

## АВТОНОМНА ВИСОКОЕФЕКТИВНА КОГЕНЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА

В роботі розглядаються питання розроблення і впровадження ефективних та екологічно чистих енергосистем на основі технології когенерації (спільного виробництва електроенергії та тепла). Пропонується автономна когенераційна установка на базі роторно-лопатєвого двигуна із зовнішнім підведенням тепла, який ефективно використовує паливо, має високий ККД і розширені функціональні можливості. Для зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище в установці використовується інноваційна технологія енергоефективного спалювання вуглеводнів (твердих, рідких, газоподібних) у струмені перегрітої водяної пари, що забезпечує суттєве зменшення показників вмісту токсичних продуктів згоряння, шкідливих викидів в атмосферу. Установка може використовуватися для розв'язання задач автономного електро- і тепlopостачання промислових та житлових об'єктів, а також для енергоефективного та екологічно безпечного спалювання (утилізації) некондиційних вуглеводневих палив і горючих виробничих відходів.

**Ключові слова:** теплоенергетика, енергоефективність, когенерація, роторно-лопатєвий двигун, перегріта водяна пара.

М.М. KOSIYUK, A.M. KOSIYUK  
Khmelnitskyi National University

## INDEPENDENT HIGH-EFFICIENT COGENERATION PLANT

The paper deals with the development and implementation of efficient and environmentally friendly energy systems based on cogeneration technology (co-generation of electricity and heat). It offers a standalone cogeneration unit based on a rotor-blade engine with an external heat supply, which uses fuel efficiently, has high efficiency and enhanced functionality. The plant uses innovative technology of energy-efficient combustion of hydrocarbons (solid, liquid, gaseous) in a stream of superheated water vapor, which significantly reduces the content of toxic combustion products and harmful emissions. The plant can be used to solve the problems of autonomous electricity and heat supply for industrial and residential facilities, as well as for energy-efficient and environmentally friendly combustion (disposal) of substandard hydrocarbon fuels (and combustible industrial waste). It is planned to continue the work in the direction of optimization synthesis of individual modules of the installation according to different criteria, which is important for its practical use.

**Keywords:** thermal power engineering, energy efficiency, cogeneration, rotary-blade engine, superheated water vapor.

### Вступ

Швидке виснаження основних енергоресурсів та їх стрімке подорожчання вимагають впровадження ефективних і екологічно чистих енергосистем. У всіх розвинених країнах ставиться завдання переходу на новий технологічний рівень, пов'язаний з енергозбереженням і скороченням використання традиційних ресурсів. При існуючому централізованому способі виробництва теплової та електричної енергії відбуваються значні перевитрати палива, пов'язаного з низькою ефективністю електростанцій і з втратами в електричних і теплових мережах. Оптимальним вирішенням цієї проблеми є впровадження однієї із провідних в світі технологій когенерації (спільного виробництва електроенергії та тепла). Вона поєднує такі характеристики, які недавно вважалися практично несумісними: найвищу ефективність використання палива, більш ніж задовільні екологічні параметри, а також автономність систем когенерації. Технологія когенерації реалізується в установках, що складаються з чотирьох основних елементів: двигуна, електрогенератора, системи утилізації тепла та системи контролю і управління. В теперішній час надзвичайно актуальним завданням є розробка і впровадження мікро- і мінікогенераційних установок.

Мікро-когенераційна установка виробляє менше 5 кВт електроенергії. Замість того, щоб просто спалювати паливо на опалення, деяка частина енергії використовується для вироблення електроенергії на додаток до тепла. Ця електроенергія може використовуватися для домашніх потреб або у бізнесі, або (якщо дозволяє політика енергокомпанії) бути продана в електромережу.

Міні-когенераційна установка, зазвичай застосовується для забезпечення енергетичних потреб окремої будівлі або середнього бізнесу. Потужність типової установки – від 5 кВт до 500 кВт.

Когенерація найбільш ефективна, коли тепло використовується на тому ж майданчику або дуже близько до нього. Повний ККД падає, коли тепло необхідно передати на великі відстані. При цьому потрібні термоізовані трубопроводи, які дорогі і неефективні. У той же час електрику значно простіше можна передаватися на великі відстані по дротах, при цьому втрати навіть на великих відстанях істотно менші.

### Аналіз останніх досліджень чи публікацій

В умовах постійно зростаючої конкуренції у боротьбі за ресурси і наростання екологічних проблем різко проявляється протистояння виробників різних видів перетворювачів теплової енергії у механічну, а потім і в електричну як найбільш універсальну. У цьому протистоянні вже давно були виділені два основних напрямки: теплові машини (двигуни) і безмашинні перетворювачі енергії.

Відома найпростіша принципова схема теплоелектроцентралі (ТЕЦ), що складається з парового котла, паротурбінної установки з електрогенератором на одному валу, лінії споживача пари з відбором від турбіни, конденсатора, через який проходить система зовнішнього тепlopостачання, лінії конденсату і

циркуляційного насоса [1]. Однак дана принципова схема може бути застосована і економічно вигідна тільки для великих промислових ТЕЦ.

Відома принципова схема пароводяної котельні з використанням теплоти відхідних газів, що складається з парового котла, економайзера для підігріву мережної води, парової турбіни з компресором для димових газів на одному валу, лінії споживача пари, конденсатора пари, лінії конденсату і циркуляційного насоса [2]. Однак теплота димових газів використовується тільки для вироблення додаткової теплової енергії.

Одним із варіантів використання теплоти викидних газів є її трансформація в електроенергію, за рахунок застосування термоелектричного генератора (ТЕГ) [3]. Отримана електроенергія може напряду живити навантаження і/або заряджати акумулятор, що може бути застосовано для автоматизації котельні.

В когенераційній установці, що містить двигун зовнішнього згоряння, генератор електричної енергії, блок управління і котел з димоходом для відводу продуктів горіння палива, при цьому котел виконаний з можливістю передачі тепла споживачам теплової енергії і нагріву робочої частини двигуна зовнішнього згоряння, виконаного у вигляді двигуна Стірлінга, кінематично пов'язаного з генератором електричної енергії і підключеного до споживачів електричної енергії [4]. Недоліками когенераційної установки є високі показники вмісту токсичних продуктів згоряння і шкідливих викидів в атмосферу, недостатньо ефективне використання палива, що знижує ККД установки та її енергоефективність.

У роботах [5, 6] науково обґрунтована перспективна технологія енергоефективного спалювання некондиційних видів рідкого вуглеводневого палива і виробничих відходів у струмені перегрітої водяної пари. Це забезпечує низький вміст монооксиду вуглецю, оксидів азоту і сажі в продуктах згоряння, що задовольняє найжорсткішим екологічним нормативам. Отримані експериментальні результати мають перспективи подальшого використання при створенні інноваційного екологічно безпечного теплоенергетичного устаткування.

**Мета роботи** – створення автономної когенераційної установки (АКУ), що забезпечує ефективне використання палива, суттєве зменшення показників вмісту токсичних продуктів згоряння і шкідливих викидів в атмосферу на базі роторного лопатевого двигуна із зовнішнім підведенням тепла.

#### Виклад основного матеріалу

Авторами розроблена модульна високоєфективна АКУ на базі роторно-лопатевого двигуна із зовнішнім підведенням тепла, блок-схема якої зображена на рис. 1.

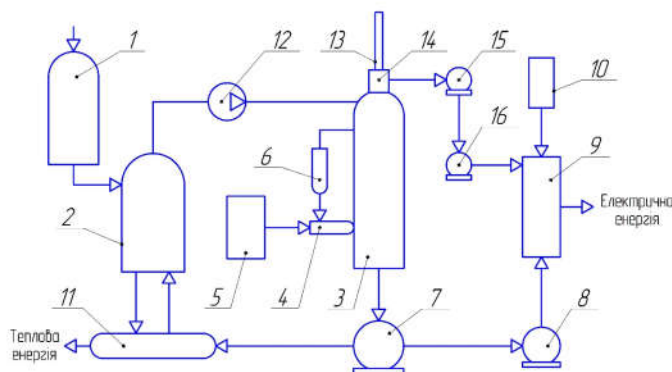


Рис. 1. Блок-схема автономної когенераційної установки:

- 1 – модуль водопідготовки; 2 – термоізольована місткість для води; 3 – термоізольований парогенератор; 4 – паливний пристрій; 5 – модуль підготовки і подачі палива; 6 – модуль подачі перегрітої водяної пари і гарячого повітря; 7 – термоізольований паровий роторно-лопатевий двигун; 8 – електричний генератор; 9 – модуль силового електрообладнання; 10 – блок керування; 11 – термоізольований пароводяний теплообмінник; 12 – насос; 13 – димохід; 14 – теплообмінник; 15 – двигун Стірлінга; 16 електричний генератор

АКУ працює наступним чином. Підготовку води, необхідної для роботи АКУ, здійснюють модулем водопідготовки 1, наприклад, за допомогою технології зворотного осмосу (технологія очищення води, при якій рідина проходить через спеціальну мембрану, позбавляючись від хімічних домішок і бактерій). Підготовлену воду подають в термоізольовану місткість для води 2 і насосом 12 під тиском у внутрішню порожнину парогенератора 3 у відповідності до алгоритму роботи блока керування 10. Термоізольований парогенератор 3, виконаний у вигляді об'ємної порожнини, температура стінок якої підтримується високотемпературним факелом, сформованим спеціальним паливним пристроєм 4, здатним використовувати різні види палива, яке проходить в модулі 5 підготовку і подачу в паливник. Модуль 6 забезпечує подачу гарячого повітря і перегрітої водяної пари в паливний пристрій 4. Пар, отриманий в парогенераторі 3, під тиском через термоізольований паропровід подається до парового роторно-лопатевого двигуна 7, який забезпечує вироблення електричного струму генератором 8. Електрична енергія, через модуль силового електрообладнання 9 у відповідності до алгоритму роботи блока керування 10, подається споживачам. Пар, який пройшов через паровий роторно-лопатевий двигун 7, паропроводом подається в термоізольований пароводяний теплообмінник 11, який термоізольованими трубопроводами під'єднаний до

термоізоляційної місткості для води 2. У відповідності до алгоритму роботи блока керування 10, тепла енергія з термоізоляційного пароводяного теплообмінника 11 подається споживачам. В димоході 13 парогенератора 3 розміщується конденсаційний модуль 14, який використовує температуру димових газів для отримання додаткової теплової і/або електричної енергії. Для виконання таких функцій він може оснащуватися термоелектричним генератором і/або тепловою машиною, наприклад двигуном Стірлінга 15, генератором електричного струму 16, який має канали зв'язку з модулем силового електрообладнання 9.

Збільшення ККД енергетичної установки досягається термоізоляцією парогенератора, робочих частин парового роторно-лопатевого двигуна, пароводяного теплообмінника, місткості з водою, паро- і трубопроводів, а розширення функціональних можливостей досягається оснащенням її модулем дистанційного і GSM – керування. Це дозволяє контролювати роботу установки за допомогою смартфона або іншого мобільного пристрою.

Для підвищення ККД і зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище в енергетичній установці використовується інноваційна технологія енергоефективного спалювання вуглеводнів (твердих, рідких, газоподібних) у струмені перегрітої водяної пари. Це забезпечує парову газифікацію продуктів термічного розкладання і неповного згоряння палива з утворенням водяного газу [5, 6].

Водяний газ – газова суміш, склад якої в середньому відсотковому відношенні становить: CO – 44%, N<sub>2</sub> – 6%, CO<sub>2</sub> – 5%, H<sub>2</sub> – 45%. Водяний газ прекрасно горить, що суттєво підвищує температуру горіння різних видів палива (твердого, рідкого, газоподібного) – кам'яного вугілля, коксу, мазуту, метану і т.д.

Відомо, що вуглець, що міститься в розпечених частинках сажі при температурі 1000–1200° С забирає атомарний кисень у води за формулою: H<sub>2</sub>O + C = CO + H<sub>2</sub>.

Таким чином, зона горіння палива, що містить вуглець, який виробляє велику кількість частинок сажі, насичується киснем, віднятим у води і перетворюються в окис вуглецю CO. Крім того, звільняється молекулярний водень, маса якого становить до 6% від маси води, що розклалася. Теплота згоряння водню в три рази перевищує теплоту згоряння вихідного палива, а наявність в зоні горіння парів води прискорює горіння окису вуглецю. Монооксид вуглецю (чадний газ), що утворився в топці займається при температурі в 700° С і горить з температурою, що досягає 2100° С.

Всі перераховані вище фактори дозволяють спалювати різні види палива (твердого, рідкого, газоподібного) з дуже гарною якістю, що підтверджується експериментами. А головне, при горінні не утворюється сажа та інші шкідливі викиди – всі тверді вуглеводневі частинки газифікуються з утворенням чадного газу і водню. Ті в свою чергу, згораючи, утворюють нешкідливі воду і вуглекислий газ. В результаті викиди при спалюванні з використанням перегрітої пари не тільки відповідають діючим екологічним нормативам, а й мають в рази нижчі у порівнянні з гранично допустимими концентраціями значення: за змістом чадного газу в 10 раз, а оксидів азоту – в 6 разів! При цьому недопалювання складає менше 0,1 відсотка, що означає практично повну відсутність сажі.

Для теплоенергетики особливе значення мають завдання, пов'язані з підвищенням ефективності використання енергоресурсів. В даний час актуальним завданням є утилізація накопичених на промислових підприємствах величезної кількості рідких вуглеводневих відходів: відпрацьованих моторних і трансмісійних мастил, мастильних рідин, нафтових шламів, відходів нафтовидобутку і нафтопереробки. Використання подібних енергоносіїв в даних паливних пристроях дозволяє вирішувати низку актуальних завдань, таких як:

підвищення ефективності спалювання; підвищення економічної ефективності (доступність палива); утилізація небезпечних відходів виробництва; зниження вмісту токсичних продуктів згоряння.

Парогенератор виробляє пар, він розкручує роторно-лопатево-двигун, який, в свою чергу, крутить електричний генератор. Електрична енергія через силову електрообладнання подається споживачам.

Пар, що пройшов через паровий роторно-лопатево-двигун подається у пароводяний теплообмінник і охолоджується. При цьому отримується гаряча вода для опалення, або вона відправляється в бак проміжного накопичувача, з якого виходить чиста гаряча вода, що подається в крани споживачів. Також з цього бака насосом подають гарячу воду в парогенератор, де вона знову перетворюється в пар. Це дозволяє забезпечити замкнутий цикл робочого тіла і підвищити ККД когенераційної установки.

Оснащення димоходу парогенератора АКУ конденсаційним модулем з ТЕГ і/ або тепловим двигуном, наприклад, двигуном Стірлінга та зв'язаного з ним генератора електричного струму дозволяє досягти технічного результату, який полягає у перетворенні теплової енергії димових газів на електричну, яку зручно використовувати для забезпечення власних потреб установки.

Температура викидних газів, в залежності від парогенератора і палива, коливається в межах 150–300°С, а температура повітря навколишнього середовища в котельні 18–22°С. Така різниця температур гарантує надійну роботу ТЕГ і/або двигуна Стірлінга, не порушуючи при цьому теплового балансу системи, для збереження тяги.

Розроблені і виготовлені зразки оригінальних пристроїв, в яких реалізований автономний самопідтримуючий режим подачі перегрітої водяної пари і гарячого повітря у зону горіння продуктів термічного розкладання вуглеводневого палива з високим вмістом сажі. Проведено їх випробування.

На дослідних зразках пристроїв отримані наступні результати: стійке горіння різних вуглеводнів (твердих, рідких, газоподібних); висока температура горіння палива (1200–1500° С) і низькі показники

шкідливих викидів; підвищення енергії горіння при спалюванні вуглеводнів за рахунок згорання водяного газу, що дозволяє знизити витрати на енергоносії від 10 до 30%.

АКУ на базі роторно-лопатевого двигуна із зовнішнім підведенням тепла можуть комплектуватися із окремих модулів, які випускаються серійно. Їх істотною перевагою є:

- 1) енергозбереження, яке досягається за рахунок когенерації;
- 2) використання широкого спектру первинних енергоносіїв (будь-які газоподібні, рідкі та тверді палива);
- 3) екологічність, яка полягає в значно менших рівнях шуму, вібрації і шкідливих викидів (установка може бути встановлена в житловій зоні);
- 4) простота в обслуговуванні, малі габарити, великий моторесурс роторно-лопатевого двигуна із зовнішнім підведенням тепла;
- 5) легкість монтажу та запуск в роботу без великих фінансових і трудових витрат на проектні, монтажні та будівельні роботи

АКУ здатна кардинально знизити капітальні витрати на електропостачання і опалення для стаціонарних і пересувних об'єктів. На відміну від сонячних і вітрових електростанцій, в когенераційних установках вироблення електричної і теплової енергії відбувається постійно у цілодобовому режимі. АКУ може також використовуватися для енергоефективного та екологічно безпечного спалювання (утилізації) некондиційних вуглеводневих палив і горючих виробничих відходів. Вона окупає себе вже через 1-2 роки постійної експлуатації.

### Висновок

Розглянуті питання впровадження ефективних і екологічно чистих енергосистем на основі технології когенерації. Розроблена АКУ на базі роторно-лопатевого двигуна із зовнішнім підведенням тепла з використанням інноваційної технології енергоефективного спалювання вуглеводнів (твердих, рідких, газоподібних) у струмені перегрітої водяної пари, що забезпечує суттєве зменшення показників вмісту токсичних продуктів згорання, шкідливих викидів в атмосферу. Вона може використовуватися для вирішення задач автономного електро- і теплопостачання промислових та житлових об'єктів, а також для енергоефективного та екологічно безпечного спалювання (утилізації) некондиційних вуглеводневих палив і горючих виробничих відходів. Роботу планується продовжити у напрямку оптимізаційного синтезу окремих модулів установки за різними критеріями, що важливо для її практичного використання.

### Література

1. Андрущенко А.И. Теплофикационные установки и их использование / А.И. Андрущенко, Р.З. Аминов, Ю.М. Хлебалин. – М. : Высшая, школа, 1989. – 256 с.
2. Бузников Е.Ф. Пароводогрейные котлы для электростанций и котельных / Е. Ф. Бузников, А.А. Верес, В. Б. Грибов ; под общ. ред. Е. Ф. Бузникова. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
3. Лобунец Ю. М. Про перспективи застосування термоелектрики в енергетиці / Ю. М. Лобунец // Термоелектрика. – 2014. – № 4. – С. 65–69.
4. Пат. RU 191262, МПК F02G 1/043, F02G 1/045. Установка когенерационная на базе двигателя внешнего сгорания / Наумов А. Ю., Коба В.Ю. ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью проектно-монтажное предприятие "ЭНЕРГОПРОМ-СЕРВИС". – № 2019112529 ; заявл. 24.04.2019 ; опубл. 31.07.2019, Бюл. № 22.
5. Ануфриев И. С. Исследование процессов горения жидких углеводородов при распылении струей перегретого водяного пара / И. С. Ануфриев // Тепловые процессы в технике. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 146–156.
6. Ануфриев И. С. Горение жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара / И.С. Ануфриев // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 4. – С. 13–24.

### References

1. Andryushenko A.I. Teplofikatsionnye ustanovki i ih ispolzovanie / A.I. Andryushenko, R.Z. Aminov, Yu.M. Hlebalin. – M. : Vysshaya, shkola, 1989. – 256 s.
2. Buznikov E.F. Parovodogreynye kotly dlya elektrostancij i kotelnyh / E. F. Buznikov, A.A. Veres, V. B. Gribov ; pod obsh. red. E. F. Buznikova. – M. : Energoatomizdat, 1989. – 208 s.
3. Lobunec Yu. M. Pro perspektivi zastosuvannya termoelektriki v energetici / Yu. M. Lobunec // Termoelektrika. – 2014. – № 4. – S. 65–69.
4. Pat. RU 191262, MPK F02G 1/043, F02G 1/045. Ustanovka kogeneracionnaya na baze dvigatelya vneshnego sgoraniya / Naumov A. Yu., Koba V.Yu. ; zayavitel i patentoobladatel Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu proektno-montazhnoe predpriyatie "ENERGOPROM-SERVIS". – № 2019112529 ; zayavl. 24.04.2019 ; opubl. 31.07.2019, Byul. № 22.
5. Anufriev I. S. Issledovanie processov gorennya zhidkikh uglevodorodov pri raspylenii struej peregretogo vodyanogo para / I. S. Anufriev // Teplovye processy v tehnikе. – 2019. – T. 11, № 4. – S. 146–156.
6. Anufriev I. S. Gorenne zhidkikh uglevodorodov v strue peregretogo vodyanogo para / I. S. Anufriev // Novoe v rossijskoj elektroenergetike. – 2019. – № 4. – S. 13–24.

Рецензія/Peer review : 6.5.2020 р. Надрукована/Printed : 16.6.2020 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Гордєєв А.І.