3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ

Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU
http://nv.nltu.edu.ua
https://doi.org/10.15421/40270516
Article received 22.06.2017 p.
Article accepted 29.06.2017 p.
УДК 536.24:533

ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)

@ ✉ Correspondence author
N.M. Fialko
nmfialko@ukr.net

Н. М. Фіалко[1], Л. С. Бутовський[2], Н. О. Меранова[1], К. В. Рокитько[1], О. О. Грановська[2], Н. М. Ольховська[1], Л. Я. Швецова[1]

[1] *Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна*
[2] *Національний технічний університет України "КПІ" ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЗОНІ ГОРІННЯ ПАЛЬНИКІВ З ЕШЕЛОНОВАНИМИ РЕШІТКАМИ СТАБІЛІЗАТОРІВ ПОЛУМ'Я

Наведено результати експериментальних досліджень температурних полів продуктів горіння у пальниках з підковоподібним розташуванням стабілізаторів полум'я. Подано детальну інформацію щодо експериментального стенду та застосованої вимірювальної апаратури. Представлено дані порівняльного аналізу температурних режимів зони горіння за наявності та відсутності ешелонування стабілізаторів полум'я. Виявлено, що зазначені режими мають певну якісну схожість у розглядуваних ситуаціях. Встановлено також наявність істотних відмінностей у характеристиках порівнюваних температурних режимів. Зокрема виявлено, що розподіли температури за центральним і периферійними стабілізаторами істотно відрізняються в умовах наявності їх ешелонування і є близькими у якісному та кількісному вимірі в разі розташування торців стабілізаторів в одній площині. За результатами зіставлення значень температури поблизу стінки каналу в умовах ешелонування стабілізаторів полум'я та без нього встановлено, що ці значення є істотно нижчими для першої зі зазначених ситуацій. Показано, що відмінності порівнюваних температур на відстані $2{,}0\cdot10^{-3}$ м від стінки каналу можуть сягати 230 °С. На основі виконаних досліджень рекомендовано застосувати в енергетичній практиці пальники з підковоподібним розташуванням стабілізаторів полум'я в разі потреби зниження теплового навантаження на стінки амбразур котлів.

Ключові слова: пальникові пристрої; поле температур; ешелонування стабілізаторів полум'я; підковоподібна решітка стабілізаторів.

Вступ. Пальникові пристрої з ешелонованим розташуванням стабілізаторів полум'я слугують формуванню потрібних температурних полів у зоні горіння. Так, за потреби зниження теплового навантаження на стінки амбразури котла доцільним є застосування у пальниках так званих підковоподібних решіток стабілізаторів полум'я, в яких стабілізатори, розташовані поблизу стінок, зміщуються вниз по потоку.

Процеси переносу у пальниках з різними типами ешелонування стабілізаторів полум'я досліджено у низці робіт (Rauschenbach et al., 1964; Fialko et al., 2011; Fialko et al., 2015a, 2015b, 2015c; Sherenkovskyi et al., 2015). Більшість з них стосується ситуації ступінчастого і гребінчастого розміщення стабілізаторів у решітці. Щодо пальників з підковоподібним розташуванням стабілізаторів полум'я, то вивчення їхніх робочих процесів обмежується публікаціями (Fialko et al., 2015d; Fialko et al., 2017). З огляду на важливість застосування в енергетичній практиці пальників з цим типом ешелонування стабілізаторів полум'я актуальним є дослідження різних елементів цих процесів.

Мета дослідження полягає у встановленні закономірностей формування теплового стану зони горіння пальників із підковоподібним ешелонуванням стабілізаторів полум'я.

Матеріали та методика дослідження. Експериментальні дослідження робочого процесу в розглядуваному стабілізаторному пальниковому пристрої, проводили на стенді, схему якого представлено на рис. 1. Його функціонування під час випробувань відбувається в такий

Інформація про авторів:

Фіалко Наталія Михайлівна, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України. **Email:** nmfialko@ukr.net
Бутовський Леонід Сергійович, канд. техн. наук, доцент, тел. +38 (044) 406-80-96. **Email:** homet129@gmail.com
Меранова Наталія Олегівна, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** mnata1956@ukr.net
Рокитько Костянтин Володимирович, мол. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** kr.kicenergetik@gmail.com
Грановська Олена Олександрівна, канд. техн. наук, доцент, тел. +38 (044) 406-80-96. **Email:** granov1810@gmail.com
Ольховська Ніна Миколаївна, наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** olkhovska@ukr.net
Швецова Людмила Якимівна, мол. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** shevcova@ukr.net

Цитування за ДСТУ: Фіалко Н. М., Бутовський Л. С., Меранова Н. О., Рокитько К. В., Грановська О. О., Ольховська Н. М., Швецова Л. Я. Експериментальні дослідження температурного режиму в зоні горіння пальників з ешелонованими решітками стабілізаторів полум'я. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(5). С. 77–81.

Citation APA: Fialko, N. M., Butovsky, L. S., Meranova, N. O., Rokytko, K. V., Granovskaya, E. A., Olkhovskaya, N. N., & Shvetsova, L. A. (2017). Experimental investigations of the temperature regime in the burning area of burners with echeloned grates of the flame stabilizers. Scientific Bulletin of UNFU, 27(5), 77–81. https://doi.org/10.15421/40270516

спосіб. Повітря від компресора через патрубок 1В підводиться до заспокійливої ділянки 2В. Витрата повітря регулюється за допомогою заслінки 12В. Після заспокійливої ділянки через перехідний патрубок 3В повітря подається до робочої ділянки 8В, яка футерована вогнетривкою керамікою. Витрата повітря через стенд вимірюється за допомогою діафрагми 4В. Температура повітря і перепад тиску на діафрагмі вимірюються термометром 5В та дифманометром 6В. У робочій ділянці встановлюється пальниковий пристрій, який випробовується. Схему робочої ділянки цього стенду представлено на рис. 2.

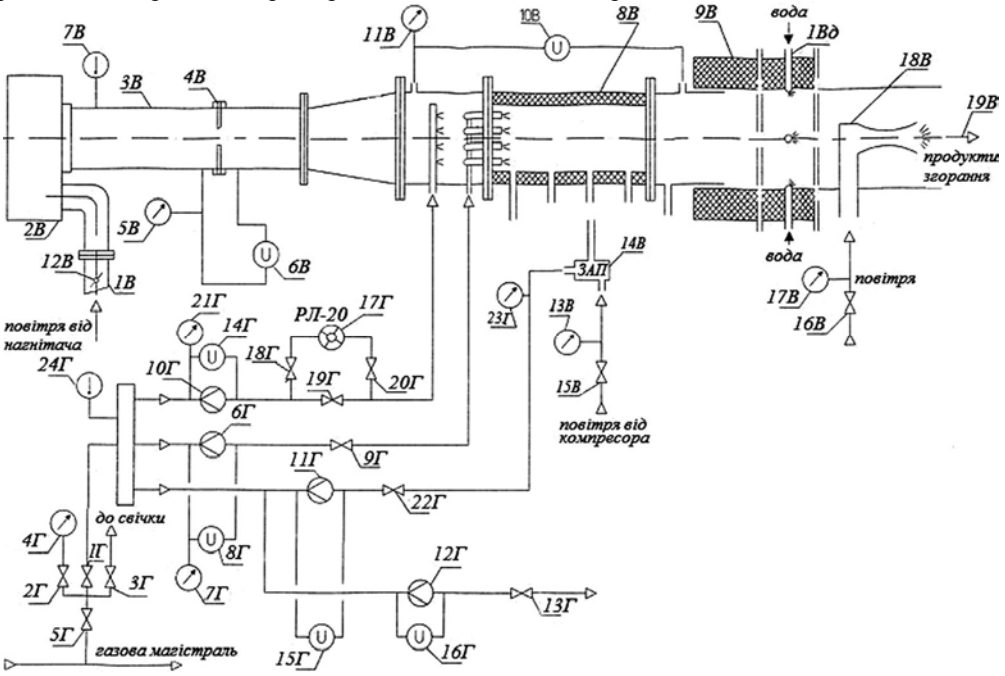

Рис. 1. Схема експериментального стенду: 1*В* – патрубок підводу повітря; 2*В* – ресивер заспокоювач; 3*В* – мірна ділянкА; 4*В* – діафрагма; 5*В* – манометр виміру тиску повітря перед діафрагмою; 6*В* – дифманометр виміру перепаду тиску на діафрагмі; 7*В* – термометр заміру температури повітря; 8*В* – робоча ділянка; 9*В* – вихідна ділянка; 10*В* – дифманометр виміру опору камери згорання; 11*В* – манометр виміру тиску або розрідження на вході в камеру згорання; 12*В* – засувка регулювання витрат повітря; 13*В* – вентиль регулювання підводу повітря до запальника; 14*В* – запальник; 15*В* – манометр виміру тиску повітря перед запальником; 16*В* – вентиль регулювання подачі повітря до ежектора; 17*В* – манометр заміру тиску повітря перед ежектором; 18*В* – ежектор; 19*В* – продукти згорання; 7*Г* – регуляційний газовий вентиль; 8*Г* – кран на манометр виміру тиску газу; 9*Г* – кран на свічку; 10*Г* – манометр виміру тиску газу 11*Г* – запірний газовий вентиль; 12*Г*, 16*Г*, 17*Г*, 18*Г* – мірні діафрагми витрати газу; 13*Г*, 27*Г* – манометри виміру тиску перед діафрагмами; 14*Г*, 20*Г*,21*Г*, 22*Г* – дифманометри заміру перепаду тиску на діафрагми; 15*Г*, 19*Г*, 24*Г*, 25*Г*, 26*Г*, 28*Г* – вентилі регулювання витрати газу; 23*Г* – лічильник витрати газу; 30*Г* – термометр для вимірювання температури газу; 29*Г* – манометр виміру тиску газу перед запальником; $1В_д$ – форсунка вприскування води на охолодження продуктів згорання

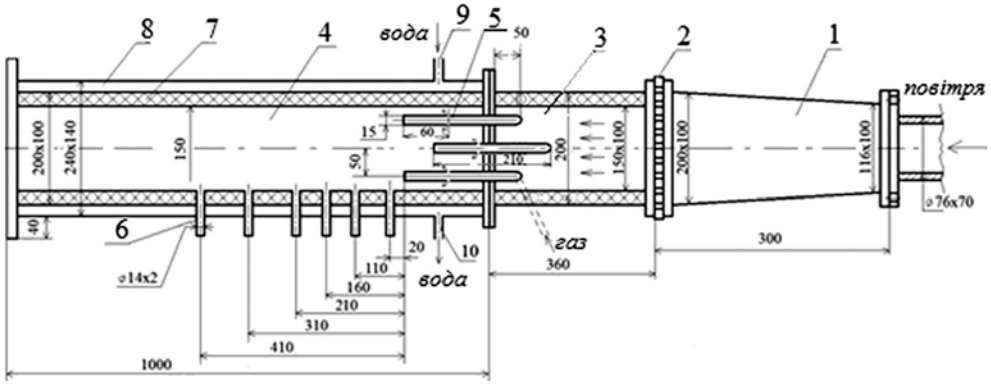

Рис. 2. Схема робочої ділянки експериментального стенду: 1 – вхідний дифузор; 2 – вирівнювальна решітка; 3 – заспокійлива ділянка; 4 – канал; 5 – стабілізатор полум'я; 6 – штуцер; 7 – ізоляція з керамзитного волокна; 8 – канал для охолодження робочої камери; 9 – вхід охолоджувальної води; 10 – вихід охолоджувальної води

Для вимірювання втрат тиску під час проходження повітря крізь досліджуваний пальниковий пристрій використовується дифманометр 10В. Температура повітря вимірюється термометром 7В. Продукти згоряння після робочої ділянки видаляються через вихідну ділянку 9В. Для зменшення температури продуктів згоряння, які виходять у димову трубу, у вихідну ділянку через штуцери 1В подається вода. На виході зі стенду для відведення продуктів згоряння використовується ежектор 18В, в котрий підводиться повітря, витрата якого регулюється вентилем 16В. Для вимірювання температури газів та складу продуктів горіння в робочій ділянці передбачена система штуцерів. Для забезпечення процесу горіння паливний газ через вентилі 5Г та 1Г підводиться до колектора, звідки по трьох магістралях подається до робочої ділянки. По одній магістралі газ через діафрагму 10Г та лічильник витрати газу 17Г надходить до лінії подачі газу на попереднє повне або часткове перемішування з повітрям. Температура газу вимірюється термометром 24Г. Тиск газу перед діафрагмою та пере-

пад тиску на діафрагмі визначається манометром 21Г та дифманометром 14Г. По другій магістралі через діафрагму 6Г газ підводиться до пальникового пристрою. Тиск газу перед діафрагмою та перепад тиску на діафрагмі вимірюються відповідно манометром 7Г та дифманометром 8Г. Витрати газу за окремими магістралями регулюються за допомогою вентилів 18Г, 19Г, 20Г та 9Г.

Для запалювання факелу в пальниковому пристрої використовується запальник 14В. Вимірювання витрата газу проводиться за допомогою діафрагми 11Г і регулюється вентилем 22Г. Вимір тиску на діафрагмі здійснюється зі застосуванням дифманометра 15Г. Тиск газу вимірюється манометром 23Г. Повітря до запальника підводиться від компресора через вентиль 15В. Тиск повітря визначається манометром 13В. Факел від запальника підводиться в зону рециркуляції за одним із стабілізаторів.

Результати дослідження. Нижче для прикладу наведено результати експериментальних досліджень для пальникового пристрою зі стабілізаторною решіткою, яка складається із трьох стабілізаторів полум'я. При цьому в межах порівняльного аналізу розглянуто дві ситуації, перша з яких відповідає підковоподібному ешелонуванню стабілізаторів полум'я, друга – відсутності їх ешелонування (рис. 3).

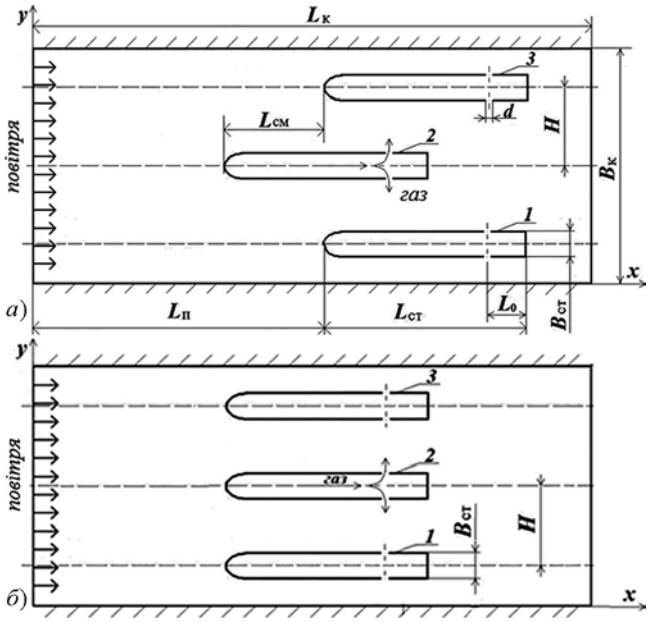

Рис. 3. Схеми розташування стабілізаторів: з підковоподібним їх ешелонуванням (а) і за відсутності ешелонування (б): 1, 2, 3 – перший, другий і третій стабілізатори полум'я

Характерні результати виконаних досліджень наведено на рис. 4-6. Представлені дані відповідають таким вихідним параметрам: $L_п$ = 0,86 м; $L_{ст}$ = 0,21 м; $L_к$ = 1,36 м; H = 0,05 м; $B_к$ = 0,15 м; $B_{ст}$ = 0,015 м; $L_{см}$ = 0,06 м; L_0 = 0,15 м; d = 0,002 м; відносний крок розташування газоподавальних отворів S/d = 8; витрата повітря дорівнювала 0,116 кг/с; витрата пропан-бутану становила $1{,}72 \cdot 10^{-3}$ кг/с; густина газу і повітря дорівнювали 2,36 кг/м^3 і 1,2 кг/м^3 відповідно; температура повітря та пропан-бутану на вході становила 15 °С; коефіцієнт надлишку повітря α = 1,25; коефіцієнт захаращення стабілізаторами прохідного перерізу каналу k_f = 0,3.

Рис. 4 і 5 ілюструють розподіли температури у фіксованих поперечних перерізах каналу відповідно при ешелонованому і неешелонованому розташуванні стабілізаторів полум'я. (Тут відлік координати x^* ведеться від торця першого по потоку стабілізатора). Як видно з рисунків, вказані розподіли температури мають певну схожість. Зокрема, вони характеризуються наявністю трьох максимумів температури, положення яких відповідає осям турбулентного сліду за стабілізаторами полум'я, та двох мінімумів, що відповідають осям міжстабілізаторних каналів. Однак, спостережено й істотні відмінності у характері наведених розподілів температури за наявності і відсутності ешелонування стабілізаторів полум'я. Так, у першому випадку значення максимумів температури за різними стабілізаторами полум'я можуть істотно відрізнятися. А в разі розташування торців стабілізаторів в одній площині ці значення є близькими за величиною.

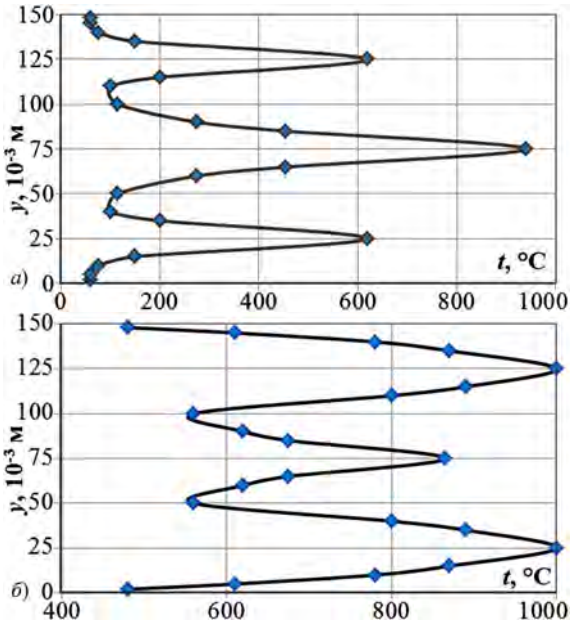

Рис. 4. Розподіли температури у поперечних перерізах каналу пальникового пристрою з підковоподібною решіткою стабілізаторів полум'я на фіксованих відстанях від торця першого по потоку стабілізатора x^*: а) $x^* = 80 \cdot 10^{-3}$ м; б) $x^* = 270 \cdot 10^{-3}$ м

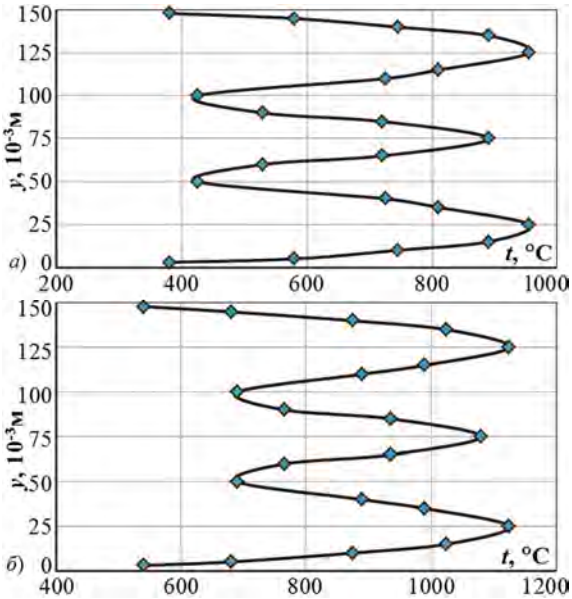

Рис. 5. Розподіли температури у поперечних перерізах каналу пальникового пристрою з неешелонованою решіткою стабілізаторів полум'я на фіксованих відстанях від торців стабілізаторів x^*: а) $x^* = 110 \cdot 10^{-3}$ м; б) $x^* = 210 \cdot 10^{-3}$ м

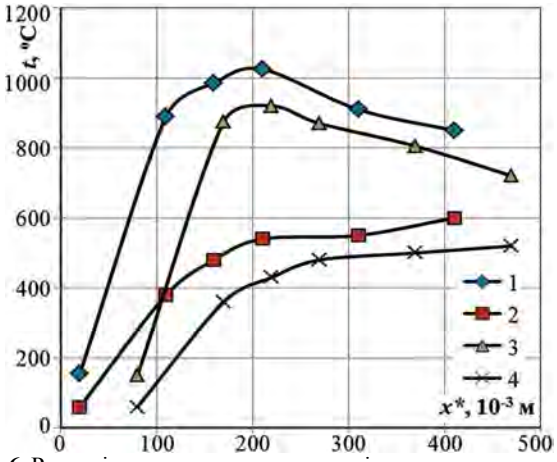

Рис. 6. Розподіл температури по довжині каналу пальника з неешелонованою (1, 2) та підковоподібною (3, 4) решітками стабілізаторів полум'я на різних відстанях у від стінки каналу: а) $y = 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м; б) $y = 15 \cdot 10^{-3}$ м

Отримані дані свідчать про те, що за наявності ешелонування стабілізаторів полум'я максимум температури на осі сліду центрального стабілізатора полум'я істотно перевищує максимуми температури за периферійними стабілізаторами. Наприклад, на відстані $x^* = 80 \cdot 10^{-3}$ м від центрального стабілізатора полум'я відмінність у значеннях вказаних максимумів становить близько 320 °С (див. рис 4, а). Очевидно, вищі рівні температури за центральним стабілізатором полум'я зумовлені тим, що горіння за ним розпочинається раніше.

Зі збільшенням відстані x^* від першого по потоку стабілізатора вниз за течією картина змінюється, так що, починаючи з деякого значення x^*, стає протилежною. А саме, значення максимумів температури за периферійними стабілізаторами полум'я стають більшими, ніж за центральним стабілізатором (див. рис. 4, б). Це пояснюють тим, що інтенсивність вигорання палива за центральним стабілізатором зменшується порівняно з ситуацією за периферійними стабілізаторами.

На рис. 6 наведено експериментальні дані щодо розподілу температури по довжині каналу поблизу його стінки – на відстані $2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м і $15 \cdot 10^{-3}$ м від неї. При цьому представлено результати як для ешелонованого, так і для неешелонованого розташування стабілізаторів полум'я. Згідно з наведеними даними при ешелонуванні стабілізаторів температура поблизу стінки є істотно нижчою, ніж за відсутності ешелонування. Так, при $y = 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ м на відстані від першого по потоку стабілізатора $x^* = 100 \cdot 10^{-3}$ м це зниження становить 230 °С, при $x^* = 200 \cdot 10^{-3}$ м – дорівнює 135 °С, а при $x^* = 400 \cdot 10^{-3}$ м – 90 °С.

Висновки. За результатами виконаних експериментальних досліджень показано, що застосування пальникових пристроїв з підковоподібним розташуванням стабілізаторів полум'я дає змогу істотно знизити теплове навантаження на стінки каналів цих пристроїв порівняно з пальниками, в яких торці стабілізаторів розміщені в одній площині.

Перелік використаних джерел

Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Alioshko, S. A. et al. (2017). Struktura techenija v gorelochnom ustrojstve pri podkovoobraznom eshelonirovanii stabilizatorov plameni [Structure of the flow in burner devices with a horseshoe echeloning of flame stabilizers]. *Problems of ecology and operation of energy facilities: a collection of works*, *4*, 106–110. Kiev. [in Russian].

Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Butovskiy, L. S. et al. (2011). Osobennosti techenija topliva i okislitelja pri eshelonirovannom raspolozhenii stabilizatorov plameni [Features of the flow of fuel and oxidizer in the echeloning location of flame stabilizers]. *Industrial Heat Engineering, 2*, 59–64. [in Russian].

Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Sherenkovskyi, Yu. V. et al. (2015a). Zakonomernosti formirovanija temperaturnyh polej produktov gorenija, [Regularities in the formation of temperature fields of combustion products]. *Problems of ecology and operation of energy facilities: a collection of works, 5*, 110–113. Kiev. [in Russian].

Fialko, N. M., Sherenkovskyi, Yu. V., Prokopov, V. G. et al. (2015b). Modelirovanie struktury techenija v eshelonirovannyh reshetkah stabilizatorov pri varirovanii shaga ih smeschenija [Modeling of the flow structure in the echeloning gratings of stabilizers with a variation in the step of their displacement]. *East-European Journal of Advanced Technologies, 2, 8*(74), 29–34. [in Russian].

Fialko, N. M., Sherenkovskyi, Yu. V., Prokopov, V. G. et al. (2015c). Vlijanie na charakteristiki techenija stepeni zagromozhdenija eshelonirovsnnymi stabilizatorami kanalov gorelochnyh ustrojstv [Influence degree of cluttering by echeloning stabilizers of burner devices channels on the characteristics of the flow]. *Scientific Journal NLTU Ukraine, 209, Part 2*, 45–53. [in Russian].

Fialko, N. M., Sherenkovskyi, Yu. V., Prokopov, V. G. et al. (2015d). Osobennosti techenija v mikrofakelnyh gorelkah s podkovoobraznym raspolozheniem stabilizatorov plameni [The specifics of flow in micro-flame burners with horseshoe-shaped arrangement of the flame stabilizers]. *Scientific Journal of NULES of Ukraine, 209*(1), 191–199. [in Russian].

Rauschenbach, B. V., Belyi, S. A., Bespalov, I. V. et al. (1964). Phizicheskie osnovy rabochego protsesa v kamerah sgoranija vozdushno-reaktivnyh dvigatelej [Physical basis of the working process in combustion chambers of air-breathing engines]. Moscow: Mashinostroenie, 526 p. [in Russian].

Sherenkovskyi, Yu. V., Fialko, N. M., Meranova, N. O. et al. (2015). Zakonomernosti techenija I smeseobrazovanija v gorelochnyh ustrojstvah s grebenchato eshelonirovannymi stabilizatornymi reshetkami [Regularities of flow and mixture formation in burners with comb shaped echeloning stabilizer gratings]. Problems of Industrial Heat Engineering. Abstracts of the IX International Conference (Vol. 37(7), pp. 31–35), October 20-23. Kiev. [in Russian].

Н. М. Фиалко[1], Л. С. Бутовский[2], Н. О. Меранова[1], К. В. Рокитько[1], Е. А. Грановская[2], Н. Н. Ольховская[1], Л. А. Швецова[1]

[1]Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина
[2]Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", г. Киев, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ЗОНЕ ГОРЕНИЯ ГОРЕЛОК С ЭШЕЛОНИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ

Приведены результаты экспериментальных исследований температурных полей продуктов горения в горелках с подковообразным расположением стабилизаторов пламени. Дана подробная информация об экспериментальном стенде и применяемой измерительной аппаратуре. Представлены данные сравнительного анализа температурных режимов зоны горения при наличии и отсутствии эшелонирования стабилизаторов пламени. Выявлено, что указанные режимы имеют определенное качественное сходство в рассматриваемых ситуациях. Установлено также наличие существенных различий в характеристиках сравниваемых температурных режимов. В частности установлено, что распределения температуры по центральному и периферийным стабилизаторам в условиях наличия их эшелонирования существенно отличаются и близки в каче-

ственном и количественном отношении при расположении торцов стабилизаторов в одной плоскости. По результатам сопоставления значений температуры вблизи стенки канала в условиях эшелонирования стабилизаторов пламени и без него установлено, что эти значения существенно ниже для первой из указанных ситуаций. Показано, что различия сравниваемых температур на расстоянии 2,0·10-3 м от стенки канала могут достигать 230 °С. На основе выполненных исследований рекомендовано применять в энергетической практике горелки с подковообразным расположением стабилизаторов пламени при необходимости снижения тепловой нагрузки на стенки амбразур котлов.

Ключевые слова: горелочные устройства; поле температур; эшелонирование стабилизаторов пламени; подковообразная решетка стабилизаторов.

N. M. Fialko[1], L. S. Butovsky[2], N. O. Meranova[1], K. V. Rokyt'ko[1], E. A. Granovskaya[2], N. N. Olkhovskaya[1], L. A. Shvetsova[1]

[1]*Institute of Engineering Thermophysics of NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[2]*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE TEMPERATURE REGIME IN THE BURNING AREA OF BURNERS WITH ECHELONED GRATES OF THE FLAME STABILIZERS

The article is devoted to experimental studies of the thermal state of the combustion zone for burner devices with horseshoe-shaped echeloning of flame stabilizers. Studies were carried out on the stand with a working area in which flat flame stabilizers were installed in various ways. In the article a detailed description of the experimental stand and the instrumentation used are given. The possibilities of using burners with horseshoe-shaped arrangement of flame stabilizers are analyzed to reduce the thermal load on the walls of the embrasure of the boiler. For this purpose, a comparison of the situations corresponding to the presence and absence of echeloning of the flame stabilizers is carried out. The conditions for burning propane-butane in the burner devices under study are considered. The results of the analysis of the temperature regimes of the combustion zone for the two specified situations are given. General regularities in the formation of temperature fields in the regions behind the end of flame stabilizers are noted. Specific features of these fields for the echeloned and non-echeloned grates of stabilizers are also discussed. It is indicated, in particular, that there is a significant difference in character of the temperature distribution behind the central and peripheral flame stabilizers in the case of a horseshoe-shaped echeloned arrangement. Data on the comparison of the temperature levels of the combustion products near the channel wall for the horseshoe-shaped grate of stabilizers and for the arrangement of their ends in one plane are given. There is a noticeable decrease in this temperature in the case of burners with the indicated type of echeloning flame stabilizers (this decrease reaches several hundred degrees). Based on the results of the performed studies, it was concluded that the horseshoe-shaped arrangement of flame stabilizers in burners is an effective means of reducing the thermal load on the walls of the boiler embrasure and can be widely used in energy practice. Further studies of this problem will concern the analysis of the influence on the formation of temperature fields of the combustion zone of such factors as the magnitude of the step of the shift of the stabilizers relative to each other, the degree of blockage by the stabilizers of the passage section of the channel, the number of flame stabilizers in the lattice and others.

Keywords: burner devices; temperature field; echeloning of flame stabilizers; horseshoe-shaped stabilizer grate.