Паливо та енергетика

УДК 683.87:683.955(045)
DOI: 10.33070/etars.3.2020.01

Сорока Б.С., докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-9174-0992,

Горупа В.В., Карабчієвська Р.С.

Інститут газу НАН України, Київ,

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Науково-технологічні засади ефективного використання палива та екологічно чистого спалювання газу в кухонних плитах. 2. Нормативна база та методологія оцінювання енергетичної ефективності та екологічних характеристик побутових газових приладів

Газові кухонні плити належать до найбільш поширених побутових приладів. Дослідження таких газовикористовуючих приладів в Україні в останні десятиріччя не проводилися, незважаючи на те, що частка природного газу, що використовується у комунально-побутовому господарстві, щорічно збільшується. Характеристики експлуатації, енергетичної ефективності роботи газових плит та показників забруднення повітря, обумовлені спалюванням газового палива у житлових приміщеннях, регламентуються нормативними документами: технічними умовами та стандартами України, країн ЄС, Росії, США, Китаю та інших держав, які розглядаються у даній роботі. Практично усі газові плити оснащені атмосферними ежекційними пальниками, основні характеристики яких систематизовані та розглядаються у даній роботі. Перелік якісних та кількісних показників газових пальників має такі відмінні ознаки: види палива (природний та скраплений газ), робочий тиск газу та номінальна теплова потужність, коефіцієнт граничного регулювання, шум, який супроводжує роботу пальника. Спалювання газу в атмосферних пальниках є двостадійним процесом. Розглянуто фізичні аспекти формування сталості полум'я. Узагальнено критерії виникнення режимів нестійкого горіння: проскок полум'я у змішувач, відрив та повисання факелу, виникнення «жовтих язиків полум'я». Атмосферні пальники мають енергетичні переваги перед пальниками повного попереднього змішування, тому що працюють з коефіцієнтом надлишку первинного повітря $\lambda_{\text{пр}} < 1,0$, а також екологічні переваги завдяки забезпеченню двостадійного процесу горіння палива. Показано, що витрати енергії в ежекційних пальниках пропорційні кубу коефіцієнта надлишку повітря, в атмосферних пальниках — кубу коефіцієнта первинного надлишку повітря: $e_a \sim \lambda_{\text{a, пр}}^3$.

Запропоновано методологію експериментальних досліджень атмосферних пальників різних конструкцій та виробників, що забезпечує їх вогневі дослідження у відповідності з національними та міжнародними нормативами, які прийняті в Україні та ЄС. Створено комп'ютеризований вогневий стенд, що дає можливість провести енергетичні та екологічні дослідження атмосферних пальників із визначенням меж порушення сталості горіння. Представлено приклад термограми нагріву досліджуваної ємності з водою, що дає можливість визначити характер теплообмінних процесів у часі та просторі для системи «атмосферний пальник — ємність, що нагрівається». *Бібл. 31, рис. 7, табл. 5.*

Ключові слова: атмосферний пальник, газове паливо, двостадійне горіння газу, діаграма сталості горіння, ламінарний режим горіння, утворення «жовтих язиків полум'я», відрив полум'я, проскок полум'я, універсальний комп'ютеризований вогневий стенд.

© Сорока Б.С., Горупа В.В., Карабчієвська Р.С., 2020

В Україні протягом останніх років частка використання природного газу в промисловості скорочується, але абсолютне його споживання населенням протягом багатьох років є майже незмінним. В абсолютному вимірі паливоспоживання у побутовому секторі перевищує використання природного газу в промисловості та складає 30 % від загального споживання газу в світі [1].

Використання природного газу населенням, як правило, здійснюється у побутових газових приладах, а саме: у газових плитах, водогрійних котлах та проточних водонагрівачах. У першій частині цієї роботи [2] доведена актуальність вивчення процесів, що супроводжують спалювання газу в побутових плитах.

Загальною конструктивною особливістю побутових газових приладів є використання в них атмосферних інжекційних пальників, принцип роботи яких полягає у підсмоктуванні усередину пальника частини стехіометричного потоку повітря-окислювача за рахунок енергії газового струменя, а також у попередньому змішуванні природного газу із згаданим первинним повітрям та у подальшому спалюванні багатогіазоповітряної суміші при відповідних коефіцієнтах надлишку повітря $\lambda_{\text{пр}} < 1,0$.

Розповсюдження побутових газових плит у світі

Застосування газових побутових плит — це один з найбільш поширених напрямів використання природного газу населенням країни. Розповсюдження газових плит, перш за все, пов'язане з поширенням газових мереж в Україні. З середини минулого сторіччя на території колишнього Радянського Союзу, в окремих регіонах Європи та узбережжя Середземного моря інтенсивними темпами збільшувався видобуток природного газу. Процес газифікації великих та малих міст та селищ [3] на певному етапі був зумовлений простою технологій отримання та використання енергії в побуті спалюванням природного газу для приготування їжі та обігріву приміщень.

Результати співставлення роботи газових та електричних плит не є однозначними, визначаються численними технічними та економічними обставинами та залежать від кількості багатопверхових комунальних будинків або індивідуальних котеджів, де мешкає більшість населення країни. Крім того, має значення структура споживання палива та електроенергії в країні. Певним недоліком є велика загальна

потужність одиначної електричної плити, що становить близько 10 кВт. Існують країни та регіони, де до будівель підводиться тільки електрична енергія, яка використовується для обігріву, кондиціювання помешкань, а також для кухонних потреб.

За даними American Gas Association, у США 177 млн споживачів використовують природний газ, щоб обігрівати свої будинки та готувати їжу, та їхня кількість продовжує зростати [4].

Згідно з даними Паспорту газифікації Російської Федерації, станом на 1 січня 2010 р. кількість побутових газових плит в Росії, що використовують природний газ, складає 21,1 млн, а плит, що використовують зріджений газ, становить 3,6 млн одиниць [5].

У Німеччині (на відміну від Франції та Італії) електричні плити більш поширені, ніж газові: з 3011 людей від 30 до 70 років, опитаних у грудні 2010 р., тільки 6 % відповіли, що готують вдома на газовій плиті [6].

З огляду на обсяг споживання газу населенням України, де в експлуатації знаходиться 13 млн газових плит, можна зробити висновок, що весь комплекс питань ефективності, технічної та екологічної безпеки використання газових плит та інших побутових газових приладів залишається актуальним та в подальшому збереже свою значущість [7, 8].

Посилення екологічних вимог до використання палива у газових пристроях

Незважаючи на те, що перші дослідження з використання газового палива були пов'язані з побутовим сектором економіки, багато останніх років та навіть десятиріч згадана проблема залишалася поза серйозної уваги дослідників. Перші роботи з використання газу в побутових пристроях проводилися у США в 1930–1940 рр. Дослідження, що проводилися у колишньому СРСР у 1940–1990 рр., були зумовлені масовою газифікацією територій. Сучасний період визначається як етап високотехнологічної комерціалізації розробок. Однак протягом значного проміжку часу дослідження процесів спалювання газу в побутових пристроях були обмежені або взагалі призупинені.

Протягом зазначеного періоду особливо актуальні екологічні аспекти горіння палива привернули серйозну увагу дослідників, пов'язаних з використанням палива в енергетиці та промисловості. На жаль, такий підхід не знайшов роз-

повсюдження з огляду на вивчення питань утворення шкідливих речовин у побутових газових приладах.

У той же час, прямий контакт споживачів палива у побуті з продуктами згоряння та вплив на здоров'я населення токсичних викидів, які безпосередньо потрапляють у житлові приміщення, в умовах розповсюдження побутових газових приладів становлять особливу загрозу, а проблема екологічних обмежень потребує найскорішого розв'язання. Це означає, що подальший аналіз та вивчення процесів екологічно чистого спалювання газового палива в побутових газових приладах, на наш погляд, має залишатися важливим напрямом діяльності наукових центрів країни у галузі теорії та практики горіння.

Нормативи шкідливих викидів. Для побутових газових приладів, у тому числі газових плит, висуваються жорсткі вимоги щодо викидів оксидів азоту та монооксиду вуглецю. Найбільш

значні обмеження встановлені для окремих районів Китаю (Пекін) та США (штат Каліфорнія): граничні концентрації NO_x складають 15 та 30 млн^{-1} відповідно [9].

Безпрецедентне індустріальне зростання Китаю зумовило стійке забруднення атмосферного повітря в окремих регіонах цієї країни та забезпечило можливість вкладання значних ресурсів у боротьбу з його наслідками. Введені останнім часом згідно з рішенням місцевої влади надзвичайно жорсткі нормативи шкідливих викидів, зокрема регіонального рівня, забезпечать збереження здоров'я жителів мегаполісу Пекіна [9]. Відома інформація, що офіційні норми муніципалітету Пекіна (the Beijing Municipality) на викиди NO_x з нових та існуючих газових котлів змінилися з 01.04.2017 р. та зараз є вищими порівняно із стандартами Європейського Союзу. Порівняння нормативів викидів відповідно до останніх стандартів наведено у табл.1.

Таблиця 1. Граничні нормативи викидів NO_x

Регіон; нормативний документ	Об'єкт	Граничний рівень, мг/м^3 ($\sim \text{млн}^{-1}$)
Пекін, Китай; Standard on Air Pollutant	Нові установки та при переведенні з вугілля на газ (coal-to-gas conversion)	30 (15)
Release for Boilers (DB 11/139–2015)*	Існуючі установки	80 (40)
EC/EU Medium Combustion Plant Directive**	Нові установки	100 (50)
	Окремі випадки	70 (35)

* При $[\text{O}_2] = 3,5\%$ — для котлів промислового та опалювального призначення; при $[\text{O}_2] = 3\%$ — для котлів енергетичного призначення; ** при $[\text{O}_2] = 3\%$.

При використанні газових плит на кухнях, особливо в умовах незадовільної роботи системи вентиляції приміщень або при її відсутності, продукти згоряння негативно впливають на здоров'я людини [10]. Особливо шкідливими для людини є діоксид азоту NO_2 та чадний газ (монооксид вуглецю) CO , а також формальдегід CH_2O , які утворюються при роботі газової плити [10]. Зазначимо, що в абсолютній більшості випадків при спалюванні газу в будь-яких камерах згоряння та топкових пристроях концентрація оксидів азоту NO_x практично цілком визначається монооксидом азоту NO , а концентрація $[\text{NO}_2]$ при цьому набагато нижча концентрації $[\text{NO}]$.

Основні характеристики паливників побутових газових плит

Види палива. Пальники побутових газових плит можуть працювати на вуглеводневому паливі: природному газі (ГОСТ 5542-87. Газы горючі природні для промислового та комунально-побутового призначення. Технічні умови [11]) та зрідженому (скрапленому) газі (ДСТУ 4047-2001. Газы вуглеводневі скраплені паливні для комунально-побутового споживання. Технічні умови [12]). Класифікація природних газів різних родовищ, що мають поширення на європейському ринку, за числом Воббе W_h , при температурі 15 °C та тиску 101,325 кПа наведена у табл.2 [13].

Таблиця 2. Класифікація газів

Родини та групи газів	$W_{h, \max}$, МДж/м ³	$W_{h, \min}$, МДж/м ³
Перша родина (штучні гази):		
група А	22,4	24,8
Друга родина (природні гази):	39,1	54,7
група Н	45,7	54,7
група L	39,1	44,8
група E	40,9	54,7
Третя родина (скраплені гази):	72,9	87,3
група В/Р	72,9	87,3
група Р	72,9	76,8

Компонентний склад природного та зрідженого газів, що використовувалися у дослідках авторів цієї роботи, разом з основними теплотехнічними характеристиками палив зведено відповідно у табл.3 та табл.4.

Іншим важливим трендом газопостачання Європи, що об'єднує розвиток газової промисловості різних країн, зокрема джерел природного газу в Росії та США, є зрідження природного газу та постачання його морським шляхом. Передбачається, що у зв'язку з розвитком

східного напрямку (перш за все Китай) перед подачею газу у газопровід для трансграничного переміщення буде подаватися газ, з якого будуть відокремлені вуглеводні C_{2+} , які будуть використані у процесах хімічної переробки.

Останнім часом спостерігаються тенденції до зміни якості горючого газу, що спалюється, зокрема в побуті, а саме: замість безпосереднього направлення до газопроводу та використання неочищеного («жирного») газу з джерела природний газ піддається очищенню від більш важких вуглеводнів та гелію. Наприклад, для природного газу, що з Росії подається до Китаю, з 2021 р. має відбиратися, млн т: етану – 2,5, пропану ~ 1, бутану ~ 0,5, пентану та гексану ~ 0,2, які будуть перероблятися на спеціально збудованому Амурському газохімічному комплексі річною потужністю 49 млрд м³ [14]. Природний газ після вказаної підготовки у вигляді метану, очищеного від хімічно цінних складових, має подаватися споживачам на спалювання через газопровід «Сила Сибіру». Запропонована технологія суттєво підвищує рентабельність відповідних схем, зокрема підготовки природного газу до енергетичного використання.

Таблиця 3. Компонентний склад та основні теплотехнічні показники природного газу*

Дата	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	O ₂	N ₂	CO ₂	Q^h , МДж/м ³	W^h , МДж/м ³
12.02.2018	89,79	4,92	1,08	0,31	0,1	0,08	0,00	1,64	2,07	38,18	48,32
19.02.2018	89,88	4,91	1,06	0,29	0,08	0,07	0,00	1,66	2,02	38,14	48,32
26.02.2018	90,45	4,66	1,06	0,16	0,06	0,06	0,01	1,59	1,78	38,17	48,51
12.03.2018	90,25	4,7	1,05	0,19	0,07	0,08	0,01	1,59	1,94	38,12	48,38
07.09.2019	89,46	5,04	1,23	0,19	0,09	0,05	0,05	1,69	2,03	38,34	48,26
26.12.2019	89,70	4,75	1,11	0,31	0,09	0,05	0,00	1,62	2,32	38,34	48,11

* ГРС ТЕЦ 5, м. Київ, за даними «Укртрансгазу».

Таблиця 4. Об'ємне стехіометричне число, теплота згоряння та компонентний склад, % (об.), скрапленого газу

Дата	Стехіометричне число (об.)	Теплота згоряння, МДж/м ³	Метан CH ₄	CO ₂	Етан C ₂ H ₆ , T _{кип} =-89°C	Пропан C ₃ H ₈ , T _{кип} =-42,07°C	Бутан $\Sigma (i,n)$ C ₄ H ₁₀ , T _{кип} = -1°C	Не визначено
30.08.17	≈ 26,56	≈ 113,8	–	–	0,12	57,56	42,3	0,02
13.12.17	≈ 27,7	≈ 117,3	–	–	–	45,32	54,68	–
10.01.18	≈ 22,84	≈ 97,84	3,54	0,06	20,68	57,75	17,97	–

Окрім вилучення з газу важких компонентів, також проводять дослідження можливостей додавання у газопровід водню. У Німеччині енергетична компанія Авасоп запускає пілотний проект, призначений для вивчення досвіду додавання у газопровід водню у концентрації до 20 % [15].

В Індії одним з найбільш поширених видів палива для приготування їжі є зріджений газ.

Споживання зрідженого газу в побуті майже однакове за обсягами з іншими вуглеводнями, які використовуються у промисловому секторі. Поліпшення рівня життя в Індії є передумовою збільшення попиту зрідженого газу в майбутньому.

Робочий тиск. Конструкція газових плит, які випускаються згідно з ДСТУ 2204-93 (ГОСТ 10798-93) «Плити газові побутові. Загальні тех-

нічні умови» [16], має гарантувати повне безпечне спалювання природного газу (без відриву полум'я, за відсутності «жовтих язиків полум'я» та без проскоку полум'я) при роботі на газі з двома значеннями номінального надлишкового тиску: $\Delta p_{g, \text{пот}} = 130$ мм вод. ст. (1274 Па) або $\Delta p_{g, \text{пот}} = 200$ мм вод. ст. (1960 Па). Номінальне значення тиску для зрідженого газу тиску становить 300 мм вод. ст. (2940 Па). Усі зазначені номінальні тиски не перевищують 5 кПа, отже газові пальники побутових газових плит належать до пальників низького тиску горючого газу.

Теплова потужність пальника. Потужність пальників побутових плит залежить від запланованих витрат газу. Зміна номінальної потужності забезпечується встановленням у пальник сопла відповідного діаметра та призначення необхідного номінального тиску газу перед соплом. Також у пальниках побутових газових плит передбачено безступінчасте регулювання витрат газу за допомогою кранів.

У табл.5 показані типи та діапазони теплової потужності N пальників відповідно до ДСТУ 2204-93.

Таблиця 5. Типи пальників побутових газових плит та їх теплова потужність

Тип пальника	$N_{\text{ном}}$, кВт	$N_{\text{мін}}$ («мале полум'я») природний газ	зріджений газ
Основні: напівшвидкої дії	$1,05 \leq N < 2,09$	$\leq 1/6 N$, але не більш 0,31 кВт	$\leq 1/5 N$, але не більш 0,31 кВт
швидкої дії	$2,09 \leq N < 3,14$	$\leq 1/6 N$	$\leq 1/5 N$
надшвидкої дії	$N \geq 3,14$	$\leq 1/6 N$	$\leq 1/5 N$
допоміжний	$0,21 \leq N < 1,05$	$\leq 1/3 N$, але не більш 0,26 кВт	

Згідно з вимогами стандарту ДСТУ 2204-93, номінальний ККД пальників газових плит з тепловою потужністю понад 1,05 кВт має становити не менш 59 %. У стандартах Російської Федерації (ГОСТ Р 50696-94 [17], ГОСТ Р 50696-2006 [18]) значення ККД має бути не менш 52 та 58 % відповідно, у стандарті ЄС ККД не регламентується [19]. У стандарті КНР [20] передбачені значення ККД 55 та 50 % для стаціонарних та вбудованих газових плит.

Коефіцієнт граничного регулювання. Пальники газових плит запроектовані однаковими для всіх типів плит; спалювання газу в них має супроводжуватися відсутністю проскоку та відриву полум'я у діапазоні зміни теплової потужності $N = 0,25-1,2$ номінального значення $N_{\text{ном}}$ [21].

Коефіцієнт надлишку повітря. У побутових плитах та інших газових приладах застосовують інжекційні пальники, конструкція яких забезпечує втягування первинного атмосферного повітря у змішувач при витіканні струменя газу із сопла. Коефіцієнт надлишку первинного повітря $\lambda_{\text{пр}}$ у пальниках газових плит різних виробників може становити від 0,3 до 0,6 [22]. Такі значення коефіцієнтів дають можливість забезпечити сталий режим горіння без проскоку, відриву та повисання полум'я, а також горіння без утворення «жовтих язиків».

Слід пам'ятати про специфічну особливість пальників газових плит — неможливість зміни та варіювання за потребою коефіцієнта надлишку первинного повітря $\lambda_{\text{пр}}$, який наперед визначається співвідношенням діаметрів змішувача пальника та газового сопла, а також геометрією пальникового тракту.

Незважаючи на розповсюджену уяву про автономність основної характеристики — незалежність коефіцієнта ежекції β від продуктивності апарату (у даному випадку — пальника), зміна його навантаження певним чином впливає на β : в області малих тисків та ламінаризованих струменів значення β збільшується із зростанням тиску газу.

Окрім наведених конструктивних характеристик пальника, на значення $\lambda_{\text{пр}}$ впливають режимні фактори, у тому числі наявність аеродинамічної тяги по тракту димових газів.

При зміні тиску перед пальником Δp_g та витрат газу відбувається певна зміна відносної кількості первинного повітря та значення $\lambda_{\text{пр}}$, що призводить до зміни ефективної (корисної) теплової потужності газової плити. Окрім того, регулювання подачі газу та різні частки первинного та вторинного повітря впливають на організацію факельного процесу та розподіл концентрацій компонентів продуктів згоряння, зокрема рівень шкідливих викидів на виході з пальника.

Довжина язиків полум'я. У жодному стандарті на побутові газові плити різних країн стосовно довжини полум'я інформація не надається, проте довжина язиків полум'я — важ-

лива характеристика пальників побутових газових плит. Враховуючи використання регулювальних кранів, які забезпечують зміну теплової потужності у межах від 0,25 до 1,2 номінального значення, довжина полум'я також змінюється. Відстань від вихідного отвору пальника, з якого подається паливна суміш, до поверхні ємності — приймача теплової енергії, яка обмежена нерухомою решіткою газової плити, — залишається незмінною.

Вимоги, що пред'являються до конструкції пальників. Місця з'єднання складових частин газових пальників мають бути герметичними, полум'я не має затухати при виплескуванні рідини в умовах нагрівання посуду. Робота пальника протягом 15 хв з наявністю полум'я біля сопла (проскок полум'я усередину пальника) не має негативно впливати на подальшу нормальну роботу пальника.

Шум, створюваний пальником. У державних стандартах України не зафіксовані вимоги до шуму, який може створюватися пальником. У стандарті Китаю на побутові газові плити вказано, що шум під час горіння (Burning noise) газової суміші має становити ≤ 65 дБ та при затуханні (Extinguishing noise) ≤ 65 дБ [20]. Інжекційні пальники характеризуються низьким рівнем створюваного шуму, проте у разі некондиційної роботи пальника (наприклад, потрапляння рідини у пальник) газовий потік при виході із сопла та газоповітряний потік при виході з вогневих отворів можуть створювати шум, що буде свідчити про ненормальну роботу пальника та необхідність у додатковому сервісному обслуговуванні.

Основні положення щодо спалювання природного або зрідженого газу в пальниках газових плит:

а) двостадійний процес: 1-а стадія — спалювання підготовленої «багатої» ($\lambda = 0,6$) газоповітряної суміші, яка подається пальником в оточуюче атмосферне повітря (атмосферу приміщення); 2-а стадія — дифузійне допалювання продуктів первинного згорання в оточуючому атмосферному повітрі (зверху пальника);

б) використання газового палива низького тиску.

Критерії оцінювання атмосферних пальників

Пальники кухонних плит можуть оцінюватися та порівнюватися за різними критеріями: — за діапазоном стійкого горіння у координатах «питомі витрати палива (швидкість

витоку паливно-окислювальної суміші з вогневих отворів) — коефіцієнт надлишку повітря $W-\lambda$; — за енергетичним ККД у координатах «енергетичний ККД — відносні питомі витрати палива»; — за екологічною характеристикою — вихід основних токсичних компонентів $X_t \equiv NO_x, CO, C_nH_m$ (ПАН, VOC) у координатах X_t-W, λ .

У перерахованих критеріях як визначальні розглядаються режимні параметри: швидкість витоку первинної газоповітряної суміші з вогневих отворів W та відносні до номінального значення витрати палива, коефіцієнт надлишку первинного повітря λ_{pr} .

Розширення діапазону сталої роботи пальників, підвищення їх енергетичної ефективності та екологічної досконалості залежить від їх конструкції, зокрема від форми та кроку розташування вогневих отворів.

Принцип двостадійного спалювання газу, який покладено в основу робочого процесу атмосферних інжекційних (ежекційних) пальників, вдало поєднує відповідність енергетичним та екологічним вимогам, а також забезпечує розширення діапазону стійкого горіння (Gas burner Interchangeability of Fuel Gases) [23, 24].

Сталість горіння в атмосферних пальниках.

Виникнення окремих форм нестійкого горіння. У кожному вихідному отворі вогневого насадка формується фронт горіння у вигляді бокової поверхні конуса з кутом при вершині α_{fo} . Процес спалювання первинної газоповітряної суміші відбувається зі швидкістю нормального горіння (розповсюдження полум'я) u_n (λ_{pr}). З огляду на це теплова потужність атмосферного пальника:

$$Q_b = n_f \int_{(F_{fo})} Q_p u_n dF_{fo}. \quad (1)$$

У наближенні незмінної швидкості u_n та її незалежності від локалізації в межах фронту горіння вона становить:

$$Q_b = n_{fo} u_{n,pr} F_{fo}, \quad (2)$$

де n_{fo} , d_{fo} — відповідно кількість та діаметр вогневих отворів; F_{fo} — бокова поверхня індивідуального конуса горіння первинної суміші (індекс fo — firing orifice, opening, outlet).

Вектор нормальної швидкості направлений від поверхні горіння (бічної поверхні конуса) у напрямі свіжої газоповітряної суміші. За умови забезпечення сталої роботи горіння цей вектор

компенсується складовою S_u локальної швидкості витікаючої суміші (рис.1):

$$|S_u| = |u_n| = 0,5 (\pi - \alpha_{fo}). \quad (3)$$

Рис.1. Принцип стабілізації фронту горіння «багатої» суміші у внутрішньому конусі полум'я атмосферного пальника.

Рис.2. Схема горіння «багатої» суміші в бунзенівському полум'ї: 1 — пальник; 2 — фронт первинного горіння, внутрішній конус полум'я; 3 — зовнішня видима поверхня полум'я; d_m — висота зони аерації, «мертва зона» — область початкової аерації (death space).

Теплова потужність пальника:

$$Q_b = 0,25 \pi d_{fo}^2 n_{fo} S_u = 0,25 \pi d_{fo}^2 n_{fo}, \quad (4)$$

$$u_{n,pr} / \sin 0,5 \alpha_{fo},$$

де

$$S_u = u_{n,pr} = w_{pr} \sin 0,5 \alpha_{fo} \quad (5)$$

за умови незмінності швидкості розповсюдження полум'я по перерізу вогневого отвору.

Порушення сталості горіння відбувається в умовах регулювання теплової потужності пальника при варіюванні швидкості витікання первинної суміші з вогневих отворів у випадках, коли конус горіння наближається до однієї з двох своїх граничних форм: з кут при вершині $\alpha_{fo} \rightarrow 0$ або $\alpha_{fo} \rightarrow \pi$ радіан.

У першому випадку (витягування конусу) сталість горіння порушується відривом полум'я, у другому випадку (наближення поверхні горіння до пласкої круглої фігури) несталість горіння визначається виникненням проскоку полум'я всередину окремих каналів горіння (див. рис.1). На рис.2 зображена схема горіння «багатої» суміші.

Що стосується локальної швидкості W_{pr} у перерізі вогневого каналу, де формується конус первинного горіння, треба виходити з двох гра-

ничних варіантів течії газоповітряної суміші, яка може відповідати ламінарному або турбулентному режиму. В першому випадку профіль швидкостей нерівномірний, параболический, локальна швидкість $W_{pr}(r)$ — функція відстані r від осі струменю, що витікає з отвору з характерним розміром (радіусом R):

$$W_{pr}(r) = W_{pr, \max} [1 - (r/R_{pr})^2], \quad (6)$$

де $W_{pr, \max}$ — максимальна швидкість на осі вогневого отвору.

При цьому середня швидкість витоку суміші у перерізі вогневого отвору становить:

$$\bar{W}_{pr} = f_{pr}^{-1} 2\pi \int_0^{R_{pr}} W_{pr}(r) r dr = 2\pi (\pi R_{pr}^2)^{-1} \int_0^{R_{pr}} W_{pr} r dr. \quad (7)$$

З урахуванням f_{pr} профілю локальних швидкостей у потоці (струмені) в умовах ламінарної течії

$$W = W_{\max} [1 - (r/R)^2] \quad (8)$$

інтегруванням по перетину течії профілів (6), зокрема, та узагальненого (8) одержуємо середню швидкість:

$$\bar{W}_{pr} = (2/R_{pr}^2) W_{pr, \max} \int_0^{R_{pr}} [1 - (r/R_{pr})^2] r dr = W_{pr, \max} (1 - 2R_{pr}^4/4R_{pr}^4) = 0,5 W_{pr, \max}; \quad (9)$$

— для швидкості витоку первинної суміші з вогневого отвору радіусом R_{pr} (площа перерізу $f_{pr} = \pi R^2$) та

$$\bar{W}_{pr} = W_{\max}; \quad (10)$$

— для середньої швидкості у будь-якому ламінарному потоці радіусом R (площа перерізу $f_{pr} = \pi R^2$).

На відміну від ламінарного режиму у випадку турбулентної течії швидкість у перерізі потоку вирівнюється (ступеневий закон розподілу). Середня швидкість при цьому наближається до максимального значення на осі потоку:

$$\bar{W} \rightarrow W_{\max}; \quad \bar{W}_{pr} \rightarrow W_{pr, \max}. \quad (11)$$

Підсумовуючи викладене вище, можна стверджувати, що у будь-якому діапазоні швидкостей та режимів течії співвідношення середньої та локальної швидкості течії витоку з каналу чи сопла, у тому числі для витікання первинної суміші з вогневого отвору, складає:

$$\bar{W}/W_{\max} = (0,5-1,0); \quad \bar{W}_{pr}/W_{pr, \max} = (0,5-1,0). \quad (12)$$

Існують три основні типи (modes) нестійкості при спалюванні газу в атмосферних пальниках: відрив полум'я (blow off), проскок у змішувач (усередину пальникового насадку — flash back); поява «жовтих кінчиків полум'я» (yellow tips) [23–25]. Вказані процеси узагальнюються діаграмами у координатах «теплова потужність пальника (теплове навантаження)

— швидкість витоку первинної суміші з пальникових отворів насадку» або коефіцієнт надлишку палива для первинного спалювання $\Phi_{\text{пр}} = \lambda_{\text{пр}}^{-1}$. Межі сталості горіння пальника побутової плити щодо складу газоповітряної суміші для областей сталого та нестійкого горіння зображені на рис.3 [26].

На рис.4 наведена діаграма сталості горіння [24], яка визначається значною універсальністю завдяки охопленню широкого діапазону режимів роботи атмосферних пальників за продуктивністю та співвідношенням «паливо : повітря». Крім того, на діаграмі нанесені криві сталості для газових трубок (сопел) кількох розмірів.

Рис.3. Межі сталості горіння конфорочної газової плити. Зони: I — проскоку; II — відриву; III — утворення оксиду вуглецю; IV — «жовтих кінчиків полум'я»; V — задовільна робота. Криві: 1 — проскок; 2 — відрив; 3 — поява «жовтих язиків полум'я»; 4 — гранично допустимий вміст оксиду вуглецю в продуктах згорання; 5 — лінія ежекції.

Вісь абсцис діаграми представлена двома параметрами: v_g — частка газу в газоповітряній суміші по відношенню до стехіометричної його концентрації та коефіцієнта надлишку повітря для досліджуваної суміші λ_a . Вісь ординат — критичне значення градієнту швидкостей у граничному шарі біля стінки вихідного вогневого отвору $g_{\text{кр}}$, яке супроводжується виникненням режимів нестійкого горіння.

Рис.4. Діаграма сталості горіння метану в атмосферному пальнику. Основні області сталості горіння в умовах спалювання природного газу: 1 — проскок полум'я; 2 — зона стійкого, блакитного полум'я; 3 — зона відриву полум'я; 4 — область стійкого, блакитного полум'я (повітря) та «жовтих кінчиків».

Після проведення нескладних перетворень можна встановити зв'язок між собою визначальних характеристик газоповітряної суміші:

$$v_g = (1 + L_{\text{ст}}) / (1 + \lambda_a L_{\text{ст}}); \quad (13)$$

$$\lambda_a = (v_g L_{\text{ст}})^{-1} (1 + L_{\text{ст}} - v_g). \quad (14)$$

Зазначений зв'язок між V_g та λ_a наданий на рис.4 у вигляді співвідношення значень параметрів V_g та λ_a на двох абсцисах. При цьому область 1 на діаграмі по складу газоповітряної суміші, яка характерна наявністю проскоку полум'я, відповідає межах розповсюдження полум'я для метан-повітряної суміші $\lambda \in \{0,6; 2,0\}$. Область відриву полум'я, навпаки, охоплює широкий діапазон співвідношень «паливо : повітря», але саме із «збагаченням» складу суміші полум'я є більш сталим. Порушення сталості полум'я при цьому пов'язане із збільшенням граничного градієнту швидкостей g .

У випадку утворення «жовтих кінчиків полум'я» визначальним є характерний розмір трубки чи діаметр отворів [3], де формується полум'я (див. рис.4). Оскільки така форма нестійкого горіння властива для «багатого» полум'я, розширення діапазону сталого горіння 2 відбувається при збільшенні діаметра труби.

На діаграмі сталості горіння (див. рис.4) області поза межами виникнення режиму нестійкого горіння відповідають нормальній ро-

боті пальників, тобто режиму «сталого блакитного полум'я».

Із збільшенням теплового навантаження пальника Q_b межі нестійкого горіння за проскоком полум'я звужуються по надлишку повітря λ , тобто значення $\lambda_{fb,min}$ збільшується (див. рис.3, область I). У той же час при збільшенні Q_b межі відриву полум'я розширюються у бік менших значень $\lambda_{blo,min}$ (див. рис.3, область II).

Підйом полум'я (flame lifting) виникає, коли на профілі швидкості уклін профілю розподілу швидкості вздовж радіусу, або градієнт швидкості у граничному шарі потоку досягає відповідного критичного значення g_{cr} . Критичний градієнт швидкості g змінюється із зміною співвідношення «повітря : газ» та складу газу. Відповідні залежності існують також для розрахунку проскоку полум'я.

Для ламінарного режиму течії критичний градієнт швидкості обчислюється за формулою [24]:

$$g_{cr} = 1,27 V^{-3} r, \quad (15)$$

де V — об'ємні витрати палива, m^3/c ; r — радіус сопла для палива, м.

Критичний градієнт граничної швидкості для відриву полум'я g_{blo} визначає відрив від отвору в полуменевій насадці, відповідний параметр g_{lb} відноситься до проскоку полум'я усередину пальникового змішувача.

На рис.4 представлені залежності g_{blo} та g_{lb} від відносної концентрації палива та коефіцієнта надлишку повітря для випадку спалювання метану з виділенням областей стабільного горіння. Окремо нанесені криві виникнення «жовтих кінчиків полум'я» у залежності від діаметра трубчастого каналу для подавання газоповітряної суміші як граничні лінії для появи «жовтих язиків полум'я».

Енергетичний ККД атмосферних пальників

А. Скорочення необхідних енергетичних витрат у цьому випадку пов'язано з необхідністю передачі меншої кількості руху (количества движения — рос.; momentum — англ.) до повітряного потоку від газового струменя у порівнянні з пальниками повного попереднього змішування. Така ситуація зумовлена зменшенням потоку первинного повітря $m_{a,pr}$ у порівнянні з масовими потоками: стехіометричним $m_{a,st}$, а також повітря-окислювача $m_{a,\Sigma}$, необхідного для повного згоряння заданого газового потоку $\dot{V}_g(\dot{m}_g)$:

$$\dot{m}_{a,pr} < \dot{m}_{a,st} < \dot{m}_{a,\Sigma}, \quad (16)$$

та відповідно

$$e_{a,pr} < e_{a,st} < e_{a,\Sigma}, \quad (17)$$

де

$$e_{a,pr} = 0,5 \dot{m}_a w_a^2 = 0,5 \dot{m}_a^3 f_a^{-2} \rho_a^{-2}, \quad (18)$$

для будь-яких потоків повітря в ежекційних пальниках, які розглядаються, зокрема

$$e_{a,pr} = 0,5 \dot{m}_{a,pr} w_{a,pr}^2 = 0,5 \dot{m}_{a,pr}^3 f_{a,pr}^{-2} \rho_a^{-2} = V_{gN}^3 \lambda_{pr}^3 \Theta_a, \quad (19)$$

де Θ_a — коефіцієнт пропорційності,

$$\Theta_a = 0,5 L_{st}^3 f_a^{-2} (T_a/T_N)^2. \quad (20)$$

Це означає, що при фіксованих типах та конструкції геометрії пальника, типі горючого газу за умови попередньо визначених витрат газу (при фіксованій тепловій потужності пальника), геометрії його протокової частини та температурі атмосферного повітря підведена до повітря від газового струменя енергія пропорційна кубу (див. формулу (22)) коефіцієнта надлишку первинного повітря λ_{pr} :

$$\lambda_{pr} : \dot{m}_{a,pr} : \lambda_{pr}^3.$$

Масові потоки повітря згоряння пов'язані з тепловою потужністю пальника, складові його енергії пропорційні кубу надлишкового повітря:

$$\dot{m}_a = V_{gN} \lambda L_{st} \rho_{aN}; e_a \sim \lambda^3. \quad (21)$$

Б. Екологічні та експлуатаційні переваги, перш за все скорочення викидів NO_x , обумовлено переходом до двостадійного згоряння — одного з основних прийомів низькоемісійного спалювання u_{bo} в умовах дифузійного спалювання газу [27].

Розширення діапазону стійкої роботи при спалюванні «багатої» суміші обумовлено підвищеною швидкістю відриву полум'я [3]:

$$u_{blo}(\lambda_{pr}) > u_{blo}(\lambda_{st}), \quad (22)$$

та зниженою швидкістю проскоку полум'я:

$$u_{flo}(\lambda_{pr}) < u_{flo}(\lambda_{st}). \quad (23)$$

Таким чином, система спалювання газу в інжекційних (ежекційних) атмосферних пальниках з використанням двостадійного спалювання (двостадійне утворення суміші) при подачі через пальник «багатої» суміші, наприклад, з $\lambda_{pr} = 0,6 < \lambda_{st}$ забезпечує зниження потрібної енергії первинного повітря у порівнянні з $\lambda_{\Sigma} = 1,05$ у 5,3 рази.

Згідно з ДСТУ 2204-93 «Плити газові побутові», тиск у газовій мережі перед плитою для природного газу складає 1290 та 1960 Па, на зрідженому газі — 2940 Па [16]. Відповідне до цього тиску та діаметра газового сопла число Рейнольдса газового потоку в соплі пальника відповідає ламінарному або перехідному режиму, що суттєво зменшує коефіцієнт ежекції у

співставленні з таким для турбулентного режиму (див. рис.3, крива 5). Відповідний турбулентному режимові розвиток газового струменя всередині пальника супроводжується зростанням кута розкриття струменя, що витікає з газового сопла атмосферного пальника. При переході з ламінарного режиму до турбулентного заміна молекулярної дифузії у системі «газ — повітря» супроводжується процесами турбулентного переносу (перемішування газового струменя з ежектованим повітрям).

Щодо режиму горіння, то конструкція вихідного пристрою з пальника: форма (геометрія) та кількість отворів, а також їхній характерний розмір — вибираються таким чином, щоб режим горіння був ламінарним. Це зменшує ризик нестійкості горіння та порушення стабілізації полум'я з огляду на явища зриву та проскоку.

Підвищенню стійкості горіння на виході з вогневого насадку пальника сприяє оптимальний склад газоповітряної суміші.

Умова стійкого процесу спалювання:

$$u_{blo} > W_{ex} > u_{flb}, \quad (24)$$

де u_{blo} — швидкість зриву (blow off) полум'я; W_{ex} — швидкість первинної газоповітряної суміші; u_{flb} — швидкість проскоку (flash back) полум'я.

Крім відриву та проскоку, небажаним також є явище «повисання» (lifting) полум'я при швидкості $W_{ex} \sim W_{lift}$.

Вогневе моделювання процесу спалювання газу в побутових пристроях

Нормативні документи. Як зазначено вище, узагальнюючими характеристиками використання палива є сталість горіння, енергетична ефективність та екологічна складова робочого процесу в газових пристроях побутового призначення. Аналізуючи чинні у розвинених державах нормативні документи, що регламентують вимоги до побутових газових плит, можна виявити різні методології проведення експериментальних досліджень. Згідно з європейським стандартом EN 30-1-1:2008+A1:2010 «Domestic cooking appliances burning gas» (зміненого у 2008, 2010 рр.), визначення ККД пальників не проводиться [28]. В Україні у 2004 р. набрав чинності документ ДСТУ EN 30-1-3:2004 «Плити газові побутові», ідентичний директиві ЄС EN 30-1-4 [19]. Також статус діючого на цей час має документ ДСТУ 2204-93 «Плити газові побутові. Загальні технічні умови». Спільним для стан-

дартів усіх держав є визначення вмісту в продуктах згоряння шкідливих викидів монооксиду вуглецю, оксиди азоту не регламентуються при роботі побутових газових плит для країн ЄС.

Деякі особливості проведення випробувань з урахуванням національних нормативів. Відповідно до ДСТУ 2204-93, початкова температура води $T_{w,en} = 20$ °С, кінцева температура нагріву $T_{w,fin}$ — це максимальна температура води в ємності після припинення подачі газу. Подача газу в пальник перекривається після досягнення температури усередині об'єму 90 °С. Температура $T_{w,fin}$ більша за 90 °С на деяку величину, обумовлену інертністю процесу нагрівання, яка залежить від маси води, товщини стінки та матеріалу ємності, відстані від фронту полум'я та інших параметрів. У стандарті КНР GB 16410-1996 на побутові газові плити дещо відрізняється методика визначення ефективності пальника [19]. Згідно стандарту КНР, початкова температура води $T_{w,en}$ має бути більша на 5 °С за температуру повітря у кімнаті, кінцева температура нагріву $T_{w,fin}$ має бути на 30 °С вища початкової температури $T_{w,en}$. Відповідно до методики стандарту GB 16410-1996, під час процесу нагріву води її необхідно перемішувати. У подальшому для розрахунку ККД використовується найбільше значення температури води після припинення подачі газу.

У Росії в нормативному документі ГОСТ Р 50696-2006 [18] надана методика визначення ККД пальника з врахуванням металоємності посуду, в якому міститься вода, тобто до складової нагріву води додається теплота нагрівання посуду з кришкою. Для визначення ККД пальника також використовують нагрів води від початкової температури 20 °С до кінцевої температури, що дорівнює найбільшому значенню, яке фіксує прилад для вимірювання температури після перекриття газу при температурі води 90 °С.

Дослідна установка Інституту газу НАНУ

Визначення характеристик пальників побутових газових плит потребує створення вогневої дослідної установки, що забезпечує можливість оптимізації конструкції пальників та режимних характеристик процесу спалювання газу в плитах. Діагностична установка, розроблена авторами у відповідності зі сформованими вимогами, — схема вогневого стенду зображена на рис.5.

Рис.5. Принципова схема вогневої установки для проведення досліджень: 1 — пальник, що піддається дослідженням; 2 — тестова ємність для нагрівання рідини; 3 — вузол збирання продуктів згоряння у формі зрізаної піраміди; 4 — електрозапальник; 5 — повітряний колектор.

Ця установка має створити умови для виконання таких дій та процедур: — імітація робочого процесу в газових плитах (спалювання газу із збереженням динаміки горіння, властивій для атмосферних пальників, та теплової обробки рідини в ємності); — визначення характеристик пальників різних конструкцій у залежності від типу палива, теплової потужності пальника, коефіцієнта надлишку первинного та вторинного повітря; — виконання діагностичних функцій: можливість коректного вимірювання та реєстрації (бажано комп'ютеризованої) індикаторів процесу горіння газу в пальниках, оцінка енергетичної ефективності використання палива та утворення шкідливих речовин.

Запропонована методологія забезпечує вимірювання таких параметрів: температура та витрати горючого газу, температура та витрати первинного повітря, температура та витрати вторинного повітря, а також якісний та кількісний склад продуктів згоряння в часі та просторі. Під час роботи установки в продуктах згоряння необхідно визначати концентрації CO та CO_2 , сумарного вмісту NO_x , окремо концентрацій NO та NO_2 , а також вміст O_2 для визначення коефіцієнта надлишку повітря в продуктах згоряння під час здійснення процесу горіння та при зміні режимних параметрів.

Дослідна установка складається з двох основних вузлів. У нижній частині корпусу, встановлені герметичні системи трубок для підведення до пальника горючого газу та первинного повітря. У верхній частині установки

— пірамідальному збірнику продуктів згоряння — встановлені пальник та ємність для нагрівання рідини. Первинне та вторинне повітря нагнітаються за допомогою компресора та рівномірно розподіляються навколо пальника, не змінюючи структуру та аеродинаміку його полум'я.

Для вимірювання витрат газу, потоків первинного та вторинного повітря на відповідних лініях подачі встановлені ротаметри з необхідним діапазоном вимірювання. Для вимірювання витрат природного газу встановлений ротаметр SH11J, діапазон вимірювань 0–10 л/хв. Вимірювання витрат первинного та вторинного повітря, а також рециркуляційних газів здійснюється ротаметрами SH11J з діапазоном вимірювань 0–3, 0–6 та 0–1 м³/год відповідно. Ротаметри, що використовуються для досліджень, пройшли перевірку в ДП «Укрметрестандарт» з відповідною сертифікацією приладів.

В установці передбачено використання природного газу, що надходить від центральної системи газопостачання міста, та скрапленого газу з балону.

Хімічний склад природного газу визначався за даними протоколів аналізу газу Боярської ЛВУМГ (БОЯРСЬКЕ ЛІНІЙНО-ВИРОБНИЧЕ УПРАВЛІННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ, Київ) у місці відбору ГРС ТЕЦ-5 у дні, найближчі до проведення експериментальних досліджень. Хімічний склад зрідженого газу визначався з використанням газового хроматографа «Agilent» (Hewlett Packard) Інституту газу НАН України. Показники аналізів наведені у табл.3.

Дослідження енергетичних характеристик та теплообміну при роботі атмосферних пальників газової плити. Для визначення впливу режимних характеристик пальника на його ККД у вогневому стенді встановлена ємність, що заповнюється водою. Геометричні розміри ємності та кількість води вибиралися відповідно до ДСТУ 2204-93. У випадку пальника малої потужності для газової плити «НОРД» була вибрана алюмінієва ємність з діаметром 180 мм, стінкою товщиною 2 мм; маса води у ємності — 2 кг.

Згідно з методикою проведення досліджень ДСТУ 2204-93, для визначення ККД пальника побутової газової плити фіксується час нагріву води в ємності у діапазоні температури від 20 до 90 °С. При досягненні температури 90 °С подача газу припиняється, остаточно фіксується

найбільше значення температури води всередині ємності.

Для визначення та аналізу основних показників теплопередачі у системі «продукти згоряння — рідина в ємності» в ємності та її стінках розміщено 6 термопар. Розташування термопар зображено на рис.6.

Рис.6. Схема розміщення термопар усередині рідини в досліджуваній ємності.

Вимірювання температури у дослідній установці здійснюється за допомогою промислового десятиканального модуля вводу M-7018Z-G/S (Тайвань) сигналів термопар типу «к». Обробка та виведення інформації у програмне середовище EZ DATA LOGGER забезпечувалося перетворювачем I-7561U (Тайвань) з USB у RS-232/422/485 з автоматичним контролем за напрямом передачі даних; живлення інформаційно-вимірювальної системи проводилося промисловим джерелом живлення MDR-20-24 MW (Тайвань).

Схема розміщення термопар у ємності (див. рис.6) передбачає можливість визначення динаміки процесу теплообміну у системі «пальник — рідина» моніторингом зміни температури в об'ємі води та розрахунком загального теплообміну під час нагріву. Попередньо проведені дослідження нагріву води в ємності показали, що температура води біля стінки (T_2 та T_4) більша за температуру в центральній області ємності (T_1 та T_3). Значення різниці температур для точок T_4 та T_3 , розташованих в одній горизонтальній площині, становить близько 5°C , для точок T_2 та T_1 — близько 2°C .

На рис.7 показано зміну температури у часі для точок T_4 та T_3 . Розбіжності по значеннях температури спостерігаються до температури кипіння, процес кипіння супроводжується інтенсивним перемішуванням, тому градієнт температур у кожній площині зменшується до нуля. Різниця температур контрольних термопар у

ділянках залежить від чисельних факторів: типу та теплоти згоряння палива, режимних характеристик (теплова потужність пальника та коефіцієнт надлишку повітря), а також від відстані від кришки пальника до днища нагрівної ємності. Із збільшенням відстані до днища різниця зменшується та при граничних значеннях прямує до нуля.

Рис.7. Значення температури води у процесі нагріву в ємності біля бічної стінки T_4 (1) та у середній локалізації об'єму T_3 (2).

Термопари T_5 та T_6 закріплені зовні на днищі. Вони дають можливість визначати температуру нижньої частини ємності, яка безпосередньо контактує з продуктами згоряння. Були проведені попередні дослідження та визначений діапазон температур на днищі ємності. Термограми нагріву води в ємності наведені на рис.7. Значення температур T_5 та T_6 залежать від режимних параметрів роботи пальників побутової газової плити, а також від відстані h від пальника до днища ємності (див. рис.5). У дослідній установці для визначення ефективної висоти розташування ємності над пальником була передбачена решітка, яка забезпечувала варіювання значення згаданої висоти h встановлення ємності по відношенню до пальника.

Температура стінок ємності t_{ws} (T_{ws}), у тому числі T_5 та T_6 , визначає тепловіддачу до стінки, оскільки при температурі стінки нижче температури насичення $t_{ws} < t_{sat}$ у граничному шарі потоку продуктів згоряння в них відбувається конденсація водяної пари, а при $t_{ws} > t_{sat}$ весь потік продуктів згоряння біля стінки є гомогенним та перебуває у газовій фазі [29, 30]. З цієї причини по ходу процесу нагрівання інтенсивність теплообміну є змінною у часі та на поверхні ємності. В умовах конденсації коефіцієнт тепловіддачі α_{cp-ws} до стінок ємності є суттєво вищим, ніж в умовах чисто газового по-

току продуктів згоряння при підвищених температурах навколо ємності [31].

У схемі, що розглядається (див. рис.5 та 6), коефіцієнт надлишку повітря λ_a для продуктів згоряння зростає по висоті ємності в міру підсмоктування навколишнього повітря у продукти згоряння навколо ємності, а t_{sat} або температура вологого термометра t_{wb} (wet-bulb temperature) та точки роси t_{dew} (dew point) відповідно знижуються. Оскільки для європейських природних газів із вмістом метану від 83,14 % (Holland) до 97,01 % (Russian) розбіжність значень t_{dew} зовсім невелика (58–59 °C) [29], визначення t_{dew} у залежності від надлишку повітря λ_a у газоповітряній суміші та розрахунки проводилися для спрощеного складу газу: $[CH_4] = 100\%$.

Цікавим є факт підтримання практично незмінного теплового потоку q_w у часі в умовах нагріву рідини в ємності незважаючи на зміну температури теплообмінної поверхні t_{ws} (T_{ws}) та рідини в основній частині процесу нагрівання (40–80 °C) перед кипінням:

$$dt_w/d\tau (\tau) \approx \text{const}, q_w \approx \text{const}, \quad (25)$$

про що свідчить близька до лінійної зміна у часі усередненої температури t_w в об'ємі ємності з водою (див. рис.7).

Коефіцієнт теплопередачі між продуктами згоряння та водою k_{CP-W} в ємності визначається коефіцієнтом тепловіддачі від потоку продуктів згоряння до стінок ємності (зовнішній фактор) α_{CP-WS} та коефіцієнтом тепловіддачі від стінки до води, що гріється в ємності (зовнішній фактор), α_{WS-W} . Кожен з цих факторів є суттєво змінним у часі та просторі. Коефіцієнт α_{CP-WS} змінюється, оскільки із зміною температури поверхні ємності граничний шар потоку продуктів згоряння змінює свій склад у відповідності із вмістом водяного конденсату, частка якого залежить від локальної температури продуктів згоряння біля стінки $T(z, r)$.

Температура теплообмінної поверхні (стінок ємності) t_{ws} (T_{ws}) неоднорідна та залежить від координат точки, де проводиться вимірювання. Для вісьсиметричної системи координат z - r межі теплообмінної поверхні (ємності) за умови нехтування товщиною стінок відповідають граничним значенням висоти H_v та радіусу R_v :

$$\begin{aligned} z &= 0; r \in \{0; R_v\}, \\ z &\in \{0; H_v\}; r = R_v = \text{const}. \end{aligned} \quad (26)$$

Висновки

1. Газові плити належать до числа найбільш розповсюджених у світі побутових газових приладів, у тому числі в Україні, окремих країнах Євросоюзу, США, Росії, Китаю, Індії та інших держав.

Як паливо для них використовують вуглеводні: природний та зріджений газ. Серед пальників газових кухонних плит найбільш розповсюдженим типом є атмосферні ежекційні пальникові пристрої, які забезпечують низькі енергетичні витрати та екологічні переваги завдяки використанню двостадійного спалювання газу. Подача у пальники підготовленої «багатої» газоповітряної суміші з коефіцієнтом надлишку первинного повітря $\lambda_{pr} < 1,0$ забезпечує зменшення необхідного тиску газу, скорочення витрат газу та енерговитрат пропорційно кубу λ_{pr} : $e_{pr} \sim \lambda_{pr}^3$.

2. Розглянуті нормативні документи України, ЄС, США, Росії, Китаю, які регламентують окремі характеристики палив, газових плит та пальників до них. Порівняні критерії класифікації пальників відповідно до стандартів окремих країн. На сучасному етапі сталого розвитку енергетики поряд з ефективністю використання органічних палив особлива увага приділяється проблемі забруднення атмосфери та глобальних кліматичних змін.

Найбільш жорсткими у світі екологічними нормативами відрізняються регіональні обмеження Пекінського муніципалітету (Китай) та штату Каліфорнія (США) відносно припустимого рівня викидів шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту.

3. Запропонована методологія вогневих випробувань атмосферних пальників, у тому числі визначення стійкості горіння газу та меж окремих видів нестабільного полум'я: проскоку, відриву та повисання, появи «жовтих кінчиків» — при варіюванні теплової потужності пальника та співвідношення «повітря:газ».

Передбачено вивчення енергетичних та екологічних характеристик пальників в умовах дослідної установки.

Створений, виготовлений та випробуваний комп'ютеризований вогневий стенд оригінальної конструкції з діагностичною системою, який дає можливість імітувати роботу атмосферних пальників різного дизайну та потужності, змінювати режимні характеристики пальників (коефіцієнти надлишку первинного та загального повітря).

4. У рамках визначення енергетичних характеристик атмосферних пальників газових

плит запропонована методика досліджень нагрівання рідини в ємності та проаналізований процес теплообміну в системі «пальник — ємність з водою».

Встановлено, що при температурі нижче температури насичення продуктів згоряння $t_{ws} < t_{sat}$ тепловіддача із зовнішньої сторони ємності супроводжується конденсацією пари у продуктах згоряння. При цьому конденсація відбувається в умовах незмінного абсолютного вологовмісту продуктів згоряння (точки роси на кривій насичення), температура поверхні ємності дорівнює температурі вологого термометра $t_{ws} = t_{wb}$. Поверхня ємності з водою при $t_{ws} < t_{sat}$ є вологою, коефіцієнт тепловіддачі α_{pr-ws} при цьому має максимальне значення.

Список літератури

- Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. Г.Л.Агафонова. М. : Физматлит, 2003. 352 с.
- Сорока Б.С., Горупа В.В. Науково-технологічні засади ефективного використання палива та екологічно чистого спалювання газу в кухонних плитах. 1. Сучасний стан та визначальні характеристики удосконалення спалювання газу в побутових газових плитах. Енерготехнологии и ресурсосбережение. 2017. № 3. С. 3–19.
- Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива : Справ. руководство. Л. : Недра, 1987. 336 с.
- Learn about Natural Gas. [Online resource]. — Access mode: <https://www.aga.org/natural-gas/>
- Годовой отчет открытого акционерного общества «ГАЗМАШ» за 2010 год. — Access mode: <https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=19&cad=rja&uact=8&ved=Ca&url=http%3a%2f%2fwww.edisclosure.ru%2fportal%2ffileload.aspx%3ffileid%3d374835&usg=aovvaw1h2tribbqrcrdq9vka mayr/>
- Verbreitung von Herdarten in Deutschland im Jahr 2011. — <http://en.statista.com/statistik/daten/studie/260831/umfrage/verbreitung-of-herdarten-in-deutschland/>
- Використання природного газу в Україні у 2016–2017 pp. — <http://naftogaz-europe.com/article/ua/vikoristannjaprirodnogogazu20162017/>
- Аналіз особливостей українського ринку видобутку та споживання природного газу. — http://www.business-inform.net/pdf/2013/11_0/170_179.pdf/
- BEIJING'S BURNING ISSUE. — <https://www.cibsejournal.com/archive/PDFs/CIBSE-Journal-2017-06.pdf/>
- Cooking Up Indoor Air Pollution. — <https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/122/1/ehp.122-A27.pdf/>
- ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения.
- ДСТУ 4047-2001. Газы углеводные скраплені паливні для комунально-побутового споживання. Технічні умови.
- ДСТУ EN 437:2018 (EN 437:2018, IDT). Випробувальні газы. Випробувальний тиск. Категорії приладів.
- Сила Поток. — https://www.2000.ua/modules/pages/files/49933-6-12-dekabrja-2019-g_746453_1.pdf/
- Erstmalig bis zu 20 Prozent Wasserstoff in einem deutschen Gasverteilnetz geplant. — <https://www.avacon.de/de/ueber-uns/newsroom/pressemitteilungen/erstmalig-bis-zu-20-prozent-wasserstoff-in-einem-deutschen-gasve.html/>
- ДСТУ 2204-93. Плити газові побутові. Загальні технічні умови.
- ГОСТ Р 50696-94. Плиты газовые бытовые. Общие технические условия.
- ГОСТ Р 50696-2006. Приборы газовые бытовые для приготовления пищи. Общие технические требования и методы испытаний.
- EN 30-1-1:2008+A1:2010. Domestic cooking appliances burning gas. Part 1-1: Safety – General.
- GB 16410-1996. Domestic gas cooking appliances.
- Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Выгдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л. : Недра, 1990. 762 с.
- Hao Wang. The Effect of Primary Air Distribution on Emissions from a Natural Gas Water Heater [Online resource]. — https://epublications.marquette.edu/theses_open/168/
- Weber E.J. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Chapter 12. Gas burner design / First Edition, Second Printing. Section 12, Ch. 14. N.Y. : The Industrial Press, 1966. P. 12/193–12/194.
- Weber E.J. Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. First Edition, Second Printing. Section 12, Ch. 14. N.Y. : The Industrial Press. 1966. P. 12/239–12/252.
- Брюханов О.Н., Матрюков Б.С. Аэродинамика, горение и теплообмен при сжигании топлива : Справочное пособие. СПб. : Недра, 1994. 317 с.
- Левин А.М. Принципы рационального сжигания газа. Л. : Недра, 1977. 247 с.
- Сорока Б.С., Пьяных К.Е., Згурский В.А., Апельков А.П. Комбинирование способов снижения образования оксидов азота — основное направление обеспечения экологических нормативов при сжигании топлива. Экотехнологии и ресурсосбережение. 2000. № 5. С. 60–69.
- EN 30-1-1:1998. Плити газові побутові. Ч. 1–4. Вимоги безпеки. Плити з одним чи більше пальниками з системою автоматичного керування. (EN 30-1-4:2002 IDT).
- Сорока Б.С., Горупа В.В. Анализ процесса конденсации водяного пара газовых атмосфер и

продуктов сгорания. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2017. № 1. С. 3–18.
30. Стабников В.Н. Лисянский В.М., Попков В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. М. : Агропромиздат, 1985. 503 с.

31. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : Учеб. для вузов. М. : Энергия,

1975. 488 с.

Надійшла до редакції 27.04.20

Сорока Б.С., докт.техн.наук,проф., ORCID 0000-0001-9174-0992,

Горупа В.В., Карачиевская Р.С.

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Научно-технологические основы эффективного использования топлива и экологически чистого сжигания газа в кухонных плитах. 2. Нормативная база и методология оценивания энергетической эффективности и экологических характеристик бытовых газовых приборов

Газовые кухонные плиты принадлежат к числу наиболее распространенных бытовых приборов. Исследования этих газоиспользующих устройств в Украине в последние десятилетия не проводились, несмотря на то, что доля природного газа, используемого в коммунально-бытовом хозяйстве, ежегодно увеличивается. Характеристики эксплуатации, энергетической эффективности работы газовых плит и показателей загрязнения воздуха, обусловленные сжиганием газового топлива в жилых помещениях, регламентируются нормативными документами: техническими условиями и стандартами Украины, стран ЕС, России, США, Китая и других государств, которые рассмотрены в настоящей работе. Практически все газовые плиты оснащены атмосферными эжекционными горелками, основные характеристики которых систематизированы и рассматриваются в настоящей работе. Перечень количественных и качественных показателей газовых горелок включает следующие отличительные признаки: виды топлива (природный и сжиженный газы), рабочее давление газа и номинальная тепловая мощность, коэффициент предельного регулирования, шум, производимый при работе горелок. Сжигание газа в атмосферных горелках представляет собой двухстадийный процесс. Рассмотрены физические аспекты формирования устойчивого пламени, а также специфические причины. Обобщены критерии возникновения режимов неустойчивого горения: проскок пламени в смеситель, отрыв и повисание факела, возникновение «желтых языков пламени». Атмосферные горелки имеют энергетические преимущества по сравнению с горелками полного предварительного смешения в силу работы с коэффициентом избытка первичного воздуха $\lambda_{\text{пр}} < 1,0$, а также экологические достоинства благодаря обеспечению двухстадийного горения газа. Показано, что энергозатраты в эжекционных горелках пропорциональны кубу коэффициента избытка воздуха, в атмосферных горелках — кубу коэффициента избытка первичного воздуха горения: $e_a \sim \lambda_{\text{а, пр}}^3$.

Предложена методология экспериментальных исследований атмосферных горелок различных конструкций и производителей, которая обеспечивает их огневые испытания в соответствии с национальными и международными нормативами, принятыми в Украине и ЕС. Создан компьютеризованный огневой стенд, позволяющий провести энергетические и экологические испытания атмосферных горелок с определением границ нарушения устойчивости горения. Представлен пример термограммы нагрева опытной емкости с водой, позволяющий оценить характер теплообменных процессов во времени и пространстве для системы «атмосферная горелка — нагреваемая емкость». *Библ. 31, рис. 7, табл. 5.*

Ключевые слова: атмосферная горелка, газовое топливо, двухстадийное горение газа, диаграмма устойчивости горения, ламинарный режим горения, образование «желтых языков пламени», отрыв пламени, проскок пламени, универсальный компьютеризованный огневой стенд.

**Soroka B.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID 0000-0001-9174-0992,
Horupa V.V., Karabchievskaya R.S.**

*The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: boris.soroka@gmail.com*

Scientific and Engineering Principles of Efficient Fuel Use and Environmentally Friendly Gas Combustion in Stove Plates. Part 2. Standard Basis And Methodology of Evaluation the Power Efficiency and Ecological Characteristics of Domestic Gas Devices

Gas stoves belong to the number of the most wide – spread domestic devices. Research activity concerning these appliances has been stopped in Ukraine some decades ago despite an increase of the natural gas using in municipal economy. Operation data, power efficiency characteristics and pollution indicators related to on air state by gas combustion in the living accommodation are regulated by the normative documents: national and international standards, regional technical (engineering) conditions of Ukraine, EU countries, Russia, USA, China and other states. Practically any gas stove is equipped with an atmospheric ejection burner. The principal characteristics of the gas burners, operation peculiarities for the atmospheric burners are systematized and analyzed in the presented paper. The following qualitative and quantitative indicators of the atmospheric burners have been considered in this paper: the fuel types to be used (natural gas, liquefied gas), working gas pressure ahead of stove, nominal heat capacity, limit range of operation adjustment, noise by burner operation. Gas burning under the atmospheric burners operation makes the two-stage process. The physical background of the stable combustion have been considered along with the specific reasons and generalized criteria of the unstable combustions modes: flash-back, blow-off, appearance of the «yellow tips» in the flame. The atmospheric burners possess both the power and environmental advantages in comparison with the burners of total preliminary mixing of fuel gas and combustion air. Application of primary air excess $\lambda_{pr} < 1.0$, provides higher efficiency of the burners and need for lower gas pressure ahead of the domestic stoves while the two-stage combustion makes one of the principle techniques of environmentally benign combustion technologies. It has been shown that energetic experiences in ejection burners are proportional to the cube of the air access coefficient, in case of the atmospheric burners – are raised two the third power: $e_a \sim \lambda_{a, pr}^3$.

An original methodology experimental researchers for the atmospheric burners of various design and of different companies – manufacturers has been proposed. The methods of the tests performing fully meet to Ukrainian norms and international standards. The computerized firing rig stand with a diagnostic facility has been created providing both power and environmental research of the atmospheric burners with definition of the boundaries of stable operation and breach the combustion stability. An example of the water heating thermogram within the test vessel has been presented providing an opportunity to evaluate the peculiarities of head transfer process by time and space for the system «atmospheric burner – the vessel to be heated and liquid to be boiled».

Bibl. 31, Fig. 7, Tab. 5.

Keywords: atmospheric burners, blow-off of flame, combustion and two-stage burning, gas fuel, laminar combustion mode, flash-back of flame, power and environmental tests, universal computerized firing rig, «yellow tips» formation.

References

1. Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R. Gorenije. Fizicheskiye i khimicheskiye aspekty, modelirovaniye, eksperimenty, obrazovaniye zagryaznyayushchikh veshchestv : Per. s angl. Moscow : Fizmatlit, 2003. 352 p. (Rus.)
2. Soroka B.S., Horupa V.V. [Scientific and Engineering Principles of Efficient Fuel Use and Environmentally Friendly Gas Combustion in Stove Plates. Part 1. Modern State-Of-The-Art and Directions for Improvement the Gas Burning in Domestic Gas Cookers]. *Energotehnologii i resursosberezheniye. [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 2017. No. 3. pp. 3–19. (Ukr.)

3. Isserlin A.S. Osnovy szhiganiy gazovogo topliva. Leningrad : Nedra, 1987. 336 p. (Rus.)
4. Learn about Natural Gas [Online resource]. — <https://www.aga.org/natural-gas/>
5. Godovoy otchot otkrytogo aktsionernogo obshchestva «GAZMASH» za 2010 god. [Onlineresource]. — <https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=19&cad=rja&uact=8&ved=0ahukewjuvq1uutyahvbiwkhuzhpcpm4chawcgmwca&url=https%3a%2f%2fwww.edisclosure.ru%2fportal%2ffileload.ashx%3ffileid%3d374835&usg=aovvaw1h2tribbqrcrdq9vka> mayr/ (Rus.)
6. Verbreitung von Herdarten in Deutschland im Jahr 2011. — <http://en.statista.com/statistik/daten/studie/260831/umfrage/verbreitung-of-herdarten-in-deutschland> (Ger.)
7. Vykorystannya pryrodnoho hazu v Ukraini u 2016–2017 rr. — <http://naftogaz-europe.com/article/ua/vikoristannjaprirodnogogazu20162017> (Ukr.)
8. Analiz osoblyvostey ukraïnskoho rynku vydobutku ta spozhyvannya pryrodnoho hazu. — Access mode: — http://www.business-inform.net/pdf/2013/11_0/170_179.pdf (Ukr.)
9. BEIJING'S BURNING ISSUE. — <https://www.cibsejournal.com/archive/PDFs/CIBSE-Journal-2017-06.pdf>
10. Cooking Up Indoor Air Pollution. — <https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/122/1/ehp.122-A27.pdf>
11. GOST 5542-87. Gazy goryuchiye prirodnyye dlya promyshlennogo i kommunal'no-bytovogo naznacheniya. (Rus.)
12. DSTU 4047-2001. Hazy vuhlevodnevi skrapleni palyvni dlya komunal'no-pobutovoho spozhyvannya. Tekhnichni umovy. (Ukr.)
13. DSTU EN 437:2018 (EN 437:2018, IDT). Vyprobuvalni hazy. Vyprobuval'nyy tysk. Katehoriyi pryladiv. (Ukr.)
14. Sylas Potoku. — https://www.2000.ua/modules/pages/files/49933-6-12-dekabrja-2019-g_746453_1.pdf (Ukr.)
15. Erstmalig bis zu 20 Prozent Wasserstoff in einem deutschen Gasverteilnetz geplant. — <https://www.avacon.de/de/ueber-uns/newsroom/pressemitteilungen/erstmalig-bis-zu-20-prozent-wasserstoff-in-einem-deutschen-gasve.html>
16. DSTU 2204-93. Plyty hazovi pobutovi. Zahalni tekhnichni umovy. (Ukr.)
17. GOST R 50696-94. Plity gazovyye bytovyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya. (Rus.)
18. GOST R 50696-2006. Pribory gazovyye bytovyye dlya prigotovleniya pishchi. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy. (Rus.)
19. EN 30-1-1:2008+A1:2010. Domestic cooking appliances burning gas. Part 1-1: Safety – General.
20. GB 16410-1996. Domestic gascooking appliances.
21. Staskevich N.L., Severinets G.N., Vygdorshchik D.Ya. Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu gaza. Leningrad : Nedra, 1990. 762 p. (Rus.)
22. Hao Wang. The Effect of Primary Air Distribution on Emissions from a Natural Gas Water Heater. — https://epublications.marquette.edu/theses_open/168
23. Weber E.J. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Chapter 12: Gas burner design / First Edition, Second Printing. Section 12, Ch. 14. N.Y. : The Industrial Press, 1966. P. 12/193–12/194.
24. Weber E.J. Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices / First Edition, Second Printing. Section 12, Ch. 14. N.Y. : The Industrial Press. 1966. P. 12/239–12/252.
25. Bryukhanov O.N., Mastryukov B.S. Aerodinamika, gorenije i teploobmen pri szhigani topiva. St.-Peterburg : Nedra, 1994. 317 p. (Rus.)
26. Levin A. M. Printsip y ratsional'nogo szhiganiya gaza. Leningrad.: Nedra, 1977. 247 p. (Rus.)
27. Soroka B.S., P'yanykh K.Ye., Zgurskiy V.A., Apal'kov A.P. Kombinirovaniye sposobov snizheniya obrazovaniya oksidov azota — osnovnoye napravleniye obespecheniya ekologicheskikh normativov pri szhigani topiva. Ecotechnologii i resurssoberezeniye. [Ecotechnologies and Resource Saving]. 2000. No. 5. pp. 60–69. (Rus.)
28. EN 30-1-1:1998. Plyty hazovi pobutovi. Ch. 1–4. Vymohy bezpeky. Plyty z odnym chy bilshe palynkamy z systemoyu avtomatychnoho keruvannya. (EN 30-1-4:2002 IDT). (Ukr.)
29. Soroka B.S., Gorupa V.V. Analiz protsessu kondensatsii vodyanogo para gazovykh atmosfer i produktov sgoraniya. Energotechnologii i resurssoberezeniye. [Ecotechnologies and Resource Saving]. 2017. No. 1. pp. 3–18. (Rus.)
30. Stabnikov V.N. et al. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv. Moscow : Agropromizdat, 1985. 503 p. (Rus.)
31. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. Moscow : Energiya, 1975. 488 p. (Rus.).

Received April 27, 2020