

*В.М. Бганцев, А.М. Левтеров*

## ГАЗОВІ ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ В СИСТЕМАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОБ'ЄКТІВ ВЕЛИКОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*В запропонованій статті аналізується потенціальна можливість підвищення ефективності енергетичного комплексу з газовою турбіною та твердооксидними високотемпературними паливними елементами, до структури якого інтегровано допоміжний поршневий газовий двигун внутрішнього згоряння. Природний газ (метан) використовується як енергетичний носій. Предметом дослідження є показники робочого процесу допоміжного двигуна при його роботі на сумішевому газовому паливі (монооксид вуглецю - метан) змінного складу. Дослідження проведені розрахунково-аналітичним методом з використанням спрощеної методики розрахунку робочого циклу поршневого двигуна. Розглядається рішення декількох проблем: утилізація викидів оксиду вуглецю на виході з паливних елементів під час їх прогрівання; забезпечення додаткового джерела електричної енергії для живлення пристроїв конверсії метану та додаткового джерела теплоти для його паро-плазмової конверсії; утилізація оксиду вуглецю та залишків неповної конверсії метану. Розрахункові дослідження показників робочого процесу допоміжного газового двигуна потужністю 100 кВт на сумішевому паливі змінного складу (оксид вуглецю - метан) показують його стабільну роботу при відповідній корекції системи регулювання паливподачі. Величина ефективного коефіцієнту корисної дії у всьому діапазоні змін складу газової суміші мало змінюється (від 0,369 до 0,380). Його зростання спостерігається зі збільшенням частки метану в сумішевому паливі. Середній ефективний тиск циклу практично не змінюється, а максимальний тиск циклу при роботі двигуна у всьому діапазоні змін у складі суміші становить на рівні 8,0 МПа. Спостерігається невелика зміна максимальної температури зі збільшенням частки метану в паливній суміші - (від 2117 К до 2048 К). Дослідження засвідчили про ефективність запропонованого способу покращення екологічних та економічних характеристик енергетичного комплексу з паливними елементами, шляхом включення в його структуру допоміжного газового двигуна з мінімально витратною адаптацією для роботи на сумішевому паливі змінного складу.*

*Ключові слова:* допоміжний ДВЗ; газова турбіна; газова суміш; монооксид вуглецю; паливний елемент; енергокомплекс; токсичність.

### Вступ

На сучасному етапі розвинення об'єктів середньої і великої потужності, генеруючих електроенергію, які побудовані з використанням ефективних паливних елементів (ПЕ), з'явилися схеми, де присутні двигуни внутрішнього згоряння з незвичайним призначенням. Використання ДВЗ у таких схемах сприяє значному зменшенню токсичності викидів енергетичного комплексу (ЕК) за рахунок утилізації продуктів, що утворюються в періоди виведення ПЕ на розрахункові режими роботи.

Основним видом палива в ЕК є природний газ метан, а токсичним продуктом конверсійних процесів у пристроях перед ПЕ – монооксид вуглецю СО. Його кількість максимальна перед початком прогрівання ПЕ і значно зменшується наприкінці цього процесу. Пов'язане це із зміною концентрації окислювача – кисню з повітря в широкому діапазоні і з неоптимальністю роботи ПЕ. Кількість викидів СО взагалі визначається потужністю ЕК, але для її зменшення достатньо газового поршневого двигуна потужністю до 100 кВт, в якому цей газ спалюється, тобто утилізується. Для підвищення ефективності спалювання СО в камері згоряння ДВЗ до нього додається метан. Таким чином, в процесі прогрівання ПЕ співвідношення між СО та  $\text{CH}_4$  змінюється, але можливе і підтримання постійного його значення. При цьому дещо змінюється

регулювання системи живлення ДВЗ сумішевим паливом. Додатково теплота з відпрацьованими газами (ВГ) ДВЗ надходить в пристрої паро-плазмохімічної конверсії метану.

Всі означені функції можливо реалізувати у газовій турбіні (ГТ), що є складовою частиною ЕК, і виробляє до 25% загальної енергії. Однак ДВЗ має більш високий ККД і менший рівень токсичності ВГ, ніж відповідні показники ГТ. Навантаженням допоміжного ДВЗ є електрогенератор, енергія якого в період прогрівання ПЕ може використовуватись для живлення пристроїв, що задіяні в обслуговуванні конверсійних приладів метану.

### Аналіз попередніх досліджень

Побудова сучасних електростанцій великої потужності з використанням ПЕ – відносно новий напрямок, який має суттєві переваги перед традиційними підходами [1, 2]. ЕК, побудовані за такими схемами мають більш високий ККД і можливість регулювання потужності у великому діапазоні за рахунок групового включення ПЕ. Але є й недоліки, пов'язані з необхідністю дотримання особливих умов в період виведення ПЕ на робочий режим. Здебільшого використовуються високотемпературні твердооксидні ПЕ, які з метою підвищення надійності потребують застосування особливих технологій при експлуатації [3, 4]. Практично для роботи усіх ЕК з ПЕ у якості палива використову-

ється метан, з якого за допомогою конверсійних технологій отримують водень з супутніми газами, а у якості окислювача застосовується кисень з повітря. Супутнім продуктом конверсії метану є також оксид вуглецю, який треба утилізувати [5, 6, 7, 8], бо його неможливо викидати в навколишнє середовище через високий рівень токсичності. Неefективним є шлях просто спалювання з утворенням парникового газу CO<sub>2</sub>. Більш прийнятним підходом виявляється використання газових ДВЗ, за допомогою яких, в результаті спалювання в них оксиду

вуглецю у суміші з метаном, отримують невеликий додаток енергії, в основному електричної, та запобігають потраплянню CO в атмосферу [ 9, 10, 11]. Потужності допоміжного ДВЗ до 100 кВт цілком достатньо для впровадження такої технології в систему ЕК потужністю 20 – 30 МВт. На таку технологію орієнтувалися при розробці у відділі водневої енергетики ІПМаш НАН України схеми ЕК потужністю 25 МВт (рис.1) з використанням твердооксидних високотемпературних паливних елементів (ТОПЕ).

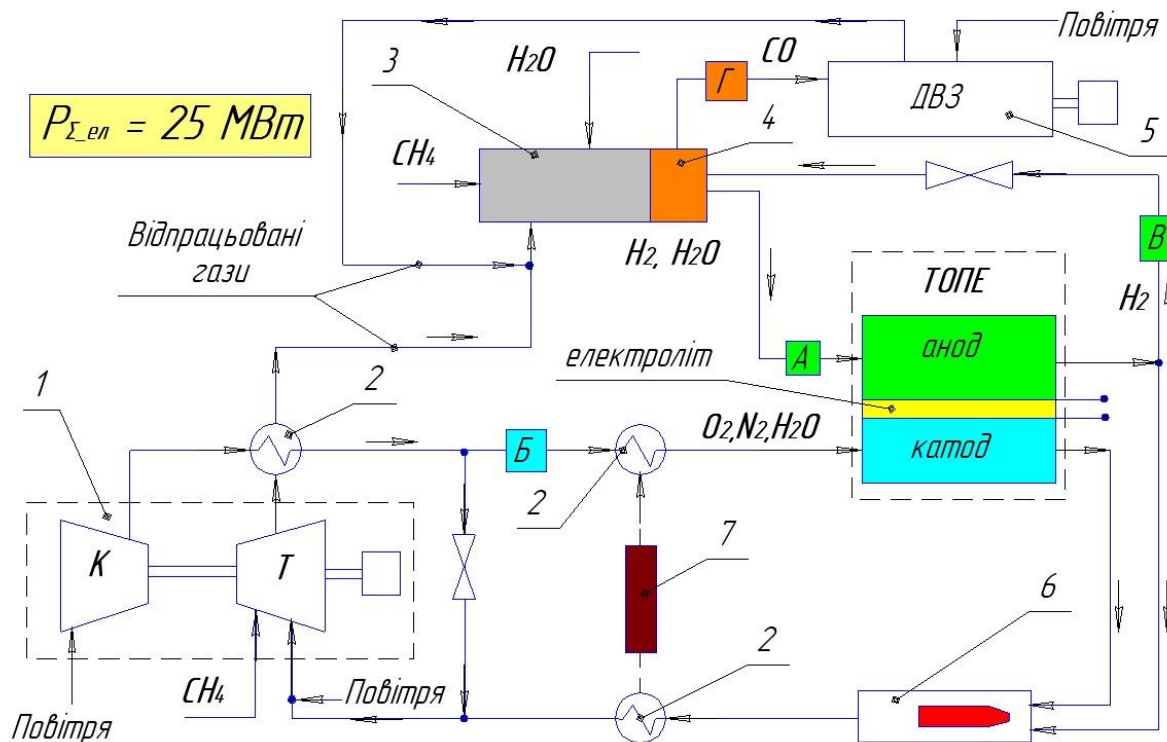


Рис. 1. Структурна схема ЕК потужністю 25 МВт з використанням допоміжного газового ДВЗ : 1 – ГТУ; 2 – теплообмінник; 3 – блок попередньої паро-плазмохімічної конверсії метану; 4 – блок сепарації газів; 5– газовий ДВЗ; 6 – паливник; 7– колектор з підігрівом

Таку ж технологію пропонують іноземні фахівці з використанням ТОПЕ у складі енергетичних установок морських суден [9]. Перевести на живлення оксидом вуглецю чи його сумішшю з метаном можна практично будь-який поршневий газовий ДВЗ. Для цього знадобиться переналаштування системи паливоподачі, яке б забезпечило реакцію двигуна на поточну зміну складу паливної суміші. Електронне керування ДВЗ дозволяє реалізувати такі вимоги.

**Мета дослідження**

Метою дослідження було розрахункове визначення показників робочого циклу газового двигуна, пристосованого для роботи на сумішевому паливі оксид вуглецю – метан в різних співвідношеннях.

Потужність двигуна для всіх варіантів розрахунків була прийнята однаковою й складала 100 кВт. Для дослідження обрано газовий двигун Caterpillar DG100-2S з номінальною потужністю 100 кВт при роботі на метані. Варіанти складу сумішевого палива, використані в розрахунках, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Склад сумішевого палива

Склад сумішевого палива, % об.						
CH <sub>4</sub>	100	95	90	80	70	60
CO	0	5	10	20	30	40

Середні значення пбитомої об’ємної теплоти згоряння складових сумішевого палива, одержані з

різних літературних джерел, прийняті наступними:  $\text{CH}_4$  – 33520 кДж/м<sup>3</sup>;  $\text{CO}$  – 12630 кДж/м<sup>3</sup>.

Розрахунки робочого циклу виконувались за спрощеною методикою, за основу якої прийнято методику, розроблену у відділі водневої енергетики ПМаш НАН України. Аналізувались значення наступних показників робочого циклу, отримані при роботі двигуна на сумішевому паливі різного складу: ефективний ККД ( $\eta_e$ ); середній ефективний тиск циклу ( $p_e$ ); витрата сумішевого палива ( $V_{\text{CH}_4}$ ); максимальний тиск циклу ( $P_z$ ); кут максимального

тиску на індикаторній діаграмі ( $\varphi_z$ ); максимальна температура циклу ( $T_z$ ); ступінь підвищення тиску при згорянні ( $\lambda$ ).

#### Результати розрахунків

Результати розрахунків робочого циклу наведені на рис. 2, 3, з яких видно, що ефективний ККД від зміни складу палива у всьому діапазоні змінюється відносно мало, від 0,369 до 0,380, з тенденцією зростання при підвищенні концентрації  $\text{CH}_4$  в сумішевому паливі.

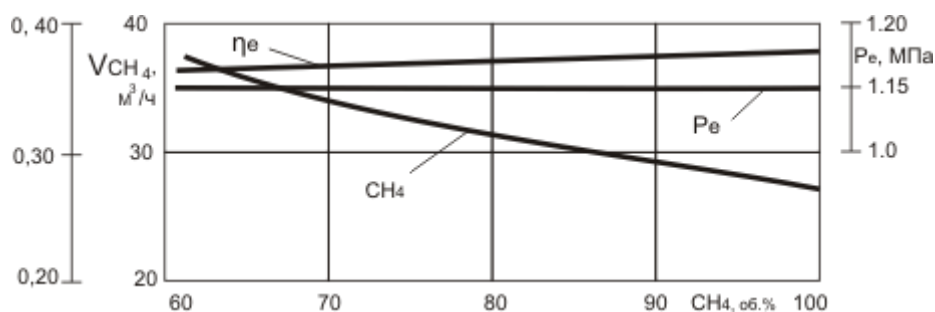


Рис. 2. Залежність витрати метану, середнього ефективного тиску та ефективного ККД двигуна Caterpillar DG-100-2S від частки метану в сумішевому паливі

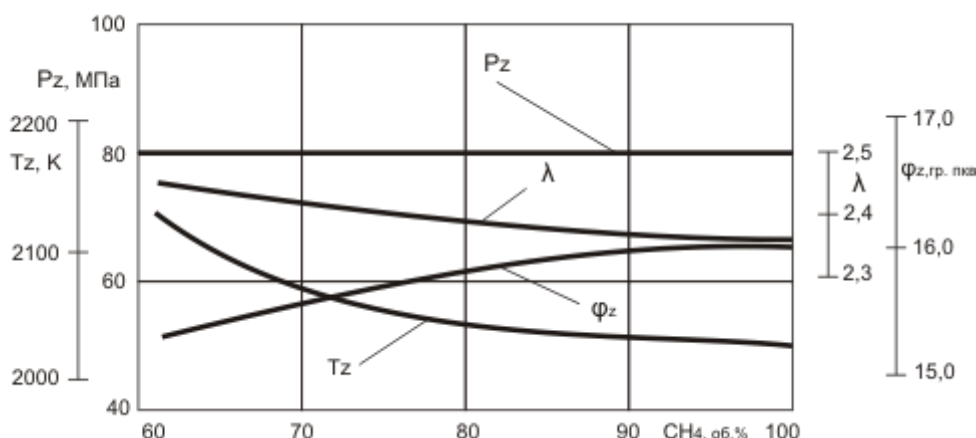


Рис. 3. Залежність максимального тиску і температури циклу, ступеня підвищення тиску при згорянні та кута максимального тиску двигуна Caterpillar DG-100-2S від частки метану в сумішевому паливі

Середній ефективний тиск циклу практично не змінюється, тому що при малих змінах ефективного ККД величина механічного ККД залишається майже на одному й тому ж рівні.

Витрата газового палива підвищується зі збільшенням у суміші частки  $\text{CO}$  – компоненти з більш низькою питомою теплотою згорання, та за умови підтримання незмінної потужності двигуна.

Величина максимального тиску циклу практично не змінюється у всьому діапазоні концентрацій компонентів сумішевого палива і знаходиться на рівні 8,0 МПа.

Ступінь підвищення тиску при згорянні має менші значення на режимі роботи двигуна, що живиться тільки метаном. В цьому випадку спостерігається невелике зростання тиску в процесі стискування у порівнянні з його значенням за концентрації  $\text{CH}_4$  в паливі 60% об. Це також відбивається на зміні ступеня підвищення максимального тиску у процесі згорання.

Збільшення кута максимального тиску та зниження максимальної температури циклу можна пояснити особливостями роботи системи регулювання кута випередження запалювання, якою

оснащено двигун. Максимальна температура циклу зі збільшенням об'ємної частки  $\text{CH}_4$  в паливній суміші зменшується з 2117 К до 2048 К через збільшення подовження згорання після верхньої мертвої точки (ВМТ).

### Висновки

Використання допоміжного газового ДВЗ у складі ЕК великої потужності з ПЕ в період їх прогрівання і, як наслідок, зміни кількості викидів оксиду вуглецю дозволяє суттєво зменшити рівень цих викидів шляхом спалювання їх суміші з метаном в камері згорання ДВЗ.

Для реалізації такої технології покращення екологічних характеристик ЕК достатньо використання газового двигуна відносно невеликої потужності (близько 100 кВт) з мінімально витратною адаптацією його до сумішевого палива змінного складу.

Використання допоміжного ДВЗ у якості приводу електрогенератора (крім основного призначення - утилізація викидів оксиду вуглецю) надає йому ще й додаткову функцію автономного джерела електроенергії для живлення пристроїв конверсії палива для ПЕ, а також джерела теплоти, що використовується у відповідних технологічних процесах ЕК.

### Список літератури:

1. Fridman A. A. *Plasma physics and engineering* / A. A. Fridman, L.A. Kennedy – New York, 2004. – 853 p. DOI:10.1201/9781482293630.
2. Зырянова М.М. Каталитическая конверсия углеводородного сырья в топливо для энергоустановок / М.М. Зырянова, С.Д. Бадмаев, В.Д. Беляев // Катализ в нефтеперерабатывающей промышленности. – 2013. – №3. – С. 22 – 27.
3. Li Bino /Study on the operating parameters of the 10 kW SOFC-CHP system with syngas // Bino Li, Zewei L., Juanzhong Z., Minfang H. at. al. // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2021. – №8. – P. 500–509. DOI: 10.1007/s40789-021-00451-3.
4. Choundhury A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation – a review / A. Choundhury, H. Chandra, A. Arora // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – №20. – P. 430 – 442. DOI:10.1016/j.rser.2012.11.031.
5. Афанасьев С.В. Технология получения синтез-газа паровой конверсией углеводородов / С.В. Афанасьев, О.С. Рощенко, С.П. Сергеев // *Химическая техника. Межотраслевой журнал для главных специалистов предприятий*. – 2016. – №6. – С. 30–32.
6. Шаравин Э.А. Генератор синтез-газа для двигателей внутреннего сгорания / Э.А. Шаравин, Е.Ю. Аристова // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. – 2010. – № 8 (88). – С. 30–38.
7. Чигодаева Д.В. Плазмохимическая установка для конверсии природного газа в углерод и водород / Д.В. Чигодаева, В.П. Шиян, Н.А. Цыбенова // *Вестник науки Сибири*. – 2012. – №4(5). – С.60–65.
8. Цанев С.В. Га-

9. Zyrjanova, M.M., Badmaev, S.D., Belyaev, V.D. (2013), «Catalytic conversion of hydrocarbon raw materials in fuel for power plants», *Catalysis in the oil refining industry [Kataliticheskaya konversiya uglevodородного syr'ya v toplivo dlya energoustanovok]*, *Kataliz v neftepererabatyvayushchej promyshlennosti*, No. 3. – pp. 22 – 27.
3. Bino, Li, Zewei, L., Juanzhong, Z., Minfang, H. at. al. (2021), «Study on the operating parameters of the 10 kW SOFC-CHP system with syngas», *International Journal of Coal Science & Technology*, No. 8, pp. 500–509. DOI: 10.1007/s40789-021-00451-3.
4. Choundhury, A., Chandra, H., Arora, A. (2013), «Application of solid oxide fuel cell technology for power generation – a review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No 20, pp. 430 – 442. DOI:10.1016/j.rser.2012.11.031.
5. Afanas'ev, S.V., Roshchenko, O.S., Sergeev, S.P. (2016), «Technology for obtaining synthesis gas by steam converting hydrocarbons», *Chemical technique. Intersectoral journal for the main specialists of enterprises [Tekhnologiya polucheniya sintez-gaza parovoj konversiej uglevodородov]*, *Himicheskaya tekhnika. Mezhotraslevoj zhurnal dlya glavnyh specialistov predpriyatij*, No. 6, pp. 30–32.
6. Sharavin, E.A., Aristova, E.Yu. (2010), «Synthesis Gase generator for internal combustion engines», *Alternative energy and ecology [Generator sintez-gaza dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya]*, *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya*, No. 8 (88), pp. 30–38.
7. Chigodaeva, D.V., Shiyani, V.P., Cybenova, N.A. (2012), «Plasmochemical installation for converting natural gas into carbon and hydrogen», *Bulletin of Siberia Science [Plazmohimicheskaya ustanovka dlya konversii prirodного gaza v uglevod i vodorod]*, *Vestnik nauki Sibiri*, No.4(5), pp.60–65.
8. Canev, S.V., Burov, V.D., Remezov, A.N. (2002), *Gas turbine and steam-gas installations of thermal power plants, edited by Canev, S.V., a textbook for universities [Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovyh elektrostancij, pod red., Uch. Posobie dlya vuzov]*, M: Publishing House MEI, 584p.
9. Sapra, H., van Biert, L., van Sluijs, W. (2021), «Integration of solid oxide fuel cell and internal combustion engine formaritime applications», *Applied Energy (Elsevier)*, Vol. 281, pp. 110–115. DOI:org/10.1016/j.APENERGY.2020.115854.
10. Kirillov V.A., Shigarov, A.B., Kuzin, N.A. (2013), «Thermochemical conversion of fuels into hydrogen-containing gas using recuperative heat of internal combustion engines», *Teoretikal Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 47 (5), pp. 524–537. DOI:10.1134/S0040579513050187.
11. Oryyshchyn, D., Harum, N., Tucker, D. (2018), «Fuel Utilization Effects on system Efficiency in Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Hybrid Systems», *Applied Energy (Elsevier)*, Vol. 228, pp. 1953–1965. DOI:10.1016/J.APENERGY.2018.07.004.

### Bibliography (transliterated):

1. Fridman, A.A., Kennedy, L.A. (2004), *Plasma physics and engineering*, New York, 853 p. DOI:org/10.1201/9781482293630.
2. Zyrjanova, M.M., Badmaev, S.D., Belyaev, V.D. (2013), «Catalytic conversion of hydrocarbon raw materials in fuel for power plants», *Catalysis in the oil refining industry [Kataliticheskaya konversiya uglevodородного syr'ya v toplivo dlya energoustanovok]*, *Kataliz v neftepererabatyvayushchej promyshlennosti*, No. 3. – pp. 22 – 27.
3. Bino, Li, Zewei, L., Juanzhong, Z., Minfang, H. at. al. (2021), «Study on the operating parameters of the 10 kW SOFC-CHP system with syngas», *International Journal of Coal Science & Technology*, No. 8, pp. 500–509. DOI: 10.1007/s40789-021-00451-3.
4. Choundhury, A., Chandra, H., Arora, A. (2013), «Application of solid oxide fuel cell technology for power generation – a review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No 20, pp. 430 – 442. DOI:10.1016/j.rser.2012.11.031.
5. Afanas'ev, S.V., Roshchenko, O.S., Sergeev, S.P. (2016), «Technology for obtaining synthesis gas by steam converting hydrocarbons», *Chemical technique. Intersectoral journal for the main specialists of enterprises [Tekhnologiya polucheniya sintez-gaza parovoj konversiej uglevodородov]*, *Himicheskaya tekhnika. Mezhotraslevoj zhurnal dlya glavnyh specialistov predpriyatij*, No. 6, pp. 30–32.
6. Sharavin, E.A., Aristova, E.Yu. (2010), «Synthesis Gase generator for internal combustion engines», *Alternative energy and ecology [Generator sintez-gaza dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya]*, *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya*, No. 8 (88), pp. 30–38.
7. Chigodaeva, D.V., Shiyani, V.P., Cybenova, N.A. (2012), «Plasmochemical installation for converting natural gas into carbon and hydrogen», *Bulletin of Siberia Science [Plazmohimicheskaya ustanovka dlya konversii prirodного gaza v uglevod i vodorod]*, *Vestnik nauki Sibiri*, No.4(5), pp.60–65.
8. Canev, S.V., Burov, V.D., Remezov, A.N. (2002), *Gas turbine and steam-gas installations of thermal power plants, edited by Canev, S.V., a textbook for universities [Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovyh elektrostancij, pod red., Uch. Posobie dlya vuzov]*, M: Publishing House MEI, 584p.
9. Sapra, H., van Biert, L., van Sluijs, W. (2021), «Integration of solid oxide fuel cell and internal combustion engine formaritime applications», *Applied Energy (Elsevier)*, Vol. 281, pp. 110–115. DOI:org/10.1016/j.APENERGY.2020.115854.
10. Kirillov V.A., Shigarov, A.B., Kuzin, N.A. (2013), «Thermochemical conversion of fuels into hydrogen-containing gas using recuperative heat of internal combustion engines», *Teoretikal Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 47 (5), pp. 524–537. DOI:10.1134/S0040579513050187.
11. Oryyshchyn, D., Harum, N., Tucker, D. (2018), «Fuel Utilization Effects on system Efficiency in Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Hybrid Systems», *Applied Energy (Elsevier)*, Vol. 228, pp. 1953–1965. DOI:10.1016/J.APENERGY.2018.07.004.

Надійшла до редакції 10.07.2022 р.

**Бганцев Валерій Микитович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу водневої енергетики Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, e-mail: dppp@ipmach.kharkov.ua, <http://orsid.org/0000-0003-0661-1040>.

**Лєвтеров Антон Михайлович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, e-mail: antmix 1947@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5308-1375>.

## INTERNAL COMBUSTION GAS ENGINES IN SYSTEMS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF FUEL ELEMENTS OF LARGE ENERGY FACILITIES

*V.M. Bgantsev, A.M. Levterov*

The proposed article analyzes the potential possibility of increasing the efficiency of an energy complex with a gas turbine and solid oxide high-temperature fuel cells, into the structure of which an auxiliary piston gas engine of internal combustion is integrated. Natural gas, methane was used as an energy carrier. The subject of the research is indicators of the working process of the auxiliary engine when it is working on mixed gas fuel (carbon monoxide - methane) of variable composition. The research was carried out by the computational and analytical method using a simplified method of calculating the working cycle of a piston engine. Solutions to several problems are considered: disposal of carbon monoxide emissions at the exit from fuel cells during their heating; provision of an additional source of electrical energy for powering methane conversion devices and an additional source of heat for its steam-plasma conversion; utilization of carbon monoxide and residues of incomplete methane conversion. Calculation studies of indicators of the working process of an auxiliary gas engine with a capacity of 100 kW on mixed fuel of variable composition (carbon monoxide - methane) show its stable operation with appropriate correction of the fuel supply regulation system. The effective efficiency coefficient in the entire range of fuel concentration slightly changed (from 0.369 to 0.380). Its growth is observed with an increase in the proportion of methane in the mixed fuel. The average effective pressure of the cycle practically does not change, and the maximum pressure of the cycle during engine operation in the entire range of changes in the composition of the mixture is at the level of 8.0 MPa. Slight change in the maximum temperature with an increase in the concentration of methane in the fuel mixture (from 2117 K to 2048 K) has been noticed. The research testified to the effectiveness of the proposed method of improving the environmental and economic characteristics of the energy complex with fuel cells, by including in its structure an auxiliary gas engine with minimal cost adaptation for operation on mixed fuel of variable composition.

**Key words:** auxiliary internal combustion engine; gas turbine; energy complex; fuel cell; gas mixture; carbon monoxide; toxicity.