

А.В. НІМИЧ,¹ О.Є. СИДОРОВ,² В.Г. ШЕВЧУК²

¹ Одеська Військова академія

(Вул. Фонтанська дорога, 10, Одеса 65026)

² Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

(Вул. Дворянська, 2, Одеса 65082; e-mail: makload@gmail.com)

ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ГОРІННЯ РІДИННОГО ВУГЛЕВОДНЕВОГО ПАЛИВА

УДК 536.46

Експериментально досліджено вплив неоднорідного електричного поля (циліндричний конденсатор) на горіння вуглеводневої краплі бензолу, гексану, або метанолу, для яких притаманний різний ступінь утворення сажі. Показано можливість як збільшення, так і зменшення масової швидкості горіння в залежності від полярності (напрямку) поля і виду палива. Описано гістерезисні явища у процесі зриву або охоплення краплі полум'ям в залежності від величини поля.

Ключові слова: рідинне паливо, сажоутворення, електричне поле, електричний пробій, масова швидкість горіння.

1. Вступ

При вивченні впливу електричного поля на горіння вуглеводневого палива, як правило, обмежуються накладенням однорідного зовнішнього поля [1–3], при цьому основне падіння напруги відбувається в зоні догорання, і істотного впливу на хімізм горіння практично не спостерігається.

В [4] виявлено, що вплив пульсуючого і постійного електричних полів на реакційні зони попередньо перемішаного полум'я “пропан-повітря” залежить від полярності прикладеної напруги. Більшість робіт із впливу електричного поля проведені для дифузійного полум'я. Так, в [5] теоретично досліджено вплив іонного вітру, який викликано змінним високочастотним електричним полем, на стійкість газофазного полум'я, яке формується на зустрічних потоках пального і окислювача (дифузійне полум'я). В [6] розроблено теоретичну модель дифузійного полум'я “етилен-повітря” в постійному електричному полі. Показано, що електричне поле впливає на поле швидкостей і стру-

ктуру зони горіння як результат дії на заряджені частинки сажі, тобто за рахунок електричного вітру. В [7] експериментально досліджуються характеристики дифузійного полум'я на зустрічних потоках пального (метан/азот) і окислювача (азот/кисень) у змінному електричному полі. Показано, що ці характеристики (швидкість та коливання полум'я) суттєво залежать від іонного вітру, а хімічні і теплові ефекти впливу поля практично відсутні. В [8] досліджуються електричні пробіи в плазмі дифузійного воднево-повітряного полум'я, які свідчать про те, що у іонному вітрі основний внесок належить від'ємним іонам. В [9] досліджувалась взаємодія низькочастотного електричного поля з фронтом попередньо перемішаного полум'я (метан-кисень-азот), що приводить до досить потужних акустичних коливань фронту полум'я. В [10] експериментально досліджено вплив постійного електричного (горизонтального) поля на швидкість горіння та структуру дифузійного полум'я стаціонарної краплі різних видів вуглеводневого рідинного палива (гексан, бензол, метанол). Показано, що швидкість вигорання збільшується до 15%, що зумовлено дією механізму іонного вітру на форму полум'я і пов'язаного з цим збільшенням тепло- і масообміну між краплиною та фронтом полум'я. Аналогічні результати отримані в роботі [11], в якій досліджувалося випаровування і горіння неста-

Цитування: Німич А.В., Сидоров О.Є., Шевчук В.Г. Вплив неоднорідного електричного поля на горіння рідинного вуглеводневого палива. *Укр. фіз. журн.* **68**, № 1, 25 (2023).

Citation: Nimych A.V., Sydorov O.Y., Shevchuk V.G. Influence of a non-uniform electric field on the combustion of liquid hydrocarbon fuels. *Ukr. J. Phys.* **68**, No. 1, 25 (2023). <https://doi.org/10.15407/ujpe68.1.25>.

ISSN 0372-400X. *Укр. фіз. журн.* 2023. Т. 68, № 1

ціонарної краплі в постійному (вертикальному) електричному полі.

При накладенні зовнішнього електричного поля на палаючу краплю вуглеводневого пального повинен виникати спрямований рух заряджених частинок сажі, що можна уявити як обдув краплі зовнішнім потоком [12, 14]. В [13] показано, що конвекція збільшує швидкість горіння в $1 + U_{\infty}R/2D_{\infty}$ раз, де U_{∞} – швидкість потоку, що обдуває, D_{∞} – коефіцієнт дифузії пального в окислюючому газі далеко від краплі радіусом R . Показано також, що відносна масова швидкість горіння (МШГ) в залежності від потоку, який обдуває $(K/K_0 - 1)$, може бути апроксимована як $Re/2$, де Re число Рейнольдса, і експериментальні точки для гептану і метанолу досить точно задовольняють це співвідношення [10].

З нашої точки зору, більш ефективним є накладання поля, яке “прошиває” полум’я, тобто впливає на зону підготовки безпосередньо перед полум’ям. З метою визначення впливу неоднорідного електричного поля на характеристики дифузійного полум’я в даній роботі досліджувалась дія такого поля допробійної і пробійної величини, на всі зони полум’я (зону підготовки, зону горіння і зону продуктів згорання). Об’єктом дослідження виступало полум’я рідинного вуглеводневого палива (метанол, гексан, бензол), утворене на стаціонарній краплі [12]. Вибір цих горючих рідин зумовлений їхнім різним ступенем сажоутворення при горінні у повітрі. Бензол, при горінні, утворює багато сажі, гексан характеризується помірним утворенням сажі, при горінні метанолу сажа практично не утворюється, тому в однорідному полі помітного впливу на нього не спостерігається [10].

2. Експериментальна установка і методика досліджень

Дослідження проводилися за методикою стаціонарної краплі [10]. Стаціонарна крапля пального діаметром від 3 до 10 мм являла собою порувату кульку, виготовлену з тонкої металевої сітки і просочену паливом. Пальне рівномірно і безперервно подавалося через тонку голку всередину кульки за допомогою електромеханічного дозатора. В процесі стаціонарного горіння ми домагалися такої витрати пального, при якій кулька була покрита рівномірним шаром рідини постійної товщини.

Цей метод дозволяє домогтися максимальної стаціонарності процесу горіння.

Неоднорідне поле створювалося подачею постійної високої напруги на циліндр діаметром 80 мм, виготовлений з металевої сітки, і на кульку, розташовану в центрі цього циліндра. Також проводилися досліди з металевим кільцем такого самого діаметра, на осі якого було розташовано кульку, в ході яких змінювалася відстань від кульки до площини кільця. Величина електричного струму, що протікає через систему, реєструвалася за допомогою осцилографа, проводилися фото- і відеозаписи палаючої краплі. Щоразу дані про горіння в електричному полі зіставлялися зі значеннями за відсутності такого. Такий спосіб дозволяє фіксувати вплив поля на масову швидкість горіння з точністю $\leq 3\%$.

3. Експериментальні результати

У разі, коли на краплю подається позитивний потенціал (+), а на сітку – негативний (–), з тієї ж причини, що і в разі однорідного поля [10] (тобто внаслідок дії механізму іонного вітру) полум’я притягається до зовнішнього електрода. При цьому воно набуває форми дзвону, спрямованого розкритою частиною вгору, оскільки позитивно заряджені, внаслідок термоємисії, сажові частинки притягуються до негативно зарядженої сітки, захоплюючи за собою газове середовище. У міру збільшення напруженості поля верхівка полум’я все більше розкривається (на значній частині верхній полум’я взагалі відсутнє). В результаті, середня відстань від краплі до зони горіння зростає, збільшується частка поверхні, на якій реакція не відбувається, а потік тепла від зони горіння до краплі зменшується. Тому і масова швидкість горіння (МШГ) зменшується (рис. 1) в повній відповідності з допущенням про механізм впливу поля на процес горіння за рахунок іонного вітру. Для порівняння зазначимо, що в разі накладення однорідного поля [10] масова швидкість завжди зростала як результат впливу електричного вітру. На цьому рисунку \dot{m} – масова швидкість горіння при включеному полі, $\dot{m}_0 = 0,069 \text{ кг/м}^2\text{с}$ – масова швидкість без поля, діаметр краплі 5,6 мм. При $U > 5 \text{ кВ}$ результати дослідів можуть бути неоднозначні, оскільки випадковим чином порушується симетрія полум’я і воно, аналогічно до горіння в

однорідному полі, може притискатися як ціле до негативного електрода. При цьому швидкість полум'я може зростати.

Якщо полярність поля протилежна (“–” на краплі, “+” на циліндричному електроді), то полум'я, навпаки, притискається до краплі, оскільки позитивно заряджені сажові частинки притягуються тепер до негативно зарядженої сфери, інтенсифікуючи тим самим перенос тепла до поверхні краплі, що зумовлює зростання швидкості горіння. При напрузі більше 2 кВ спостерігався електричний пробій крізь полум'я.

Для метанолу експериментально проявляються такі особливості – рис. 2. По-перше, в неоднорідному електричному полі, на відміну від однорідного, зниження МШГ не залежить від полярності поля, тобто в разі практично повної відсутності сажових частинок механізм електричного вітру не проявляється і вплив поля має місце тільки на хімізм реакцій, які протікають. При цьому цей ефект в обох випадках призводив до зниження МШГ.

Коли напруженість поля досягає пробійної величини (незалежно від полярності і форми зовнішнього електрода – це може бути голчастий, пластинчастий, кільцевої або іншої форми електрод), між краплею і електродом виникає хаотична сукупність іскрових розрядів. При цьому настає сильна турбулізація полум'я. Масова швидкість горіння збільшується в 2–4 рази. Першопричина такого зростання може бути зумовлена як кінетичним механізмом (оскільки іскрові канали, які “прошивають” зону горіння і зону підготовки палива, є потужними джерелами постачання хімічно активних частинок в зону реагування), так і власне турбулізацією зони горіння.

4. Нестационарне електричне поле і явище гістерезису

Описані раніше експерименти проводилися в стаціонарному, тобто незмінному в часі неоднорідному полі. Експерименти в неоднорідному і нестационарному полі (“+” на краплі, “–” на сітці), показали те, що при збільшенні напруженості поля полум'я починає хаотично коливатися як ціле. При подальшому зростанні напруги форма полум'я трансформується в сильно витягнутий “хвіст”, який тягнеться від краплі до металеві сітки. При подальшому збільшенні напруги верхня частина

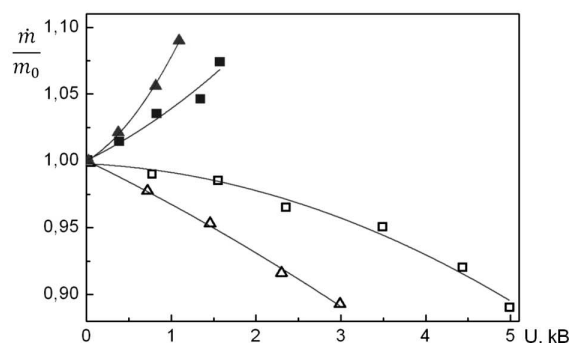


Рис. 1. Вплив неоднорідного циліндричного поля на швидкість горіння гексану (■) та бензолу (▲) “+” на краплі; (□) і (△) “–” на краплі відповідно

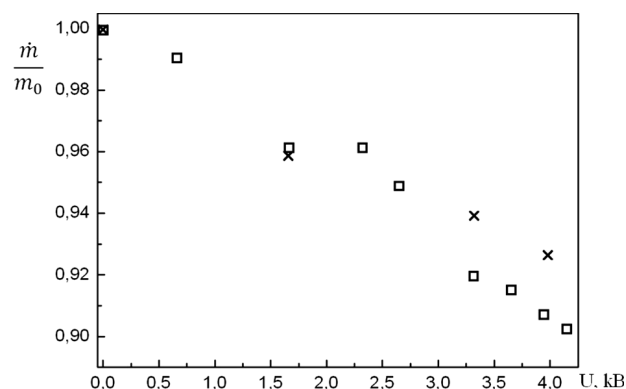


Рис. 2. Залежність МШГ від величини неоднорідного поля для метанолу при різній полярності краплі $d = 5,6$ мм. □ – “+” на краплі; × – “–” на краплі відповідно, $\dot{m}_0 = 0,078$ кг/м²с

полум'я все сильніше “прибивається” до краплі, а потім відбувається зрив полум'я і різкий перехід в слід краплі. Подальше зниження напруги між обкладинками конденсатора приводило до повного охоплення краплі полум'ям, яке відбувалось настільки ж різко, як і зрив, але, на відміну від нього, охоплення відбувалось при меншій напрузі. На рис. 3 а, б, с показано залежності нижньої межі z/d_k фронту полум'я для гексану, метанолу і бензолу в неоднорідному циліндричному полі.

Розглянемо досліджуваний процес більш детально. Як видно з рис. 3 а, б, с, при напрузі між обкладинками конденсатора $U < U_{кр}^{зр}$ координата полум'я щодо центра краплі практично не змінюється. При досягненні $U = U_{кр}^{зр}$ і невеликому збільшенні напруги відбувається різка зміна координати полум'я і зрив полум'я в слід краплі.

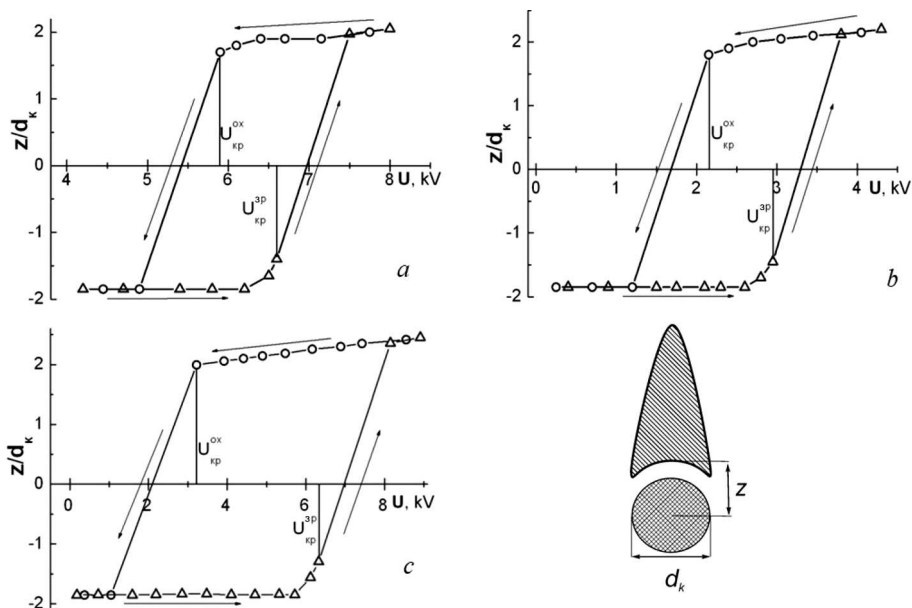


Рис. 3. Залежність $z/d_k(U)$ для неоднорідного циліндричного поля $d_k = 5,6$ мм. о – охоплення, Δ – зрив. Метанол, $\dot{m}_0 = 0,078$ кг/м²с, $\dot{m} = 0,034$ кг/м²с (а); гексан, $\dot{m}_0 = 0,069$ кг/м²с, $\dot{m} = 0,049$ кг/м²с (b); бензол, $\dot{m}_0 = 0,031$ кг/м²с, $\dot{m} = 0,012$ кг/м²с (c)

При подальшому зниженні напруги і досягненні $U \leq U_{кр}^{ox}$ відбувається відновлення полум'я на лобовій точці при його русі зі сліду краплі.

Критичні напруги зриву-охоплення ($U_{кр}^{ox}$, $U_{кр}^{зр}$), а також площа гістерезисної петлі змінюються, як видно з рис. 3 а, b, c, в залежності від використовуваного пального.

Подібне явище досліджено в [12], де описано гістерезисну поведінку полум'я при обдуванні краплі конвективним потоком. Досліджувалися краплі ацетону і спирту. В [14] показано, що критична швидкість обдування палаючої краплі $V_{зр}$, при якій відбувається зрив полум'я, дорівнює 27–58 см/с. Будемо виходити з припущення, що зрив полум'я має місце, коли швидкість електричного вітру, зумовленого коронним розрядом між зовнішньою обкладкою і полум'ям, стає порівняною зі швидкістю стефанівської течії продуктів згорання, яка відтікає із зони горіння назовні. Тоді можна висунути гіпотезу про те, що швидкість електричного вітру при зриві полум'я повинна відповідати критичній швидкості гідродинамічного потоку, що обдуває краплю ($V_{зр}$).

Звернемося до оцінки характерної швидкості стефанівської течії для нижньої частини полум'я, оскільки зрив починається з лобової точки. Можна

показати, що швидкість стефанівської течії продуктів згорання

$$V_{ст}^{прод} = \frac{\dot{m}}{\rho_g} \frac{r_k^2}{r_\phi^2} \frac{T_{пр}}{T_0} \frac{n_{пр}}{n_0} \sim 15 \text{ см/с},$$

де r_ϕ – радіус зони (фронту) горіння, n_0 , і $n_{пр}$ – число молей вихідної речовини і продуктів горіння, T_0 , $T_{пр}$ – їх температури, відповідно. Для гексану $V_{ст}^{прод} = 15$ см/с. При швидкості конвективної течії, що обдуває краплю, більшій, ніж швидкість стефанівської течії, тобто $V_{ст} > V_{ст}^{прод}$, буде відбуватися зрив полум'я. Таким чином, зрив полум'я на краплі, що горить в електричному полі, має гідродинамічний характер, однак його природа, на відміну від конвективного зриву, зумовлена механізмом електричного вітру, що породжується коронним розрядом.

5. Висновки

Отримані в роботі основні результати можна сформулювати в таких висновках:

1. Експериментально показано, що для рідинного вуглеводневого палива (бензин, бензол, гексан та ін.) можливо як збільшувати, так і зменшувати масову швидкість горіння (до 15%), прикладаючи зовнішнє неоднорідне електричне поле нижче

пробійної величини і різної конфігурації. Встановлено, що цей вплив в разі закіптюженого полум'я зумовлено механізмом іонного вітру, як результат руху заряджених частинок сажі в електричному полі. Для незакіптюженого (яке не коптить) полум'я (метанол) масова швидкість горіння зменшується при будь-якій полярності поля, що, ймовірно, зумовлено впливом поля на хімізм реакцій в передполум'яній зоні і зоні горіння. При досягненні пробійних значень масова швидкість горіння може збільшуватись у 2–4 рази.

2. Показано, що в разі неоднорідного електричного поля нижче пробійної величини для будь-якого типу вуглеводневого палива при критичній швидкості горіння, яка менше стаціонарної, процес зриву (охоплення) полум'ям краплі носить гістерезисний характер. Природа цього явища, на відміну від конвективного зриву, зумовлена механізмом електричного вітру. Швидкість електричного вітру в неоднорідному електричному полі порівняна з критичною швидкістю зриву полум'я гідродинамічним потоком, який обдуває полум'я.

1. T. Ueda, O. Imamura, K. Okai, M. Tsue, M. Kono, J. Sato. Combustion behavior of single droplets for sooting and non-sooting fuels in direct current electric fields under microgravity. *Proc. Combust. Inst.* **29** (2), 2595 (2002).
2. K. Okai, T. Ueda, O. Imamura, M. Tsue, M. Kono, J. Sato, D.L. Dietrich, F.A. Williams. Effects of DC electric fields on combustion of octane droplet pairs in microgravity. *Combust. Flame.* **136** (3), 390 (2004).
3. Z.-G. Yuan, U. Hedge, G.M. Faeth. Effects of electric fields on non-buoyant spherical diffusion flames. *Combust. Flame.* **124** (4), 712 (2001).
4. S.D. Marcum, B.N. Ganguly. Electric-field-induced flame speed modification. *Combust. Flame.* **143** (1–2), 27 (2005).
5. C. Guerra-Garcia, M. Martinez-Sanchez. Counterflow non premixed flame DC displacement under AC electric field. *Combust. Flame.* **162** (11), 4254 (2015).
6. A. Sayed-Kassem, A. Elorf, P. Gillon, M. Idir, B. Sarh, V. Gilard. Numerical modelling to study the effect of DC electric field on a laminar ethylene diffusion flame. *ICHMT.* **122**, 105167 (2021).
7. M.-V. Tran, M.S. Cha. Time evolution of propagating nonpremixed flames in a counterflow, annular slot burner under AC electric fields. *Proc. Combust. Inst.* **36** (1), 1421 (2017).
8. M. Simeni Simeni, Y. Tang, Y.-C. Hung, Z. Eckert, K. Frederickson, I.V. Adamovich. Electric field in NS Pulse and AC electric discharges in a hydrogen diffusion flame. *Combust. Flame.* **197**, 254 (2018).
9. Y. Ren, S. Li, W. Cui, Y. Zhang, L. Ma. Low-frequency AC electric field induced thermoacoustic oscillation of a premixed stagnation flame. *Combust. Flame.* **176**, 479 (2017).
10. E.P. Ichenko, V.G. Shevchuk. Role of charged soot grains in combustion of liquid hydrocarbon fuels in external electric field. *Ukr. J. Phys.* **50** (2), 144 (2005).
11. Y. Luo, Z. Jiang, Y. Gan, J. Liang, W. Ao. Evaporation and combustion characteristics of an ethanol fuel droplet in a DC electric field. *J. Energy Inst.* **98**, 216 (2021).
12. V.V. Kalinchak, A.I. Struchaev, S.G. Orlovskaya, M.I. Chabanov. Flame inertial characteristics of a hydrocarbon droplet during its hysteresis. *Combust., Explos., Shock Waves* **26** (1), 81 (1990).
13. M. Ackerman, F.A. Williams. Simplified model for droplet combustion in a slow convective flow. *Combust. Flame.* **143** (4), 599 (2005).
14. В.Е. Глушков, В.В. Калинин, Г.И. Собитняк, Н.В. Федосеева. Устойчивость горения капель жидкого топлива при различных направлениях вынужденной конвекции. *Физика аэродисперсных систем.* **23**, 55 (1983).

Одержано 18.09.22

A. V. Nimych, O. Y. Sydorov, V. G. Shevchuk

INFLUENCE OF A NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD ON THE COMBUSTION OF LIQUID HYDROCARBON FUELS

The influence of a non-uniform electric fields (a cylindrical capacitor) on the combustion of liquid droplets of such hydrocarbons as benzene, hexane, and methanol, which are characterized by different soot formation degrees, is experimentally studied. It is shown that the applied field can both increase and decrease the fuel mass burning rate depending on the field polarity (direction) and the fuel type. The hysteresis phenomena – the flame lift-off from the droplet and the droplet coverage with flame – and their dependence on the field properties, are described.

Keywords: liquid fuels, soot formation, electric field, electric breakdown, mass burning rate.