

УДК 621.791.85

**Ю.С. Попіль, доц., канд.техн.наук, В.М. Корж, проф., д-р.техн.наук,**

**І.Л. Левченко, бакалавр**

*Національний технічний університет України «КПІ», м.Київ*

**А.Е. Солових, доц., канд.техн.наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Визначення умов стабільного горіння воднево-кисневого полум'я

Приведені результати досліджень умов стійкого горіння полум'я з використанням воднево-кисневої суміші отриманої з електролізно-водяних генераторів. Розглянуті питання зміни швидкості витікання струменя при зміні витрати, складу суміші, діаметрів сопел. Встановлені закономірності зміни геометричних параметрів факела і швидкості течії продуктів горіння від складу суміші при зворотному ударі, стійкому горінні і відриві полум'я.

**швидкість горіння суміші, швидкість витікання газового потоку, відрив, зворотній удар полум'я, межа стабільного горіння, воднево-киснева суміш, пари вуглеводневих сполук**

При газополуменевій обробці матеріалу (ГПОМ), суттєві вимоги пред'являються до техніки безпеки, при роботі обладнання та дотримання режиму технологічного процесу. Відомо, що від швидкості течії пальної суміші залежить стабільність горіння полум'я. Серед факторів, які впливають на швидкість горіння є відношення окислювача до пального газу, температура, тиск суміші, геометричні розміри камери згорання [ 1].

Швидкість горіння суміші впливає на довжину факела полум'я. Як відомо [ 2] при використанні в якості палива газів заміників ацетилену, в яких швидкість горіння 3-4 м/с, довжина факелу більше, ніж при спаленні ацетилену. Саме це впливає на вибір газа-замінника ацетилену для газокисневого різання металів великої товщини, газополуменевого нанесення покриття.

При газовому зварюванні геометрія та довжина ядра факелу впливають на формування шву. При швидкості горіння ацетилено-кисневої суміші 13,5 м/с, вірогідність проходження зворотнього полум'я по газовій арматурі, більше ніж у інших газів, що підвищує вимоги до конструкції захистних засобів (запобіжні затвори, полум'я гасники, зворотні клапани).

Дослідження процесу стійкого горіння воднево-кисневого полум'я (ВКП), яке отримується при спаленні суміші, що виробляється електролізно-водяними генераторами і використовується для ГПОМ дуже обмежено описано в технічній літературі.

**Метою роботи** було визначення меж стабільного горіння та закономірності зміни геометричних показників факелу і швидкості течії продуктів горіння від технологічних параметрів процесу, визначення умов утворення зворотнього удару і відриву полум'я отриманого при спаленні воднево-кисневої суміші яка виробляється електролізно-водяними генераторами (ЕВГ) , та вплив на ці межі добавок вуглецеводневих сполук.

Стійкий процес горіння обмежується інтервалами швидкостей витікання газової суміші з пальника. Так при низькій швидкості витікання газової суміші, коли вона менше швидкості горіння можливе проходження полум'я в пальник (зворотній удар), а при високій відрив полум'я. Це явище обмежує використання ВКП, при роботі пальника на мінімальних режимах витрат газової суміші, приводить до вигорання

змішувача газового пальника, а при великих номерах сопел пальників до зворотнього удару, або хлопків. При збільшенні діаметра сопла пальника необхідно збільшувати витрати пальної суміші для того щоб зберегти швидкість потоку. Для стабілізації такого полум'я використовують додатково стабілізатори фронту полум'я—гідродинамічні засоби, стержні, сітки .

В межах стабільного горіння полум'я можлива ламінарна і турбулентна течія струменю продуктів горіння. Особливості розвитку ламінарних і турбулентних факелів полум'я, пов'язано з залежністю довжини дифузійного факелу від числа Рейнольдса. При ламінарному характеру течії, довжина факелу прямо пропорційна значенню числа  $Re$ , а при турбулентному не залежить від нього . У перехідній області течії відбувається розпад ламінарного і утворення турбулентного полум'я (рис.1). За даними дослідників [ 3,4 ] при  $Re < 2300$  потік газу ламінарний, а при  $Re > 3200$  – турбулентний.

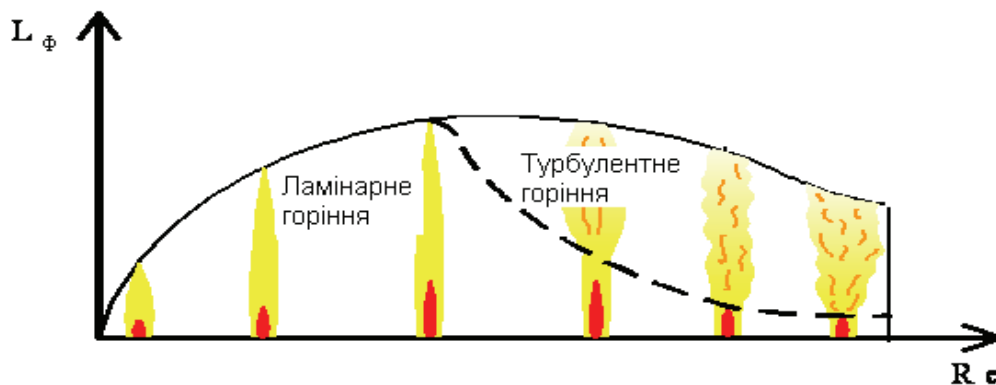


Рисунок 1 –Залежність геометричних розмірів факелу від числа Рейнольдса

Для підтримання стабільного процесу горіння полум'я необхідно, щоб відбувався баланс тепла, яке іде на інтенсифікацію процесу займання від розігріву реакційної системи, що впливає на швидкість хімічних реакцій, та тепла, яке підтримує процес горіння. Відповідно для стабільного процесу горіння тепловиділення повинно бути більшим ніж тепловідвід. З підвищенням температури системи тепловиділення та швидкість хімічних реакцій зростає:

$$q_{\dot{a}} \geq q_{\dot{an}} ; \quad (1)$$

$$dq_{\dot{a}} \frac{dq_{\dot{a}}}{dT} \geq \frac{dq_{\dot{an}}}{dT_g} , \quad (2)$$

де  $dq_{\dot{a}}$  - швидкість тепловиділення в хімічному процесі;

$dq_{\dot{an}}$  - швидкість тепловідводу з системи;  $T$ -температура.

При окисленні водню киснем з точки зору розгалуження ланцюгової реакції, механізм утворення ланцюгу представляє собою процес утворення вільних радикалів завдяки термічного, каталітичного, фотохімічного або інших шляху. Обрив ланцюга відбувається коли радикал рекомбінується, або приєднується до іншої молекули. Згідно теорії реакції окислення водню, зародження ланцюгу відбувається на стінці реакційної зони (в нашому випадку сопла пальника) тільки при підвищенні температури ( $T > 700^0K$ ) [ 5].

Характерною особливістю розгалужених-ланцюгових реакцій є межа займання, в випадках богатих сумішей  $H_2-O_2$ , коли обрив ланцюга на стінках обумовлений адсорбцією атомів H, умови займання суміші будуть

$$\frac{d(H)}{dt} > 0 . \quad (3)$$

Протікання фізико-хімічних реакцій в факелі полум'я проходить по довжині ядра факелу і на деякій відстані від ядра, в зоні догорання вуглеводневі сполуки розкладаються і загоряються. Реакція повного згорання вуглецю і водню відбувається за рахунок кисню, який подається з пальника, та за рахунок кисню оточуючого середовища.

Газокиснева суміш, яка входить в склад продуктів горіння, утворює вільний потік. Згідно теорії вільного потоку, ядро факелу, зберігає швидкість потоку, рівну швидкості в каналі.

**Методика досліджень.** Досліджувались швидкості витоку струменю при стабільному процесі горіння, зворотному ударі, відриві полум'я. Уточнювались межі стійкого горіння при різних витратах газових сумішей і номерів наконечників пальників для сумішей різного складу.

Експериментальні дослідження проводились з використанням газодинамічного зонда, за допомогою якого вимірювався статичний та динамічний тиск газової струмини, та закритої вольфрамо-ренієвої термопари ВР 5/20 для контролю за температурою. Термопара із зондом закріплювалась на пристрої, який дозволяв вимірювати дані по всій довжині факельного полум'я. Температура нагрівання мундштука пальника контролювалась хромель-копелевими термопарами при стандартних умовах в діапазоні 60-160<sup>0</sup>С, в залежності від характеру течії. Допустима похибка термопар складає  $\pm 1\%$  від вимірювальної електро-рушійної сили, а допустима похибка вимірювального приладу, мілівольтметра марки М-2020 розрахованого на виміри напруги до 100 мВ, складає 0,2%.

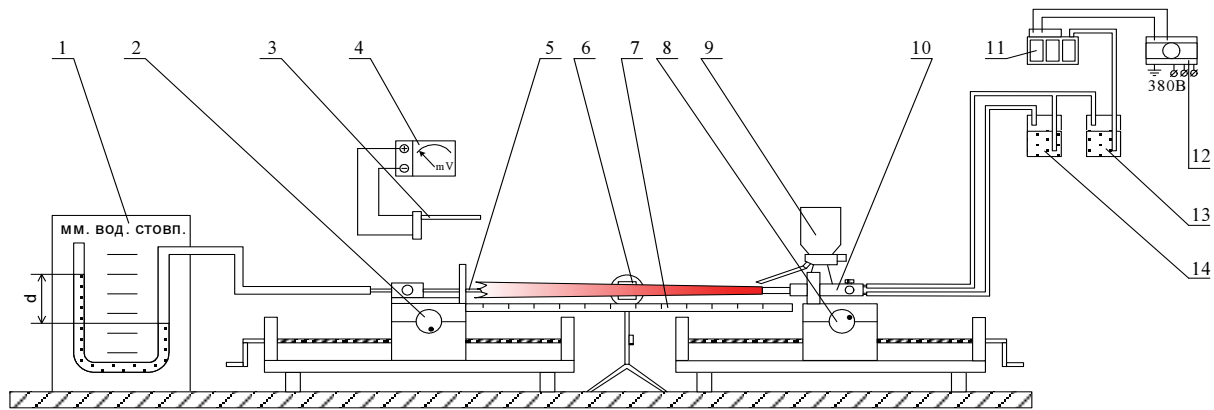
**В вимірювальних приладах використовувалися компенсаційні дроти для врахування впливу температури вільних кінців, введення поправки виконувалось розрахунковим шляхом.**

При проведенні дослідження використовувався пальник “ЕВРО-ДЖЕТ XS-7” з стандартним набором змінних мундшуків: з діаметром сопла  $\varnothing$  1,6 мм для першого номера мундштука, для другого –  $\varnothing$  2,0 мм, для третього  $\varnothing$  2,2 мм. Воднево-киснева суміш вироблялась електролізно-водним генератором А1803, з максимальною продуктивністю по виробленню пальної суміші – 1,6 дм<sup>3</sup>/год. Воднево-кисневе полум'я отримане з ЕВГ має постійне співвідношення  $\beta = V_{O_2}/V_{H_2} = 0,5$ . Для регулювання характеру окислювальності полум'я у суміш додавались пари вуглеводневих сполук.

Дослідження проводились на трьох найбільш поширених при газотермічній обробці матеріалу з використанням ЕВГ газових сумішей: воднево-киснева суміш (ВКС), ВКС з добавками 5,5% парів бензину (ВКС+бензин), ВКС з добавками 16% парів етилового спирту (ВКС+спирт). Характер течії продуктів горіння регулювався візуально, з фіксацією по зміні довжини факелу полум'я, а витрати вуглеводневих добавок визначались зважуванням барботера до і після експерименту. Схема дослідної установки наведена на рисунку 2. Витрати газової суміші визначались методом витіснення води.

Для визначення густини струмини в даній точці приймали склад продуктів горіння по довжині факелу ВКС та ВКС+вуглеводні сполуки отриманий в результаті досліджень за методикою інституту газу АН України, які проводились з використанням ентальпійного зонду Грея за методом “холодних проб”. [6].

Для визначення газової постійної визначали процентний склад суміші продуктів горіння по довжині газового факелу, в 3-х зонах. Газові постійні складових газів, які входять в склад продуктів горіння можна визначити з довідкової літератури [7].



- 1 – U-подібний манометр; 2 – механізм переміщення зонду; 3 – термопара; 4 – мілівольтметр;  
 5 – зонд Піто-Прандтля; 6 – прилад ИССО-1; 7 – шкала контролю дистанції заміру; 8 – механізм переміщення пальника; 9 – дозатор живлення порошку; 10 – пальник; 11 – ЕВГ;  
 12 – джерело живлення ЕВГ; 13 – водяний запобіжний пристрій;  
 14 – барботажний пристрій для насичення ВКС вуглеводневими сполуками

Рисунок 2 – Схема установки для дослідження газодинамічних і температурних характеристик струменю продуктів горіння

Для визначення газової постійної суміші об'ємними долями можна використовувалась формула:

$$R = \frac{848}{\mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_n r_n} = \frac{848}{\sum_1^n \mu_i r_i}, \frac{\text{кГм}}{\text{кг} \cdot \text{град}}, \quad (5)$$

де  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  – молекулярна вага компонентів, які входять в суміш, кг/моль;

848 – універсальна газова постійна, кГм/моль·град;

$r_1, r_2, \dots, r_n$  – об'ємний вміст кожного компоненту в долях, одиниці;

Враховуючи данні [8] про склад продуктів горіння на межі високотемпературної зони можна знайти універсальну газову постійну, для сумішей продуктів спалення ВКС, ВКС+бензин, ВКС+спирт.

Знаючи газову постійну, для розрахунку швидкості течії продуктів горіння по довжині факелу використовувалось рівняння, яке враховує напірний тиск і температуру газового потоку на кожній із ділянок факелу.

$$W_2 = \phi \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k+1} \cdot R \cdot T \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (6)$$

де  $k$  – показник адіабати;

$R$  – універсально газова постійна;

$P^* = P_c + P_d$  – напірний тиск,

$P_c, P_d$  – статичний, динамічний тиск;

$P_1$  – тиск атмосфери в яку витікає газ, кг/м<sup>2</sup>;

$T$  – температура полум'я, К;

$g$  – прискорення вільного падіння 9,8 м/с<sup>2</sup>;

коефіцієнт  $\phi = 0,87$  враховує нерівномірність розподілення швидкості потоку газу по перерізу сопла і опір в ньому.

Для визначення коефіцієнта  $\phi$ , який враховує характер витікання струменю від геометричних розмірів сопла пальника можна використовувати довідкові значення [9]. Оскільки, сопла які використовуються мають кут  $14^\circ$ , враховуючи геометрію сопла пальника “ЕВРО-ДЖЕТ XS-7” відповідає форма сопла, де коефіцієнт дорівнює  $\phi = 0,87$ .

Газодинамічний стан струменю продуктів горіння воднево-кисневої суміші (ВКС) оцінювався показником числа Рейнольдса, яке визначає ламінарність або турбулентність струменю, що витікає на зрізі сопла пальника при різних витратах і складах газових сумішей та діаметрах мундштуків пальника.

Величина числа Рейнольдса визначається середньою швидкістю  $U_m$  газового потоку в перерізі вихідного каналу  $d$  мундштука пальника для наповнення:

$$Re = \frac{U_m \cdot d}{\nu}, \quad (8)$$

де  $\nu$  – кінематична густина газу або газової суміші,  $m^2/c$  (для ВКС 30%  $O_2$  та 70%  $H_2$ ,  $\nu = 36,93 \cdot 10^{-6} m^2/c$ );

$d$  – діаметр перерізу вихідного каналу сопла пальника, м;

$U_m$  – середня швидкість газової струмини в вихідному каналі мундштука пальника,  $m/c$ .

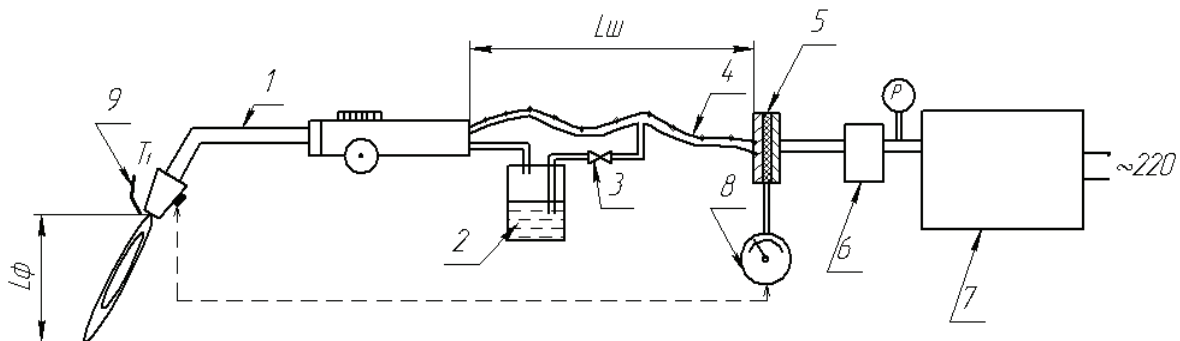
Середня швидкість витікання пальної суміші на зрізі сопла пальника визначалась [10].:

$$U_m = 354 \cdot \frac{V_{гс}}{d \cdot c}, \quad (9)$$

де 354-емперичний коефіцієнт;

$V_{гс}$  – витрати газової суміші, яка приведена до нормальних умов (760 мм.рт.ст. і  $20^\circ C$ )  $m^3/год$ .

Швидкість горіння пальної суміші визначалась по часу проходження фронту полум'я по газовій арматурі до розривної мембрани 6 після чого електронний секундомір 8 відключався і фіксувалися довжина шлангів і витрати пальної суміші. Дослідження проводились на дослідній установці представлений на (рис .3).



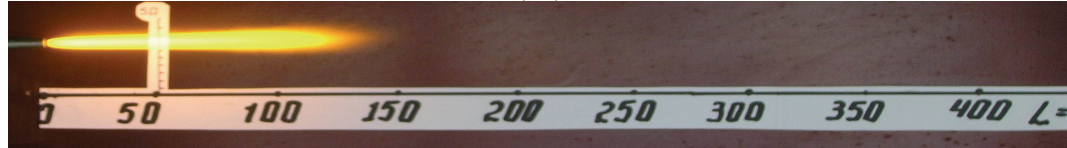
1-газовий пальник; 2-барботер ; 3-вентель регулювання складу суміші; 4-шланг; 5-розривна мембрана; 6-запобіжний затвор; P-датчик тиску; 7-електролізно-водяний генератор; 8-електронний секундомір; 9- термо -датчик контролю нагріву мундштука пальника

Рисунок 3 – Дослідна установка для визначення швидкості горіння пальної суміші

Дослідження геометричних розмірів факелу полум'я показали, що максимальна довжина досягається при ламінарному характеру течії продуктів горіння (рис. 4а). При збільшенні витрат пальної суміші, більш критичної швидкості течії, довжина факелу скорочується, потік турбулізується і при досягненні критичної швидкості відбувається відрив полум'я (рис 4б.)



( а )

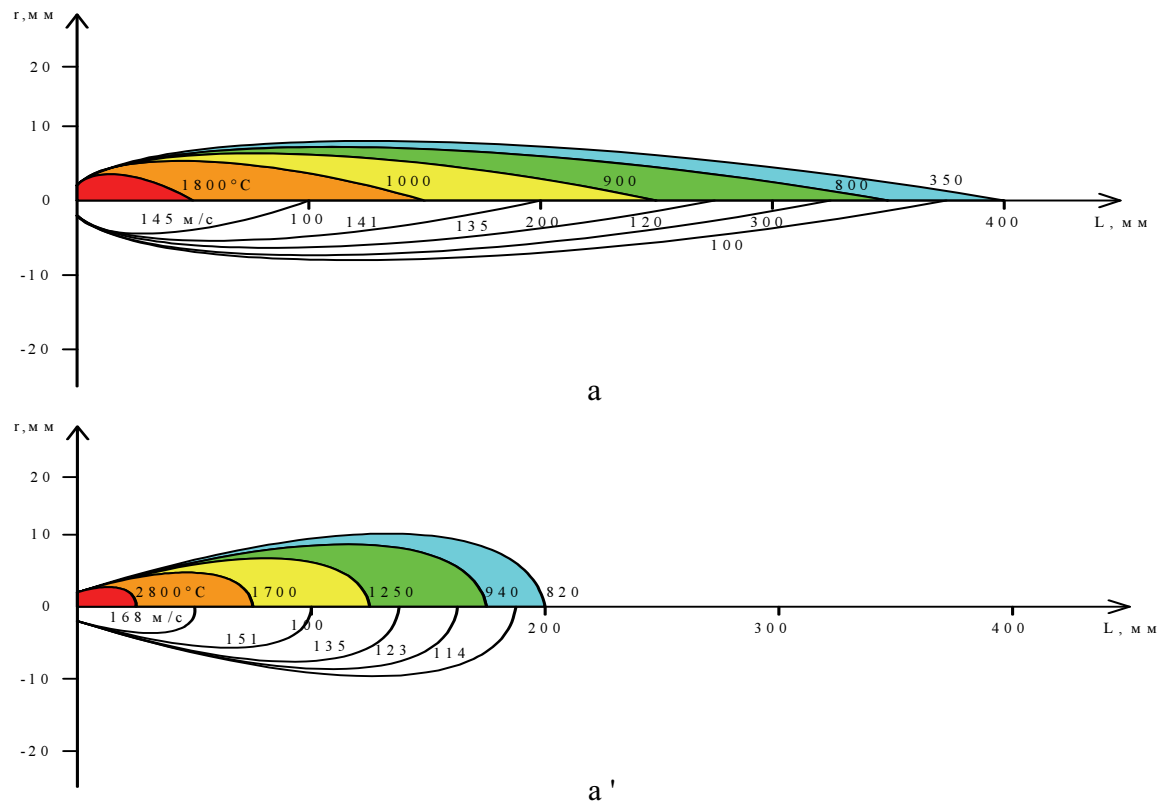


( б )

а) стабільне горіння. б) факел на межі відриву

Рисунок 4 – Форма факелу ВКП в залежності від витрат та характеру течії

Як показали дослідження розподілення температури та швидкості по довжині струменю продуктів горіння, характер течії змінює довжини температурних інтервалів, та перерозподіляє швидкісні показники (рис.5). Вуглеводневі сполуки, які вводяться в воднево-кисневу суміш знижують максимальну температуру в високотемпературній зоні, а в зоні догорання збільшують, і температуру і швидкість.



Цифри на кривих значення  $T$  і  $V$

а – ВКС ламінарний; а' – ВКС турбулентний

Рисунок 5 – Поля температур  $T^{\circ}\text{C}$ , і швидкостей  $V$  м/с в струмені продуктів горіння

Межі стійкого горіння чистої воднево кисневої суміші з співвідношенням кисню до водню 1:2 знаходиться у діапазоні швидкості витікання пальної суміші 30...100 м/с. Межа переходу від ламінарного до турбулентного характеру течії потоку продуктів горіння знаходиться при швидкості витоку струменю більше 70 м/с, що відповідає числу Рейнольдса  $Re = 3500$ . При цьому досягається максимальна довжина факелу 380мм. Стіжке горіння суміші ВКС+5,5% парів бензину відбувається при швидкостях витікання струменю пальної суміші від 30 до 90 м/с. Перехід від ламінарної

до турбулентної течії потоку продуктів горіння знаходиться при критичній швидкості витоку струменю більше 50 м/с, що відповідає числу Рейнольдса  $Re = 3000$ . Факел має більшу довжину-ніж чиста ВКС, яка дорівнює 400мм. Сстійке горіння суміші ВКС+16% парів етилового спирту відбувається при швидкостях витікання струменю пальної суміші від 40 до 105 м/с. Межа переходу знаходиться при критичній швидкості витоку струменю більше 65 м/с, що відповідає числу Рейнольдса  $Re = 3200$  (рис 6.)

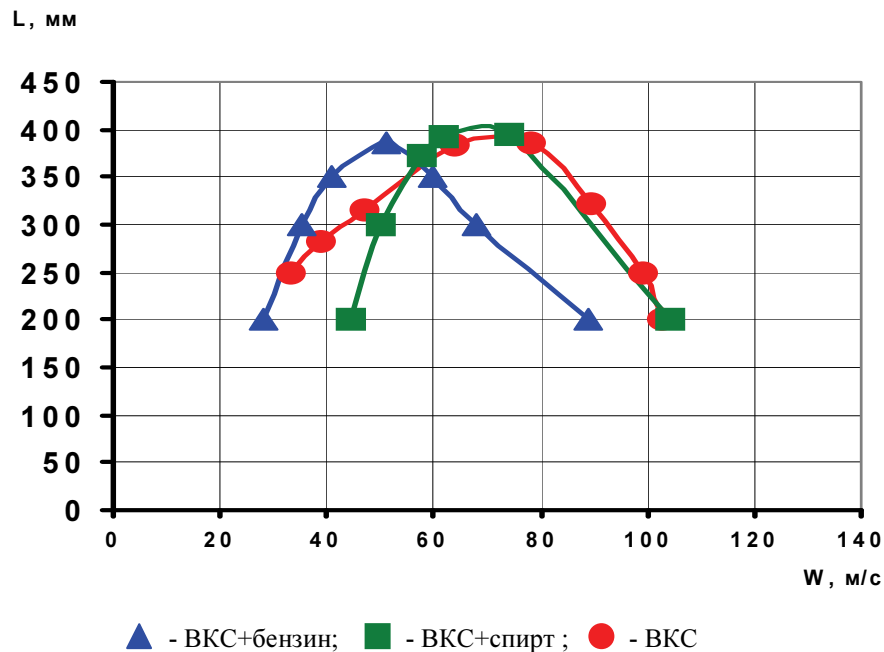


Рисунок 6 – Залежність довжини факела від швидкості витікання газів

Дослідження зворотнього удару показало, що проходження фронту нормального горіння ВКП по газовій арматурі відбувається при критичній середній швидкості течії на зрізі мундштука пальника з діаметрами отворів 1,6-2,2мм, приблизно 13,3м/с. Введення в суміш парів вуглеводневих сполук знижує швидкість горіння продуктів пальної суміші, що значно зменшує вірогідність отримання зворотнього удару (табл.1). Відрив полум'я ВКП відбувається при швидкостях більших ніж 100м/с.

Таблиця 1 – Критичні середні швидкості течії при різних умовах горіння

№ Сопла пальника	Діаметр сопла, мм.	Зворотній удар, м/с			Стабільне горіння полум'я, м/с			Відрив полум'я, м/с		
		ВКС	ВКС+ бензин	ВКС+ спирт	ВКС	ВКС+ бензин	ВКС+ спирт	ВКС	ВКС+ бензин	ВКС+ спирт
1	1,6	13,5	8,1	8,8	30-100	30-90	40-105	>100	>90	>105
2	2,0	13,04	7,7	9,42						
3	2,2	13,2	8,7	9,45						

### Висновки:

1. Стабільний режим горіння ВКП знаходиться у діапазоні швидкості витікання пальної суміші 30...100 м/с. Межа переходу від ламінарного до турбулентного характеру течії потоку продуктів горіння знаходиться при швидкості витоку струменю більше 70 м/с, що відповідає числу Рейнольдса  $Re = 3500$ . Додатки в воднево-кисневу суміш вуглеводневих сполук зміщують ці межі в меншусторону.

2. Зворотній удар ВКП може утворюватись при критичній середній швидкості течії на зрізі сопла пальника приблизно 13,3м/с, в пальниках з діаметрами отворів сопла 1,6-2,2мм.

Введення в суміш парів вуглеводневих сполук знижує швидкість горіння продуктів пальної суміші. Відрив полум'я ВКП відбувається при швидкостях більших ніж 100м/с.

З.Р результати роботи можна використовувати при проектуванні конструкцій і розрахунку геометричних розмірів пальників та запобіжної арматури при спаленні воднево-кисневої суміші.

## Список літератури

1. Антонов И.А. Газопламенная обработка металлов. -М.: Машиностроение, 1976. - 264 с.
2. Нинбург А.К. Газопламенная обработка металлов с использованием газов – заменителей ацетилена. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
3. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1975. – 325 с.
4. Абрамович Г.Н. “Прикладная газовая динамика” –М., 1976 . – 888 с.
5. Семенов Н.Н.Цепные реакции.- Л.: ОНТИ, 1934,2е изд. М.: Наука,1986.-534с.
6. Грей Д.Калориметрический зонд для измерения очень высоких температур. /Приборы для научных исследований./,1962.№7.с 21-24.
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука, 1972.- 720 с.
8. Корж В.Н. Анализ газодинамического состояния газовой струи, вытекающей из сварочной горелки // Химическая технология. – 1990. – № 4. – С.23 – 24.
9. Стаскевич Н.Л. Справочное руководство по газоснабжению. - Л.: Гостоптехиздат, 1960. – 874 с.
10. Глизманенко Д.Л., Евсеев Г.Б. Газовая сварка и резка металлов. - М.: Машгиз, 1954.-532 с.

*Ю. Попиль, В. Корж, И. Левченко, А. Соловых*

### **Определение условий стабильного горения водородно-кислородного пламени**

Приведены результаты исследований условий устойчивого горения пламени с использованием водородно-кислородной смеси полученной из электролизно-водяных генераторов. Рассмотрены вопросы изменения скорости истекания струи при изменении расходов, состава смеси, диаметров сопел. Установленные закономерности изменения геометрических параметров факела и скорости течения продуктов горения от состава смеси при обратном ударе,устойчивом горении и отрыве пламени.

*Y. Popil', I. Korzh, I. Levchenko, A.Solovykh*

### **Determination of terms of the stable burning of oxyhydrogen flame**

The results of research of flame burning conditions using a hydro-oxygen mixture, hydro-oxygen mixture with addition of carbon-hydrogen vapors are given. The results of research were compared to similar parameters of a propane-oxygen mixture. The questions of changing of jet's velocity are considered, the mixture composition and nozzle diameters being varied. The change of flow length upon the mixture composition relationships are established for backfire, steady burning and separation of flame. The distribution of the jet velocity along the length of torch for three cases of the flow expiration with use of different mixtures and numbers of tips is calculated. The optimal band of steady flame burning is established.

Одержано 17.03.11