УДК 683.87:683.955(045)

НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА ТА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТОГО СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ В КУХОННИХ ПЛИТАХ

Частина 1. Сучасний стан та визначальні характеристики удосконалення спалювання газу в побутових газових плитах

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

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

Споживання газового палива в побуті, зокрема для приготування їжі – один з найстаріших напрямів 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.

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

Керуючись звітною інформацією «НАК Нафтогаз України» за 2016 рік, 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 в 2016 році в комунально-побутовому секторі було витрачено 11,9 млрд. $м^3$/рік. В 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.

На жаль, основні наукові дослідження та розробки, пов’язані з побутовим використанням газу, в т.ч. в Україні, відносяться до періоду післявоєнної газифікації країни (1948 – 1975р.р.) і 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 різній газовій апаратурі, яку поділяють на такі групи [6-8]:

а) прилади для приготування їжі (газові побутові плити різних конструкцій та продуктивності, автономні духові шафи);

б) прилади для гарячого водопостачання (проточні водонагрівачі);

в) прилади для індивідуального опалення;

г) прилади для освітлення;

д) прилади для спеціальних цілей (пальники інфрачервоного випромінювання).

Прилади з останніх двох груп наведеного переліку застосовуються досить рідко. Варто також зауважити, що використання проточних газових водонагрівачів теж зменшується, 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, повинні відповідати ДСТУ 2204—93 «Плити газові побутові. Загальні технічні умови». [9]. Основний тип плит, які використовуються в побуті – це стаціонарні підлогові плити 2, 3, 4 – ох – пальникові з духовою шафою. Також виготовляються настільні переносні та вбудовані газові плити. Газові плити призначені для роботи на природному газі з початковим тиском 1274 і 1960 Па, або скрапленому газі з тиском 2940Па. Відповідно до ДСТУ 2204—93 ККД газової плити відносно теплової енергії пальників столу повинен складати не менше 59%, вміст оксидів азоту в продуктах згоряння – не більше 200 мг/м^3 (≈104 ppm), вміст оксиду вуглецю в сухих нерозведених продуктах згоряння 625 мг/м^3 (0,05%). Пальники столу газової плити та їх деталі повинні 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 з шкідливими речовинами в продуктах згоряння (оксиди азоту NO_x, вуглецю CO, різноманітні вуглецеві сполуки C_nH_m, включаючи в їхньому складі 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 і навіть місцевих нормативів шкідливих викидів в окремих найбільш забруднених містах світу. Так, в 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 $[NO_x] \approx 30$ 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 залишались 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 і лише в окремих випадках лімітуюча концентрація $[NO_x]$ в продуктах згоряння знижується до 70мг/м^3 [11].

Екологічні характеристики пальників побутових газових плит

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

Як вказує 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] ≥ 2000 ppm. 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 двоокис азоту NO_2 (замість NO) одночасно з оксидом вуглецю CO та формальдегідом 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 мільйона каліфорнійців можуть бути піддані впливу рівнів CO, що перевищують стандарти для навколишнього повітря, а 12 мільйонів 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].

В 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. В роботі 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 [12].

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

Таблиця 1. Граничні концентрації викидів $[NO_x]_{lim}$, $[CO]_{lim}$, для побутових споживачів різних країн

Країна	Назва документа	$[NO_x]_{lim}$, ppm(мг/м^3)	$[CO]_{lim}$, % (об)
Україна	ДСТУ 2204-93 Плити газові побутові. Загальні технічні умови. [9]	105 (200)	< 0,05
Росія	ГОСТ Р 50696-94 Плиты газовые бытовые Общие технические условия. [14]	105 (200)	< 0,03
ЄС	Domestic cooking appliances burning gas –	—	0.10-0.20

	Part 1 – 1: Safety General. EN 30 – 1–1:2008 +A3 2013. [15]		
	Directive (EU) 2015/2193 On the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. [16]	50, min 35 (100,min 70)	—
США	ANSI Z21.1-2016/CSA 1.1-2016 - Household cooking gas appliances. [17]	+	—
	Rule 1147 NOx reductions from miscellaneous sources. [18]	30	—
Китай	GB 16410 Domestic gas cooking appliances. [19]	Max 150	0-0.2%
	DB 11/139 – 2015 Air Pollutant Release for Boilers [20]	15 (30)	—
Австралія	AS 5263.0-2013 Gas appliances General requirements. [21]	+	+

Важливими для пальників побутових газових плит є показники вмісту оксидів азоту NO_x, оксидів вуглецю CO та діоксид вуглецю CO2. Згідно з державними будівельними нормами ДБН В.2.2-15-2005 (Житлові будинки. Основні положення) [13] для приміщення типу кухня-їдальня повинна передбачатися припливна (приточна) вентиляція, яка забезпечує однократний повітрообмін. Мається на увазі, що за годину в кухню має надходити обсяг свіжого повітря, який дорівнює об'єму приміщення. Згідно з цим документом мінімальна площа кухні повинна становити не менше 7 $м^2$. Звісно, що ці норми, встановлені для сучасних будинків, в реальних умовах побутового споживання газу в Україні можуть не відповідати дійсній ситуації щодо існування та справності вентиляції.

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

Як видно з таблиці, українські нормативи суттєво відстають від усіх представлених і не мотивують впровадження заходів, спрямованих на скорочення шкідливих викидів в побуті.

Варто зауважити, що рекомендована методологія визначення оксидів азоту (ДСТУ 2204-93 «Плити газові побутові. Загальні технічні умови») побудована на використанні повільного хімічного методу, використання якого потребує залучення окремих розчинів. Відбір проб зображений з конструктивними вадами при його відображенні. Таким чином в Україні ситуація з нормами шкідливих викидів при використанні газу в побуті – взагалі та при спалюванні газу в кухонних плитах – зокрема, 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 в продуктах згоряння з атмосферних пальників, виникає висновок щодо екологічно небезпечного стану повітря кухонних приміщень в країні.

Фізико – хімічні засади спалювання газу

1. Основні наукові дослідження пальників газових плит співпали в часі зі створенням фундаментальних засад горіння, які були проведені в XX сторіччі [4]. Відповідні пальники, як правило, відносяться до складу атмосферних пристроїв спалювання попередньо підготовленої газо-повітряної суміші. Сам процес гомогенного горіння розділяється на стадії:

1) примусового запалювання з використанням зовнішнього джерела енергії (іскрове запалювання);
2) формування фронту горіння та розповсюдження полум'я в підготовленій суміші;
3) догоряння полум'я в умовах підсосу навколишнього атмосферного повітря в індивідуальні факели.

Процес примусового запалювання переходить в самопідпалюючий процес стаціонарного горіння в умовах переносу активних центрів реакції від фронту до свіжої горючої суміші. Можна вважати, що процес вигоряння факелів розпочинається з температури запалювання (самозапалювання) T_{ig}, шо визначається часом затримки спалахування (запалювання) τ_{ig}, тобто перебігом часу від попередніх хімічних реакцій, включаючи реалізацію ланцюгового механізму, до реакцій основного механізму горіння відповідного палива. В таблиці 2 наведені температури самозапалювання для деяких горючих газів.

Таблиця 2. Температура самозапалювання горючих газів

	Літературні джерела					
	[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	—

Значення представлені для стандартних умов: тиск 101,325 кПа; Т = 298 К.

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, шляхом умовної складної (приведенной (рус.)) хімічної реакції [28], що проходить в умовах прогресивного самоприскорення. Відповідні швидкості нормального розповсюдження полум'я u_n, хімічної реакції $W_{ch.r}$ визначаються якісними залежностями:

$u_n \sim \sqrt{(æ / \tau)} \sim \sqrt{(æ\, W_{ch.r})}$, [мс$^{-1}$]; (1)

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

де æ — коефіцієнт температуропровідності реагуючої суміші;

$\tau_{ch.r}$ — характерний час наведеної (приведенной (рус.)) хімічної реакції в зоні горіння з енергією активації Е та температурою горіння Т;

2. При створенні перших конструкцій атмосферних пальників використовувались та відпрацьовувалися основні положення фундаментальної дифузійно-теплової теорії ламінарного горіння (30-ті — 50-ті роки XX ст., Я.Б. Зельдович, Д.А. Франк – Каменецький), пов'язаної з 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 в 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 із вогневих отворів.

$u_f = q_b\, Q_\ell^{-1}$, (3)

Тут 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 в роботі [30] за результатами досліджень одного з контрольних пальників # 36 за умови спалювання природного газу.

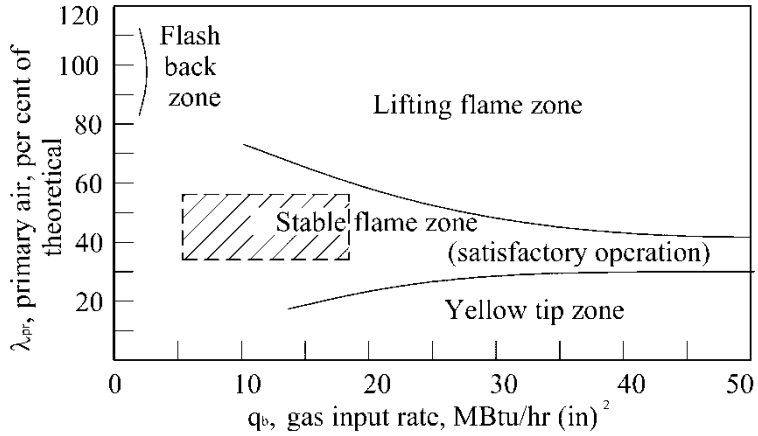

Рис 2. Залежність питомого теплового навантаження контрольного пальника від коефіцієнту надлишку первинного повітря. / Взаємне розташування зон стійкого полум'я (стабільного горіння), виникнення областей порушення стабільного горіння [30] за даними випробувань пальника # 36 при спалюванні природного газу.

3. Для одержання числових значень обмежувальних швидкостей газоповітряної суміші, відповідних тепловому навантаженню q_b, в певних точках « *i* », а також побудови граничних поверхонь (кривих) проскоку (fb) , повисання (*l*f), 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}):

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

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

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

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

де w — швидкість газоповітряної суміші для умов порушення стійкості горіння на лініях fb, *l*f, bo, yt, тобто при виникненні проскоку, повисання, відриву полум'я, або при появі жовтих кінців полум'я відповідно, м/с;

q_i — питоме теплове навантаження для деякої точки «i» на одній з ліній порушення стійкості горіння на лініях fb, *l*f, bo, yt, (проскок, повисання, відрив, поява жовтих кінців полум'я), 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.

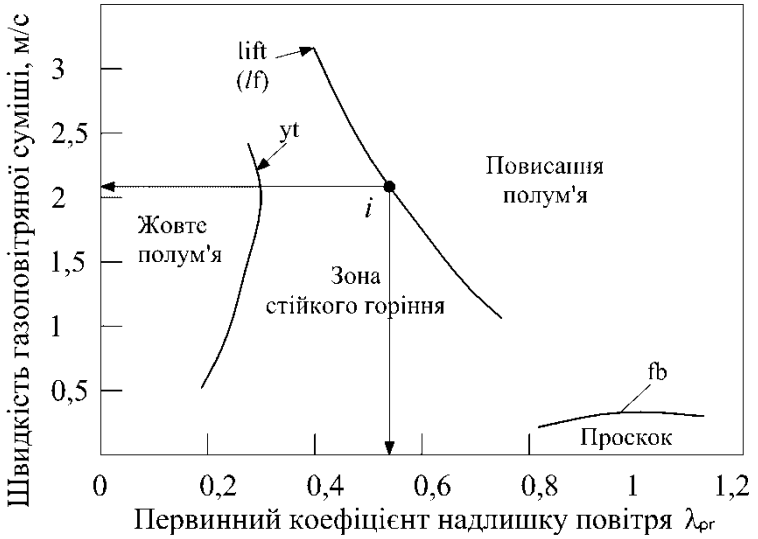

Рис 3 Взаємне розташування зони стійкого горіння та меж її порушення внаслідок повисання факелів, виникнення проскоку полум'я, появи жовтих язиків (неповне згоряння), при спалюванні природного газу з використанням пальника, характеристики якого дана на рис. 2,
« *i* » — контрольна точка

Конструкції пальників газових побутових плит

Основним конструктивним елементом побутових газових плит є газовий пальник або конфорка. В перекладі з голандської мови *komfoor* — пристрій для розпалювання вогню (толковий словник Ушакова, 1941р., етимологія слова). В 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].

Всі 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:

— пальники з горизонтальним змішувачем та периферійним підведенням вторинного повітря;

— пальники з вертикальним змішувачем та периферійним підведенням вторинного повітря;

— пальники з центральним та периферійним підведенням вторинного повітря.

В побутових газових плитах на протязі усього часу їхнього існування застосовувалися тільки інжекційні (ежекційні) пальники, звичайно із змішувачами типу труби Вентурі. На рис 2 – 4 представлені основні конструкції пальників газових побутових плит. Одна із найперших конструкцій інжекційного пальника представлена на рис 4; розробник — Санкт–Петербурзький завод газової апаратури. В пальнику регулювання витрати первинного повітря здійснювалось шибером 1. Недоліком вказаної конструкції є необхідність зняття газового пальника з плити для забезпечення доступу до регулювання подачі первинного повітря.

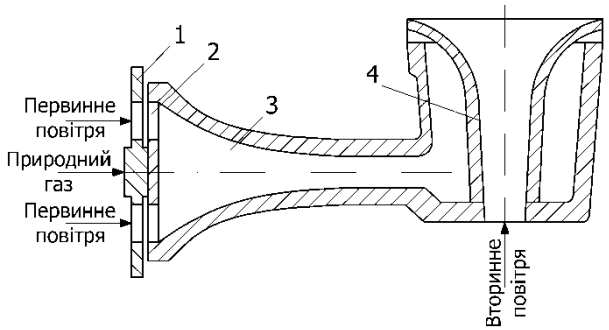

Рис. 4. Конфорочний пальник [6].
1 — рухома частина шиберу; 2 — нерухома частина шиберу, торцева поверхня пальника; 3 — змішувач; 4 — вогневий насадок.

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 включає кришку, дифузор та газове сопло) розташовані в просторі з єдиною вертикальною віссю (рис. 5). В цих пальниках змінена форма вогневого насадку для покращення підводу вторинного повітря до окремих факелів та запобігання їхнього злиття в єдиний вогневий шар (слой рус., layer англ.).

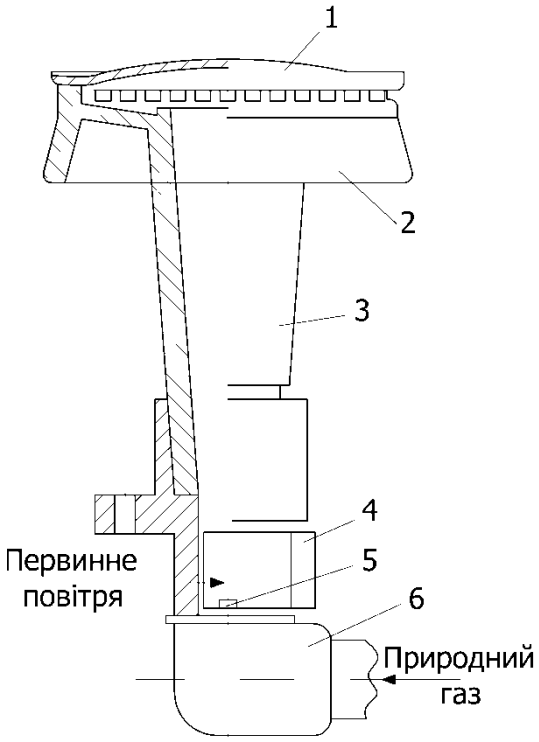

Рис. 5. Вертикальний пальник [34].
1 — кришка; 2 — вогневий насадок; 3 — дифузор; 4 — вікно для ежекції первинного повітря; 5 — сопло; 6 — корпус сопла.

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.

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

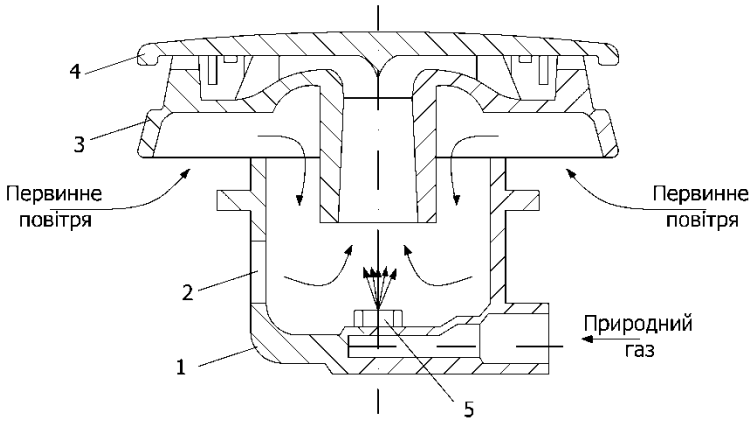

Рис. 6. Пальник сучасних побутових газових плит [35].
1 — корпус, 2 — отвір для ежекції первинного повітря, 3 — вогневий насадок, 4 — кришка, 5 —сопло.

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 із вогневого насадку, а також запалюється первинна газоповітряна суміш. Вихідні отвори (приклади див. рис. 7) можуть бути круглими (для пальників рис. 2), прямокутними (для пальників рис. 3), у вигляді трапеції та багатокутними (рис. 4).

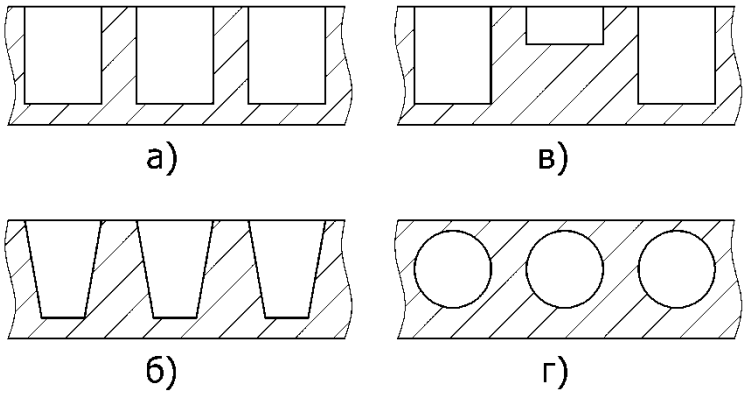

Рис 7. Форма вихідних вогневих отворів вогневих насадків пальників газових побутових плит.

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 ÷ 1,2) від номінального значення потужності [6].

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

Таблиця 3. Характеристика вогневих насадків пальників побутових газових плит

ТМ виробника газової плити	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
BEKO	45	1,0	79	2.0	90	2,9

Значне число виробників побутових газових плит у власних інструкціях не зазначають ККД при використанні палива за допомогою пальників, які встановлюються на плиті. В інструкціях окремих виробників відображена інформація про ККД > 54%. В деяких інструкціях дублюється інформація з ДСТУ 2204 — 93 та зазначається ККД не менше 59 % для випадку використання пальників тепловою потужністю більше 1,05 кВт. Виходячи з відомої теплової потужності пальників, можна визначити наближене значення витрат газу $\dot{V}_\ell$ для пальників різної потужності N (див. табл. 3).

$$\dot{V}_\ell = 3600\ N\ /(Q_\ell^P\ \eta), \qquad (м^3/год) \qquad (8)$$

де N — теплова потужність пальника, кВт;

Q_ℓ^P — теплота згоряння палива яке використовується в плиті, кДж/м^3;

η — ККД досліджуваного пальника.

Для відповідних значень теплової потужності пальників, які встановлюються на плитах, витрати природного газу можна визначити з урахуванням ККД використання палива за даними рис.8. В газових плитах передбачено регулювання подачі газу в діапазоні 1:4, тобто режим мінімального теплового навантаження складає 25 % витрат від максимальних витрат газу.

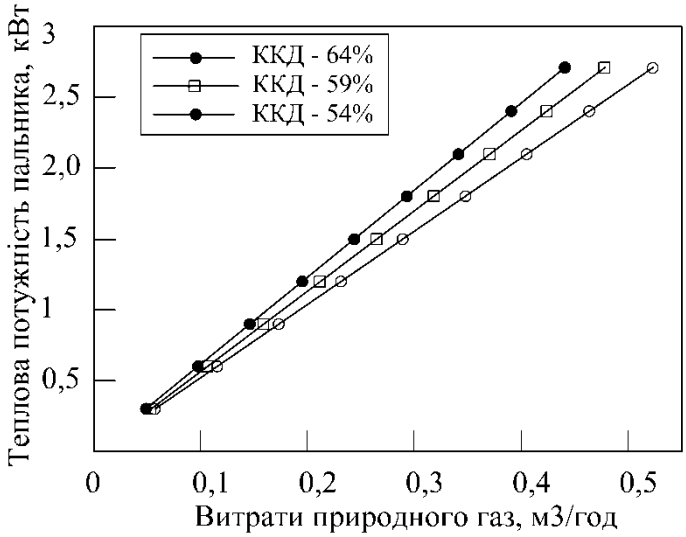

Рис. 8. Залежність витрат природного газу для пальників побутових плит від теплової потужності.

В технічних характеристиках побутових газових плит для пальників різної теплової потужності вказані діаметри отворів в соплах, через які подається газ, а також наведені витрати природного газу (див табл. 4).

Таблиця 4.Технічні характеристика пальників газових плит

Марка/ країна	Пальник малої потужності			Пальник нормальної потужності			Пальник великої потужності		
	номінальна потужність, кВт	діаметр сопла, мм	витрати газу, м3/год	номінальна потужність, кВт	діаметр сопла, мм	витрати газу, м3/год	номінальна потужність, кВт	діаметр сопла, мм	витрати газу, м3/год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AEG/ Electrolux	1,0	0,70	0,095	2,0	0,96	0,190	3,0	1,19	—
Beko (Турція)	1,0	82	0.095	2,0	1,02	0.190	2.9	1.21	0,275
Bosh (Німеччина)	1,0	0,72	0,095 15С	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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hansa(Польща)	1,0	0,72	0,095	1,8	0,98	0,171	2,8	1,17	0,267
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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	1,1	—	2,65	1,4	—

Наведені табличні дані взяті з технічної документації виробників відповідних газових плит (паливо — природний газ G-20, тиск 20 мбар = 2 кПа).

Таблиця 5. Розміри вихідних отворів вогневого насадку пальників газових плит

Виробник	Пальник малої потужності		Пальник нормальної потужності		Пальник великої потужності	
	діаметр вогневого насадку, мм	загальна площа вихідних отворів вогневого насадку, мм^2	діаметр вогневого насадку, мм	загальна площа вихідних отворів вогневого насадку, мм^2	діаметр вогневого насадку, мм	загальна площа вихідних отворів вогневого насадку, мм^2
Gorenje	39	≈ 174	63	≈ 206	87	≈ 270

Веко	45	≈ 155	79	≈ 203	90	≈ 264
КГА	—	—	65	≈ 378	—	—

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 і характеристиками: геометричними (формою та розмірами вогневих отворів, наявністю стабілізуючих елементів), режимними (потужність пальника, умови експлуатації). Зрозуміло, нарешті, що на факельний процес впливають склад газоповітряної суміші та конструкція пальника в цілому, а також окремих його вузлів.

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

На рис. 9 представлено схему 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 (h_f' замість h_f), а також підвищення вірогідності злиття зазначених факелів.

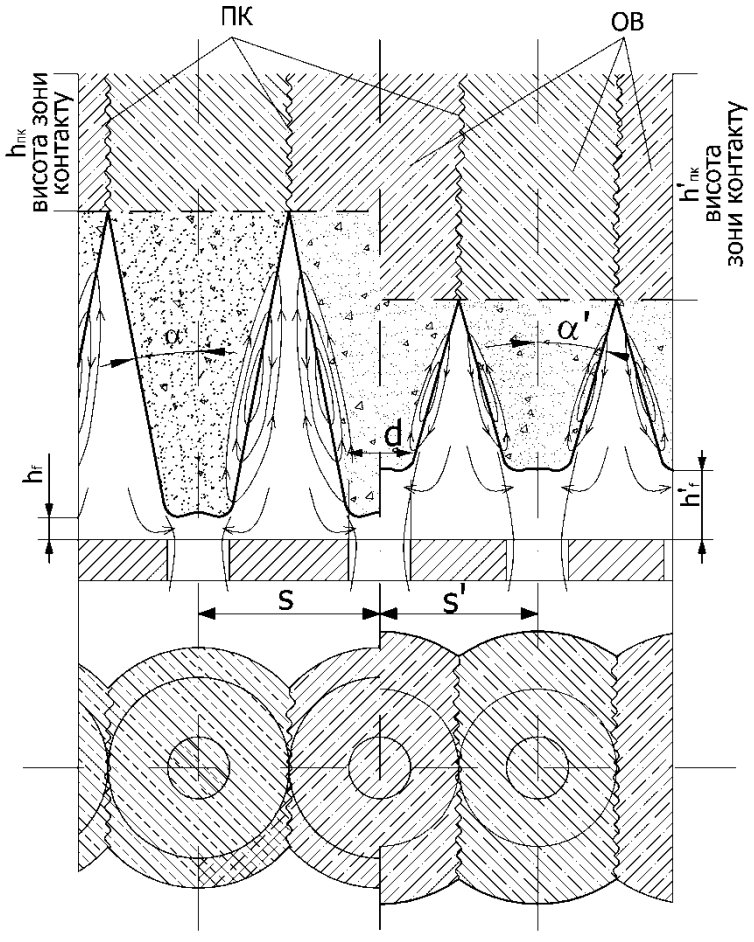

Рис 9. Схема формування та повисання факелів біля вогневих отворів насадку при варіюванні кроку розміщення отворів (перехід від кроку s до кроку s′)

Мінімальний розмір отворів, як правило, становить не менше 1мм, це 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 як основних, так і 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 наступними виразами:

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

де $F_\Sigma = F_i + F_j$; $\Pi_\Sigma = \Pi_i + \Pi_j$; $F_i = \sum f_i$; $F_j = = \sum f_j$; $\Pi_i = \sum \pi_i$; $\Pi_j = \sum \pi_j$, (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 в якості основних (характерний розмір d_i) та стабілізуючих (відповідний розмір d_j) елементів слугують круглі отвори, діаметри яких співвідносяться між собою як $d_i = 3d_j$. В першому вогневому насадку — дев'ять стабілізуючих отворів, в другому насадку — один стабілізуючий отвір.

1 – 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 (в 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 дорівнює $d_e = 4 F_\Sigma / \Pi_\Sigma = 1/2\, d_i$.

2 – 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 дорівнює $d_e = 4 F_\Sigma / \Pi_\Sigma = 5/6\, d_i$.

З приведених розрахунків видно, що збільшення числа та площі стабілізуючих отворів призводить до скорочення еквівалентного розміру вогневого отвору d_e. В 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 в кожному секторі насадку за рахунок дії відповідних секторальних стабілізуючих струменів меншого розміру та швидкості.

3. В довіднику О.С. Іссерліна [36] наведені рекомендації щодо розміщення вогневих отворів з огляду формування факелів в залежності від коефіцієнту 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 і передачі вогню, та мінімальну відстань, 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 дозволяє 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 ж закономірності одержані в 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].

$$Pe_{dest} = Pe^{1/n} \lambda^{m}, \qquad (9)$$

де $Pe_{dest} = w_{dest}d/æ$ — число Пекле, визначене за швидкістю потоку газоповітряної суміші, тобто швидкості потоку w_{dest} газоповітряної суміші, яка відповідає переходу від рекомендованого робочого до неробочого режиму пальника, тобто, до режимів, які супроводжують небажані ускладнення: (зрив (подекуди – повисання потоку), проскок, виникнення жовтих кінчиків полум'я на виході із вогневого отвору, що супроводжується порушенням стабільності горіння).

$Pe_н = u_n\ d/\ æ$ — число Пекле, що відповідає режиму течії при характерній швидкості витікання суміші, яка дорівнює швидкості нормального розповсюдження полум'я газоповітряної суміші складу, що розглядається.

d — характерний розмір (діаметр) вогневих отворів;

æ — коефіцієнт температуропровідності газоповітряної суміші складу, що аналізується.

З огляду на зазначене вище рівняння (9) 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 (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. В таблиці 6 приведені значення відносного кроку s/d_e вогневих отворів для деяких пальників побутових газових плит.

Таблиця 6. Відносний крок вогневих отворів s/d_e у вогневих насадках пальників з однорядним виходом газоповітряної суміші

Виробник	s/d_e		
	Пальник малої потужності	Пальник нормальної потужності	Пальник великої потужності
Gorenje	3,0	3,68	3,0
Веко	3,87	4,74	4,69
КГА	–	2,2	—

З. Перші генерації пальників газових плит визначались 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 радіусам назовні і по радіусам в напрямку осі головки. Конструкція такого пальника наведена на рис 10 [30].

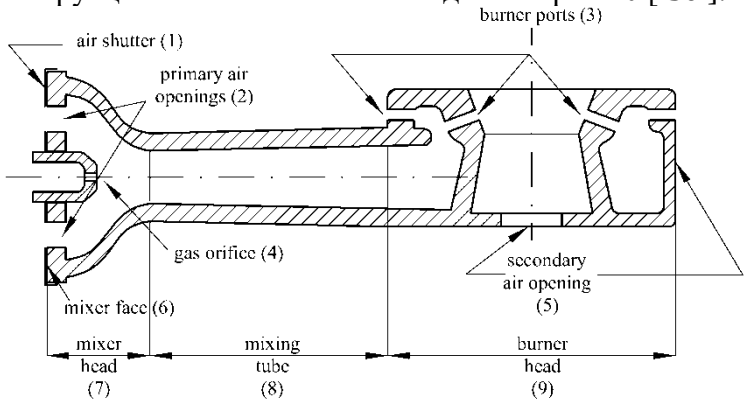

Рис. 10 Газовий атмосферний пальник [30]. 1— кришка для регулювання підводу первинного повітря; 2 — отвори підводу первинного повітря;3 — вогневі отвори пальника; 4 — газове сопло; 5 — отвір для підводу вторинного повітря (для допалювання факелів первинної суміші у вторинному (дифузійному) факелі) ;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

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

Конструктивно стабілізуючі елементи (щілини) мають менший характерний розмір, ніж основні отвори та в поєднанні з кришкою вогневого насадку чинять більший аеродинамічний опір витіканню суміші з стабілізуючих щілин . Це призводить до зменшення швидкості руху суміші в стабілізуючих елементах (рис. 11), зниження локальних швидкостей протоку в стабілізуючих

елементах в сполученні із меншими характерними розмірами сприяє забезпеченню стійкості горіння основного факела.

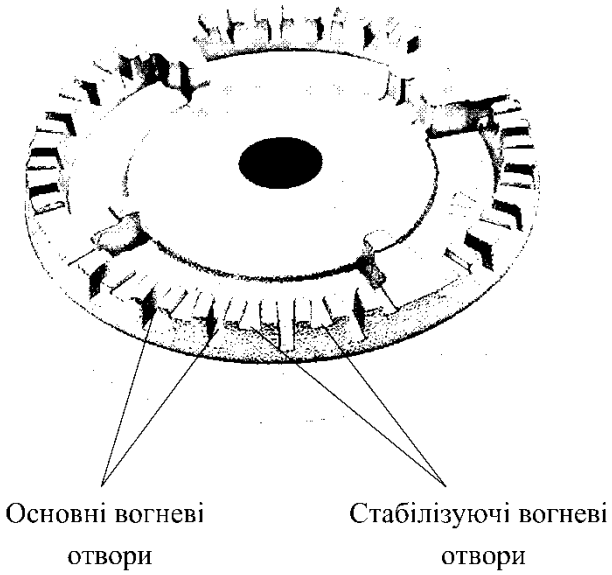

Рис 11. Зовнішній вигляд пальника з одним рядом вогневих отворів, виробник Sabaf (Італія).

Інша особливість сучасних пальників побутових газових плит — використання декількох поясів спалювання, розташованих на єдиному вогневому насадку. На рис. 11 та 12 приведені 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 — 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 (рис 12).

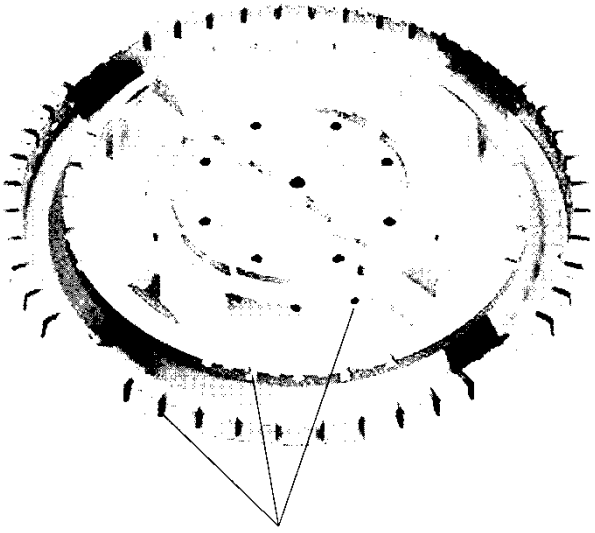

Рис 12. Зовнішній вигляд пальника з трьома рядами вогневих отворів, виробник Sabaf (Італія).

4. Як відомо, критичне значення числа Рейнольдса для струменю дорівнює $Re_{cr} = 5 \div 10$ [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 градусів, взагалі характерного для турбулентних течій та ще збільшеного внаслідок течії газового струменю із густиною ρ_g в середовищі із 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 із отворів вогневого насадку для більшості пальників є змінним, може відноситися до турбулентного, ламінарного та перехідного режимів.

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

Виробник	Пальник малої потужності				Пальник нормальної потужності				Пальник великої потужності			
	Витрати газу, м³/год	Діаметр отвору сопла, мм	Швидкість потоку м/с	Число Re	Витрати газу, м³/год	Діаметр отвору сопла, мм	Швидкість потоку м/с	Число Re	Витрати газу, м³/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

Номінальне значення числа Рейнольдса розраховано при максимальній витраті газу

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

Висновки

З огляду на безпосередній контакт споживачів газового палива з продуктами згоряння, зокрема, з 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 таких споживачів.

1. З огляду на ігнорування світових тенденцій обмеження шкідливих викидів при роботі газового обладнання в обмеженому просторі кухонних приміщень, особливо при відсутності аспіраційних пристроїв та систем вентиляції приміщень в 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: оксидів азоту NO_x, перш за все з огляду на пряме утворення викидів NO_2, та оксидів вуглецю CO. Аналіз нормативних документів України у порівнянні з 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 в рази більші значення в порівняння із 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 з 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 в житлово-комунальному секторі України.

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

4. Узагальнені характеристики типорозмірів пальників різної потужності окремих виробників газових побутових плит. Визначені представницькі геометричні та режимні критерії організації спалювання газу в пальниках кухонних плит, в 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 наступні форми порушення стабільного горіння (unstable combustion / unstabilities): проскок (flashback), відрив або повисання факелів (blowout or flame lifting), а також 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. В 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.