

ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОКАЛОРІЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Марченко А. П., Кравченко С. С.

Вступ

Проблеми екологічної безпеки України

У сучасних умовах суспільного розвитку серед пріоритетів національних інтересів України особливо виділяється забезпечення екологічно та техногенно безпечних умов життєдіяльності громадян і суспільства, збереження і відновлення навколишнього природного середовища [1].

Найбільшу шкоду навколишньому середовищу спричиняють транспорт, промисловість, енергетика та сільське господарство. Тому питання про впровадження природозберігаючих технологій у цих сферах життєдіяльності стоїть особливо гостро.

Транспорт належить до головних забруднювачів атмосферного повітря. Двигуни внутрішнього згорання транспортних засобів споживають найбільш значну долю нафтопродуктів і одночасно є активним, постійно діючим чинником хімічного, механічного, теплового і інших видів шкідливої дії на навколишнє середовище. Так, з відпрацьованими газами двигунів внутрішнього згорання викидається більш ніж 200 хімічних сполук-продуктів згорання палива, з яких найбільш небезпечними для людини є: оксиди азоту NO_x , монооксид вуглецю CO , незгорілі вуглеводні CH .

Одночасно все більшою проблемою для України стає утилізація відходів промислового виробництва, оскільки, велика кількість паливного потенціалу у вигляді низькокалорійних газів, в Україні викидається і забруднює атмосферу. Як приклад, Україна займає 4-е місце в світі по викидам шахтного газу в атмосферу. Шахтний газ значною мірою складається із метану CH_4 , який за своїм негативним впливом на навколишнє середовище значно перевищує CO_2 .

Не менш небезпечним забруднювачем оточуючого середовища є відходи сільськогосподарського виробництва.

Щорічно на полігони України вивозяться 11-13 млн. т. твердих побутових відходів, в процесі анаеробної переробки яких виділяється біогаз, макрокомпонентами якого є метан і діоксид вуглецю. За оцінками фахівців це приблизно 800 тис. т. метану [2].

Всі вище зазначені чинники глибоко впливають на екологічну ситуацію в Україні і викликають такі негативні наслідки як парниковий ефект, кислотні дощі, руйнування озонового шару. Утилізація означених побічних продуктів промислового та сільськогосподарського виробництва, так званих низькокалорійних газів, дозволить не тільки покращити екологічну ситуацію, але і виробляти електроенергію та тепло, частково замінюючи корисні копалини.

Як показує світовий досвід, одним із шляхів вирішення зазначених проблем, є використання означених низькокалорійних газових палив в стаціонарних енергоустановках з двигунами внутрішнього згорання. Більш того, використання деяких з цих палив навіть в якості добавки до нафтового покращує його екологічні показники, що видно з рис. 1.

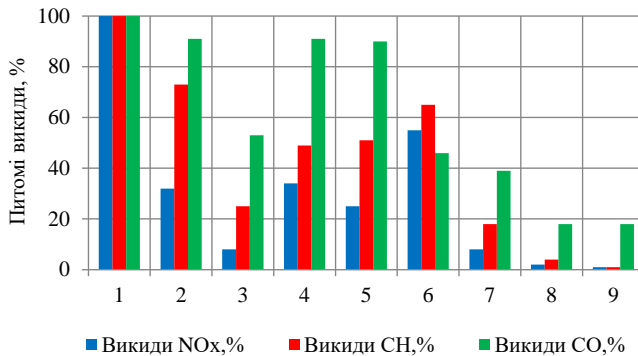


Рисунок 1. Порівняльна оцінка впливу альтернативних видів палива на екологічні показники автомобільного двигуна з примусовим займанням [4]:

- 1 – бензин; 2 – бензин + продукти його конверсії; 3 – бензин + H_2 ;
 4 – зріджений нафтовий газ; 5 – стиснутий природний газ; 6 – метанол; 7 – метанол + H_2 ; 8 – синтез-газ; 9 – водень

Низькокалорійні газові палива (НГП)

Нетрадиційні джерела енергії, до яких відносять гази вторинної переробки (синтез-газ, генераторний, піролізний, біогаз) та гази, що отримані як побічний продукт промисловості (коковий, доменний, шахтний, нафтовий гази), так звані низькокалорійні газові палива, можуть бути ефективно використані в якості альтернативних палив для когенераційних установок на базі двигунів внутрішнього згоряння. Ці палива можна виробляти з різноманітних видів як органічної, так і неорганічної сировини, таких як вугілля, нафта, природний газ, торф, деревина, побутові та промислові відходи тощо. Тому роль використання НГП швидко зростає в Європі та по всьому світу. Так, наприклад, в багатьох європейських країнах на таких газах більше 10 років виробляється електро- та тепла енергія, а програми по утилізації НГП є широко розповсюдженими [5]. Можливість спалювання широкого складу газів в ДВЗ дозволяє виробляти дешево енергію із відновлювальних, а також з побічних енергоресурсів.

На практиці більша частина газових палив складається із сумішей декількох газів в різних концентраціях в залежності від виду вихідної сировини та способу її переробки. Розглянемо основні особливості НГП.

Синтез-газ і генераторний газ у промисловості отримують паровою конверсією або парціальним окисленням метану, газифікацією або піролізом твердого палива (вугілля, коксу, торфу, деревини).

Співвідношення компонентів у генераторному газі, що отримано за методом газифікації, коливається в широкому діапазоні, оскільки залежить як від застосовуваної сировини, так і від виду конверсії – водяною парою або киснем. Найбільше поширення отримали методи газифікації Lurgi та Shell (рис. 2, а), за якими виходить газ складу: відповідно, 15-18 % та 65-66 % CO, 38-40 % та 30-32 % H₂, 9-11 % та 0,4 % CH₄, 30-32 % та 1-2 % CO₂. При підвищенні температури зростає вміст оксиду вуглецю, при підвищенні тиску – водню і метану. При цьому присутні домішки інертних газів (N₂ й ін.) та сірководню, якщо сировина містить сірковмісні продукти. Генераторний газ очищують від сірководню та діоксиду вуглецю за допомогою селективних розчинників. Співвідношення між

CO та H₂ за необхідності змінюють конверсією оксиду вуглецю водяною парою з отриманням синтез-газу [6].

Заводи з газифікації працюють в 29 країнах. Лідуючі позиції в світі – 37 % виробленої потужності – займає азіатсько-австралійський регіон завдяки інтенсивному розвитку цієї галузі в Китаї (рис. 2, б). Друге місце посідає африкансько-середньосхідний регіон, де Південно-Африканська республіка традиційно виробляє у великих обсягах синтез-газ для виробництва моторних палив. Найбільші заплановані обсяги будівництва потужностей з виробництва синтез-газу (65 %) має Північно-Американський регіон завдяки активній політиці США у цьому напрямку.

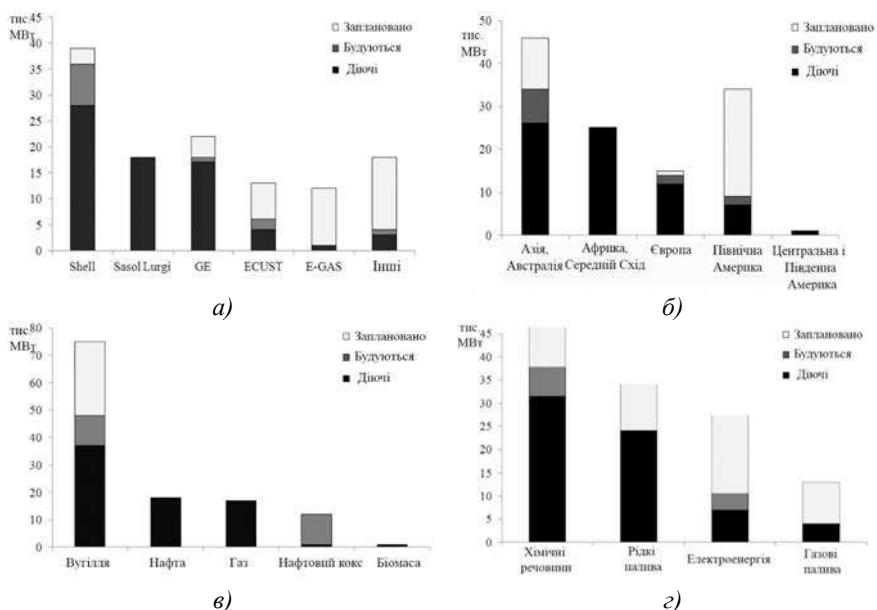


Рисунок 2. Сучасний стан виробництва синтез-газу в світі [7]:

- а – розподіл технологій газифікації вугілля в світі; б – розподіл потужностей виробництва синтез-газу по регіонах в світі; в – розподіл сировини, що використовується для виробництва синтез-газу в світі;
- г – розподіл ринкових продуктів, які виробляють з синтез-газу в світі

Більшу частину синтез-газу (51 %) виробляють з вугілля. На другому місці за використанням для виробництва синтез-газу (25 %) є нафта, на третьому (22 %) – природний газ. В якості сировини також використовують нафтовий кокс, біомасу та відходи (рис. 2, в). Більшість заводів, що будуються або заплановано побудувати працюватимуть на вугіллі [7].

Ринкові продукти, що виробляють з синтез-газу, включають хімічні речовини (45 %), рідкі моторні палива (38 %), електроенергію (11 %) та газові палива (6 %) – рис. 2, г.

Більшу частину моторних палив, що вироблено у світі з синтез-газу, отримано на 97 установках фірми Sasol у Південно-Африканській Республіці. Останнім часом потужності з виробництва синтетичних моторних палив нарощують також США і Китай.

У нетрадиційній енергетиці особливе місце займає переробка біомаси (органічних сільськогосподарських і побутових відходів) метановим бродінням з отриманням **біогазу**, макрокомпонентами якого є 40-70 % метану (CH_4) та 30-60 % діоксиду вуглецю (CO_2). У значно менших концентраціях, на рівні одного відсотку присутні: азот (N_2), кисень (O_2), водень (H_2). Теплота згоряння біогазу зазвичай не перевищує 20-22 МДж/м³, метанове число – 110-130.

Необхідні умови для отримання біогазу – відсутність кисню та постійна температура (15-55 °С). Період ферментації становить 10-120 днів. У даний час найбільш поширена технологія «анаеробна ферментація», що протікає при температурі близько 35°C протягом 25-30 днів.

Перевага біогазу полягає в тому, що він може бути виготовлений з місцевої сировини в будь-якому місті або селищі та є відновлювальним джерелом енергії. Кожна тонна побутових відходів виділяє 120-200 м³ біогазу. Кожного року на полігони України вивозять 11-13 млн т. твердих побутових відходів, в процесі переробки яких виділяється близько 800 тис. т. метану [8]. Як відомо, вплив метану на механізм утворення парникового ефекту в 21-23 разів більший за вуглекислий газ. Тому переробка біомаси та утилізація біогазу в двигунах внутрішнього згоряння з подальшим отриманням електричної та теплової енергії

дозволить покращити економічну та екологічну ситуацію в країні. Приклад цього – Німеччина, яка є провідною країною в Європі з виробництва та використання біогазу. У 2011 році в Німеччині близько 18 млрд кВт·год електроенергії генеруються з біогазу, та в середньому, більш ніж 5 мільйонів будинків забезпечується електроенергією з біогазу [9]. В липні 2012 р. у Німеччині працювало 87 установок, на яких вироблялось 55930 м³/год біометану, при цьому в процесі будівництва знаходилося ще 39 установок, що передбачає збільшення виготовлення біометану до 81620 м³/год [10].

Незважаючи на це, сьогодні сектор біоенергетики в Україні розвивається досить повільно. Україна споживає енергії із біомаси (відходів в об'ємі 1,56 млн т. н.е) лише 1,24 % від загальної поставки первинної енергії. Основним енергоносієм в Україні залишається природний газ (36,9 %), на другому місці – вугілля (32,7 %) на третьому – атомна енергія (18,7 %) [11].

Слід відзначити, що деревина не підходить для вироблення біогазу, оскільки лігнін, яка міститься в ній не переробляється метановою бактерією. Відходи деревної промисловості цілком можливо використовувати для отримання **піролізних газів**.

Піролізний газ складається з газоподібних вуглеводнів і оксиду вуглецю (CO), який утворюється від неповного згоряння деревного вугілля – твердої горючої складової деревини. Горючими елементами піролізного газу є: водень (H₂ – 20-40 %), оксид вуглецю (CO – 34-40 %), метан (CH₄ – 1-6 %). Негорючими елементами є: азот (N₂ – 2-5 %), вуглекислий газ (CO₂ – 20-35 %). Теплотворна здатність даного паливного газу становить 4-10 МДж/м³.

Технологія отримання піролізного газу включає: подрібнення відходів, їх ущільнення, відкачку повітря, дегазацію при температурі більше 600 °C та подальшу газифікацію за допомогою чистого кисню.

Газові електростанції на базі ДВЗ, що використовують піролізний газ працюють на заводах в Fondotoce (Італія), Chiba та Mutsu (Японія), Gussing, (Австрія) (рис. 3).

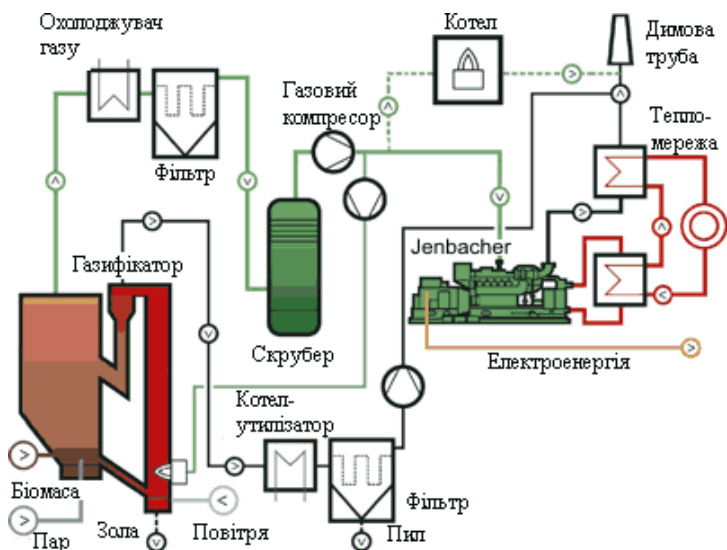


Рисунок 3. Технологія газифікації деревини в Gussing, Австрія [5]

Коксовий газ отримують як побічний продукт процесу виробництва коксу. Склад коксового газу значно змінюється залежно від виду вугілля, що використовується в процесі. Основними компонентами газу є водень ($H_2 \approx 55\%$), метан ($CH_4 \approx 25\%$) та азот ($N_2 \approx 10\%$), що показано в табл. 1.

Так, наприклад, у металургійних галузях за існуючої технології виплавляння сталі на кожному технологічному процесі виділяються низькокалорійні гази, які можуть бути використані в якості палива для ДВЗ. На рис. 4 показані основні технологічні процеси та кількість газів, що виділилося на кожному етапі при виплавлянні 1-ї тони сталі. Як побічний продукт при виробництві коксу утворюється коксовий газ з високим вмістом водню. На заводі середньої потужності видобувається близько 60 тисяч тон сталі на рік [12].

Сучасні металургійні підприємства розвинених країн використовують технологічні гази (доменний, коксовий, мартенівський гази та феррогаз) для вироблення електроенергії високоефективними установками на базі двигунів внутрішнього згоряння. Це дозволяє металургійним комбінатам повністю покривати власні потреби і, більше того, продавати надлишкову електроенергію.

Так, наприклад, на заводі по виробництву коксу Profusa SA в Bilbao (Іспанія) з 1995 року на коксовому газі працюють 12 двигунів GE Jenbacher, які виробляють 7164 кВт електричної потужності. При цьому рівень викидів оксидів азоту NO_x при роботі на коксовому газі забезпечується нижче на 40 % ніж при роботі на природному газі [5].

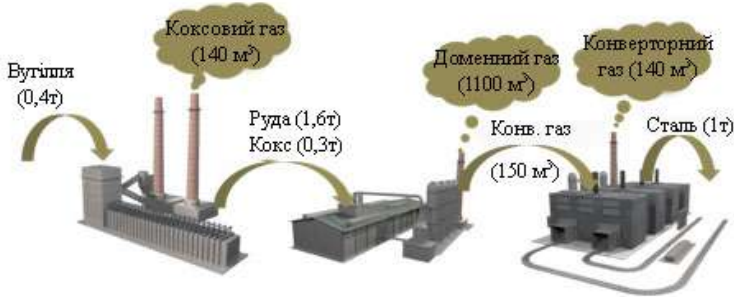


Рисунок 4. Виділення промислових газів при виплавці 1 тони сталі [12]

Перспективним альтернативним паливом на сьогодні є **шахтний газ**, що представляє собою суміш метану з повітрям. Світові запаси шахтного газу перевищують запаси природного газу та оцінюються в 260 трлн m^3 [13]. Найбільш значні ресурси шахтного газу зосереджені в Росії (близько 80 трлн m^3), США (60 трлн m^3), Китаї (28 трлн m^3), Україні (близько 12 трлн m^3).

Суміш шахтного газу з повітрям при певних співвідношеннях є вибухонебезпечною. Тому, для забезпечення безпечної роботи в шахтах підтримують нижню межу метану в суміші не більше 5 %, а верхню – не менше 32 %. Разом з тим, досвід світового двигунобудування свідчить про розробку і використання в газових двигунах метано-повітряної суміші з вмістом метану, що подається в основну камеру згоряння, не менше 27 % [14].

Крім вибухонебезпечності метан є одним з газів, що створюють парниковий ефект. Вміст метану в атмосфері швидко зростає, щороку збільшуючись на 0,6 % (при збільшенні обсягу діоксиду вуглецю на 0,4 %) [15].

Велика кількість викидів метану в атмосферу відбувається саме при видобутку кам'яного вугілля. При цьому, Україна займає четверте місце у світі по викидах шахтного газу в атмосферу (рис. 5) [16]. За оцінками експертів, шахтний метан активно виділяється на 70-80 % діючих шахт України.

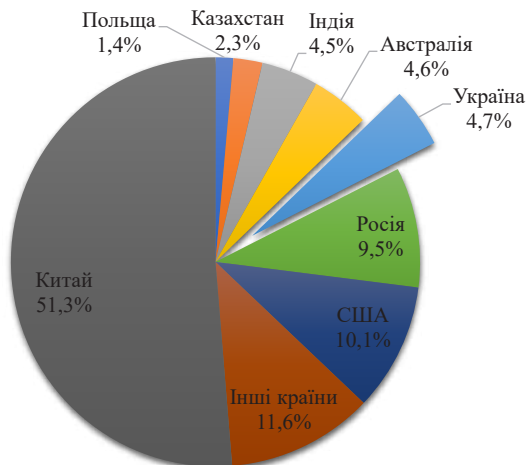


Рисунок 5. Викиди шахтного метану на вугільних шахтах світу [16]

Утилізація шахтного метану є надзвичайно актуальним для України з точки зору економіки розглядаючи його як ресурс для забезпечення енергетичних потреб країни, та з екологічних міркувань зменшення викидів метану в атмосферу. Крім того, відбір шахтного газу є одним з важливих факторів створення безпечних умов роботи на шахтах України.

Таким чином, велика кількість різноманітних газів (відходів промислового і сільськогосподарського виробництва) в Україні викидаються у навколишнє середовище та забруднюють атмосферу. Утилізація цих газів дозволить поліпшити екологічну ситуацію в країні, а також зменшити її енергозалежність від імпорту природного газу. Накопичений досвід експлуатації газових двигунів зарубіжних компаній показує, що широкий спектр низькокалорійних газів можливо ефективно використовувати в газових двигунах. Проте різноманітність

НГП, а отже широкий діапазон їх фізико-хімічних властивостей ускладнює регулювання й оптимізацію робочих процесів в двигуні порівняно з використанням традиційних палив. У зв'язку з цим велика увага приділяється дослідженням, що направлені на оцінку придатності до використання того чи іншого палива (оцінку фізико-хімічних властивостей), та вивченню факторів, які впливають на показники двигунів.

Вплив компонентного складу НГП на їх моторні властивості

Склад низькокалорійних газових палив широко змінюється залежно від вихідної сировини (вугілля, індустріальні гази та побутові відходи) способу та технології виробництва (газифікації або окислення), конфігурації та умов експлуатації хімічного реактора або очисників. Фізико-хімічні властивості таких газів надзвичайно різноманітні, проте тільки ті гази, характеристики яких знаходяться в певному діапазоні, можуть використовуватися в газових двигунах. В табл. 1 наведені фізико-хімічні властивості деяких НГП. Видно, що горючими компонентами низькокалорійних газових палив є водень H_2 , оксид вуглецю CO , метан CH_4 і незначна кількість важких вуглеводнів. Решта (близько 10-50 % від загального об'єму) – негорючі компоненти, зокрема азот N_2 , діоксид вуглецю CO_2 та кисень O_2 . Саме компонентний склад газового палива визначає його моторні властивості.

Нижча теплота згоряння НГП змінюється в широких межах – 3,5-27 МДж/м³, що в 1,5-10 разів менше теплоти згоряння природного газу (35,9 МДж/м³). Так, наприклад, синтез-газ та генераторний газ мають, відповідно, в 3,4 та 5,8 разів меншу об'ємну нижчу теплоту згоряння у порівнянні з природним газом. Це пояснюється значним вмістом в НГП водню, що має низьку об'ємну теплоту згоряння (характерно для синтез-газу), або великим вмістом інертних компонентів (генераторний газ). Нижча теплота згоряння визначає об'ємну витрату палива двигуном. Очевидно, що для забезпечення незмінної потужності двигуна у порівнянні з роботою на природному газі потрібно збільшувати об'ємну циклову подачу НГП.

Важливою моторною властивістю газового палива є метанове число, що визначає можливість роботи двигуна за високих ступенів стиску. Згідно табл. 1 шахтний газ, біогаз та генераторний газ мають порівняно високі значення метанового числа (135-70). Проте коксовий газ та синтез-газ мають низькі МЧ (30-60), що пояснюється високим вмістом водню. Гази, які мають змінне або низьке МЧ схильні до детонації, що призводить до виникнення ударних механічних та теплових навантажень на деталі двигуна.

Таблиця 1. Властивості газових палив та їх компонентів [5,17]

Газ	Компонентний склад, % об.	Нижча теплота згоряння МДж/м ³	Межі займання		Ламінарна швидкість згоряння, см/с	Необхідна кількість повітря м ³ /м ³	Метанове число *	С/Н	Густина, кг/м ³
			Нижня	Верхня					
Метан	CH ₄	35,0	2	0,6	41	9,55	100	3	0,716
Водень	H ₂	10,8	10	0,15	270	2,38	0	0	0,0899
Монооксид вуглецю	CO	12,6	2,94	0,15	45	2,38	73	-	1,25
Природний газ	CH ₄ =92,2 C ₂ H ₆ =4,1 C ₃ H ₈ =1,0 C ₄ H ₁₀ =0,36 C ₅ H ₁₂ =0,33 N ₂ =2 CO ₂ =0,1	34,2	2,0	0,6	40-42	9,96	79,8	3,1	0,781
Синтез-газ (Тексако)	H ₂ =35 CO=52 CH ₄ =0,4 N ₂ =0,6 CO ₂ =12	10,48	5,63	0,2	70	2,11	56,1	10,48	0,928
Піролізний газ	H ₂ =30 CO=35 CH ₄ =5 N ₂ =5 CO ₂ =25	9,4	5,0	0,37	70	2,03	78	9,7	1,054
Шахтний газ	CH ₄ =43,8 N ₂ =43,2 CO ₂ =2,2 O ₂ =9,8	15,47	2,0	0,7	37	3,74	108	3,17	1,037
Біогаз	CH ₄ =65 CO ₂ =35	22,75	1,9	0,62	27	6,2	135	4,61	1,15
Коксовий газ	H ₂ =55 CO=8 CH ₄ =31 N ₂ =3,8 CO ₂ =1,2 O ₂ =1	17,8	4,43	0,4	100	4,42	40,5	2,056	0,46
Генераторний газ	H ₂ =23 CH ₄ =2 N ₂ =42 CO ₂ =9 CO=24	6,2	2,17	0,6	50	1,31	70,7	7,73	1,037

* – розраховано за методикою AVL.

На процес згоряння в двигуні з примусовим запалюванням значно впливає наявність інертних компонентів (зокрема CO_2 та N_2), що входять до складу НГП. На рис. 6 показано залежності, що характеризують вплив різних інертних компонентів на метанове число та межі запалювання.

Ці компоненти не беруть активної участі в процесі згоряння, проте збільшують МЧ газового палива (рис. 6, а). При цьому вплив вмісту CO_2 на МЧ

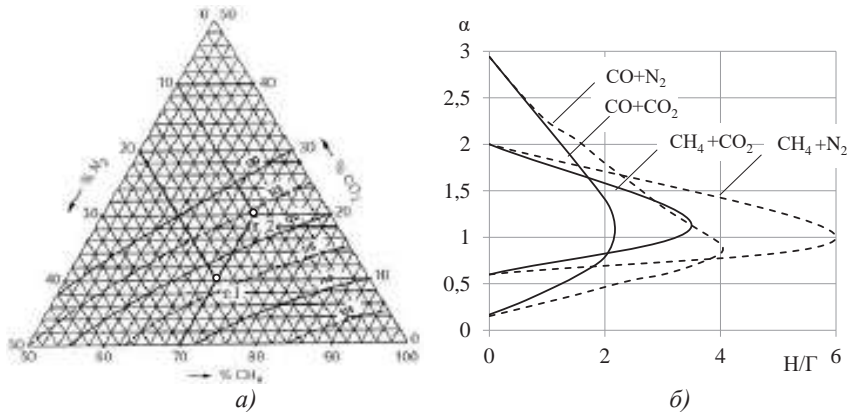


Рисунок 6. Вплив вмісту інертних компонентів на метанове число (а) [19] та межі запалювання паливо-повітряної суміші, (б) Н/Г – відношення негорючих та горючих компонентів

в 3 рази вище, ніж вплив N_2 [18]. Наприклад, для газу, що містить 10 % CO_2 , 20 % N_2 , 70 % CH_4 (точка 1, рис. 6, а) метанове число дорівнює 117, а для газу 20 % CO_2 , 10 % N_2 , 70 % CH_4 (точка 2, рис. 6, а) метанове число – 124.

Інертний компонент CO_2 на відміну від інших інертних складових НГП є трьохкомпонентним газом, що має порівняно високу теплоємність. Наприклад, теплоємність CO_2 за температурою 1500°C складає $44,035 \text{ кДж}/(\text{кмоль}^\circ\text{C})$, що в 1,8 разів більше теплоємності N_2 за цієї температури. Підвищений вміст CO_2 в НГП може привести до зменшення максимального тиску і температури циклу, отже зниження термодинамічної ефективності циклу.

Значення меж запалювання визначають можливість ефективного збіднення або збагачення паливо-повітряної суміші: верхня межа відповідає

максимальному збагаченню суміші, нижня – максимальному збідненню. З рис. 5, б видно, що підвищення вмісту інертних компонентів в паливі призводить до звуження меж запалювання. При цьому вплив інертного компоненту CO_2 на межі запалювання є більш суттєвим у порівнянні з N_2 .

H_2 та CO відрізняються більш широкими концентраційними межами (відповідно, $\alpha=0,15-10$ та $\alpha=0,15-2,95$), а наявність цих компонентів розширює межі запалювання НГП. Згідно табл. 1, синтез-газ, піролізний, коксовий та генераторний газу мають більш широкі межі запалювання ніж інші НГП. Розширення меж запалювання НГП сприяє покращенню запуску ДВЗ за низьких температур, підвищує надійність запалювання і повноту згорання збіднених паливо-повітряних сумішей.

Ламінарна швидкість згорання палива обумовлює ступінь підвищення тиску в циліндрі та жорсткість робочого процесу двигуна. Ця властивість залежить як від складу палива, так і ступеня збіднення газоповітряної суміші. Зі збільшенням швидкості згорання ростуть навантаження на деталі кривошипно-шатунного механізму. Крім того, збільшується максимальна температура робочого тіла, що призводить до зростання викидів оксидів азоту NO_x . Проте зі зменшенням швидкості згорання зростає неповнота згорання палива і погіршується паливна економічність двигуна. Наявність водню H_2 в паливі призводить до суттєвого збільшення швидкості згорання і, як наслідок, зменшення неповноти згорання НГП. З табл. 1 видно, що для шахтного газу та біогазу швидкість згорання є меншою порівняно з природним газом, а для генераторного, піролізного та коксового газу – більшою. Можна передбачити, що відповідну тенденцію зміни матиме і повнота згорання для означених палив.

Зі збільшенням відношення C/H , тобто зі збільшенням вмісту вуглецю в паливі, паливо-повітряні суміші згоряють при більш високих температурах (за однакових умов згорання). Це пояснюється тим, що для повного згорання одиниці маси вуглецю необхідна в 3 рази менша кількість повітря, ніж для згорання водню. Теплота згорання палива виділяється в меншому об'ємі газу, що призводить до збільшення температури. Очевидно найбільші температури

матимуть місце при згорянні синтез-газу, генераторного та піролізного газів, найменші – шахтного, біогазу та коксового газів.

Очевидно, що найкращими моторними властивостями володіють НГП, що мають високі значення метанового числа та об'ємної теплоти згорання, низький вміст інертних компонентів та відношення С/Н, широкі межі запалювання та високу швидкість згорання. Проте підвищення вмісту окремих компонентів у складі НГП (зокрема CH_4 та H_2) неоднозначно впливає на моторні властивості палива, що призводить як до покращення одних моторних властивостей, так і погіршення інших. Наприклад, H_2 має високу швидкість згорання, що з однієї сторони, поліпшує умови згорання палива в двигуні та підвищує його ефективність, з іншої – внаслідок підвищення температури циклу призводить до збільшення емісії NO_x з ВГ. Присутність CO та CH_4 в суміші зменшує швидкість згорання. CO_2 та N_2 діють як розчинник, зменшуючи швидкість та температуру полум'я, проте підвищують МЧ газового палива. Оцінити комплексний вплив властивостей НГП на показники двигунів можливо експериментальним шляхом або за результатами математичного моделювання їх робочих процесів.

Аналіз проблем використання НГП в ДВЗ

На сьогодні на світовому ринку представлені двигуни фірм Caterpillar, Waukesha Engine Dresser Inc, GE Energy Jenbacher gas engines, Cummins Power Generation, MWM GmbH (в минулому Deutz Power Systems) та ін. [5,20-23], які працюють на різних НГП у складі когенераційних установок.

Основними проблемами використання НГП в якості палива для ДВЗ є низька теплотворна здатність, присутність компонентів, що негативно впливають на процеси згорання та терміни експлуатації двигунів, нестабільність компонентного складу [26]. Занадто низькі значення нижчої теплоти згорання та метанового числа взагалі унеможливають використання деяких видів НГП у двигуні. Означені проблеми в ряді випадків можуть бути усунені адаптацією конструкції двигуна до використання певного виду палива, зокрема зміною

ступеня стиску, корекцією кута випередження запалювання, збільшення енергії запалювання, тощо [20, 24-27].

Використання НГП в традиційних двигунах з іскровим запалюванням, які працюють на стехіометричній або збагаченій паливо-повітряній суміші може призвести до погіршення якості запалювання та пропусків спалахування, зниження потужності й ККД двигуна [25,28-30]. Це пояснюється зниженням нижчої теплоти згоряння палива та зменшенням швидкості розповсюдження фронту полум'я з підвищенням вмісту інертних компонентів, особливо CO_2 . Як наслідок, збільшується тривалість згоряння та період затримки запалювання. Результати дослідження [31] показують, що при роботі двигуна з іскровим запалюванням на збідненій до $\alpha=1,05$ паливо-повітряній суміші добавка CO_2 до палива в кількості 20-40 % не призводить до зниження потужності, а при роботі на збагаченій до $\alpha=0,98$ паливо-повітряній суміші природного газу та 30 % CO_2 внаслідок збільшення неповноти згоряння палива спостерігається зниження потужності на 3%, індикаторного ККД – на 2 %.

При використанні НГП в двигунах великої розмірності також виникає проблема забезпечення надійного запалювання та згоряння суміші. Цю проблему вирішують за допомогою використання форкамерно-факельного запалювання, за якого висока енергія форкамерного факелу стабілізує процес згоряння в циліндрі [20,27]. Зокрема, фірмою Caterpillar розроблено двигун з іскровим запалюванням низькокалорійних палив за допомогою системи форкамерно-факельного запалювання [20,32]. При цьому до форкамери та циліндру двигуна газ подається з однієї паливної магістралі. В роботі [33] показано, що форкамерно-факельне запалювання збіднених сумішей біогазу ($\text{CH}_4=60\%$; $\text{CO}_2=40\%$) з повітрям дозволяє забезпечити надійну роботу двигуна. При цьому ефективний ККД двигуна знижується на 1 % у порівнянні з його роботою на природному газі, а викиди з ВГ CO та CH зменшуються відповідно на 15 та 8 %, емісія NO_x залишається незмінною. Відзначено, що процес згоряння збіднених сумішей НГП з повітрям майже не відрізняється від згоряння природного газу та несуттєво залежить від вмісту інертних компонентів N_2 та CO_2 в паливі.

Компенсувати зниження ККД двигуна вдається за рахунок оптимізації його конструктивних та регулювальних параметрів, зокрема, ступеня стиску, кута випередження запалювання, тиску наддуву, енергії запалювання та ін.

Таким чином, використання НГП в ДВЗ на теперішній час для транспортних енергетичних установок є обмеженим, що обумовлюється проблемами зберігання цих палив на борту транспортних засобів, зменшення потужності двигуна, зменшенню запасу ходу транспортного засобу, складністю організації точного дозування двох палив при використанні НГП в якості добавки до основного. Найбільш перспективним слід вважати безпосереднє використання НГП у стаціонарних установках з ДВЗ з форкамерно-факельним запалюванням збіднених паливо-повітряних сумішей для вироблення електроенергії, які можуть бути розташовані поблизу сировини цього палива.

Проблеми та перспективи конвертації вітчизняних газових двигунів ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах

Аналіз конструкцій і показників роботи сучасних стаціонарних газових двигунів, що виробляють та експлуатують в Україні показав, що найбільш високі показники паливної економічності мають газові двигуни типу ГД100. Це вертикальний двигун, десятициліндровий, двотактний, із зустрічно рухомими поршнями і прямоточною продувкою. Розташування циліндрів однорядне.

Експлуатація підтвердила значні переваги означених двигунів відносно зносостійкості, довговічності, терміну служби, відносно низької вартості технічного обслуговування [34-38]. Більш того, ці двигуни мають нетрадиційну систему запалювання – форкамерно-факельне запалювання (ФФЗ) паливо-повітряної суміші, що дає можливість конвертувати їх для роботи на НГП. Тому ці двигуни вибрані в якості базових для конвертації на НГП. Основні параметри двигуна 11ГД100М наведені нижче [36].

Кількість циліндрів Z	10
Діаметр циліндра D , м.....	0,207
Хід нижнього і верхнього поршнів $S_1=S_2$, м.....	0,254

Ступінь стиску ϵ	12,5
Кут початку запалювання, відносно нижнього КВ θ , гр.п.к.в.....	358
Кут відставання верхнього колінчастого вала від нижнього $\phi_{\text{отст}}$, гр.....	12
Номінальна потужність N_e , кВт.....	1078
Максимальна потужність протягом однієї години $N_{e,max}$, кВт	1185
Номінальна частота обертання колінчастого валу n , хв ⁻¹	750
Середній ефективний тиск на номінальному режимі p_e , МПа.....	0,532
Максимальний тиск згоряння p_z , МПа.....	не більше 7,5
Тиск наддувного повітря на режимах номінальної потужності p_s , МПа..	0,2-0,27
Питома витрата палива (природного газу) на номінальному режимі g_e , кДж/(кВт год).....	не більше 10400

Особливістю системи форкамерно-факельного запалювання є можливість здійснення стабільного робочого процесу на збіднених і вкрай збіднених паливо-повітряних сумішах. Завдяки цьому в двигунах ГД100 вдається здійснити якісне регулювання потужності від повного навантаження до холостого ходу, за якої коефіцієнт надлишку повітря в циліндрі змінюється в межах $\alpha = 1,7-3$.

Як відомо, для метану нижня межа іскрового запалювання в суміші з повітрям $\alpha = 1,6-2,0$ [39-41]. Проте межі стійкої, рівномірної роботи двигунів ГД100 є значно ширшими ($\alpha=3$), що пояснюється властивостями і особливостями поширення форкамерного факела. На відміну від звичайного іскрового запалювання форкамерний факел має значно більшу енергію та швидкість поширення, що сприяє викненню в циліндрі великої кількості джерел займання.

Разом з тим, при форкамерно-факельному запалюванні в двигунах ГД100 спостерігається різке зменшення індикаторного ККД при $\alpha > 2-2,5$ внаслідок зростання неповноти згоряння. За цих умов відбувається зниження температури в циліндрі на початку згоряння та різке зниження температури при розширенні робочого тіла під впливом руху поршнів. В результаті температура згоряння знижується настільки, що більше половини заряду згоряє в умовах повільного протікання хімічних реакцій, частина палива, яка не встигла згоріти при розширенні, викидається з ВГ [34]. Одним із способів підвищення ефективності

згоряння збіднених паливо-повітряних сумішей є підвищення температури заряду суміші на впуску [34,42,43].

При роботі двигунів на НГП виникає ряд інших проблем (зниження потужності й ККД двигуна, погіршення якості запалювання та ін.), що вимагає суттєвої модернізації конструкції двигуна та його систем.

При використанні НГП в форкамері може утворитися значно збіднена паливо-повітряна суміш, оскільки для повного згоряння одиниці НГП потрібно менша кількість повітря у порівнянні з природним газом (табл. 1). За таких умов можливі пропуски запалювання в циліндрі двигуна, оскільки в даному випадку збільшується мінімально потрібна енергія запалювання суміші від розряду свічки запалювання та зменшується енергія факелу на виході. З іншої сторони, займання збагачених сумішей утворює потужний факел, що може призвести до небажаного збільшення тиску згоряння, жорсткої роботи двигуна, перегріву стінки циліндру напроти сопла форкамери та виникнення детонаційного згоряння. Отже при зміні виду газового палива потрібно змінювати конструкцію форкамери і налаштування газової апаратури.

Таким чином, означена модернізація неможлива без проведення розрахункових і експериментальних досліджень впливу конструктивних і регульовальних параметрів двигуна на його показники, виконання оптимізації параметрів з метою покращення технікоекономічних показників двигунів типу ГД100.

Дослідження процесу згоряння НГП в циліндрі двигуна 11ГД100М

З використанням розробленої математичної моделі [44] проведено розрахункове дослідження робочого процесу стаціонарного газового двигуна 11ГД100М при використанні в якості палива низькокалорійних газів (табл. 1). На рис. 7 наведені розрахункові індикаторні діаграми, температури РТ в процесі згоряння та характеристики тепловиділення на номінальному режимі роботи двигуна 11ГД100М при використанні природного газу та НГП.

З рис. 7, а видно, що при використанні синтез-газу, генераторного газу та піролізного газу в циліндрі двигуна зменшується період затримки запалювання та збільшується швидкість згоряння в початковий період згоряння та, як наслідок, збільшується на 4,7 – 9 % максимальний тиск циклу. Пояснюється це наявністю в цих паливах значної кількості водню, що має високу швидкість згоряння і низьку теплоємність. Крім того, наявність великої кількості водню в цих НГП призводить до розширення меж запалювання і згоряння, а отже і збільшення на 4,2-4,6 % повноти згоряння, що видно з характеристик активного тепловиділення (рис. 7, а).

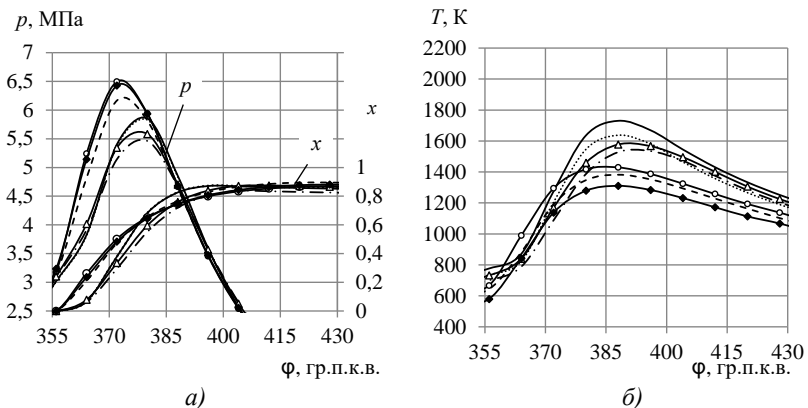


Рисунок 7. Розрахункові індикаторні діаграми, характеристики тепловиділення (а) та температура РТ в циліндрі двигуна 11ГД100М (б) в процесі згоряння при використанні природного газу та НГП ($n = 750 \text{ хв}^{-1}$; $N_e = 1100 \text{ кВт}$; $p_s = 0,127 \text{ МПа}$; $\theta_{zn} = 8 \text{ гр. п.к.в.}$; $\epsilon = 12,5$): — – Природний газ; \circ – Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; - . - - Шахтний газ; – Біогаз; Δ – Коксовий газ; \blacklozenge – Генераторний газ

При використанні шахтного газу в якості палива зменшується на 0,5 МПа максимальний тиск циклу порівняно з роботою на природному газі. Також спостерігається зменшення швидкості згоряння та погіршення динаміки тепловиділення.

Процес згоряння біогазу в циліндрі двигуна 11ГД100М протікає без суттєвих змін у робочому циклі. При цьому, тиск згоряння і температура РТ майже не змінюються.

Проаналізуємо процес згоряння НГП в циліндрі двигуна 11ГД100М при значеннях надлишку повітря, за яких працює дослідний двигун на номінальному режимі роботи при використанні в якості палива природного газу ($\alpha=1,92$). Вказане досягається зменшенням тиску наддувочного повітря p_s при незмінній цикловій подачі палива.

На рис. 8 наведені розрахункові індикаторні діаграми, температура РТ у процесі згоряння та характеристики тепловиділення двигуна 11ГД100М при роботі на НГП за однакових коефіцієнтів надлишку повітря α .

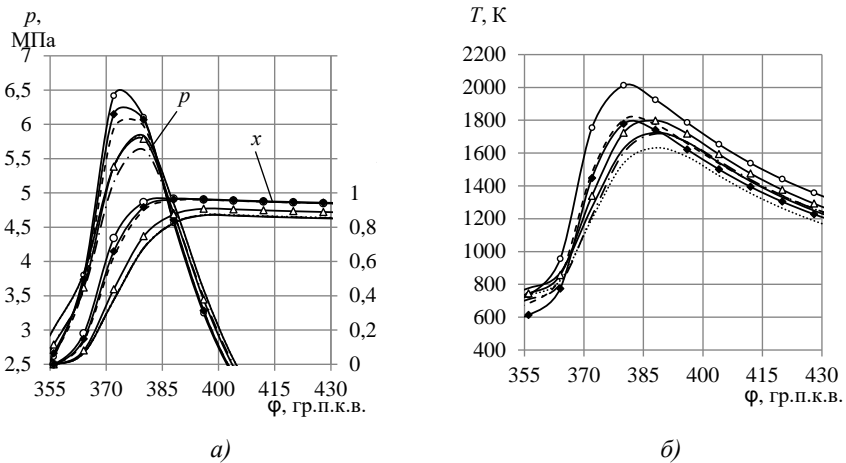


Рисунок 8. Розрахункові індикаторні діаграми, характеристики тепловиділення (а) та температура РТ в циліндрі двигуна 11ГД100М (б) в процесі згоряння за $\alpha=1,92$: — — — Природний газ; \circ — Синтез-газ; - - - - Піролізний газ; - . - . - Шахтний газ; — Біогаз; Δ — Коксовий газ; \blacklozenge — Генераторний газ

Аналіз приведених характеристик активного тепловиділення (рис. 7 та 8) показує, що при збагаченні паливо-повітряної суміші до $\alpha=1,92$ на ділянці видимого згоряння виділяється більше на 15 % активної теплоти (відповідно

близько 80 % та 95 %). У всіх випадках максимальний тиск згоряння залишається майже незмінним, проте помітно зростає температура згоряння (рис. 8, б). Означене сприяє більш повному згорянню палива та підвищенню термодинамічної ефективності робочого циклу.

Порівнюючи температури РТ в процесі згоряння за однакових α при використанні в якості палива біогазу спостерігається зниження температури циклу на 93 К у порівнянні з роботою двигуна на природному газі. Пояснюється це зменшенням швидкості згоряння біогазу та наявністю великого вмісту CO_2 , що має високу теплоємність яка збільшується зі збільшенням температури. Це означає, що при високій температурі згоряння багато теплоти поглинається CO_2 , і таким чином значно знижується температура полум'я. Зниження температури циклу при використанні в якості палива біогазу у порівнянні з природним газом спостерігається і в роботах [45,46].

Таким чином, характер кривих тиску залежить від вмісту CH_4 , H_2 , CO , інертних газів та коефіцієнту надлишку повітря. Високий вміст водню в синтез-газі, піролізному газі, коксовому газі та генераторному газі призводить до швидкого згоряння, а пік на кривих тиску зміщується ближче до ВМТ. Наявність вмісту CO_2 в паливі призводить до зменшення температури згоряння. Покращити показники двигуна 11ГД100М при роботі на НГП можливо за рахунок регулювання складу паливо-повітряної суміші.

Показники двигуна на номінальному режимі

Результати розрахунку робочого процесу двигуна 11ГД100М, що працює на НГП та природному газі, на номінальному режимі роботи наведені на рис. 9.

Видно, що коефіцієнт надлишку повітря при використанні низькокалорійних газів (окрім біогазу) значно зростає порівняно з роботою на природному газі. Проте показники ефективності робочого циклу (індикаторний та ефективний ККД) майже не змінюються, що пояснюється розширенням меж запалювання і згоряння паливо-повітряної суміші. Отримані розрахункові

результати підтверджуються даними експериментальних випробовування на ДП «Завод ім. Малишева».

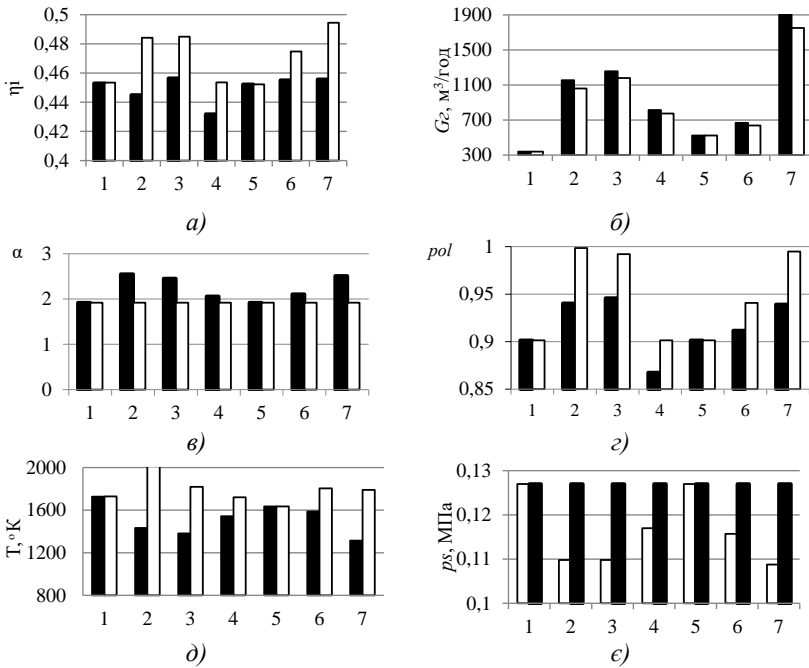


Рисунок 9. Показники двигуна 11ГД100М на номінальному режимі ($N_e = 1100 \text{ кВт}$, $p_s = 0,127 \text{ МПа}$) при використанні природного газу та НГП:

■ – $p_s = 0,127 \text{ МПа}$; □ – $p_s = \text{var}$; а – індикаторний ККД; б – об’ємна витрата палива; в – коефіцієнт надлишку повітря; г – повнота згоряння палива; д – максимальна температура циклу; е – тиск наддуву; 1 – Природний газ; 2 – Синтез-газ; 3 – Піролізний газ; 4 – Шахтний газ; 5 – Біогаз; 6 – Коксовий газ; 7 – Генераторний газ

Винятком є використання шахтного газу, для якого індикаторний і ефективний ККД двигуна зменшуються на 4,6 %. Це паливо, що складається в основному з метану і повітря, має такі самі властивості як і природний газ.

Отже збільшення надлишку повітря призводить до зменшення швидкості і повноти згоряння шахтного газу в циліндрі ДВЗ. При роботі двигуна на біогазі індикаторний ККД, тиск згоряння і коефіцієнт надлишку повітря майже не змінюються.

Крім того, при роботі двигуна 1ГД100М на збіднених до $\alpha=1,92$ паливо-повітряних сумішах спостерігається підвищення індикаторних показників двигуна. Це обумовлено збільшенням швидкості згоряння та температури циклу (рис. 9, д) та, як наслідок, збільшенням індикаторного ККД двигуна та повноти згоряння палива. Так, наприклад, при використанні синтез-газу, генераторного та піролізного газів зменшення α призводить до підвищення індикаторного ККД з 0,43-0,45 до 0,45-0,49 та максимальної температури циклу на 30-40 %, повнота згоряння при цьому наближається до одиниці. При цьому індикаторний ККД двигуна перевищує відповідний показник при роботі двигуна на природному газі. Проте, слід відзначити, що тиск наддуву при цьому дорівнює $p_s=0,109-0,11$ МПа, що може призвести до погіршення очищення циліндру від ВГ.

Наслідком підвищення індикаторного ККД двигуна при збагаченні паливо-повітряної суміші є покращення його паливної економічності. З рис. 9 видно, що об'ємна витрата палива зменшується на 5-8 % залежно від виду НГП.

Збагачення паливо-повітряної суміші від $\alpha=2,06$ до $\alpha=1,92$ при використанні шахтного газу також призводить до збільшення індикаторного ККД, який наближується до відповідного показника при роботі на природному газі. При цьому тиск наддуву зменшується до $p_s=0,117$ МПа.

Слід відмітити суттєве збільшення об'ємної витрати палива при використанні НГП, внаслідок зменшення їх теплотвірної здатності. Так, найбільше зростання об'ємної витрати палива (в 5,6 разів) спостерігається при використанні генераторного газу, найменше зростання – у випадку використання біогазу (в 1,5 разів), коксового газу (в 1,95 разів), шахтного газу (в 2,4 разів).

За результатами проведеного розрахункового дослідження можна зробити висновок, що при використанні НГП відбувається значне збіднення паливо-повітряної суміші в циліндрі двигуна ГД100 у порівнянні з роботою на

природному газі. Недивлячись на це, показники ефективності робочого циклу (індикаторний та ефективний ККД) майже не змінюються, що пояснюється розширенням меж запалювання і згоряння паливо-повітряної суміші. Виключенням є використання шахтного газу, для якого індикаторний і ефективний ККД двигуна зменшується на 4,6 %.

Результати дослідження показують, що регулювання складом паливо-повітряної суміші є ефективним заходом підвищення ефективності робочого процесу двигуна 1ГД100М при його роботі на НГП.

Показники двигуна на режимах навантажувальної характеристики

На рис. 10 представлено основні параметри роботи газового двигуна 1ГД100М при роботі на низькокалорійних газових паливах та природному газі за навантажувальною характеристикою при $n = 750 \text{ хв}^{-1}$, $p_s = 0,127 \text{ МПа}$, $\theta = 358$ гр.п.к.в.

З рис. 10 видно, що індикаторний та ефективний ККД двигуна при використанні НГП (окрім біогазу та коксового газу) на режимах часткових навантажень зменшуються порівняно з роботою на природному газі. Слід відзначити збільшення повноти згоряння синтез-газу, піролізного та генераторного газів палива на всіх режимах роботи двигуна, що призводить до збільшення максимального тиску згоряння на 0,8-2 МПа. Проте, не дивлячись на це, на режимах малих та середніх навантажень індикаторний та ефективний ККД двигуна зменшуються у порівнянні з роботою двигуна на природному газі. Так, наприклад, на режимі 25 % N_e індикаторний ККД двигуна при використанні синтез-газу, генераторного та піролізного газів зменшується, відповідно, на 19,3 %, 16,3 % та 14,2 %. Зниження ефективності циклу при використанні означених палив можна пояснити значним зростанням коефіцієнту надлишку повітря в циліндрі (до $\alpha = 2,85$), зменшенням температури циклу і, як наслідок, зменшенням індикаторного ККД двигуна.

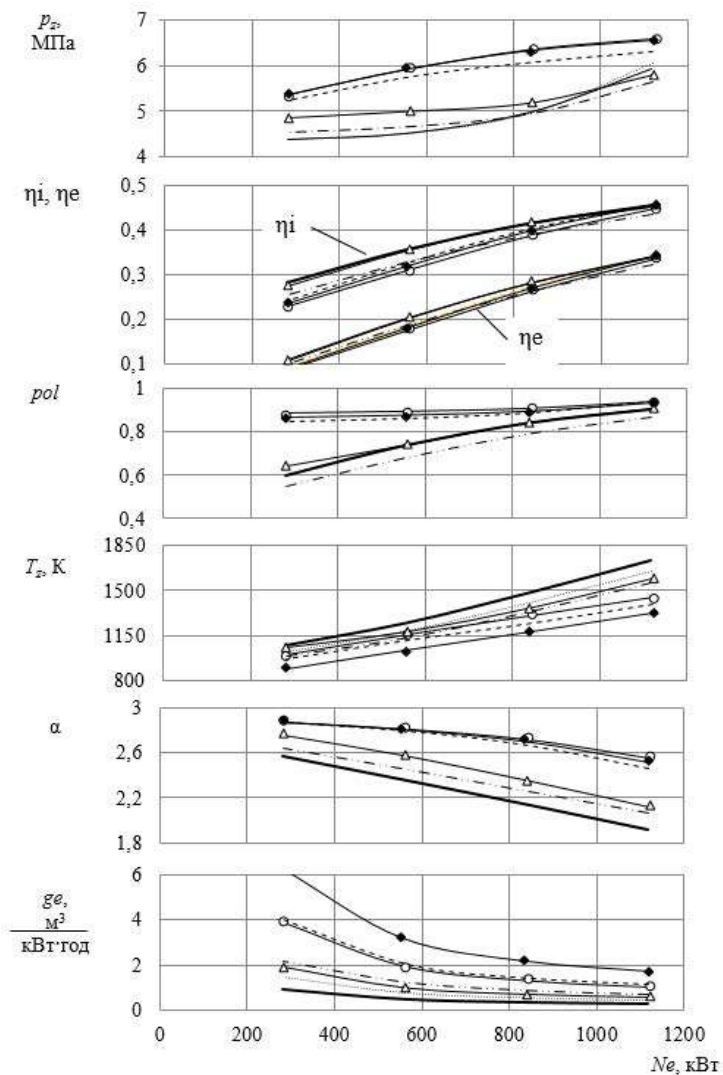


Рисунок 10. Навантажувальна характеристика двигуна 11ГД100М при використанні природного газу та НГП ($n=750 \text{ хв}^{-1}$):

— — — — — Природний газ; \circ — Синтез-газ; - - - - - Піролізний газ;
 - . - . - Шахтний газ; — Біогаз; Δ — Коксовий газ; \blacklozenge — Генераторний газ

1.9 Оптимізація параметрів газового двигуна 11ГД100М при використанні НГП

Відмінність фізико-хімічних властивостей низькокалорійних газових палив від природного газу призводить до зміни протікання робочого процесу дослідного двигуна 11ГД100М та в деяких випадках погіршення його показників. Отже необхідно проводити оптимізацію його параметрів.

Вибір раціональних параметрів двигуна 11ГД100М при його роботі на НГП виконано на основі сіток І. М. Соболя та Р. Б. Статнікова [47].

Для кожного НГП з використанням розробленої математичної моделі проводилися розрахункові експерименти в 512 точках. За прийнятими обмеженнями були відсіяні неефективні точки. Точка, що відповідала максимальному значенню індикаторного ККД вважалася оптимальною.

У табл. 2 наведені значення оптимізованих параметрів газового двигуна 11ГД100М для випадків використання дослідних палив.

Таблиця 2. Оптимізовані параметри газового двигуна 11ГД100М при використанні НГП (базові параметри: $p_s = 0,127$ МПа; $T_s=300$ К; $\theta = 358$ гр.п.к.в.; $\varepsilon=12,5$)

Газ	p_s , МПа	T_s , К	θ , гр.п.к.в.	ε
Синтез-газ	0,115	315	354	12,5
Піролізний газ	0,117	315	356	12,5
Шахтний газ	0,112	315	357	12,5
Біогаз	0,12	310	355	12,5
Коксовий газ	0,117	315	356	12,5
Генераторний газ	0,116	320	357	12,5

Згідно табл. 2 при використанні усіх дослідних газів в двигунах ГД100 потрібно зменшувати тиск наддувочного повітря на 6-12 % та збільшувати температуру наддувочного повітря на 3-7%. Ступінь стиску ε залишаються не змінним, а кут випередження запалювання змінюються для різних НГП у незначних межах (1-4 гр.п.к.в.).

Порівняння показників двигуна 11ГД100М за базових та оптимізованих параметрів наведено на рис. 11.

При використанні рекомендованих значень параметрів двигуна відбувається збільшення максимального тиску та температури циклу, повноти згоряння палива (рис. 11). Як результат, підвищується на 2-8 % індикаторний ККД двигуна (з 0,43-0,46 до 0,46-0,49) у порівнянні з базовим варіантом.

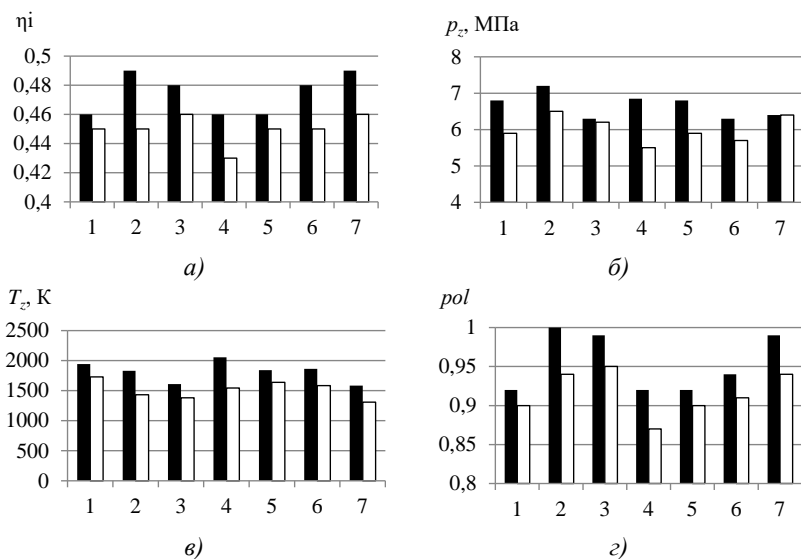


Рисунок 11. Порівняння показників газового двигуна 11ГД100М за базових та оптимізованих параметрах при використанні природного газу та НГП:

а – індикаторний ККД; б – максимальний тиск циклу; в – максимальна температура циклу; з – повнота згоряння; ■ – за оптимізованих параметрах; □ – за базових параметрах; 1 – Природний газ; 2 – Синтез-газ; 3 – Піролізний газ; 4 – Шахтний газ; 5 – Біогаз; 6 – Коксовий газ; 7 – Генераторний газ

ВИСНОВКИ

1. Транспорт, промисловість, енергетика та сільське господарство згубно впливають на екологічну ситуацію в Україні та викликають такі негативні наслідки як парниковий ефект, кислотні дощі, руйнування озонового шару. Утилізація побічних продуктів промислового та сільськогосподарського виробництва, так званих низькокалорійних газів, дозволить не тільки покращити екологічну ситуацію, але і виробляти електроенергію та тепло, частково замінюючи корисні копалини. Одним із шляхів вирішення цієї проблем, є використання низькокалорійних газів в якості альтернативних палив для стаціонарних енергоустановок з двигунами внутрішнього згорання.

2. Проаналізовано сучасний стан проблеми виробництва і використання НГП у ДВЗ. НГП доцільно використовувати в стаціонарних двигунах з ФФЗ, які менш вимогливі до якісного та кількісного складу НГП порівняно з іншими типами ДВЗ. Запропоновано загальні підходи щодо їх конвертації.

3. Найкращими властивостями володіють НГП, що мають високі значення метанового числа, нижчої теплоти згорання, низький вміст інертних компонентів та широкі межі займання. Проте, підвищений вміст окремих компонентів НГП неоднозначно впливає на властивості палив та показники двигунів.

4. Показано, що при використанні більшості низькокалорійних газових палив на режимі номінальної потужності показники ефективності циклу майже не змінюються у порівнянні з роботою на природному газі. Проте, слід відзначити збільшення в 1,5-5,6 разів об'ємної витрати НГП внаслідок суттєвого зменшення нижчої теплоти згорання цих палив.

5. При використанні НГП в двигунах 11ГД100М потрібно зменшувати тиск наддувочного повітря на 6-12 % та збільшувати його температуру на 3-7 %. Ступінь стиску є залишається не змінним, кут випередження запалювання змінюються для різних НГП у незначних межах (1-4 гр.п.к.в.). Запропоновані значення параметрів забезпечують підвищення індикаторного ККД двигуна на 2-8 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні екологічні проблеми України [Електронний ресурс] / ECOTOWN – Режим доступу: <https://ecotown.com.ua/news/Osnovni-ekolohichni-problemy-Ukrayiny-u-2014-rotsi> – 08.12.2014.
2. Тверді побутові відходи в Україні: ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ СЦЕНАРІЇ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ Підсумковий звіт [Електронний ресурс] / Міжнародна фінансова корпорація (IFC, Група Світового банку) – Режим доступу: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/504c5765-89d4-4be1-916e-ea27aa94feaf/22.+Тверді+побутові+відходи+в+Україні+ПОТЕНЦІАЛ+РОЗВИТКУ+Сценарії+розвитку+галузі+оводження+.pdf?MOD=AJPERES&CVID=INpI3Ew> –19.03.2021.
3. Канило П. М. Анализ эффективности использования альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / П. М. Канило, И. В. Парсаданов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2009. – №1. – С. 8–13.
4. Ассад М. С. Влияние состава альтернативных моторных топлив на процесс их сгорания / М. С. Ассад // *Автомобильная промышленность*. – 2007. – №10. – С. 10–11.
5. Трегуб Е. Европейский опыт утилизации сбросного энергопотенциала промышленных газов / Е. Трегуб // *Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы»*. – 2008. – № 4.
6. Марченко А. П. Проблемы и перспективы производства синтетических газовых топлив (Обзор) / А. П. Марченко, А. А. Осетров, С. С. Кравченко // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2013. – №4. – С. 5-14.
7. Worldwide Gasification Database Analysis [Електронний ресурс] / National Energy Technology Laboratory (NETL) – Режим доступу: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/worlddatabase/summary.html> – 10.2010.

8. Пятничко А. И. Результаты обследования полигонов тбо Украины для установления объемов добычи и состава биогаза / А. И. Пятничко, Г. В. Жук, В. Е. Баннов // *Технические газы*. – 2010. – №2. – С. 63–66.

9. European Biogas Association [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://european-biogas.eu>

10. Гелетуха Г. Г. Перспективы производства и использования биогаза в Украине / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев / Аналитическая записка БАУ // Биоэнергетическая ассоциация Украины. – 2013. – 22 с.

11. Гелетуха Г. Г. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная, Е. Н. Олейник // *Промышленная теплотехника*. – 2013. – Т. 35, № 5. – С.48–55.

12. Газотурбинные электростанции [Электронный ресурс] / ООО «НИК». – режим доступа: <http://turbonik.ru/>

13. Кузьменко И. Ф. Технология комплексной переработки шахтного газа с получением товарного сниженного метана / И. Ф. Кузьменко, А. И. Рубцов, А. Л. Довбиш, А. А. Мельниченко // АГЗК+АТ. – 2011. – №5(59). – С. 5–9.

14. Энергетические установки и окружающая среда : учеб. пособ. / [В. А. Маляренко, Г. Б. Варламов, Г. Н. Любчик и др.]. – Харьков : ХГАГХ, 2002. – 398 с.

15. Пылев В. А. Шахтный газ – моторное топливо для двигателей внутреннего сгорания / В. А. Пылев, С. А. Кравченко, А. А. Прохоренко, Е. Г. Заславский, В. В. Шпаковский // *Двигатели внутреннего сгорания*, 2007. – № 1. – С. 10–15.

16. Global Methane Initiative. Метан из угольных шахт: возможности сокращения выбросов, совершенствования сбора и утилизации [электронный ресурс] Отчет GMI/ Global Methane Initiative. — 2011. – режим доступа к отчету: https://www.globalmethane.org/documents/coal_fs_rus.pdf

17. Gregorz Przybyla. Energy analysis of a small capacity SI engine fueled with lean air gas mixture / Gregorz Przybyla, Stefan Postrzednik, Zbigniew Zmudka // *Powertrain and Transport*. – 2012. – vol.19, №2. – P. 423–432.
18. Мысник М. И. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания / М. И. Мысник, А. Е. Свистула // *Ползуновский вестник*. – 2009. – №1-2. С. 37–43.
19. Mollenhauer K. Handbook of diesel engines / Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 636 p.
20. Mueller G. P. Landfill Gas Application Development of the Caterpillar G3600 Spark-Ignited Gas Engine / G. P. Mueller // *J. Eng. Gas Turbines Power*. – 1995. – vol.117, №4. – P. 820–825.
21. GE Power & Water. Distributed Power [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://www.ge-distributedpower.com/products/power-generation>
22. Буров В. Д. Потенциал применения газопоршневых двигателей зарубежных производителей на территории РФ. / В. Д. Буров, А. А. Дудолин, В. В. Макаревич, Е. В. Макаревич. // *Турбины и дизели*. – 2009. – № 3. – С. 28-33.
23. Опыт эксплуатации газопоршневых агрегатов на биогазе [Электронный ресурс] / Генрих БААС, компания DEUTZ Power Systems (MWM GmbH) – Режим доступа: http://www.ges-ukraine.com/maininfo_14-17.html
24. Przybyla G. Performance of SI engine fuelled with LCV gas – [электронный ресурс] / G. Przybyla, L. Ziolkowski, A. Szlek – Режим доступа: http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.mam.gov.tr/ContentPages/17571677.pdf
25. Ankit B Joshi. Using biogas in SI engine by Changing ignition parameter and compression ratio: a review / Ankit B Joshi, Pratik B Umrigar, Akash B Patel, Karan A Patel // *IJSRD – International Journal for Scientific Research & Development*. – 2015. – vol. 3. – P. 751–756.
26. Przybyla. G. Assessment of the performance of a small capacity SI engine fuelled with model lean mixture of biogas // *International Journal of Thermodynamics*. – 2013. – vol. 16, №4. – P. 179–188.

27. Goto S. Developmen of Hight Density Gas Engine 22AG / S. Goto, H. Nishi, S. Nakayama, S. Takahashi // *IHI Engineering Review*. – 2004. – Vol. 37, №3. – P. 104–107.
28. Лукшо В. А. Исследования показателей двигателя с искровым зажиганием при работе на газовых топливах / В. А. Лукшо, А. В. Козлов, А. С. Теренченко, А. А. Демидов // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2011. – №6 (24). – С. 28–33.
29. Yamasaki Y. Combustion Characteristics of Low-Calorific-Value Gaseous Fuels in Small Gas Engine / Y. Yamasaki, G. Tomatsu, Y. Nagata, S. Kaneko // *Journal of Environment and Engineering*. – 2009. – Vol.4, №1. – P. 188–197.
30. Munoz M. Low heating value gas on spark ignition engines / M. Munoz, F. Moreno, J. Morea-Roy, J. Ruiz, J. Arauzo // *Biomass & Bioenergy*. – 2000. – №15. – P. 431–439.
31. Huang J. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine / J. Huang, R. J. Crookes // *Fuel*. – 1998. – Vol. 77, №15. – P. 1793–1801.
32. Газовые двигатели Caterpillar серии G3600-G3300: руководство по выбору, монтажу и эксплуатации / G: Caterpillar. – 1997. – 46 с.
33. Roubaud A. Improving performances of a lean burn cogeneration biogas engine equipped with combustion prechambers / A. Roubaud, D. Favrat // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84, №16. – P. 2001–2007.
34. Генкин К. И. Газовые двигатели ГД100 и агрегаты на их базе / К. И. Генкин, Д. Т. Аксенов, Б. Н. Струнге. – Л. : Недра, 1970. – 328 с.
35. Поставка газопоршневой электрической станции ГПЭС-ГД100/3000. Техпредложение / ООО «Инновационные технологии – Энергетика». – 2014. – 15 с.
36. Мотор-генераторы газовые 11ГД100М. Технические условия (ТУЗ–408-76). – [Чинний від 1976.01.10]. – Харьков : ГП «Завод им. Малышева», 1976. – 38 с.
37. Звіт № 379. О заводських и доводочных испытаниях газового двигателя 1ГД100 / Синенко / Производственное объединение «Завод имени Малышева». – Харьков, 1966 г. – 27 с.

38. Акт приемки междуведомственной комиссией головного образца модернизированного газового мотор-генератора 11ГД100М. – Харьков, 1970.
39. Газобаллонные автомобили: Справочник / А. И. Морев, В. И. Ерохов, Б.А. Бекетов и др. М.: Транспорт, 1992. – 175 с.
40. Генкин К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. – М. : Машиностроения, 1977. – 196 с.
41. Shivaprasad K. V. Performance, Emission and Fuel Induction System of Hydrogen Fuel Operated Spark Ignition Engine – A Review / K. V. Shivaprasad, G. N. Kumar, K. R. Guruprasad // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. – 2012. – Vol.2. – P. 565–571.
42. Гусаков С. В. Анализ возможности применения топлив с низкой удельной теплотой сгорания в ДВС / С. В. Гусаков, И. В. Афанасьева, Х. Мурад // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2011. – №2 (22). – С. 34–37.
43. Ramos J. I. Internal combustion engine modeling / J. I Ramos. – New York : Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 425 p.
44. Кравченко С. С. Конвертація стаціонарного двигуна ГД100 для роботи на низькокалорійних газових паливах [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.03 / Сергій Сергійович Кравченко ; [наук. керівник Марченко А. П.] ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків, 2016. – 21 с. – Бібліогр.: С. 16-18. – укр.
45. Arroyo J. Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with syntetic gases derived from biogas / J.Arroyo, F. Moreno, M. Munoz, C. Monne, N. Bernai // *Fuel*. – 2014. – Vol. 117. – P. 50–58.
46. Karim G. A. Methane-carbon dioxide mixtures as a fuel / G. A. Karim, I. Wierzba. // *Natural Gas: Fuels and Fueling*. – 1992. – SEA SP-927. – P. 81–91.
47. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников – М. : Наука. 1985. – 110 с.