рующем кипящем слое (ЦКС/CFB) таких топлив как RDF/SRF имеет определенный оптимальный диапазон, учитывая технологические, экологические (Директива 2010/75/ЕС и т.д.) и финансовые показатели. Учитывая это, представляется целесообразным внедрять ЦКС для сжигания RDF/SRF для котлов, начиная с паропроизводительности 50-75 т/ч, тогда как сжигание RDF для котлов с меньшей паропроизводительностью возможно эффективно реализовать по технологии Stoker (на подвижных решетках). Конструкция такого котла должна опираться на опыт пуско-наладочных работ и эксплуатацию энергетического (мощного) ЦКС-котлоагрегата (паропроизводительность 670 т/ч; 545/545 °С), полученные нами на Старобешевской ТЭС в Украине. С учетом вышесказанного, был проведен анализ внедрения и модификаций, осуществленных в ЦКС-котлоагрегате (циклоны, уплотнительный котел, теплообменники с кипящим слоем). Приобретенный опыт был использован при совместных с КБ «Энергомашпроект» работах по проектированию котла средней паропроизводительности (75 т/ч; 500 °С), предназначенного для сжигания RDF/SRF и высокозольных отходов мокрого углеобогащения, анализ запасов которых также приведены. Эскизный 3D-дизайн такого котла представлен вместе с ключевыми характеристиками. *Библ. 6, рис. 4, табл. 4.*

Ключевые слова: сжигание, отходы, вторичное топливо, котлоагрегат, энергия.

Теплофізичні основи енергетичних процесів

УДК 662.951.2

DOI: 10.33070/etars.4.2020.03

Сігал І.Я.¹, докт. техн. наук, проф. Сміхула А.В.¹, канд. техн. наук,

Сігал О.І.², канд. техн. наук, Марасін О.В.¹, канд. техн. наук

¹ **Інститут газу НАН України, Київ**

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

² **Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ**

вул. Желябова, 2а, 03680 Київ, Україна, e-mail: office@engecology.com

Дослідження горіння відірваних газових струменів при стабілізації фронту полум'я на вертикальній поверхні

Досліджено умови стабілізації горіння відірваних газових струменів на вертикальній поверхні у діапазоні діаметрів сопел $d_0 = 1,6\text{--}3,0$ мм. Показано механізм стабілізації полум'я відіраного струменя газу на вертикальній поверхні, який дає можливість при стабільному горінні збільшити швидкість витікання газу через одне сопло у 3 рази й більше у порівнянні з дифузійним горінням вільного струменя газу, що ніяк не стабілізований. Встановлено оптимальну відстань до вертикальної вогнетривкої поверхні у калібрах сопла щодо створення щільних подових пальникових пристроїв. Обґрунтовано необхідність використання мінімальних по зриву кутів атаки при конструюванні щільних подових пальників, які були експериментально встановлені. Експериментально показано, що, починаючи з тиску газу в трубі-колекторі $p \approx 500$ мм вод. ст. та, відповідно, швидкості його витікання через сопло більше $W_g \approx 100$ м/с, при відстані до вертикальної поверхні, на якій стабілізується факел $15 < L/d_0 \leq 30$, для діапазону діаметрів сопел $d_0 = 1,6\text{--}3,0$ мм безрозмірна площа основи s_g/s_0 еліптичного циліндру E_b менше у 2–2,5 рази максимальної, що спостерігається на відстані $L/d_0 \approx 40$. *Бібл. 15, рис. 6.*

Ключові слова: стабілізація полум'я, удар струменя, щільний пальник, горіння.

Струменева подача газового палива застосовується в переважній більшості пальникових пристроїв, що використовуються у котлоагрегатах середньої та великої потужності. Виокремлення трьох режимів горіння дифузійного струменю газу: ламінарного, перехідного та турбулентного — здійснено у 1949 р. [1]. Подальші роботи щодо вивчення закономірностей сумішоутворення (перемішування пального та окисника) та горіння дали можливість встановити відповідні залежності та створити методики розрахунку для конструювання газопальникових пристроїв, які використовуються в Україні та країнах колишнього СРСР донині практично без принципових конструктивних змін [2–6].

Зважаючи на технічну можливість перепроекткування практично усіх типів твердопаливних котлів на спалювання природного газу, по мірі його надходження споживачам у колишньому СРСР та світі були проведені реконструкції котлів з установленням газових або газомазутних пальників [7, 8]. Виявилося, що при переведенні котлів з твердого палива на газ одними з найбільш універсальних конструкцій пальників є подові, оскільки їх можна було змонтувати замість колосникової решітки без реконструкції трубної частини котла [7–9]. Так, на початку 1950-х рр. Сігалом І.Я. запропоновані концепція та конструкція подового пальника з прямою щілиною, з довжиною вогневої частини, що дорівнює глибині топки котла [7].

У процесі експлуатації щільних подових пальників з'ясувалося, що рівномірне тепловиділення по глибині топки значно подовжує її ресурс, а це зменшує витрати при капітальних ремонтах. Згодом Інститутом газу НАН України було розроблено серію винятково газових котлів (ТВГ-8, ТВГ-8М, ТВГ-4р, КВГ-4,65, КВГ-7,56 та ін.), у яких щільні подові пальники використовуються як базові. На даний час подові щільні пальники перших моделей продовжують успішно експлуатуватися в Україні та країнах колишнього СРСР на котлах потужністю 0,5–12 МВт у кількостях, що обліковуються десятками тисяч із загальною тепловою потужністю близько 60 ГВт [8]. Поточні викиди оксидів азоту для діючих котлів, що обладнані щільними подовими пальниками, відповідають директиві ЄС для котлів вхідною потужністю 1–

50 МВт. При застосуванні лише рециркуляції димових газів у дуттьове повітря подових пальників, наприклад, котла ТВГ-8 потужністю 10 МВт у кількості $\gamma = 20\text{--}25\%$ може бути досягнуто рівня $\text{NO}_x \leq 100 \text{ мг/м}^3$ (при $3\% \text{ O}_2$), що вимагається при установленні нових котлів [10].

Оптимальні конструктивні характеристики щільних подових пальників ще у 1950–1960 рр. фактично були визначені емпірично з мінімально необхідним науковим обґрунтуванням для можливості швидкого налагодження їх масового випуску [7, 9]. В останні роки проведені дослідження стабілізації факелу на вогнетривкій поверхні, зокрема, щодо потужних подових пальників 12–26 МВт [11]. Однак необхідні додаткові дослідження, що допоможуть краще зрозуміти механізми сумішоутворення, стабілізації та горіння газу.

Дослідження горіння одиничного відірваного газового струменя при стабілізації полум'я на вертикальній поверхні

Принциповий механізм стабілізації полум'я на вертикальній поверхні при використанні одиничного газового струменя показано на рис.1, а. Турбулентний струмінь газового палива 1 витікає через сопло 2 (або отвір) круглого перетину діаметром d_0 з газового колектору-труби 3 під кутом α по відношенню до напрямку руху повітря та гальмується на вертикальній вогнетривкій поверхні 4, що розташована на визначеній по геометричній вісі струменя відстані у калібрах сопла (L/d_0) . Факел, що утворюється є відірваним, який формується не від сопла, а розміщується на вертикальній поверхні, утворюючи об'ємну фігуру, наближену до еліптичного циліндру, всередині якого знаходиться ще один еліптичний циліндр із сумішшю повітря та газу, що не горить (встановлено в результаті газового аналізу суміші, у якій присутні лише сліди кінцевих та проміжних продуктів горіння) (рис.1, б). Газовий струмінь до гальмування на вертикальній поверхні приєднує частину повітря. Якщо для сопла діаметром 3 мм факел вільного вертикального струменя природного газу вже при швидкості більше $W_g > 22 \text{ м/с}$ стає схильним до зриву [12], то

при його стабілізації на вертикальній вогнетривкій поверхні та збільшенні швидкості витікання до 145 м/с й більше горіння проходить ста-

більно (перевірена швидкість витікання природного газу до $W_g = 185$ м/с) (рис.1, в).

Fig.1. The basic mechanism of flame stabilization on a vertical surface: 1 — gas jet; 2 — nozzle; 3 — collector-pipe; 4 — vertical refractory surface; α — angle of attack (angle between the initial direction of gas and air); $\delta_{фр}$ — height of the elliptical cylinder; J — the zone of contact of the partially aerated gas jet with the wall; E_b — elliptical cylinder, which contain the combustion zone; E_g — elliptical cylinder of non-combustible mixture; s_g , mm², — the area of the base of an elliptical cylinder with a mixture of air and non-combustible gas.

Стабілізація горіння газового факелу на вертикальній поверхні дає можливість у кілька разів збільшити об'єм спалюваного палива, при цьому швидкість витікання газового палива може варіюватися у широкому діапазоні.

Для з'ясування механізму стабілізації факела газу на вертикальній поверхні був проведений експеримент з двома їх типами: вогнетривка муліто-кремнеземиста волокниста плита; металічна водоохолоджувана поверхня (температура води $t = 20$ °C) (рис.2). Встановлено, що стабілізація полум'я струменю природного газу відбувається на обох поверхнях. Проте геометричні розміри факелу при однакових умовах подачі природного газу, що стабілізується на вогнетривкій поверхні, дещо менші за рахунок впливу розігрітої до 1000–1100 °C стінки, а кінцевий склад продуктів згоряння містить меншу кількість монооксиду вуглецю. Також факел, який стабілізується на металевій водоохолоджуваній поверхні, при пульсаціях

повітря схильний до зриву. Тобто показано, що стабілізація факелу на вертикальній поверхні досягається за рахунок урівноваження швидкості турбулентного горіння (u_t , м/с) та швидкості руху утвореної суміші природного газу та повітря [13].

У роботі [11] експериментально досліджено вплив кута атаки газового струменя α на площу основи s_g еліптичного циліндру E_b (рис.1, б) із сумішшю повітря та природного газу, що не горить, та показано, що у розглянутому діапазоні кутів $\alpha = (15-90)^\circ$ при $L/d_0 = \text{const}$ відповідно й $s_g \approx \text{const}$ (рис.3, а). Також досліджено залежність концентрації метану в аерованому струмені природного газу від відстані, яку він проходить до його взаємодії з вертикальною поверхнею. На рис.3, б приведено газовий аналіз по вісі аерованого струменя природного газу в зоні J — зіткнення струменя з вертикальною поверхнею (близько 1 мм від поверхні).

Рис.1. Принциповий механізм стабілізації полум'я на вертикальній поверхні: 1 — газовий струмінь; 2 — сопло; 3 — колектор-труба; 4 — вертикальна вогнетривка поверхня; α — кут атаки (кут між початковим напрямком руху газу та повітря); $\delta_{фр}$ — висота еліптичного циліндру; J — зона зіткнення частково аерованого газового струменя із стінкою; E_b — еліптичний циліндр, що вміщує зону горіння; E_g — еліптичний циліндр негорючої суміші; s_g (мм²) — площа основи еліптичного циліндру із сумішшю повітря та газу, що не горить.

Рис.2. Фотографія стабілізації турбулентного струменя природного газу на різних вертикальних поверхнях: а) муліто-кремнеземиста волокниста плита; б) водоохолоджувана металічна поверхня. Умови: $W_g = 145$ м/с; $L/d_0 \approx 26$; $\alpha = 45$; сопло діаметром 1,6 мм; $a_{slot} = 120$ мм; газовий колектор діаметром $76 \times 3,5$ мм; дуттьовий вентилятор вимкнено.

Fig.2. Photo of stabilization of natural gas turbulent stream on various vertical surfaces: a) mulite-silica fibrous plate; b) water-cooled metal surface. Conditions: $W_g = 145$ м/с; $L/d_0 \approx 26$; $\alpha = 45$; nozzle $\varnothing$ 1.6 mm; $a_{slot} = 120$ mm; gas collector $\varnothing$ 76×3.5 mm; the blower fan is switched off.

Рис.3. Вплив кута атаки на площу основи s_g еліптичного циліндру E_g (а) та газовий аналіз щодо концентрації метану в місці зустрічі аерованого струменя зі стінкою (б). Умови: $d_0 = 1,6 - 3,5$ мм; $W_g = 84 - 145$ м/с [11].

Fig.3. Influence of the angle of attack on the area of the base s_g of the elliptical cylinder E_g (a) and gas analysis of methane concentrations at the meeting points of the aerated jet with the wall (b). Conditions: $d_0 = 1,6 - 3,5$ mm; $W_g = 84 - 145$ м/с [11].

Таким чином, з експериментальних даних, наведених на рис.3, б, можна зробити висновок, що у прийнятому діапазоні швидкостей природного газу та повітря аерація струменя природного газу слабо залежить від швидкості повітря, що подається вентилятором знизу.

Чим більше об'єм еліптичного циліндру E_g (із сумішшю повітря та газу, яка не горить) на вертикальній поверхні (див. рис.1, б), тим більше розміри факелу. Характерним розміром, що корелюється з об'ємом E_g , є площа його основи s_g , яку, віднесу до площі перетину сопла $s_0 = \pi d_0^2 / 4$, можна прийняти за характерний безрозмірний масштаб (s_g / s_0).

Проведено експериментальні дослідження щодо визначення безрозмірної площі s_g / s_0 на вертикальній вогнетривкій поверхні у залежності від відстані, яку проходить струмінь природного газу (температура $t = 20$ °С, склад, %: CH₄ – 92,7; C₂H₆ – 2,8; C₃H₈ – 1,2; CO₂ – 1,1; N₂ – 2,2) у калібрах сопла L/d_0 . З рис.4 видно, що при збільшенні швидкості витікання природного газу (його витраті) відносна площа s_g / s_0 має екстремум у діапазоні $L/d_0 \approx 40$ калібрів діаметру сопла та, ймовірно, зв'язана з приєднанням струменем природного газу стехіометричної кількості повітря (див. рис.3, в) [14, 15], але якість взаємоперемішування не досліджувалася. При цьому, починаючи з тиску

газу орієнтовно більше 500 мм вод. ст. та відповідно швидкості його витікання більше $W_g > 100$ м/с, можна виокремити три діапазони відстані у калібрах сопла до вертикальної вогнетривкої поверхні (рис.4, в): I — $L/d_0 < 15$, в якому факел стає таким, що світиться та містить значну кількість частинок сажі (не досліджувався); II — $15 \leq L/d_0 \leq 30$, стабілізація факелу відбувається надійно (зокрема, при ввімкненні дуттьового вентилятора), тобто відбувається інтенсифікація перемішування природного газу та повітря за рахунок більш раннього удару об стінку аерованого струменя газу, який ще має значну швидкість, а концентрація природного газу в ньому вище стехіометричної; III — $30 < L/d_0$, причому в діапазоні $30 < L/d_0 \leq 40$ спостерігається збільшення розмірів площі основи s_g/s_0 еліптичного циліндру E_b та, відповідно, факелу на вертикальній вогнетривкій поверхні, а далі при $L/d_0 > 40$ s_g/s_0 і розміри факелу, розміщеного на вертикальній вогнетривкій поверхні, зменшуються до його відриву на відстані близько $L/d_0 \approx 90$, також при вмиканні дуттьового вентилятора стабілізація факелу, починаючи з $L/d_0 > 30$, поступово погіршується, а факел стає більш волітарним.

Дослідження щілинних подових паликових пристроїв на лабораторному стенді та у котлоагрегатах

Проаналізувавши конструкції діючих подових паликових щілинних пристроїв, встановлено, що відстань до їх щілин у калібрах сопла відповідає другій частині діапазону II (див. попередній розділ) та є рекомендованою як така, що встановлена на основі промислових досліджень, наприклад, $a_{\text{slot}} = 100$ мм, $\alpha = 45^\circ$, діаметр зовнішнього колектора 57 мм, $d_0 = 1,5$ мм: $L/d_0 \approx 28$; $a_{\text{slot}} = 120$ мм, $\alpha = 45^\circ$, діаметр зовнішнього колектора 76 мм, $d_0 = 1,8$ мм, тобто: $L/d_0 \approx 26$ [7].

Рис.4. Залежність безрозмірної площі s_g/s_0 на вертикальній вогнетривкій поверхні від відстані, яку проходить струмінь природного газу у калібрах сопла L/d_0 , дуттьовий вентилятор вимкнено, $\alpha = (15-90)^\circ$.

Fig.4. Dependence of the dimensionless area s_g/s_0 on the vertical refractory surface on the distance traveled by a stream of natural gas in the calibers of the nozzle L/d_0 , the blower fan is switched off, $\alpha = (15-90)^\circ$.

На лабораторному стенді (рис.5, а) було проведено дослідження сегментів конструкцій подових щілинних паликових пристроїв при використанні групи сопел (досліджувані діаметри сопел, мм: $d_0 = 1,6; 2,0; 2,5; 3,0$), а також дослідження заводських та нових паликових пристроїв МПИГ-3 (рис.5, б), які були встановлені у котлоагрегатах ТВГ-8.

Рис.5. Лабораторний стенд для дослідження фрагмента паливкового пристрою (а) та фото роботи паливника МПИГ-3 у котлі ТВГ-8 (б): 1 — газовий колектор; 2 — сопла; 3 — вертикальна вогнетривка стінка; 4 — масштабна шкала; 5 — перфорований лист; 6 — повітряний короб; 7 — ротаметр; 8 — теплообмінник; 9 — вентилятор; 10 — витяжна труба; 11 — газоаналізатор; 12 — електричний запальник.

Fig.5. Laboratory stand for the study of the burner device fragment (a) and a photo of the MPIG-3 burner in the boiler TVG-8 (b): 1 — gas collector; 2 — nozzles; 3 — vertical refractory wall; 4 — scale; 5 — perforated sheet; 6 — air box; 7 — rotameter; 8 — heat exchanger; 9 — fan; 10 — exhaust pipe; 11 — gas analyzer; 12 — electric igniter.

Для діапазону швидкостей витікання природного газу $W_g = 84-145$ м/с шляхом підсвічування струменя природного газу було визначено його кут розкриття, що склав близько 18° . Відповідно, на довільній відстані L/d_0 до вертикальної стінки по геометричній вісі сопла безрозмірний діаметр D/d_0 аерованого газового струменю складає:

$$D/d_0 = 2 \operatorname{tg}(9^\circ) \cdot (L/d_0) + 1, \quad (1)$$

Найкраще змішування повітря і газу відбувається тоді, коли сусідні аеровані струмені не перетинаються до зустрічі з стабілізуючою поверхнею, тобто необхідне дотримання умови при виборі кроку сопел (s):

$$s/d_0 \geq D/d_0, \quad s \geq D, \quad (2)$$

Наприклад, прийемо $L/d_0 = 30$, $d_0 = 1,6$ мм, відповідно $D = 16,8$ мм. Так, при використанні сопла $d_0 = 1,6$ мм з конструктивних міркувань прийнятий крок між всіма сопел $s = 20$ мм, що реалізується у заводських та нових серійних паливкових пристроях котлів типів ТВГ-КВГ. При збільшенні діаметру соплових отворів можна залишити технологічно прийнятний крок отворів (s), шляхом зменшення відс-

тані L/d_0 до вогнетривкої поверхні з метою отримання паливника більшої питомої потужності (Q/l , МВт/м), але, при цьому, збільшиться аеродинамічний опір паливника та розміри факелу.

На лабораторному стенді (див. рис.5, а) для одиночного сопла та групи сопел (три сопла) емпірично було визначено кути атаки α (рис.1, а, рис.6, а) турбулентного газового струменя, при яких спостерігалось стійке горіння або зрив при стабілізації факелу на муліто-кремнеземистій волокнистій плиті, що за своїми характеристиками наближається до вогнестійкої цегли (шамот класу А), яка використовується для формування щілин подових паливників [6].

Слід приймати кут атаки α мінімальним по зриву факелу, оскільки це зменшує малу піввісь b основи еліптичного циліндру E_b (див. рис.3, а), що при застосуванні групи сопел з малим кроком s/d_0 (для забезпечення більшої питомої потужності паливника Q/l , МВт/м) дає можливість отримати факел меншої довжини (процес сумішоутворення, що продовжується на поверхні щілини, розтягується по висоті щілини паливника та топці котла найменше).

При роботі пальника на газі середнього тиску і використанні сопел $d_0 = 1,6$ мм для пальника МПИГ-3 котла ТВГ-8 (ТВГ-8М) робоча потужність (Q , МВт) на погонний метр колектору-труби (1, м) складає $Q/1 \approx 1,2$ МВт/м, а у котлі ПТВМ-100 при дослідженні експериментального подового пальника, встановленого у холодній воронці ($d_0 = 3,5$ мм), було досягнуто $Q/1 \approx 4,4$ МВт/м, однак, отримані факели суттєво відрізняються за довжиною [11].

Найбільш розповсюдженою конструкцією подового пальникового пристрою є пальник, що експлуатується у котлах КВГ-7,56, ТВГ-8 (ТВГ-8М) та інших, з газовим колектором діаметром 76 x 3,5 мм, $\alpha = 45^\circ$, свердленими отворами діаметром 1,6 мм та рекомендованою шириною щілини $a_{\text{slot}} = 120$ мм [7], що відповідає $L/d_0 \approx 29,3$. Ця відстань визначена емпірично за результатами дослідження подових пальникових пристроїв під час експлуатації. При використанні спеціальних сопел (рис.1 а, поз.2) відстань до стінки у калібрах сопла

зменшується та є можливість збільшити ширину щілини, що зменшує швидкість повітря, аеродинамічний опір пальника, а також висота факелу зменшується, за рахунок чого підвищується теплосприймання у нижній частині топки котла.

По розробкам Інституту газу НАН України була проведена модернізація більш 15 котлів ТВГ-8М ПАТ «Київенерго» та ін. Було встановлено нові пальники МПИГ-3 з профільованими соплами, які виступають за межі колектору на 6 мм, з шириною щілини $a_{\text{slot}} = 130$ мм, що відповідає $L/d_0 = 29,9$, використано щілину з раптовим розширенням, за рахунок якої висота факелу ще зменшується, а його стабілізація покращується [8]. На рис.6, б наведено залежність утворення та викидів оксидів азоту від потужності котлів ТВГ-8М до його модернізації з використанням подових пальників старої конструкції (апроксимуюча крива 2, щілина з раптовим розширенням) та при роботі пальників МПИГ-3 (апроксимуюча крива 1).

Fig.6. Empirical value of the angle of attack of a single and a group of turbulent gas jets (three units) at which there is a stable combustion or failure (tested for the range $W_{\text{gas}} = 84\text{--}185$ м/с, $L/d_0 > 15$, $\alpha = (15\text{--}90)^\circ$, $W_{\text{air}} < 3$ м/с) (a) and the dependence of the formation and emissions of nitrogen oxides on the capacity of boilers TVG-8M before and after its modernization (used indicators of 3 boilers, two of which before and after modernization) (b).

З рис.6, б можна зробити висновок, що зменшення швидкості повітря на вході у пальник за рахунок розширення щілини зменшує число Рейнольдса (Re), що призводить до зменшення висоти факелу [11], але при цьому незначно підвищують-

ся викиди оксидів азоту, однак вони відповідають діючим нормам ЄС для існуючих котлів такої потужності [10].

Для котла Бортницької станції аерації ДКВР-6,5-13 м.Києва були виготовлені спеціальні подові

Рис.6. Емпіричне значення кута атаки одиночного та групи турбулентних газових струменів (три одиниці), при якому спостерігається стійке горіння або зрив (перевірено для діапазону $W_g = 84\text{--}185$ м/с, $L/d_0 > 15$, $\alpha = (15\text{--}90)^\circ$, $W_n < 3$ м/с) (а); залежність утворення та викидів оксидів азоту від потужності котлів ТВГ-8М до його модернізації та після (використано показники трьох котлів, два з яких до модернізації та після) (б).

щільні палинкові пристрої типу МПИГ-3, що можуть працювати окремо на природному газі та біогазі (потребується заміна сопел на спеціальні біогазові). При цьому палиник може стабільно працювати при концентрації метану (CH_4) в біогазі від 50 % яка може коливатись і, в середньому, складає 67 %.

Висновки

Досліджено умови стабілізації горіння відірваних газових струменів на вертикальній поверхні діапазону діаметрів сопел $d_0 = 1,6\text{--}3,0$ мм та швидкостей витікання природного газу $W_g = 84\text{--}145$ м/с (перевірена швидкість витікання природного газу до $W_g = 185$ м/с) — величин, що емпірично встановлені та закладаються при конструюванні щільних подових палиників. Показано механізм стабілізації полум'я відіраного струменя газу на вертикальній поверхні, який дає можливість при стабільному горінні збільшити швидкість витікання газу через одне сопло у 3 й більше разів у порівнянні з дифузійним горінням вільного струменя газу, що ніяк не стабілізований.

Щодо створення щільних подових палинкових пристроїв встановлено оптимальну відстань до вертикальної вогнетривкої поверхні у калібрах сопла, що складає $L/d_0 \approx 30$ при концентрації природного газу в аерованому струмені, яка більше стехіометричної та складає близько 14 %. Обґрунтовано необхідність використання мінімальних по зриву кутів атаки при конструюванні щільних подових палиників, які були експериментально встановлені.

Експериментально показано, що, починаючи з тиску газу в трубі-колекторі $p \approx 500$ мм вод. ст. та, відповідно, швидкості його витікання через сопло більше $W_g \approx 100$ м/с, при відстані до вертикальної поверхні, на якій стабілізується факел $15 < L/d_0 \leq 30$, для діапазону діаметрів сопел $d_0 = 1,6\text{--}3,0$ мм безрозмірна площа основи s_g/s_0 еліптичного циліндру E_b менше у 2–2,5 рази максимальної, що спостерігається на відстані $L/d_0 \approx 40$. Це пояснюється інтенсифікацією перемішування газу та повітря за рахунок більш раннього удару об стінку аерованого струменя газу, який ще має значну швидкість, та концентрацією приєднаного повітря у струмені менше стехіометричної.

Список літератури

1. Hottel H.C., Hawthorne W.R. Diffusion in laminar flame jets. *Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena*. 1949. Vol. 3. P. 254–266.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960. 715 с.
3. Spalding D.B. Some Fundamentals of Combustion. London : Butterworths, 1955. 250 p.
4. Иванов Ю.В. Основы расчета и проектирования газовых горелок. М. : Гостоптехиздат, 1963. 360 с.
5. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. М. : Недра, 1972. 276 с.
6. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. Berlin : Springer Science & Business Media, 2006. 378 p.
7. Сигал И.Я., Лавренцов Е.М., Косинов О.И., Домбровская Э.П. Газовые водогрейные промышленно-отопительные котлы / Под общ. ред. И.Я. Сигала. Киев : Техника, 1967. 145 с.
8. Лавренцов Е.М., Сигал И.Я., Смихула А.В., Домбровская Е.П., Кернажицкая О.С., Марасин А.В. Досвід розробки, впровадження та модернізації водогрійних котлоагрегатів з двосвітними екранами та щільними подовими палиниками. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 17–26.
9. Михеев В.П., Фёдоров В.П. Подовые и щелевые горелки для природного газа. Л. : Недра, 1965. 74 с.
10. Directive (EU) 2015/2193. (2015) Of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants, *Official Journal of the European Union*, 2015, 28 November, 19 p.
11. Смихула А.В. Розробка та дослідження потужних подових щільних палиників для водогрійних баштових котлів : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2007. 20 с.
12. Сигал И.Я., Смихула А.В., Марасин А.В., Куц В.П., Домбровская Э.П., Колчев В.А., Кернажицкая Е.С. Экспериментальное исследование биогаза как топлива для котлов. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2013. № 5. С. 26–32.
13. Щёлкин К.И. Теория горения и детонации // Механика в СССР за 50 лет. М., 1970. Т. 2. С. 344–422.
14. Ricou F.P., Spalding D.B. Measurements of entrainment by asymmetrical turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1961. Vol. 11, № 1. P. 21–32.
15. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Турбулентное смешение газовых струй. М. : Наука, 1974. 272 с.

Надійшла до редакції 12.08.20

Сигал И.Я.¹, докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.¹**, канд. техн. наук,
Сигал А.И.², канд. техн. наук, **Марасин А.В.¹**, канд. техн. наук

¹ **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

² **Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев**

ул. Желябова, 2а, 03680 Киев, Украина, e-mail: office@engecology.com

Исследование горения оторванных газовых струй при стабилизации фронта пламени на вертикальной поверхности

Исследованы условия стабилизации горения оторванных газовых струй на вертикальной поверхности в диапазоне диаметров сопел $d_0 = 1,6\text{--}3,0$ мм. Показан механизм стабилизации пламени оторванной струи газа на вертикальной поверхности, который позволяет при стабильном горении увеличить скорость истечения газа через одно сопло в 3 и более раз по сравнению с диффузным горением свободной струи газа, которая никак не стабилизирована. Установлено оптимальное расстояние до вертикальной огнеупорной поверхности в размерах калибров сопла для создания щелевых подовых горелочных устройств. Обоснована необходимость использования минимальных по срыву углов атаки при конструировании щелевых подовых горелок, которые были экспериментально установлены. Экспериментально показано, что, начиная с давления газа в трубе-коллекторе $p \approx 500$ мм вод. ст. и, соответственно, скорости его истечения через сопло больше $W_g \approx 100$ м/с, при расстоянии до вертикальной поверхности, на которой стабилизируется факел $15 < L/d_0 \leq 30$, для диапазона диаметров сопел $d_0 = 1,6\text{--}3,0$ мм безразмерная площадь основы s_g/s_0 эллиптического цилиндра E_0 меньше в 2–2,5 раза максимальной, которая наблюдается на расстоянии $L/d_0 \approx 40$. Библ. 15, рис. 6.

Ключевые слова: стабилизация пламени, удар струи, щелевая горелка, горение.

Sigal I.Ya.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, **Smikhula A.V.¹**,
 Candidate of Technical Sciences, **Sigal O.I.²**, Candidate of Technical Sciences,
Marasin O.V.¹, Candidate of Technical Sciences

¹ **The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**

39, Dehtiarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

² **Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**

2-a, Zhelyabova Str., 03057 Kyiv, Ukraine, e-mail: office@engecology.com

Combustion Research of Impinging Gas Jets at Stabilization of the Flame Front on a Vertical Surface

The conditions of stabilization of combustion of detached gas jets on the vertical surface of the range of nozzle diameters $d_0 = 1.6\text{--}3.0$ mm are investigated. The mechanism of flame stabilization of a detached gas jet on a vertical surface is shown, which allows to increase the gas flow rate through one nozzle by 3 or more times with stable combustion, compared

to diffusion combustion of a free gas jet, which is not stabilized. The optimal distance to the vertical refractory surface in the nozzle calibers for the creation of slot bottom burner devices has been established. The necessity of using the minimum angles of attack till failure of combustion, which were experimentally founded, for the construction of slot bottom burner devices, is substantiated. It is experimentally established that starting from the gas pressure in the collector-pipe $p \approx 500$ mmwg and, accordingly, the speed of its flow through the nozzle is more than $W_g \approx 100$ m/s at a distance to the vertical surface on which the flame is stabilized $15 < L/d_0 \leq 30$, for the range of nozzle diameters $d_0 = 1.6\text{--}3.0$ mm, dimensionless area base s_g/s_0 of the elliptical cylinder E_b , less than 2–2.5 times of the maximum observed at a distance $L/d_0 \approx 40$. *Bibl. 15, Fig. 6.*

Keywords: flame stabilization, impinging jet, slot burner, combustion.

References

1. Hottel H.C., Hawthorne W.R. Diffusion in laminar flame jets. *Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena*. 1949. Vol. 3. pp. 254–266.
2. Abramovich G.N. Theory of Turbulent Jets. Moscow : Fizmatgiz, 1960. 715 p. (Rus.)
3. Spalding D.B. Some Fundamentals of Combustion. London : Butterworths, 1955. 250 p.
4. Ivanov Yu.V. [Fundamentals of calculation and design of gas burners]. Moscow : Gostoptekhizdat, 1963. 360 p. (Rus.)
5. Ivanov Yu.V. [Gas burner devices]. Moscow : Nedra, 1972. 276 p. (Rus.)
6. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. Berlin : Springer Science & Business Media, 2006. 378 p.
7. Sigal I.Ya., Lavrentsov E.M., Kosinov O.I., Dombrowskaya E.P. [Gas-fired heat-water supply industrial boilers]. Kyiv : Tekhnika, 1967. 145 p. (Rus.)
8. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Dombrowska E.P., Kernazhytska E.S., Marasin O.V. [Experience of development, implementation and modernization of hot water supply boilers with dual-screens and the slot bottom burners]. *Energotehnologii i resursoberezhniye. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2019. No. 3. pp. 17–26. (Ukr.)
9. Mikheev V.P., Fedorov V.P. [Bottom slot burners for natural gas]. Leningrad : Nedra, 1965. 74 p. (Rus.)
10. Directive (EU) 2015/2193 (2015) Of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants, *Official Journal of the European Union*, 2015, 28 November, 19 p.
11. Smikhula A.V. [Development and research of power bottom slot burners for tower hot water boilers : Abstract of the dissertation]. Kyiv : The Gas Institute, 2007. 20 p. (Ukr.)
12. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Marasin O.V., Kouts V.P., Dombrowska E.P., Kolchev V.O., Kernazhytska E.S. [Experimental research of a biogas as a fuel for boilers]. *Energotehnologii i resursoberezhniye. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2013. No. 5. pp. 26–32. (Rus.)
13. Shchelkin K.I. [The theory of combustion and detonation. In: Mechanics in the USSR for 50 years]. Moscow, 1970. Vol. 2. pp. 344–422. (Rus.)
14. Ricou F.P., Spalding D.B. Measurements of entrainment by asymmetrical turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1961. 11 (1). pp. 21–32.
15. Abramovich G.N., Krashenninnikov S.Yu., Sekundov A.N., Smirnova I.P. [Turbulent Mixing of Gas Jets]. Moscow : Nauka, 1974. 272 p. (Rus.)

Received August 12, 2020