

Ryszard PETELA

Krzysztof UTRACKI

Instytut Techniki Ciepłej

WSTĘPNE BADANIA PROCESU SPALANIA W POLU ELEKTRYCZNYM

Streszczenie. Dokonano przeglądu obszernej literatury dotyczącej tematu. Wykonano palnik o przeciwbieżnych strugach oraz instalację towarzyszącą. Przeprowadzono badania wpływu pola elektrycznego na kształt płomienia, występowanie siły masowej, poziom hałasu płomienia i wygaszanie. Uzyskane wyniki przedstawiono wykresem i tablicą.

1. Wstęp

W ciągu ostatnich lat silnie rozwinęła się nauka o plazmowym stanie materii. Płomień jest przypadkiem plazmy niskotemperaturowej, a jego elektryczne właściwości zależą zarówno od rodzaju paliwa jak i sposobu spalania. Już dziś wykorzystuje się niektóre z tych właściwości, np.: w generatorach MPD czy też do jonizacyjnej kontroli obecności płomienia przy palniku.

W poszukiwaniu nowych efektów oddziaływania pola elektrycznego na płomień przeprowadzono w niniejszej pracy badania procesu spalania w laboratoryjnym palniku o przeciwbieżnych strugach. Doświadczenia te miały charakter badań podstawowych. Pojawiające się w literaturze naukowej różnorodne doniesienia na ten temat nie wyjaśniają problemu całkowicie, ale są jednak zgodne co do faktu, że pole elektryczne sprzyja procesowi palenia się, tzn. że na przykład: rozszerza granice zapłonu, podwyższa temperaturę płomienia, przesuną granicę zdmuchnięcia. Kontrowersyjny jest jak dotąd pogląd o wpływie pola elektrycznego na normalną prędkość spalania.

2. Przegląd literatury rozważanego zagadnienia

Początek zainteresowań elektrycznymi właściwościami płomienia sięga roku 1600, kiedy to na dworze królowej Elżbiety fizyk sir William Gilbert badał i opisywał przyciąganie płomienia do elektrycznie naładowanych ciał.

W czasach późniejszych wielu badaczy zajmowało się oddziaływaniem płomienia i elektryczności. Spośród nich wymienić należałoby takich, jak: De-saguliers, Watson, Henly, Ingenhauß, Volta, Bennet, Brande, Grove, Kellog, Faraday, Chattock. Wykazali oni, że płomień może przewodzić prąd elektryczny oraz że może być odchylany w polu elektrycznym.

Za początek nowoczesnych badań można uznać pracę Calcote'a, w której na podstawie odchylenia się płomienia Bunsena w poprzecznym polu elektrycznym wykazał on, że koncentracja jonów musi być rzędu 10^{18} jonów/m³, a więc znacznie większa, niż by to wynikało z równowagi termodynamicznej. A zatem jony muszą być produktami reakcji chemicznych.

Od tego czasu wykonano liczne badania w rozmaitych aspektach badawczych. Przykładem mogą być poniżej sklasyfikowane pozycje:

1. Identyfikacja jonów [13, 18, 27]
2. Koncentracja jonów i elektronów [3, 11, 12, 35]
3. Chemiczny mechanizm formowania jonów [29, 38]
4. Intensywność generacji jonów [5, 37, 45]
5. Rozchodzenie się i prędkość płomienia [2, 4, 7, 15, 19, 26, 41]
6. Siła masowa i wiatr jonowy [28, 30, 31, 33]
7. Rozważania nad rolą elektronów [8, 23, 46]
8. Temperatura elektronowa [3, 9, 42, 46]
9. Powstawanie sadzy [1, 25, 34, 40]
10. Wprowadzanie do płomienia posiewu alkalicznego [44]
11. Pole elektryczne wysokiej częstotliwości [26]
12. Pomiar powierzchni płomienia [20]
13. Stabilność płomienia [22]
14. Powstawanie łuku elektrycznego w płomieniu [17, 21, 44]
15. Przekazywanie ciepła [16, 24, 39]
16. Przewodzenie prądu elektrycznego [48]
17. Powstawanie aerozoli [47]
18. Kształt płomienia [6, 24]

Ponadto wiele z wyszczególnionych tu problemów omówionych jest w monografiach [32, 43] a także w jednym z rozdziałów [36].

3. Mechanizm wpływu pola elektrycznego na płomień

Oddziaływanie pola elektrycznego na płomień odbywa się pośrednio poprzez ładunki elektryczne w postaci jonów dodatnich i elektronów.

Pod wpływem pola ładunki elektryczne zostają przyspieszane, zwiększając tą drogą swoją energię. Na skutek zderzeń cząstki dodatnie przekazują pęd cząstkom obojętnym. Elektrony nie przekazują efektywnie pędu w obszarze płomienia ze względu na mały przekrój czynny. Uporządkowany ruch cząstek obojętnych spowodowany przekazaniem pędu od cząstek naładowanych nosi nazwę wiatru jonowego lub wiatru Chattocka.

Przemiana energii pola w energię kinetyczną ruchu cząstek powoduje w efekcie wywiązanie się ciepła. Jeżeli natężenia pola jest na tyle małe, że nie powstaje reakcja lawinowa (wyładowanie), to powstające ciepło Joula jest o cztery rzędy wielkości mniejsze niż wywiązująca się energia chemiczna i może powodować wzrost temperatury w obszarze spalania o co najwyżej 1K.

Faktowi temu nie przypisuje się większej roli. Jeżeli natomiast natężenie pola powoduje przebicie, to powstający łuk elektryczny dostarcza stosunkowo dużą ilość energii.

Tą drogę otrzymać można bardzo wysokie temperatury, nawet takie, które nie są możliwe do uzyskania drogą rekuperacji ciepła, ze względu na ograniczoną możliwość podgrzewania substratów.

Istnieje także trzeci mechanizm wpływu pola elektrycznego. Zderzenia cząstek spowodowane obecnością pola przyczyniają się do powstania dodatkowych centrów reakcji. W rezultacie powinna wzrastać intensywność procesu spalania.

4. Opis stanowiska badawczego i przeprowadzonych badań. Wyniki

Palnik składa się z dwu współosiowych, przeciwnie skierowanych dysz, z których każda ma koncentryczny płaszcz powietrzny zapewniający chłodzenie. Średnice dysz wynoszą 2 mm. Ich odległość waha się od 25 do 30 mm. Górna i dolna część palnika są odizolowane elektrycznie od siebie i stanowią jednocześnie elektrony. Górną dyszą dopływa gaz palny i azot, dolną - tlen i azot. Strumienie czynników regulować można w dowolnych proporcjach.

Paliwo i utleniacz mieszają się na skutek swych prędkości oraz gradientów koncentracji. Stąd zawsze istnieje taki obszar, gdzie paliwo i utleniacz znajdują się w stechiometrycznej ilości. Tam właśnie powstaje czoło spalania w kształcie krążka. Poprzez zwiększenie przepływu czynników można osiągnąć taki stan, w którym reakcja chemiczna nie będzie nadążała za wydajnością przepływu i wówczas płomień wygasa w środku, bądź całkowicie.

Przedstawiony układ palnika zapewnia dwuwymiarowość przepływu oraz jednakowe oddziaływanie pola elektrycznego w całym obszarze płomienia.

Przeprowadzono badania wpływu pola elektrycznego na:

- kształt płomienia,
- występowanie siły masowej,
- poziom hałasu płomienia,
- wygaszenie.

Niektóre wyniki zamieszczone są w pracy [49].

Wykazano, że pole elektryczne nie odkształca płomienia wodoru, a fakt ten tłumaczyć należy brakiem występowania istotnej jonizacji w płomieniu wodoru [14]. Natomiast gaz miejski o składzie: $\text{CO}_2 = 4\%$, $\text{C}_n\text{H}_m = 3,2\%$, $\text{O}_2 = 0,8\%$, $\text{CO} = 8\%$, $\text{H}_2 = 52\%$, $\text{CH}_4 = 23\%$, $\text{N}_2 = 8\%$ dawał płomień, który przyciągany był do katody, co tłumaczyć można efektem wiatru jonowego. Większą niż w przypadku spalania wodoru generację jonów gaz miejski zawdzięcza obecności CH_4 i procesom chemojonizacji [35]. Wynika stąd wniosek ogólny, że efekt przyciągania płomienia węglowodorowego do katody, w przypadku płomieni o przepływie substratów w zgodnym kierunku, powodować będzie lepszą stabilizację płomienia, jeżeli usytuować odpowiednio katodę.

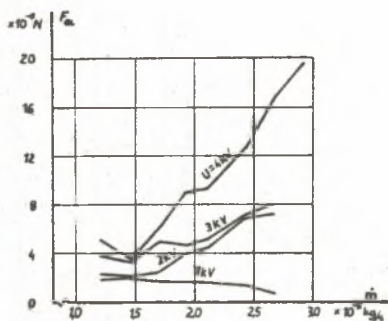
W celu oszacowania siły elektrycznej oddziaływującej na płomień wykonano następujący eksperyment: gaz miejski puszczany był z dyszy górnej, a tlen z dyszy dolnej. Dla pewnych wartości przepływu czynników płomień miał kształt krążka i rozptył spalin był symetryczny. Przyłożenie dodatniego potencjału do dyszy górnej zakłócało tę symetrię. Powrót do poprzedniego stanu uzyskać można było poprzez zwiększenie strumienia tlenu. Wielkość zmiany strumienia tlenu świadczyła o wielkości wpływu pola elektrycznego. Zmiana strumienia pędu strugi tlenu jest miarą siły wywieranej przez pole elektryczne na płomień. Wartość siły obliczono ze wzoru:

$$\vec{F}_{el} = \vec{P}_u - \vec{P}_o \quad (1)$$

gdzie:

\vec{F}_{el} - siła elektryczna (wektor),

\vec{P}_o, \vec{P}_u - strumień pędu strugi (wektor) tlenu przed i po przyłożeniu potencjału do elektrod.



Rys. 1. Siła elektryczna

Otrzymane wartości w funkcji strumienia \dot{m} gazu palnego przedstawia wykres (rys. 1). Parametrem jest tu dodatni potencjał elektrody górnej. Jak widać, siła elektryczna przy dużych napięciach U jest wyraźnie proporcjonalna do strumienia paliwa, a więc do ilości zawartych w płomieniu jonów. Średnią wartość siły masowej \bar{q}_m wywołanej polem elektrycznym można orientacyjnie określić wzorem:

$$\bar{q}_m = \frac{\vec{F}_{el}}{V} \quad (2)$$

Szacując objętość V płomienia na podstawie fotografii wykonanej na kliszy panchromatycznej ORWO NP 27 na około $V = 1,5 \text{ cm}^3$ uzyskano wartość $\bar{q}_m = 30 \div 150 \text{ N/m}^3$, co jest wielkością około 50 razy większą niż grawitacyjna siła masowa ($Q\bar{g}$). W przypadku rozważania równania Naviera-Stokesa, dotyczącego obszaru w polu elektrycznym, siła elektryczna nie powinna być pomijana, a więc na przykład:

$$\varrho(\bar{w}\nabla)\bar{w} = \varrho\bar{g} + \bar{q} - \text{grad } p + \eta\nabla^2\bar{w} + \frac{1}{3}\eta\text{grad}(\text{div } \bar{w}) \quad (3)$$

gdzie:

\bar{w}, Q, p, \bar{g} - prędkość przepływu (wektor), gęstość, ciśnienie i przyspieszenie grawitacyjne (wektor),

η - dynamiczny współczynnik lepkości,

\bar{q} - lokalna siła masowa wywołana polem elektrycznym.

Trzecim badanym efektem był efekt zmniejszania hałasu płomienia. W miarę dodawania azotu do strug tlenu i gazu miejskiego płomień zmieniał swój kształt od krążka (dysku) poprzez krążek z otworem w środku do torusa. Torus drgał intensywnie powodując hałas rzędu 80÷90 dB (zagłuszający np. rozmowę). Przyłożenie napięcia pomiędzy dysze, w niektórych przypadkach, hałas ten znacznie redukowało. Płomień w polu elektrycznym zachowywał się tak, jak gdyby zmniejszono strumień azotu w płomieniu bez pola.

Badano również wpływ pola elektrycznego na wygaszanie płomienia. Stwierdzono, że pole elektryczne pozwala na istnienie płomienia w tych zakresach przepływu, dla których normalnie płomień wygaszał.

5. Uwagi końcowe

Potwierdzono niewątpliwy wpływ pola elektrycznego na proces spalania. Dalsze poznanie zjawiska wymaga precyzyjniejszych metod pomiaru, np. optycznych (interferometrii) pozwalających określić objętość płomienia. Wskazane byłoby też określenie rozkładu temperatury i koncentracji składników.

LITERATURA

- [1] Ball R.T., Howard J.B.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p.353. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1971.
- [2] Baranow A.A., Bułdakow W.F., Szetuchin G.G.: Fiz. Gorienija i Wzrywa, 12.5.1976.
- [3] Bell J.C., Bradley D., Jesch L.F.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p. 345. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1971.
- [4] Blair D.W., Shen F.C.T.: Combust. Flame, 13.440.1969.
- [5] Boothman D., Lawton J., Melinek S.J., Weinberg F.J.: Proc. Int. Symp. Combust., 12th, p. 969. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1969.
- [6] Borisenko W.M., Kelszman E.A., Mieszczeriakow G.M.: Mech. Zidkosti i Gaza, 1.121.1975.
- [7] Bowser R.J., Weinberg F.J.: Combust. Flame, 18.296.1972.
- [8] Bradley D., Said M.A.: Ibrahim. Combust. Flame, 22.43.1974.
- [9] Bradley D., Shappard C.G.W.: Combust. Flame, 15.323.1970.
- [10] Calcote H.F.: Symp. Combust. Flame Explos. Phenomena, 3rd, p.245. Williams Wilkins, Baltimore, Maryland 1949.
- [11] Calcote H.F.: Combust. Flame, 1.385.1957.
- [12] Calcote H.F.: Proc. Int. Symp. Combust., 9th, p. 622. Academic Press, New York 1963.
- [13] Deckers J., Van Tiggelen A.: Proc. Int. Symp. Combust., 7th, p.254. Butterworths, London 1959.

- [14] Desty D.H., Geach C.J., Goldup A.: An Examination of the Flame Ionization Detector Using a Diffusion Dilution Apparature. Third Int. Symp. on Gas Chromatography., Edinburg, June 1960.
- [15] Diaczko B.G., Potonski I.J., Klimow A.S.: Fiz. Gorienija i Wzrywa, 12.3.1976.
- [16] Fells I., Harker J.H.: Combust. Flame, 12.587.1968.
- [17] Fells I., Gawen J.C., Harker J.H.: Combust. Flame, 11.309.1967.
- [18] Feugier A., Van Tiggelen A.: Combust. Flame, 11.234.1967.
- [19] Fox J.S., Mirchandani I.: Combust. Flame, 22.267.1974.
- [20] Fox M.D., Weinberg F.J.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p.641. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1971.
- [21] Gawen J.C., Harker J.H., Fells I.: Nature (London), 210.1149.1966.
- [22] Harker J.H., Porter J.E.: J. Inst. Fuel, 41.264.1968.
- [23] Heinsohn R.J., Wulfhorst D.E., Becker P.M.: Combust. Flame, 11.288.1967.
- [24] Heinsohn R.J., Wilhelm C.F., Becker P.M.: Combust. Flame, 14.341.1970.
- [25] Howard J.B.: Proc. Int. Symp. Combust., 12th, p. 877. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1969.
- [26] Jaggere H.C., von Engel A.: Combust. Flame, 16.275.1971.
- [27] Jensen D.E., Miller W.J.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p.363. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1971.
- [28] Jones F.L., Becker P.M., Heinsohn R.J.: Combust. Flame, 19.351.1972.
- [29] Kinbara T., Noda K.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p. 333. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania.
- [30] Lawton J.: Combust. Flame, 17.7.1971.
- [31] Lawton J., Mayo P.J.: Combust. Flame, 17.243.1971.
- [32] Lawton J., Weinberg J.F.: Electrical Aspects of Combustion. Oxford. Clarendon Press. 1969.
- [33] Lawton J., Weinberg F.J.: Proc. Roy. Soc., Ser. A 277.468.1964.
- [34] Mayo P.J., Weinberg F.J.: Proc. Roy. Soc., Lond. A 319.351.1970.
- [35] Miller W.J.: Oxid. Combust. Rev. 3.97.1968.
- [36] Palmer H.B., Beer J.M.: Editors, Combustion Technology. Some modern Developments. Academic Press, New York and London 1974.
- [37] Peeters J., Van Tiggelen A.: Proc. Int. Symp. Combust., 12th, p.437. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1969.
- [38] Peeters J., Lambert J.F., Hertoghe P., Van Tiggelen A.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p. 321. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1971.
- [39] Pejack E.R., Jones C.D.: Combust. Flame, 12.509.1968.
- [40] Place E.R., Weinberg F.J.: Proc. Int. Symp. Combust., 11th, p.245. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1967.
- [41] Salamandra G.D., Wentzel N.M., Fiedosiejewa I.K.: Fiz. Gorienija i Wzrywa, 12.2.1976.
- [42] Silla H., Dougherty T.J.: Combust. Flame, 18.65.1972.
- [43] Stiepanow E.M., Diaczko B.G.: Jonizacija w płomieni i elektryczne pole. Miertakurgia. Moskwa 1968.
- [44] Uhlhem M.B., Walsh B.W.: Combust. Flame, 17.45.1971.
- [45] Van Tiggelen A., Peeters J., Vinckier C.: Proc. Int. Symp. Combust., 13th, p. 311. Combust. Inst., Pittsburgh, Pennsylvania 1971.

- [46] Von Engel A., Cozens J.R.: Nature (London), 202.480.1974.
[47] Weinberg F.J.: Proc. Roy. Soc., Ser. A 307.195.1968.
[48] Wilson H.A.: Rev. Mod. Phys., 2.156.1931
[49] Zembek J.: Badanie procesu spalania w polu elektrycznym, Pr.dypl. wykonana w Inst. Tech. Ciep. Pol. Śl. Gliwice 1979.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Р е з ю м е

В статье представлен обзор обширной литературы, касающейся темы. Сделана горелка с противоточными струями и сопровождающие установки. Проведены исследования, связанные с определением влияния электрического поля на форму пламени, появление массовой силы, интенсивность шума пламени и гашение.

Полученные результаты представлены диаграммой и таблицей.

INTRODUCTORY INVESTIGATION OF THE COMBUSTION PROCESS IN ELECTRIC FIELD

S u m m a r y

The extensive survey of literature on considered subject is carried out. For experiments the opposite jet burner was applied. The investigations were carried out in order to determine the influence of the electric field upon the flame shape, body force appearing, flame noise level and extinction phenomenon. Some obtained results are presented in Figure 4 and in the table 1.