pointed out.

An analysis of the surface of low temperature oxidation has been performed. The importance of the presence of inert substance in the solid fuel has been indicated.

Two main types of modeled system has been considered: a diffusive one, and a system with forced flow of volatile substances. Three basic stages of the system: an initial, transient and asymptotic one has been distinguished. Special attention has been given to the possibility of self-heating within the cooling system of boiler house, in places of fuel storage, in the transport, and the mill coal bunkers. A limit of the generation rate of the heat sources connected with low temperature oxidation of the coal has been estimated. In a given installation the level of self heating depends on the hight of the coal layer in the bunker, and the pressure difference between the mill and the environment.

The need of further research in that area to enable one the better learning of the self-heating process has been stressed.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwyner

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.