Топливо и энергетика

УДК 683.87:683.955(045)

Сорока Б.С., *докт. техн. наук, проф.,* ***Горупа В.В.***
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. 1. Сучасний стан та визначальні характеристики спалювання газу в побутових газових плитах

В Україні споживання природного газу в промисловості та в енергетиці в останні роки скорочується внаслідок кризових явищ в економіці країни, до певної міри завдяки впровадженню відновлюваних джерел енергії, а також альтернативних технологій. У той же час в комунально-побутовому секторі обсяги використання газового палива зростають завдяки збільшенню кількості споживачів. Найбільш часто природний газ використовується в побуті для обігріву помешкань та приготування їжі. Ці статті витрат газу в Україні вже перевищують витрати газу в промисловості. Приготування їжі здійснюється безпосередньо в житлових приміщеннях, які зазвичай не відповідають Державним будівельним нормативам України щодо роботи системи вентиляції. Використання природного газу в побутових газових плитах має важливе значення з точки зору контролю викидів шкідливих компонентів продуктів згоряння, а також енергетичних характеристик використання природного газу. До складу основних забруднювачів навколишнього середовища при спалюванні природного газу в газових плитах відносять NO_x (в основному високотоксичний NO_2), CO, CH_2O, а також вуглеводні (незгорілі UHC та поліароматичні PAH). Наведено огляд нормативних документів, що регламентують викиди CO та NO_x для України в порівнянні зі стандартами США, ЄС, Росії, Австралії та Китаю. Представлено конструкції пальників побутових газових плит, їх основні характеристики: потужність, витрати природного газу, діаметри сопел, діаметр вогневих насадків, крок вогневих отворів та ін. Проаналізовано сучасні фізико-хімічні засади спалювання газу в атмосферних ежекційних пальниках з огляду на стабілізацію процесу горіння та забезпечення стійкості факелів. Серед чинників дестабілізації факельного процесу в рамках згаданого аналізу розглядаються такі форми порушення стабільного горіння: проскок, відрив або повисання факелів, а також виникнення жовтих кінчиків полум'я. *Бібл. 37, рис. 12, табл. 7.*

Ключові слова: побутові газові плити, ежекційні пальники, проскок, відрив або повисання факелів, жовті кінці полум'я, первинний коефіцієнт надлишку повітря

© Сорока Б.С., Горупа В.В., 2017

Місце спалювання газу в комунально-побутовому секторі серед процесів використання газового палива

Споживання газового палива в побуті, зокрема, для приготування їжі — один з найстаріших напрямків використання газового палива на сучасному етапі розвитку газової промисловості. Основними видами палива для кухонних плит є здебільшого природний газ (на газифікованих територіях), а також пропан-бутанові суміші (балонний газ або паливопостачання від локальних резервуарів).

1. Споживання природного газу в економіці України в останні роки постійно скорочується. В той же час витрати цього палива в побуті змінюються незначно. Відповідні дані наведені на рис.1, базуючись на статистичній звітності [1]. Це означає, що скорочення витрат природного газу відбувається за рахунок відмінних від побуту секторів економіки, перш за все промисловості та енергетики.

Керуючись звітною інформацією «НАК Нафтогаз України» за 2016 р., можна стверджувати, що загальне використання природного газу за рік зменшилося на 2 % [2]. В той же час населення збільшило використання природного газу на 5 %, в результаті чого у 2016 р. в комунально-побутовому секторі його було витрачено 11,9 млрд м^3. У порівнянні з промисловим використанням природного газу 9,9 млрд м^3/рік населення використало на 2 млрд м^3 більше. Значні обсяги споживання газу стимулюють проведення аналізу технічної досконалості приладів для побутового використання природного газу.

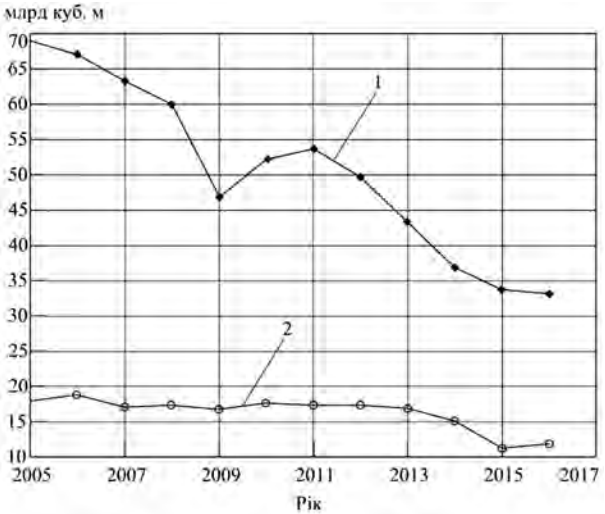

Рис.1. Обсяги споживання природного газу в Україні по роках: 1 — загальне споживання в економіці країни; 2 — споживання в комунально-побутовому секторі.

На жаль, основні наукові дослідження та розробки, пов'язані з побутовим використанням газу, у тому числі в Україні, відносяться до періоду післявоєнної газифікації країни (1948–1975 рр.) та пов'язані з прогресом фундаментальних досліджень в області теорії горіння мінеральних палив (fossil fuels) [3–5]. В останні десятиріччя було практично припинено вивчення процесів спалювання вуглеводневого палива у відповідних системах та пристроях.

2. Основними споживачами природного газу в побуті є прилади для індивідуального опалення (газові котли) та прилади для приготування їжі (побутові газові плити). Загальні витрати природного газу, використаного для індивідуального опалення, перевищують витрати газу в побутових газових плитах. Враховуючи сезонність використання котлів та загальне споживання палива в комунально-побутовому секторі, можна зробити висновок про періодично визначальну частку споживання газу в плитах та значущість ефективного використання палива при його спалюванні у відповідних пальниках.

Природний газ в комунально-побутовому секторі може використовуватися в різних газових приладах, які поділяють на такі групи [6–8]: а) для приготування їжі (газові побутові плити різних конструкцій та продуктивності, автономні духові шафи); б) для гарячого водопостачання (проточні водонагрівачі); в) для індивідуального опалення; г) для освітлення; д) для спеціальних цілей (пальники інфрачервоного випромінювання).

Прилади з останніх двох груп наведеного переліку застосовуються досить рідко. Використання проточних газових водонагрівачів теж зменшується тому, що багаторазове циклічне вмикання та вимикання газового проточного нагрівача, що є характерним для побутових умов, знижує його ККД, окрім того, собівартість нагріву води в ньому наближена до такої, що відповідає випадку електричного накопичувального водонагрівача. Разом з тим останні значно простіші в експлуатації та не відрізняються особливими вимогами до приміщення, в якому вони встановлені.

Побутові газові плити, які використовують для приготування їжі, мають відповідати ДСТУ 2204–93 [9]. Основний тип плит, які використовуються в побуті, — це стаціонарні підлогові 2–4-пальникові плити з духовою шафою. Також виготовляються настільні переносні та вбудовані газові плити. Газові плити призначені для роботи на природному газі з початковим тиском 1274 та 1960 Па або на скрапленому газі з тиском 2940 Па. Відповідно до ДСТУ

2204–93, ККД газової плити відносно теплової енергії пальників столу має складати не менше 59 %, вміст оксидів азоту в продуктах згоряння — не більше 200 мг/м^3 (≈ 104 млн$^{-1}$), вміст оксиду вуглецю в сухих нерозведених продуктах згоряння — 625 мг/м^3 (0,05 %). Пальники столу газової плити та їх деталі мають бути взаємозамінними, встановлюватися та зніматися без застосування інструменту.

3. Вперше увагу на характеристики палива було звернуто у зв'язку з проблемою заміщення палив («Interchangeability of fuel gases», American Gas Association), яка була започаткована саме стосовно використання палива у побутових газових пальників. Варіювання властивостей та критерії заміщення палив у такій постановці були на відповідному етапі пов'язані зі стійкістю горіння за умови попередження явищ проскоку (flashback), відриву (blow out) або повисання полум'я (lifting) [10].

На сучасному етапі споживання газового палива в побуті найбільший інтерес становить екологічна складова з огляду на можливість безпосереднього контакту людського організму зі шкідливими речовинами в продуктах згоряння (NO_x, CO, різноманітні вуглецеві сполуки C_nH_m, до складу яких входять незгорілі компоненти UHC та поліароматичні з'єднання PAH, а також частинки PM 10, PM 2,5).

Саме екологічний аспект спалювання визначив створення не тільки національних, але й регіональних та навіть місцевих нормативів шкідливих викидів в окремих найбільш забруднених містах світу. Так, у Пекіні (Китай) через часте виникнення смогів місцева влада (Beijing Municipal Government) ініціювала створення та впровадження стандарту DB 11/139–2015 на забруднення повітря для котлоагрегатів з обмеженням викидів NO_x на рівні $[NO_x] \le 30$ мг/м^3 в той час, як теперішні характеристики обмежуються граничною концентрацією 80 мг/м^3 при вмісті $[O_2]$ в продуктах згоряння 3,5 % для промислових котлоагрегатів та нагрівальних пристроїв, а також при 3 % $[O_2]$ для енергетичних агрегатів. Запропоновані критерії заміщення газового палива мали на меті створення таких умов спалювання альтернативного газу, щоб індекси проскоку, відриву, повисання полум'я та появи в ньому жовтих кінчиків залишалися незмінними по відношенню до умов, характерних для використання базового палива.

Таким чином, сьогоднішні норми в Пекіні стали набагато жорсткішими, ніж в Євросоюзі, де для NO_x обмежуюча концентрація становить 100 мг/м^3 при 3 % $[O_2]$ для нових агрегатів; лише в окремих випадках лімітуюча концентрація $[NO_x]$ в продуктах згоряння знижується до 70 мг/м^3 [11].

Екологічні характеристики пальників побутових газових плит

1. До складу основних забруднювачів навколишнього середовища при спалюванні природного газу в газових плитах відносять NO_x, CO, а також вуглеводні (незгорілі UHC та поліароматичні PAH). З точки зору впливу на клімат основним парниковим газом є CO_2.

Як вказують Національний інститут онкології та Міністерство екології США, дуже небезпечним компонентом, що виділяється під час готування їжі на плиті, що працює на природному газі, дровах та рідкому паливі, є формальдегід HCHO [12]. Цей компонент має канцерогенні властивості, внаслідок чого в ЄС заборонено вживання продукції з вмістом $[HCHO] \ge 2000$ млн$^{-1}$.

Підтвердженням цьому є досліди науковців з Національної лабораторії Лоуренса Берклі та Стенфордського університету, які розробили імітаційну модель оцінки емісії газових плит на сім'ю з п'яти чоловік. Згідно з їхніми дослідженнями, прилади для приготування їжі на природному газі, які використовують у третині американських домогосподарств, можуть сприяти погіршенню якості атмосферного повітря в приміщеннях, особливо коли вони використовуються без аспіраційних систем. На відміну від більшості споживачів вуглеводнів, газові плити напряму викидають NO_2 (замість NO) одночасно з CO та HCHO, кожен з яких може загострювати різні респіраторні та інші захворювання та негативно впливати на здоров'я людини.

На підставі цих результатів моделювання дослідники оцінили, що протягом тижня взимку 1,7 млн каліфорнійців можуть бути піддані впливу рівнів CO, що перевищують стандарти для навколишнього повітря, 12 млн людей можуть зазнати впливу надмірного рівня NO_2, якщо вони не використовують систему вентиляції під час готування їжі.

Встановлено, що газові пальники додають 25–33 % до внутрішньодомової концентрації $[NO_2]$ влітку та 35–39 % взимку. Зазначені сезонні зміни $[NO_2]$, осереднені за тиждень, відображають факт зменшеної вентиляції повітря в приміщенні взимку. Щодо концентрації [CO] газові плити визнані відповідальними у 30 % внеску влітку та 21 % взимку до внутрішньодомової концентрації, оскільки влітку абсолютна зовнішня концентрація оксиду вуглецю менша. Пальникові пристрої додають незначно до внутрішньої концентрації HCHO з огляду на наявний підвищений внесок таких

джерел формальдегіду всередині приміщень, як будівельні матеріали та меблі [12].

У цілому в США дуже серйозним та небезпечним виявився показник перевищення федеральних та місцевих (штатних) нормативів щодо рівня шкідливих речовин всередині домівок у випадку відсутності або невикористання систем провітрювання внутрішньодомових приміщень. Ця характеристика має відносне значення 6,7, тобто відсутність вентиляції приміщень може мати незворотні наслідки для людського здоров'я [12].

Також було зазначено, що особи, які готують їжу, та маленькі діти (віком від 0 до 5 років), які, як вважалося, знаходяться найближче до плити, зазнають найбільший вплив. У роботі [12] зазначено, що перехід на електричні кухонні плити не вирішує проблему, тому що приготування їжі на електричній плиті супроводжується виділенням акролеїну (акрилового альдегіду), дуже отруйної речовини, що подразнює слизову оболонку.

2. Новий етап досліджень, які стосуються атмосферних пальників, тобто пальників газових плит, пов'язаний з необхідністю приведення їх екологічних характеристик у відповідність до нормативів Євросоюзу, а також інших держав (США, Японія), які визначають розвиток цього сектору економіки. Наприклад, відповідно до договору з ЄС про енергетичну співпрацю, з 1 січня 2018 р. екологічні нормативи мають бути приведені у відповідність до Директиви з Екобезпеки, беручи до уваги те, що газова плита встановлена в житловому приміщенні — в кухні, і продукти згоряння природного газу можуть безпосередньо впливати на людину.

Важливими для пальників побутових газових плит є показники вмісту NO_x, CO та CO_2. Згідно з державними будівельними нормами ДБН В.2.2–15–2005 [13], для приміщення типу кухня-їдальня має передбачатися припливна (приточна) вентиляція, яка забезпечує однократний повітрообмін. Мається на увазі, що за 1 год у кухню має надходити обсяг свіжого повітря, який дорівнює об'єму приміщення. Згідно з цим документом, мінімальна площа кухні має становити не менше 7 м^2. Звісно, що ці норми, встановлені для сучасних будинків, у реальних умовах побутового споживання газу в Україні можуть не відповідати дійсній ситуації щодо існування та справності вентиляції.

Аналізуючи нормативні документи по викидах від газових побутових плит, потрібно зауважити, що для деяких країн світу регламентуються тільки викиди CO, для окремих країн викиди NO та NO_x.

Як видно з табл.1, українські нормативи суттєво відстають від усіх представлених та не мотивують впровадження заходів, спрямованих на скорочення шкідливих викидів у побуті.

Таблиця 1. Граничні концентрації викидів для побутових споживачів

Країна	$[NO_x]_{lim}$, млн$^{-1}$ (мг/м^3)	$[CO]_{lim}$, % (об.)	Документ
Україна	105 (200)	< 0,05	[9]
Росія	105 (200)	< 0,03	[14]
ЄС	–	0,10–0,20	[15]
ЄС	50, min 35 (100, min 70)	–	[16]
США	+	–	[17]
США	30	–	[18]
Китай	max 150	0–0,2%	[19]
Китай	15 (30)	–	[20]
Австралія	+	+	[21]

Рекомендована методологія визначення оксидів азоту [9] побудована на повільному хімічному методі, використання якого потребує залучення окремих розчинів. У ній відбір проб зображений з конструктивними вадами.

Таким чином, в Україні ситуація з нормами шкідливих викидів при використанні газу у побуті та при спалюванні газу в кухонних плитах є надзвичайно небезпечною, оскільки обмеження щодо шкідливих викидів не є достатньо жорсткими та обов'язковими для виконання. Якщо до сказаного додати відсутність контролю за вмістом вуглеводнів у продуктах згоряння з атмосферних пальників, виникає висновок щодо екологічно небезпечного стану повітря кухонних приміщень у країні.

Фізико-хімічні засади спалювання газу

1. Основні наукові дослідження пальників газових плит, які були проведені у XX ст., співпали у часі зі створенням фундаментальних засад горіння [4]. Такі пальники, як правило, належать до атмосферних пристроїв спалювання попередньо підготовленої газо-повітряної суміші. Сам процес гомогенного горіння розподіляється на такі стадії: примусового запалювання з використанням зовнішнього джерела енергії (іскрове запалювання); формування фронту горіння та розповсюдження полум'я в підготовленій суміші; догоряння полум'я в умовах підсосу навколишнього атмосферного повітря в індивідуальні факели.

Процес примусового запалювання переходить у самопідпалюючий процес стаціонарного горіння в умовах переносу активних центрів ре-

акції від фронту до свіжої горючої суміші. Можна вважати, що процес вигоряння факелів розпочинається з температури запалювання (самозапалювання) T_{ig}, що визначається часом затримки спалахування (запалювання) τ_{ig}, тобто перебігом часу від попередніх хімічних реакцій, у тому числі реалізації ланцюгового механізму, до реакцій основного механізму горіння відповідного палива. У табл.2 наведені температури самозапалювання для деяких горючих газів. Значення представлені для стандартних умов: P = 101,325 кПа; T = 298 К.

Таблиця 2. Температура самозапалювання газів, К

Газ	Документ					
	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[27]
Водень	810	845	845	833	833	783
Метан	868	810	905	858	810	810
Етан	788	745	745	788	788	788
Пропан	743	739	766	743	739	743
і-Бутан	733	—	—	733	735	733
n-Бутан	638	688	678	703	678	—
n-Пентан	533	557	505	—	531	—

Після досягнення T_{ig} швидкість горіння визначається співвідношенням швидкостей дифузії та теплопровідності, з одного боку, та сотень хімічних реакцій, сотень (тисяч) початкових, проміжних та кінцевих компонентів процесу горіння (для природного газу, наприклад, механізм GRI Mech 3.0). Інтегрально цей процес відображує лінійну швидкість горіння (м/с) через умовну складну наведену хімічну реакцію [28], що проходить в умовах прогресивного самоприскорення. Відповідні швидкості нормального розповсюдження полум'я u_n, хімічної реакції $W_{ch.r}$ визначаються якісними залежностями:

$$u_n \sim (a/\tau)^{1/2} \sim (a\, W_{ch.r})^{1/2}; \qquad (1)$$

$$W_{ch.r} \sim \tau_{ch.r}^{-1} \sim \exp(E/RT), \qquad (2)$$

де a — коефіцієнт температуропровідності реагуючої суміші; $W_{ch.r}$ — характерний час наведеної хімічної реакції у зоні горіння з енергією активації E та температурою горіння T.

2. При створенні перших конструкцій атмосферних пальників використовувалися та відпрацьовувалися основні положення фундаментальної дифузійно-теплової теорії ламінарного горіння (Зельдович Я.Б., Франк-Каменецький Д.А., 30–50-ті роки XX ст.), пов'язаної зі швидкостями, межами та стійкістю горіння [29].

Крім того, для обліку характеристик палив були створені базові положення та критерії взаємозамінності горючих газів (AGA — American Gas Association), пов'язані зі стійкістю горіння (за проскоком, відривом полум'я та неповнотою згоряння) [10]. Додатковими небажаними режимами роботи атмосферних пальників є такі, при яких спалювання супроводжується утворенням жовтих язиків полум'я (yellow tips).

Ці положення звичайно ілюструються діаграмами стійкості у координатах «питоме теплове навантаження пальника q_b, кВт/м^2 (або в оригіналі MBtu/hr (in)^2 — коефіцієнт надлишку повітря λ (air excess factor), або надлишкове паливо (Equivalence Ratio $\Phi = \lambda^{-1}$) [30, 3]. При трансформації q_b через теплоту згоряння палива (нижчу) Q_l, можна перейти від діаграми стійкості горіння в наведених координатах у відповідну діаграму з визначенням граничних лінійних швидкостей горючої суміші через розрахунок проміжного умовного параметру — швидкість горючого газу u_f на виході з вогневих отворів:

$$u_f = q_b / Q_l, \qquad (3)$$

де Q_l — нижча теплота згоряння палива, що розглядається.

На рис.2 зображена зона стійкої роботи пальника та області її порушення внаслідок проскоку полум'я, його повисання та появи слідів неповного спалювання (виникнення жовтих кінчиків полум'я), визначені у роботі [30] за результатами досліджень одного з контрольних пальників № 36 за умови спалювання природного газу.

3. Для одержання числових значень обмежувальних швидкостей газоповітряної суміші, відповідних тепловому навантаженню q_b, в пев-

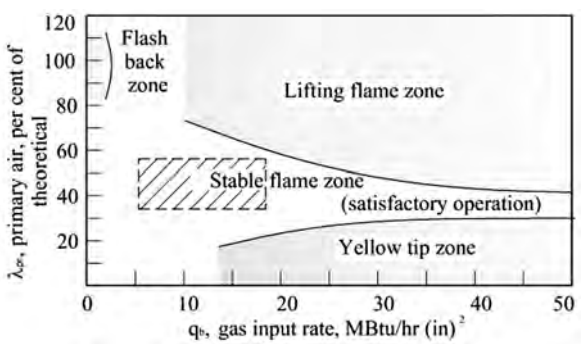

Рис.2. Залежність питомого теплового навантаження контрольного пальника від коефіцієнту надлишку первинного повітря. Взаємне розташування зон стійкого полум'я (стабільного горіння), виникнення областей порушення стабільного горіння [30] за даними випробувань пальника № 36 при спалюванні природного газу.

них точках «*i*», а також побудови граничних поверхонь (кривих) проскоку (fb), повисання (lf), відриву полум'я (bo), горіння з утворенням жовтих кінчиків полум'я в термінах швидкості суміші слід скористатися залежностями, одержаними нами з огляду на фізичний зміст характеристик потоку в контрольних точках «*i*», через відповідний перерахунок даних залежностей q_b (λ_{pr}):

$$w_{fb,i} = q_{fb,i}\, Q_l^{-1}\, (1 + \lambda_{fb,i}\, L_{st}); \qquad (4)$$

$$w_{lf,i} = q_{lf,i}\, Q_l^{-1}\, (1 + \lambda_{lf,i}\, L_{st}); \qquad (5)$$

$$w_{bo,i} = q_{bo,i}\, Q_l^{-1}\, (1 + \lambda_{bo,i}\, L_{st}); \qquad (6)$$

$$w_{yt,i} = q_{yt,i}\, Q_l^{-1}\, (1 + \lambda_{yt,i}\, L_{st}), \qquad (7)$$

де w — швидкість газоповітряної суміші для умов порушення стійкості горіння на лініях fb, lf, bo, yt, тобто при виникненні проскоку, повисання, відриву полум'я, або при появі жовтих кінчиків полум'я відповідно, м/с; q_i — питоме теплове навантаження для деякої точки «i» на одній з ліній порушення стійкості горіння на лініях fb, lf, bo, yt, МВт/м^2; Q_l — нижча теплота згоряння газу, МДж/м^3; L_{st} — об'ємне стехіометричне число, м^3 (повітря)/м^3 (горючого газу).

Графік з відповідними швидкостями газоповітряної суміші представлений на рис.3.

Рис.3. Взаємне розташування зони стійкого горіння та меж її порушення внаслідок повисання факелів, виникнення проскоку полум'я, появи жовтих язиків (неповне згоряння) при спалюванні природного газу з використанням пальника, характеристики якого дані на рис.2; «i» — контрольна точка.

Конструкції пальників газових побутових плит

Основним конструктивним елементом побутових газових плит є газовий пальник, або конфорка. У перекладі з голандської мови komfoor — пристрій для розпалювання вогню (толковий словник Ушакова, 1941 р., етимологія слова). У подальшому при перевиданні словників стали використовувати термін «конфорка». Як правило, в побутових газових плитах використовують інжекційні пальники низького тиску з початковим попереднім змішуванням природного газу та первинного повітря [31–34].

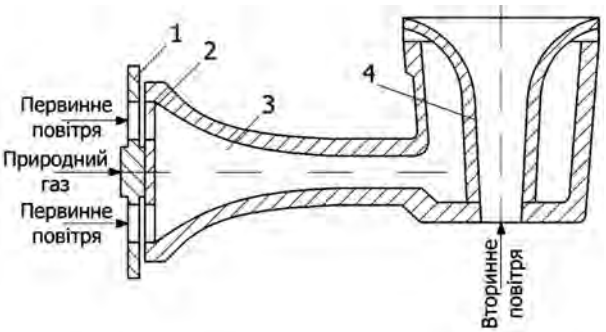

Рис.4. Конфорочний пальник [6]: 1 — рухома частина шибера; 2 — нерухома частина шибера, торцева поверхня пальника; 3 — змішувач; 4 — вогневий насадок.

Усі пальники попередніх та сучасних газових плит незалежно від фірми-виробника та країни походження характеризуються однаковим принциповим способом організації робочого процесу. Це пальники двостадійного спалювання з повним попереднім змішуванням газу з первинним повітрям-окислювачем. Змішування газу з первинним повітрям та дифузійним допалюванням багатої первинної газової суміші.

Пальники побутових газових плит класифікують за розташуванням інжектора-змішувача: з горизонтальним змішувачем та периферійним підведенням вторинного повітря; з вертикальним змішувачем та периферійним підведенням вторинного повітря; з центральним та периферійним підведенням вторинного повітря.

У побутових газових плитах протягом усього часу їхнього існування застосовувалися тільки інжекційні (ежекційні) пальники, звичайно зі змішувачами типу труби Вентурі. На рис. 4–6 представлені основні конструкції пальників газових побутових плит.

Одна з найперших конструкцій інжекційного пальника представлена на рис.4; розробник — Санкт-Петербурзький завод газової апаратури. У пальнику регулювання витрати первинного повітря здійснювалося шибером 1. Недоліком вказаної конструкції є необхідність зняття газового пальника з плити для забезпечення доступу до регулювання подачі первинного повітря.

Подальший розвиток та модернізація газових побутових плит пов'язаний з покращенням

стабілізації горіння факелів, що забезпечило появу уніфікованих газових плит, в яких змішувач та вогневий насадок (система має кришку, дифузор та газове сопло) розташовані в просторі з єдиною вертикальною віссю (рис.5). У цих пальниках змінена форма вогневого насадку для покращення підводу вторинного повітря до окремих факелів та запобігання їхнього злиття в єдиний вогневий шар (рос. — слой, англ. — layer).

Із запровадженням конструкцій пальників з елементами, що організують пілотне полум'я на них, регулювання первинного повітря шибером стало практично недоцільним. Замість нього на вхідному кінці змішувача є отвори, які забезпечують ежекцію необхідної кількості первинного повітря. Застосування отворів унеможливило виникнення кіптявого полум'я. Конструкція вогневого насадку виключає можливість проскоку та відриву полум'я.

Рис.5. Вертикальний пальник [34]: 1 — кришка; 2 — вогневий насадок; 3 — дифузор; 4 — вікно для ежекції первинного повітря; 5 — сопло; 6 — корпус сопла.

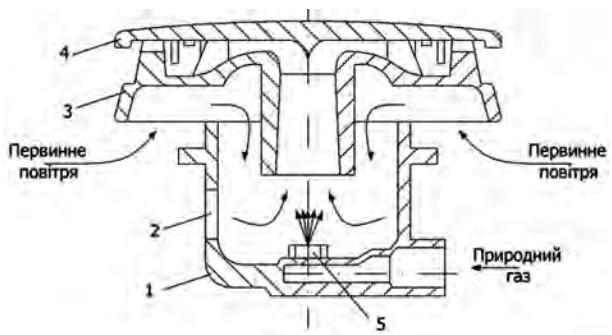

Рис.6. Пальник сучасних побутових газових плит [35]: 1 — корпус; 2 — отвір для ежекції первинного повітря; 3 — вогневий насадок; 4 — кришка; 5 — сопло.

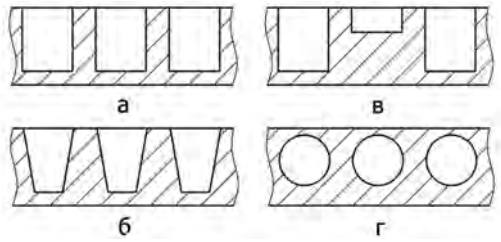

Рис.7. Форма вихідних вогневих отворів вогневих насадків пальників газових побутових плит: а — прямокутні; б — у вигляді трапеції; в — багатокутні; г — круглі.

Пальники сучасних побутових газових плит представлені на рис.6. Вони мають менші габаритні розміри, ежектор виконаний разом із вогневим насадком. У корпусі пальника є отвір для ежекції первинного повітря, окрім того, первинне повітря також ежектується через щілину між корпусом та вогневим насадком.

З огляду на організацію процесу спалювання газу та забезпечення стабільності факелів визначальним елементом пальників побутових газових плит є вихідні вогневі отвори, через які газоповітряна суміш виходить з вогневого насадку, а також запалюється первинна газоповітряна суміш. Вихідні отвори для пальників можуть мати різні форми (приклади на рис.7).

Окремі концептуальні, режимні та геометричні особливості пальників побутових газових плит

1. Газові пальники сучасних плит запроектовані однаковими для усіх типорозмірів газових плит, забезпечують стійке спалювання природного газу без проскоку та відриву полум'я при зміні теплової потужності в діапазоні 0,25–1,20 від номінального значення [6].

Застосування інжекційних пальників дало змогу спростити конструкцію побутових газових плит та відмовитися від пристроїв для примусової подачі (нагнітання) повітря. У сучасних газових плитах використовуються пальники, які мають діаметр вогневого насадку 4–10 см, теплову потужність 0,7–3,5 кВт. У табл.3 наведенні характеристики вогневого насадку, а також потужності сучасних побутових газових плит.

Значна кількість виробників побутових газових плит у власних інструкціях не зазначають ККД при використанні палива за допомогою пальників, які встановлюються на плиті. В інструкціях окремих виробників вказано, що ККД > 54 %. У деяких інструкціях дублюється інформація з ДСТУ 2204–93 та зазначається ККД > 59 % для випадку використання пальників тепловою потужністю більше 1,05 кВт. Виходячи з відомої теплової потужності паль-

Таблиця 3. Характеристика вогневих насадків пальників побутових газових плит

Газова плита	Пальник малої потужності		Пальник середньої потужності		Пальник великої потужності	
	діаметр, мм	потужність, кВт	діаметр, мм	потужність, кВт	діаметр, мм	потужність, кВт
Gorenje	55	1,0	75	1,75	100	2,7
Bosch	—	1,0	—	1,7	—	3,0
Electrolux	55	1,0	71	2,0	102	3,0
Hansa	40	1,0	65	1,65	90	2,6
Gefest	—	0,7	—	2,0	—	3,05
Cezaris	—	0,9	—	2,0	—	3,0
Beko	45	1,0	79	2,0	90	2,9

ників, можна визначити наближене значення витрат газу ($м^3/год$) для пальників різної потужності N (кВт) (див. табл.3):

$$\dot{V} = 3600\ N/(Q_l^p \eta), \qquad (8)$$

де Q^p_l — теплота згоряння палива, яке використовується у плиті, $кДж/м^3$; η — ККД досліджуваного пальника.

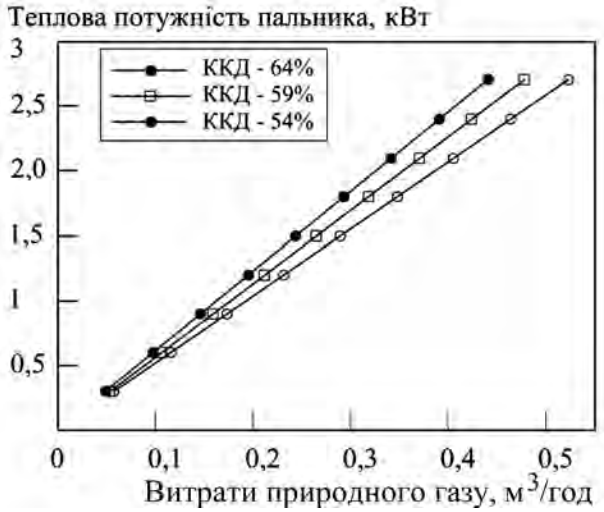

Рис.8. Залежність витрат природного газу для пальників побутових плит від теплової потужності.

Для відповідних значень теплової потужності пальників, які встановлюються на плитах, витрати природного газу можна визначити з урахуванням ККД використання палива за даними рис.8. У газових плитах передбачено регулювання подачі газу в діапазоні 1 : 4, тобто режим мінімального теплового навантаження складає 25 % витрат від максимальних витрат газу. У технічних характеристиках побутових газових плит для пальників різної теплової потужності вказані діаметри отворів у соплах, через які подається газ, а також наведені витрати природного газу (табл.4). Розміри вихідних отворів вогневого насадку пальників газових плит наведені у табл.5.

2. Крок розміщення отворів вогневого насадку пальника впливає на характеристики поодиноких факелів та відповідних груп факелів, з огляду на що його слід розглядати сумісно з іншими параметрами та характеристиками: геометричними (форма та розміри вогневих отворів, наявність стабілізуючих елементів), режимними (потужність пальника, умови експлуатації). На факельний процес впливають склад газоповітряної суміші та конструкція пальника, а також окремих його вузлів.

2.1. Існує декілька підходів для обгрунтування кроку розміщення вогневих отворів

Таблиця 4. Технічні характеристика пальників газових плит

Плита (країна)	Пальник малої потужності			Пальник нормальної потужності			Пальник великої потужності		
	номінальна потужність, кВт	діаметр сопла, мм	витрати газу, $м^3/год$	номінальна потужність, кВт	діаметр сопла, мм	витрати газу, $м^3/год$	номінальна потужність, кВт	діаметр сопла, мм	витрати газу, $м^3/год$
AEG/Electrolux	1,0	0,70	0,095	2,0	0,96	0,190	3,0	1,19	—
Beko (Турція)	1,0	0,82	0,095	2,0	1,02	0.190	2.9	1.21	0,275
Bosh (Німеччина)	1,0	0,72	0,095	1,75	0,97	0,167	3,6	1,35	0,342
Gorenje (Словенія)	1,0	0,77	0,09521	1,9	1,04	0,189	3,0	1,29	0,286
Hansa (Польща)	1,0	0,72	0,095	1,8	0,98	0,171	2,8	1,17	0,267
Kaiser (Німеччина)	—	0,75	—	—	1,09	—	—	1,24	—
Gefest (Білорусь)	0,7	0,61	—	2,0	1,04	—	3,05	1,26	—
NORD (Україна)	0,75	0,68	—	1,7	1,10	—	2,65	1,40	—

Примітка. Дані взяті з технічної документації виробників відповідних газових плит (паливо — природний газ G-20, тиск 2 кПа).

(burner ports) у насадку (або головці) пальника (burner head) [30]. Мається на увазі врахування компоновки факелів у насадку для забезпечення взаємного підпалу струменів газоповітряної суміші за рахунок тепломасообміну між гарячими продуктами згоряння або їх стабілізацію. У рамках іншого прийому використовуються окремі стабілізуючі струмені, що подаються із зменшеною швидкістю та зазвичай мають малий характерний розмір (діаметр, діагональ).

На рис.9 представлена схема формування та взаємодії факелів, що організовані пальником газової плити, за умови варіювання кроку розміщення отворів між окремими факелами. При взаємному перетині струменів утворюються об'ємні зони контакту (ЗК) та умовні поверхні контакту (ПК). Зближення факелів між собою та скорочення кроку (s′ замість s) супроводжується збільшенням ПК, а також об'єму ЗК. Водночас можна прогнозувати збільшення висоти повисання фронту запалювання (hf′ замість hf), а також підвищення вірогідності злиття зазначених факелів.

Мінімальний розмір отворів, як правило, становить не менше 1 мм, що пов'язано із намаганням попередити перекриття отворів через їхнє забруднення. Максимальний крок отворів пальника визначається можливістю передачі полум'я від отвору до отвору. Мінімальний крок отворів визначається попередженням злиття факелів, що формуються суміжними отворами. Злиття факелів необхідно уникати, тому що при цьому ускладнюється доступ вторинного повітря до факелів, погіршуються умови утворення вторинної горючої суміші, полум'я витягується та може виходити за бажані межі зони горіння. У такому випадку порушується нормальний процес теплової обробки продуктів у посуді на газовій плиті.

2.2 Для пальників сучасних газових плит необхідно враховувати наявність у вогневих отворах основних, а також стабілізуючих елементів. Відношення s/d_e при цьому потрібно розраховувати, маючи на увазі складний профіль вогневих отворів. Для розрахунку відносного кроку вогневих отворів необхідно визначити еквівалентний діаметр поодинокої факельної системи, що припадає на отвори відповідного сектору насадку. Якщо насадок складається з n типових секторів, треба розглядати n^{-1} частину загальної кількості та площі отворів насадку. При цьому крок s сектору дорівнює хорді сектору. Еквівалентний діаметр отворів d_e для виділеного сектору вогневого насадку, в який входять основні та стабілізуючі елементи, можна знайти за таким виразом:

$$d_e = 4\, F_\Sigma / \Pi_\Sigma, \qquad (9)$$

де

$$F_\Sigma = F_i + F_j;\ \Pi_\Sigma = \Pi_i + \Pi_j;\ F_i = \Sigma f_i;$$
$$F_j = \Sigma f_j;\ \Pi_i = \Sigma \pi_i;\ \Pi_j = \Sigma \pi_j, \qquad (10)$$

де f_i, f_j та π_i, π_j — розрахункові площі та периметри окремих основних та стабілізуючих елементів виділеного сектору вогневого насадку відповідно.

Продемонструємо на прикладі вплив наявності та розміру стабілізуючих елементів вогневого насадку. Розглянемо два вогневих насадки, де як основні (характерний розмір d_i) та стабілізуючі (відповідний розмір d_j) елементи є круглі отвори, діаметри яких співвідносяться

Таблиця 5. Розміри вихідних отворів вогневого насадку пальників газових плит

Виробник	Пальник малої потужності		Пальник нормальної потужності		Пальник великої потужності	
	I	II	I	II	I	II
Gorenje	39	≈ 174	63	≈ 206	87	≈ 270
Веко	45	≈ 155	79	≈ 203	90	≈ 264
КГА	—	—	65	≈ 378	—	—

Примітка. I — Діаметр вогневого насадку, мм; II — загальна площа вихідних отворів вогневого насадку, мм^2.

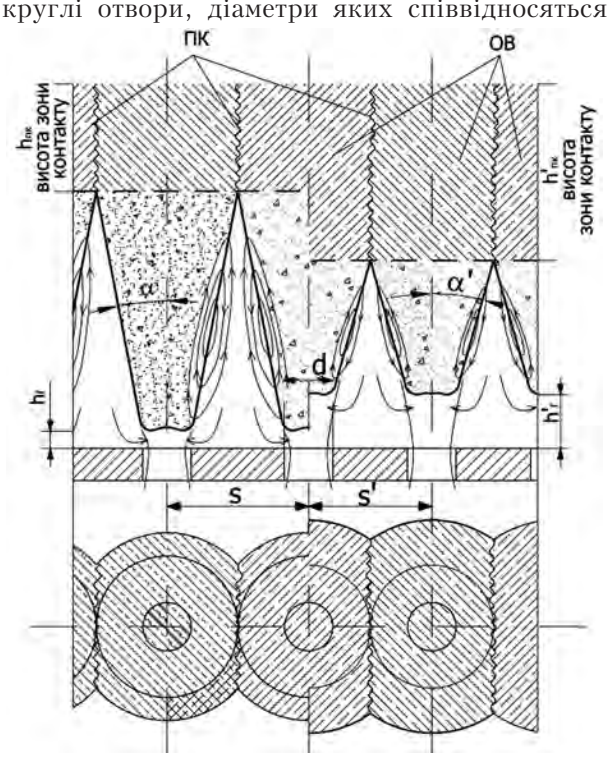

Рис.9. Схема формування та повисання факелів біля вогневих отворів насадку при варіюванні кроку розміщення отворів (перехід від кроку s до кроку s′).

між собою як $d_i = 3d_j$. У першому вогневому насадку дев'ять стабілізуючих отворів, у другому — один.

1-й насадок. Якщо діаметр стабілізуючого отвору $d_j = 1/3\ d_i$, тоді площа його становить $f_j = \pi\ d_i^2/36$. Сумарна площа 9-ти стабілізуючих отворів та одного основного (у цілому площа окремої факельної щілини для окремого сектору вогневого насадку) дорівнює:

$$F_\Sigma = \pi\ d_i^2/4 + 9\ \pi\ d_i^2/36 = \\ = 2\ \pi\ d_i^2/4 = \pi\ d_i^2/2. \qquad (11)$$

Периметр поодинокої факельної щілини для сектору насадку складає:

$$\Pi_\Sigma = \pi\ d_i + 9\ \pi\ d_i/3 = 4\ \pi\ d_i. \qquad (12)$$

Еквівалентний діаметр $d_e = 4\ F_\Sigma/\Pi_\Sigma = 1/2\ d_i$.

2-й насадок. Сумарна площа одного стабілізуючого отвору та одного основного (площа окремої факельної щілини сектору вогневого насадку) дорівнює:

$$F_\Sigma = \pi\ d_i^2/4 + \pi\ d_i^2/36 = 9\ \pi\ d_i^2/36 + \\ +\ \pi\ d_i^2/36 = 10\ \pi\ d_i^2/36. \qquad (13)$$

Периметр поодинокої факельної щілини сектору насадку складає:

$$\Pi_\Sigma = \pi\ d_i + \pi\ d_i/3 = 4/3\ \pi\ d_i. \qquad (14)$$

Еквівалентний діаметр $d_e = 4\ F_\Sigma/\Pi_\Sigma = 5/6\ d_i$.

З приведених розрахунків видно, що збільшення числа та площі стабілізуючих отворів призводить до скорочення еквівалентного розміру вогневого отвору d_e. У свою чергу, в умовах фіксованого абсолютного кроку s при розміщенні факелів це збільшує відносний крок s/d_e. За таких умов при збільшених відстанях між щілинами основний вплив на стабільність горіння замість взаємопідпалу окремих факелів припадає на стабілізацію основних факелів у кожному секторі насадку за рахунок дії відповідних секторальних стабілізуючих струменів меншого розміру та швидкості.

3. У довіднику О.С.Іссерліна [36] наведені рекомендації щодо розміщення вогневих отворів з огляду на формування факелів у залежності від коефіцієнта надлишку первинного повітря $\lambda_1 = \lambda_{pr} \in \{0{,}2;\ 0{,}6\}$. Збільшення λ_{pr} зменшує крок. При цьому введено два поняття про відповідні відстані між отворами: максимальну, що забезпечує легкість запалювання та передачі вогню, та мінімальну, що забезпечує відсутність злиття факелів. Експериментально показано, що у випадку вільного факелу, що розвивається при спалюванні газу в навколишньому повітрі, зменшення коефіцієнту надлишку λ_1 дає змогу розширити діапазон стійкого горіння. Мається на увазі, що внаслідок відповідного збільшення швидкості зриву полум'я при зменшенні λ_1, тобто при переході до дифузійного спалювання, розширюються межі стійкого горіння [29]. Подібні закономірності одержані у дослідах О.М.Левіна [3].

Взагалі критеріальна обробка експериментальних даних щодо стійкості спалювання з огляду на виникнення зриву або проскоку полум'я дає задовільний результат з одержанням критеріального рівняння [36]:

$$Pe_{dest} = Pe_н^{1/n}\ \lambda^m, \qquad (15)$$

де Pe_{dest} — число Пекле, визначене за швидкістю потоку газоповітряної суміші, тобто швидкості її потоку w_{dest}, що відповідає переходу від рекомендованого робочого до неробочого режиму пальника, тобто до режимів, які супроводжують небажані ускладнення: зрив або подекуди повисання потоку, проскок, виникнення жовтих кінчиків полум'я на виході з вогневого отвору, що супроводжується порушенням стабільності горіння, $Pe_{dest} = w_{dest}\ d/a$; $Pe_н$ — число Пекле, що відповідає режиму течії при характерній швидкості витікання суміші, яка дорівнює швидкості нормального розповсюдження полум'я газоповітряної суміші складу, що розглядається, $Pe_н = u_п\ d/a$ (тут d — характерний розмір (діаметр) вогневих отворів; a — коефіцієнт температуропровідності газоповітряної суміші складу, що аналізується).

З огляду на рівняння (15) можна стверджувати, що кожний критичний за швидкістю режим залежить від типу палива: припустимі значення вихідних швидкостей потоку w_{dest} для проскоку та відриву полум'я збільшуються для палив із підвищеною швидкістю нормального розповсюдження полум'я: $w_{dest} \sim u_n^{1/n}$.

Скорочення кроку розміщення отворів на вогневому насадку призводить до збільшення поверхонь контакту (ПК) між окремими газоповітряними струменями (див. рис.9), збільшення вакууму (негативного тиску) між ними та в певній мірі до додаткового (окрім скорочення s/d_e) зближення струменів між собою внаслідок викривлення осей струменів.

У табл.6 наведені значення відносного кроку s/d_e вогневих отворів у вогневих насадках пальників з однорядним виходом газоповітряної суміші.

Таблиця 6. Відносний крок вогневих отворів s/d_e пальників побутових газових плит

Виробник	Пальник малої потужності	Пальник нормальної потужності	Пальник великої потужності
Gorenje	3,0	3,68	3,0
Beko	3,87	4,74	4,69
КГА	–	2,2	–

4. Перші генерації пальників газових плит визначалися способом подачі на спалювання первинної газоповітряної суміші за допомогою однорядно розташованої системи вогневих отворів. Для об'єктивності слід визнати, що були відомі системи з кільцевими головками та двома поясами вогневих отворів для подачі газоповітряної суміші із змішувача: по радіусах назовні та по радіусах у напрямку осі головки. Конструкція такого пальника наведена на рис.10 [30].

Сучасні пальникові системи відрізняються наявністю вогневих отворів у сполученні зі стабілізуючими елементами іншої геометрії та різних розмірів.

Конструктивно стабілізуючі елементи (щілини) мають менший характерний розмір, ніж основні отвори, та у поєднанні з кришкою вогневого насадку чинять більший аеродинамічний опір витіканню суміші зі стабілізуючих щілин. Це призводить до зменшення швидкості руху суміші у стабілізуючих елементах, зниження локальних швидкостей протоку в стабілізуючих елементах у сполученні із меншими характерними розмірами сприяє забезпеченню стійкості горіння основного факела.

Інша особливість сучасних пальників побутових газових плит — використання декількох поясів спалювання, розташованих на єдиному вогневому насадку. На рис.11 приведено зовнішній вигляд пальників побутових плит з одним та трьома рядами вогневих отворів відповідно. Існують конструкції пальників, де напрямки подачі газоповітряної суміші мають єдиний вектор (здебільшого вздовж радіусів —

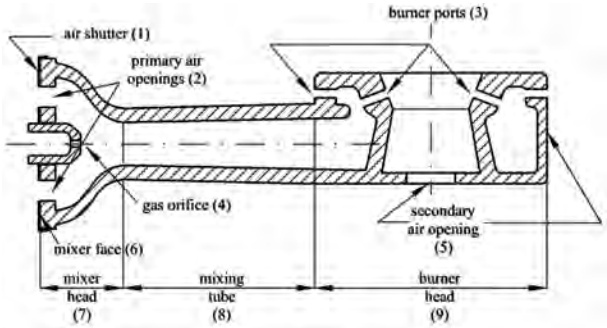

Рис.10. Газовий атмосферний пальник [30]: 1 — кришка для регулювання підводу первинного повітря; 2 — отвори підводу первинного повітря; 3 — вогневі отвори пальника; 4 — газове сопло; 5 — отвір для підводу вторинного повітря (для допалювання факелів первинної суміші у вторинному (дифузійному) факелі); 6 — торцева поверхня змішувача; 7 — конфузорна головка змішувача; 8 — змішувач у вигляді труби Вентурі (змішувальна труба); 9 — головка пальника (вогневий насадок).

а

б

Рис.11. Зовнішній вигляд пальника з одним (а) та трьома (б) рядами вогневих отворів, виробник Sabaf (Італія).

Таблиця 7. Характеристики номінального режиму використання газу в сучасних кухонних плитах

Виробник	Пальник малої потужності				Пальник нормальної потужності				Пальник великої потужності			
	витрати газу, $м^3/год$	діаметр отвору сопла, мм	швидкість потоку, м/с	число Re	витрати газу, $м^3/год$	діаметр отвору сопла, мм	швидкість потоку, м/с	число Re	витрати газу, $м^3/год$	діаметр отвору сопла, мм	швидкість потоку, м/с	число Re
Beko	0,095	0,82	49	4282	0.190	1,02	64	6885	0,275	1.21	66	8400
Bosh	0,095	0,72	64	4877	0,167	0,97	62	6363	0,342	1,35	66	9363
Gorenje	0,095	0,77	56	4560	0,189	1,04	61	6717	0,286	1,29	60	8166
Hansa	0,095	0,72	64	4877	0,171	0,98	63	6449	0,267	1,17	69	8435

Примітка. Номінальне значення числа Рейнольдса розраховано при максимальній витраті газу.

назовні). Такий підхід використовується для пальників малої та нормальної потужності. Для пальників великої потужності використовують вогневі насадки, які мають три пояси вогневих отворів, в одному з яких отвори мають спрямованість по радіусах до осі вогневого насадку (див. рис.11).

5. Критичне значення числа Рейнольдса для струменю дорівнює Re_{cr} = 5–10 [37]. Беручи до уваги дуже низькі значення критичних чисел Re_{cr} для переходу від ламінарного до турбулентного режиму у випадку струменевих течій та витікання з сопла, можна з впевненістю стверджувати, що ежекційні пальники газових плит працюють виключно в режимі розвиненої турбулентності в усьому діапазоні регулювання подачі газу в пальник. Режим розвиненої турбулентності в проточній частині пальника забезпечує ежекцію первинного повітря у змішувач завдяки витоку газового струменю всередину змішувача та удару об стінки останнього в умовах достатнього кута розкриття струменю 20–30°, взагалі характерного для турбулентних течій та ще збільшеного внаслідок течії газового струменю з густиною ρ_g у середовищі з більшою густиною (ρ_{air}): $\rho_{air} > \rho_g$. Окрім розміру отворів та кроку між ними, важливим є гідродинамічний режим руху при подачі газоповітряної суміші на спалювання. Режим руху (число Re) газоповітряної суміші з отворів вогневого насадку для більшості пальників є змінним, може бути турбулентним, ламінарним та перехідним (табл.7).

Перехід від ламінарного до турбулентного режиму течії газоповітряної суміші з факельних щілин призводить до різкої зміни форми факелу, а також до збурювання процесів тепломасообміну в зоні горіння. Інтенсифікація процесів перемішування продуктів згоряння з свіжою газоповітряною сумішшю обумовлює збільшення швидкості горіння та турбулентного розповсюдження полум'я.

Висновки

З огляду на безпосередній контакт споживачів газового палива з продуктами згоряння, зокрема зі шкідливими викидами саме в умовах приготування їжі, основним при роботі кухонних плит слід вважати екологічний аспект їхньої експлуатації.

На сучасному етапі Україна використовує найменш жорстку систему регламентації забруднених викидних газів з газових кухонних плит, незважаючи на випереджаючі темпи побутового споживання природного газу, а також зростання кількості споживачів.

1. З огляду на ігнорування світових тенденцій зменшення шкідливих викидів при роботі газового обладнання в обмеженому просторі кухонних приміщень, особливо при відсутності аспіраційних пристроїв та систем вентиляції приміщень, у даний час необхідно:

— одержати адекватну картину забруднення навколишнього середовища шкідливими викидами при роботі атмосферних пальників;

— вивчити сучасний стан розробки та практичного впровадження перспективних конструкцій пальникових систем для кухонних плит;

— провести комплексні дослідження та розробки з метою підвищення енергетичної ефективності використання палива та скорочення шкідливих викидів при спалюванні газу в атмосферних пальниках кухонних плит.

2. Побутові газові плити є суттєвим джерелом небезпечних викидів: NO_x (перш за все з огляду на пряме утворення викидів NO_2) та CO. Аналіз нормативних документів України у порівнянні зі стандартами та нормами США, ЄС, Росії, Китаю, Австралії свідчить про те, що окремі показники побутових газових плит в Україні мають бути терміново переглянуті у бік більш жорстких обмежень. Нормативи викидів оксидів азоту в Україні мають у кілька разів більші значення у порівняння з регіональними обмеженнями, що діють в США та Китаї. При визначенні шкідливих викидів побутових газових плит враховується наявність та конструкція вентиляційної системи. Вважається, що потенційна небезпека безпосереднього контакту зі шкідливими речовинами продуктів згоряння існує для дорослих, які займаються приготуванням їжі, а також для дітей віком до 5 років.

3. Проведений аналіз основних конструкцій пальників газових побутових плит, що експлуатуються у житлово-комунальному секторі України.

Приведений огляд основних технічних характеристик пальників газових побутових плит різних виробників.

4. Узагальнені характеристики типороз- мірів пальників різної потужності окремих виробників газових побутових плит. Визначені представницькі геометричні та режимні критерії організації спалювання газу в пальниках кухонних плит, у тому числі щодо характерних розмірів вогневих отворів, кроку їхнього розміщення, випускних швидкостей, чисел Рейнольдса.

5. Проаналізовані фізико-хімічні засади нормального спалювання газу в атмосферних ежекційних пальниках, а також щодо забезпечення стійкості процесу горіння та стабільності факелів. Серед чинників дестабілізації факельного процесу в рамках згаданого аналізу розглядаються такі форми порушення стабільного горіння (unstable combustion/unstabilities):

проскок (flashback), відрив або повисання факелів (blowout or flame lifting), виникнення жовтих кінчиків полум'я (yellow tips).

6. Запропонований спосіб узагальнення індикаторів порушення стабільного спалювання для пальників окремих конструкцій та типорозмірів через побудову діаграми визначення зони стабільного горіння в координатах (лінійна швидкість витікання суміші з вогневих отворів — коефіцієнт надлишку повітря). Представлені прості залежності для визначення зазначених вище (п.4) характеристик порушення стабільної роботи пальників через діаграму теплового навантаження пальників, що розглядаються.

7. Коефіцієнт корисної дії пальників сучасних побутових газових плит залежить від багатьох факторів, до яких можна віднести склад газу, потік ежектованого первинного повітря, відстань від пальника до поверхні, яка нагрівається, діаметр та площу цієї поверхні, а також інші фактори. У державному стандарті рекомендовані значення ККД пальників газових побутових плит не менше 59 %. Слід вважати доцільним подальше удосконалення конструкцій пальників з метою підвищення енергетичної ефективності газової плити.

Умовні позначення

T – температура, К
u_n – нормальна швидкості розповсюдження полум'я, м/с
a – коефіцієнт температуропровідності
τ – час, с
W – швидкість витоку газоповітряної суміші суміші, м/с
E – енергія активації, кДж/моль
R – універсальна газова стала, Дж/кг·К
q_b – питоме теплове навантаження, MBtu/hr (in)^2
λ – коефіцієнт надлишку повітря
L – об'ємне стехіометричне число
Ф – надлишок палива
– витрата природного газу, м^3/год
N – теплова потужність пальника, (кВт)
Q^p – нижча теплота згоряння природного газу; МДж/м^3
η – ККД пальника
s′ – відстань між отворами вогневого насадку, мм
h – висота повисання фронту запалювання, мм
Pe – критерій Пекле
d – діаметр отвору, мм
F – площа, м^2
П – периметр, м
ρ – густина, кг/м^3

Індекси

ig – самозапалювання
ch.r – хімічна реакція
f – паливо
L – нижча теплота згоряння
pr – первинне
i – деяка точка
fb – проскок полум'я
*l*f – повисання полум'я
bo – відрив полум'я
yt – жовті язики полум'я
st – стехіометрія
dest – деструктивний режим
n – показник степені
m – показник степені
e – еквівалентний
cr – критичний режим
g – газ
air – повітря

Список літератури

1. Динаміка використання природного газу в Україні 23.02.2016. — http://naftogaz-europe.com/article/ua/gasconsdyn 2015ukr
2. Нафтогаз опублікував основні показники діяльності газового ринку України за 2016 рік. — http://www.naftogaz.com./www/3/nakweb.nsf/0/E8A50F7214508AE8C22580BC00440E84?OpenDocument
3. Левин А.М. Принципы рационального сжигания газа. — Л. : Недра, 1977. — 247 с.
4. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М. : Мир, 1968. — 592 с.
5. Спейшер В.А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. — М. : Энергия, 1967. — 250 с.
6. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Выгдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. — Л. : Недра, 1990. — 762 с.
7. Пальгунов П.П., Исаев В.Н. Санитарно-технические устройства и газоснабжение зданий. — М. : Высш. шк., 1982. — 343 с.
8. Стаскевич Н.Л.,. Выгдорчик Д.Я Справочник по сжиженным углеводородным газам. — Л. : Недра, 1986. — 543 с.
9. ДСТУ 2204–93. Плити газові побутові. Загальні технічні умови. — Введ. 30.06.93.
10. Weber E.J. Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. — N.Y. : The Industrial Press, 1966. — P. 12/239–12/252.
11. Beijing's Burning Issue. — https://www.cibsejournal.com/arhive/PDFs/CIBSE-Journal-2017-06. pdf
12. Cooking Up Indoor Air Pollution. — https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/122/1/ehp.122-A27.pdf.
13. ДБН В.2.2–15–2005. Житлові будинки основні споруди. Основні положення. — Введ. 01.01.06.
14. ГОСТ Р 50696–94. Плиты газовые бытовые. Общие технические условия. — Введ. 28.07.94.
15. EN 30–1–1:2008 +A3 2013. Domestic cooking appliances burning gas – Part 1 – 1: Safety General.

16. Directive (EU) 2015/2193. On the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants.
17. ANSI Z21.1–2016/CSA 1.1–2016. Household cooking gas appliances.
18. RULE 1147. NO_x reductions from miscellaneous sources. — http://www.aqmd.gov/docs/default-source/rule-book/reg-xi/rule-1147.pdf
19. GB 16410. Domestic gas cooking appliances.
20. DB 11/139–2015. Air Pollutant Release for Boilers.
21. AS 5263.0–2013. Gas appliances General requirements.
22. Chemsafe, Database of evaluated safety characteristics, DECHEMA, BAM und PTB, Frankfurt/M., Germany, Update 2006.
23. Zabetakis M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapours, U.S. Department of Mines, Bulletin 627. — Washington, 1965. — 121 p.
24. Reed R.J. North American Combustion Handbook. Vol. 1: Cjmbustion, Fuels, Stoichiometry, Heat transfer, fluid flou. — Clevland : North America Manufacturing Company, 1986.
25. Gas Encyclopedia Air Liquide. — https://encyclopedia.airliquide.com/.
26. ISA–TR 12.13–01–1999 (R200X). Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Draft technical report.
27. ГОСТ Р 51330.19–99. Электрооборудование взрывозащищенное. Ч. 20. Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования. — Введ. 09.12.99.
28. Новожилов Б.В. Горение. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров. — М. : Сов. энцикл., 1984. — С. 134–135.
29. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецький Д.А. Турбулентное и гетерогенное горение. Ч. 2. — М. : Изд-во Моск. механ. ин-т, 1947.
30. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Ch. 12. Gas burner design. — N.Y. : The Industrial Press, 1966. — P. 12/193–12/194.
31. Якубчик П.П., Татура А.Е., Черников Н.А., Продоус О.А. Справочник по инженерному оборудованию жилых и общественных зданий. — Киев : Будивэльнык, 1989. — 360 с.
32. Кязимов К.Г. Справочник работника газового хозяйства. — М. : Высш. шк., 2006. — 278 с.
33. Ионин А.А. Газоснабжение : Учеб. для вузов. — М. : Стройиздат, 1989. — 439 с.
34. Иссерлин А.С. Газовые горелки. — Л. : Недра, 1973. — 188 с.
35. Горелки стола бытовых газовых плит. — https://www.c-o-k.ru/articles/gorelki-stola-bytovyh-gazovyh-plit.
36. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива : Справ. пособие. — Л. : Недра, 1987. — 336 с.
37. Теория турбулентных струй / [Г.Н.Абрамович, Т.А.Гиршович, С.Ю.Крашенинников и др.]. — М. : Наука, 1984. — 716 с.

Надійшла до редакції 04.08.17

Сорока Б.С., *докт. техн. наук, проф.,* ***Горупа В.В.***
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. 1. Современное состояние и определяющие характеристики сжигания газа в бытовых газовых плитах

В Украине потребление природного газа в промышленности и энергетике в последние годы уменьшается вследствие кризисных явлений в экономике страны, в некоторой степени благодаря внедрению возобновляемых источников энергии, а также альтернативных технологий. В то же время в коммунально-бытовом секторе объемы использования газового топлива растут за счет увеличения количества потребителей. Наиболее часто природный газ используется в быту для обогрева помещений и приготовления пищи. Эти статьи расходов газа в Украине уже превышают расходы газа в промышленности. Приготовление пищи осуществляется непосредственно в жилых помещениях, которые обычно не соответствуют Государственным строительным нормативам Украины в отношении работы системы проветривания. Использование природного газа в бытовых газовых плитах имеет важное значение с точки зрения контроля выбросов вредных компонентов продуктов сгорания, а также энергетических характеристик использования природного газа. В состав основных загрязнителей окружающей среды при сжигании природного газа в газовых плитах относят NO_x (в основном высокотоксичный NO_2), CO,

CH_2O, а также углеводороды (несгоревшие UHC и полиароматические PAH). Приведен обзор нормативных документов, регламентирующих выбросы CO и NO_x для Украины в сравнении со стандартами США, ЕС, России, Австралии и Китая. Представлены конструкции горелок бытовых газовых плит, их основные характеристики: мощность, расход природного газа, диаметры сопел, диаметры огневых насадок, шаг огневых отверстий и др. Проанализированы современные физико-химические основы сжигания газа в атмосферных эжекционных горелках газовых плит, учитывая стабилизацию процесса горения и обеспечение устойчивости факелов. Среди факторов дестабилизации факельного процесса в рамках упомянутого анализа рассматриваются следующие формы нарушения стабильного горения: проскок, отрыв или повисание факелов, а также возникновение желтых кончиков пламени. *Библ. 37, рис. 11, табл. 7.*
Ключевые слова: бытовые газовые плиты, эжекционные горелки, проскок, отрыв или повисание факелов, желтые концы пламени, первичный коэффициент избытка воздуха.

Soroka B.S., *Doctor of Technical Sciences, Professor,* ***Horupa V.V.***
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtiarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: boris.soroka@gmail.com

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

Natural gas NG consumption in industry and energy of Ukraine, in recent years falls down as a result of the crisis in the country's economy, to a certain extent due to the introduction of renewable energy sources along with alternative technologies, while in the utility sector the consumption of fuel gas flow rate enhancing because of an increase the number of consumers. The natural gas is mostly using by domestic purpose for heating of premises and for cooking. These items of the gas utilization in Ukraine are already exceeding the NG consumption in industry. Cooking is proceeding directly in the living quarters, those usually do not meet the requirements of the Ukrainian norms DBN for the ventilation procedures. NG use in household gas stoves is of great importance from the standpoint of controlling the emissions of harmful components of combustion products along with maintenance the satisfactory energy efficiency characteristics of NG using. The main environment pollutants when burning the natural gas in gas stoves are including the nitrogen oxides NO_x (to a greater extent — highly toxic NO_2 component), carbon oxide CO, formaldehyde CH_2O as well as hydrocarbons (unburned UHC and polyaromatic PAH). An overview of environmental documents to control CO and NO_x emissions in comparison with the proper norms by USA, EU, Russian Federation, Australia and China, has been completed. The modern designs of the burners for gas stoves are considered along with defining the main characteristics: heat power, the natural gas flow rate, diameter of gas orifice, diameter and spacing the firing openings and other parameters. The modern physical and chemical principles of gas combustion by means of atmospheric ejection burners of gas cookers have been analyzed from the standpoints of combustion process stabilization and of ensuring the stability of flares. Among the factors of the firing process destabilization within the framework of analysis above mentioned, the following forms of unstable combustion/flame unstabilities have been considered: flashback, blow out or flame lifting, and the appearance of flame yellow tips. *Bibl. 37, Fig. 11, Tab. 7.*
Key words: domestic gas cookers, ejection burners, flashback, blow out or flame lifting, yellow tips of the flame, primary air axcess.

References

1. Dynamika vykorystannya pryrodnoho hazu v Ukrayini 23.02.2016. — http://naftogaz-europe.com/article/ua/gasconsdyn 2015ukr. (Ukr.)
2. Naftohaz opublikuvav osnovni pokaznyky diyal'nosti hazovoho rynku Ukrayiny za 2016 rik. — http://www.naftogaz.com./www/3/nakweb.nsf/0/E8A50F7214508AE8C22580BC00440E84?OpenDo-cument (Ukr.)
3. Levin A.M. [Principles of rational gas combustion], Leningrad : Nedra, 1977, 247 p. (Rus.)
4. L'yuis B., El'be G. [Combustion, flames and explosions of gases], Moscow : Mir, 1968, 592 p. (Rus.)
5. Speysher V.A. [Gas combustion in power plants and in industry], Moscow : Energiya, 1967, 250 p. (Rus.)
6. Staskevych N.L., Severynets H.N., Vyhdorchyk D.Ya. Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu gaza, Leningrad : Nedra, 1990, 762 p. (Rus.)
7. Pal'hunov P.P., Ysaev V.N. [Sanitary and engineering devices and gas supply the buildings], Moscow : Vyssh. shkola, 1982, 343 p. (Rus.)
8. Staskevych N.L., Vyhdorchyk D.Ya. [Liquefied hydrocarbon gases. Handbook], Leningrad : Nedra, 1986, 543 p. (Rus.)
9. DSTU 2204-93. Plyty hazovi pobutovi. Zahal'ni tekhnichni umovy, 30.06.1993. (Ukr.)
10. Weber E.J. Interchangeability of Fuel Gases. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices/ First Edition, Second Printing. Section12, Ch.14, N.Y. : The Industrial Press, 1966, pp. 12/239–12/252.
11. Beijing's Burning Issue. — https://www. cibse-journal.com/archive/PDFs/CIBSE-Journal-2017-06.pdf
12. Cooking Up Indoor Air Pollution. — https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/122/1/ehp.122-A27.pdf.
13. DBN V.2.2-15-2005. [Residential house. Basic regulations], 01.01.2006. (Ukr.)
14. GOST R 50696-94. [Household gas stoves. General specifications], 28.07.1994. (Rus.)
15. EN 30–1–1:2008 + A3 2013. Domestic cooking appliances burning gas, Part 1. – 1: Safety General.
16. Directive (EU) 2015/2193. On the limitation of emissons of certain pollutants into the air from medium combustion plants.
17. ANSI Z21.1-2016/CSA 1.1-2016. Household cooking gas appliances.
18. RULE 1147. NO_x reductions from miscellaneous sources. — http://www.aqmd.gov/docs/default-source/rule-book/reg-xi/rule-1147.pdf
19. GB 16410. Domestic gas cooking appliances.
20. DB 11/139–2015. Air Pollutant Release for Boilers.
21. AS 5263.0-2013. Gas appliances General requirements.
22. Chemsafe, Database of evaluated safety characteristics, DECHEMA, BAM und PTB, Frankfurt/M., Germany, Update 2006. (De)
23. Zabetakis M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapours, U.S. Department of Mines, Bulletin 627, Washington, 1965, 121 p.
24. Reed R.J., North American Combustion Handbook, Vol. 1: Cjmbustion, Fuels, Stoichiometry, Heat transfer, fluid flou, Clevland : North America Manufacturing Company, 1986.
25. Gas Encyclopedia Air Liquide. — https://encyclopedia.airliquide.com/.
26. ISA–TR 12.13–01–1999 (R200X). Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Draft technical report.
27. GOST R 51330.19-99. [Dust – ignition – proof construction. Part 20. Data on combustible gases and vapors related to the operation of electrical equipment], 09.12.1999. (Rus.)
28. Novozhylov B.V. [Combustion / Physical encyclopedic dictionary], Ed. A.M.Prokhorov, Moscow : Sovetskaya yentsyklopediya, 1984, pp. 134–135. (Rus.)
29. Zel'dovych Ya.B., Frank-Kamenets'kyy D.A. [Turbulent and heterogeneous combustion. Part 2, Moscow : Moscow Mekhanical Institute, 1947, 172 p. (Rus.)
30. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. Ch. 12. Gas burner design, First Edition, Second Printing, Section12, Ch.14, N.Y. : The Industrial Press, 1966, pp.12/193–12/194.
31. Yakubchik P.P., Tatura A.Ye., Chernikov N.A., Prodous O.A. [Engineering equipment for residential and public buildings. Handbook], Kiev : Budivel'nyk, 1989, 360 p. (Rus.)
32. Kyazimov K.G. [Worker's Handbook for the gas industry employee], Moscow : Vysshaya shkola, 2006, 278 p. (Rus.)
33. Ionin A.A. [Gas supply: Textbook for high schools], Moscow : Stroyizdat, 1989, 439 p. (Rus.)
34. Isserlin A.S. [Gas burners], Leningrad : Nedra, 1973, 188 p. (Rus.)
35. [Burners for the table of household gas stoves]. — https://www.c-o-k.ru/articles/gorelki-stola-bytovyh-gazovyh-plit. (Rus.)
36. Isserlin A.S. [Basics of gas fuel combustion], Leningrad : Nedra, 1987, 336 p. (Rus.)
37. Abramovich G.N., Girshovich T.A., Krasheninnikov S.Yu., Sekundov A.N., Smyrnova I.P. [The theory of turbulent jets], Moscow : Nauka, 1984, 716 p. (Rus.)

Received August 4, 2017