

**KAPITEL 6 / CHAPTER 6⁶**
COGENERATION PLANT WITH ENERGY ACCUMULATOR**DOI: 10.30890/2709-2313.2025-42-03-041****Вступ**

В теперішній час, значна увага приділяється підвищенню економічності теплових двигунів. Це пов'язано не тільки з необхідністю зниження собівартості виробленої корисної енергії, але і (що має не менш важливе значення) з екологічними проблемами, оскільки теплові двигуни є значними джерелами забруднення довкілля токсичними і тепловими викидами.

Дієвим шляхом підвищення економічності теплових двигунів при зменшенні шкідливих викидів, є впровадження когенераційних технологій. Така технологія дозволяє забезпечувати ефективну роботу двигуна, на режимах приближених до оптимального, в широкому діапазоні зміни його навантажень. Вона ефективна як для потужних стаціонарних установок, працюючих на централізовану енергомережу і покриваючих значні добові та сезонні коливання її навантажень, так і для установок малої потужності, що працюють в децентралізованому режимі.

Інтенсивний розвиток когенераційних технологій в провідних країнах світу дозволив досягти значних темпів їх впровадження. Так, за даними наведеними в [1], вже на початок другого тисячоліття, частка когенераційних електрогенеруючих потужностей в енергетиці Данії становила близько 60%, Нідерландів - 43%, Фінляндії – 33%, Австрії – 25% тощо.

Впровадження когенераційних технологій дозволив малим поршневим двигунам і турбінам досягти певної конкурентоспроможності, в порівнянні з традиційними системами виробництва електроенергії. Така їх ефективність обумовлена тим, що за рахунок виробництва кількох енергетичних продуктів (переважно, електричної і теплової енергії) в одному технологічному процесі, забезпечується загальний коефіцієнт використання енергетичного потенціалу

⁶*Authors: Sklyarenko Evgen Valentynovych, Vorobiov Leonid Yosypovych, Ivanov Serhii Oleksandrovych*

Number of characters: 20319

Author's sheets: 0,51



палива на рівні 80...85% і вище (в порівнянні з ефективністю електростанцій в 35...40%) [1, 2].

Тому пошук оптимальних рішень для впровадження таких технологій є актуальним, що потребує спеціальних аналітичних та експериментальних досліджень і практичних зусиль.

6.1 Особливості когенераційних установок та джерела втрати енергії

Необхідність впровадження когенераційних технологій в Україні, з надзвичайною гостротою постала сьогодні, в силу значних порушень стабільності централізованої системи, викликаних війною.

Для вирішення проблеми в країну була завезена велика кількість електрогенераторів на базі поршневих двигунів (ПД). Значна їх кількість це установки малої потужності (до 100кВт), з К.К.Д. генерації електричної енергії в межах, 40...45% (дизельні двигуни) і 35...37% (двигуни із згорянням при постійному об'ємі). Решта енергетичного потенціалу палива, як правило, є теплові втрати. Так, із теплового балансу, наприклад, дизельного двигуна видно, що при ефективній теплоті 42...45% теплові втрати складають: з охолоджуючою рідиною - 20...35%, з маслом – 2...4%, з відпрацьованими газами – 25...40%, через огорожувальні конструкції - 2...7% і до 5% є теплота, яка не виділилась внаслідок неповного згоряння палива [3].

Основні джерела теплових втрат ПД і способи їх використання:

1. Рідину охолодження циліндрів двигуна, з температурою до 90 ...120°C, можна використовувати для:

а) підігріву води, повітря чи іншого теплоносія (наприклад, для опалення або гарячого водопостачання);

б) підігріву впускного повітря у двигуні (покращення процесу згоряння);

в) термоелектричних генераторів (для отримання електроенергії).

2. Відпрацьовані гази з температурою 300...350°C (дизельні двигуни), 400...500°C (двигуни із згорянням при постійному об'ємі) дозволяють отримати



пару низького тиску $8 \dots 10 \text{ кг/см}^2$ для власних виробничих потреб.

3. Джерела з низькотемпературним потенціалом теплоти, частіше всього використовують для попереднього підігрівання цільового теплоносія.

Утилізація приведених теплових потоків дозволяє, не тільки підвищити економічність двигунів, але й зменшити забруднення довкілля тепловими та іншими токсичними викидами.

Метою даної роботи є підвищення ефективності використання енергетичного потенціалу палив в теплових двигунах.

6.2 Когенераційна установка на базі двигуна внутрішнього згоряння

Для утилізації теплової енергії широкого поширення набула когенераційна схема, що приведена на рисунку 1, де частина теплової енергії використовується для нагрівання води, повітря чи іншого теплоносія. Ефективність таких систем, в значній мірі, залежить від застосованих теплоутилізаційних пристроїв, їх К.К.Д. та конструктивних особливостей.

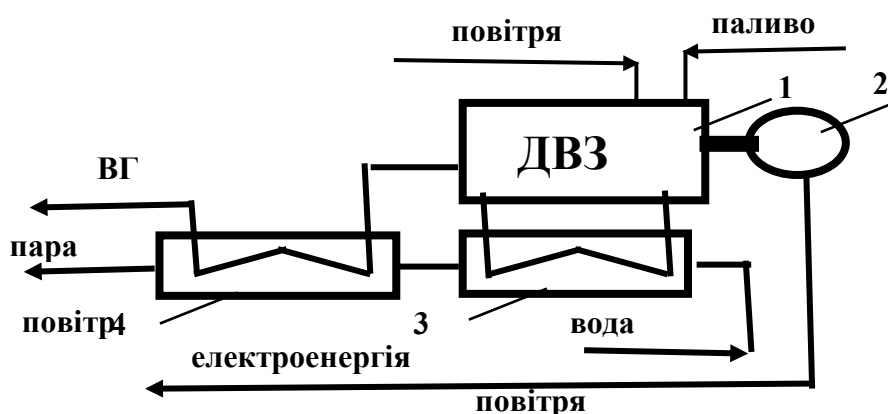


Рисунок 1 - Схема когенераційної установки на базі двигуна внутрішнього згоряння, з утилізацією теплової енергії

де: 1 – двигун внутрішнього згоряння; 2 – електрогенератор;

3 – теплообмінник по охолоджуючій рідині; 4 – теплообмінник по відпрацьованим газам; ВГ- відпрацьовані гази

Оцінка доцільності і енергоефективності застосування когенераційних



установок (КГУ), частіше всього здійснюється із застосуванням коефіцієнта використання теплоти палива (КВТП) [4]:

$$\text{КВТП} = (N_e + N_T) / B \cdot Q_H \quad (1)$$

Де: N_e - електрична або механічна потужність установки;

N_T - теплова потужність установки;

B – витрати палива установки;

Q_H – нижча теплота згоряння палива.

В нормативних документах установок ці величини приводяться в числовому вигляді. Другий член рівняння (у чисельнику) приводиться з врахуванням ступеня корисного використання скидної теплоти установки, що виражається тепловим коефіцієнтом.

Традиційно, тепловий коефіцієнт двигуна визначається як

$$K_{TD} = N_T / N_e = \eta_T / \eta_e \quad (2)$$

Тобто, величина теплового коефіцієнта залежить як від електричного (механічного) К.К.Д. двигуна, так і від ступеня утилізації його скидної теплоти.

В роботі [5] приведена методика порівняльної оцінки ефективності енергетичних установок, яка пов'язує вище зазначені характеристики двигуна. Шляхом статистичної обробки значної кількості характеристик когенераційних установок (на базі ГТУ і ПД) було показано, що відношення теплової і електричної потужності є величиною детермінованою, що залежить від електричного К.К.Д. Емпірична залежність теплового коефіцієнта двигуна від його електричного К.К.Д. має вигляд :

$$K_{TD} = 0,362 \cdot \eta_{ED}^{-1,25}; \quad (3)$$

В графічному вигляді ця залежність представлена на рисунку 2.

Проведений аналіз показав, що на приведену залежність, значний вплив має тип теплового двигуна, його потужність та режим експлуатації.

Важливим фактором підвищення ефективної роботи когенераційної установки бачиться, в її спроможності до акумулювання теплової енергії, в спеціальних теплообмінниках. Енергоакумулювання дозволяє забезпечувати роботу двигуна на режимах наближених до оптимального, в широкому діапазоні



Рисунок 2 - Залежність теплового коефіцієнта двигуна від його електричного К.К.Д.

зміни навантажень. А накопичену теплову енергію можливо використовувати, впродовж наступних кількох годин, навіть коли двигун не працює.

6.3 Теплові акумулятори

Теплові акумулятори є пристроями, до яких теплота підводиться в процесі зарядки, а при розрядці теплота відводиться до іншого теплоносія безпосередньо чи через стінку. При цьому, кількість відведеної теплоти може регулюватися при допомозі вимушеної конвекції чи іншим способом. Поряд з цим, такі теплообмінники можуть бути також, ефективними глушниками надмірного звуку двигуна.

Крім конструктивних особливостей, ефективність теплоакумулятора, в значній мірі, залежить від застосованих теплоносіїв та їх теплотехнічних характеристик. Серед них:

- твердотільні матеріали з високою теплоємністю (наприклад, алюміній, чавун, шамот, магнезит, кераміка і ін.);
- рідинні (вода, масла і інші спеціальні теплоносії, див. табл.1);
- речовини з фазовим перетворенням (наприклад, парафін, солі і ін.). При



зміні фази (плавлення/кристалізація) іде накопичення/віддача теплоти.

Зазвичай, теплоносій вибирається з урахуванням діапазону необхідних робочих температур (таблиці 1 і 2) та їх теплотехнічних характеристик.

Таблиця 1 - Інтервали температур (°C) ряду використовуваних теплоносіїв [6]

Теплоносій	Інтервал температур, °C
Вода і пара	0...200
Мінеральне мастило	- 10...315
Дифеніл/дифенілоксида	20...400
Моноетіленгліколь	- 40...100
Ізмери бензилбензолу	- 50...330
Ізмери дібензилбензолу	- 15...350
Дифенілметан	200...400
Теплопередаючі солі	155...540
Натрій і розплави металів	200...700

Серед приведених в табл.1 теплоносіїв, як акумулюючого середовища, найбільшого поширення набула вода. Її основною перевагою є доступність і можливість використання в простих системах як для акумулювання теплоти, так і для прямого її перенесення.

Поряд з приведеними теплоносіями (в табл. 1), на практиці застосовують і інші теплоносії, як рідкі так і тверді (табл. 2). Як перевагу над водяними акумулюючими системам, ці теплоносії застосовують при більш високих температурах.

Таблиця 2 - Теплоакумулюючі характеристики ряду теплоносіїв[7,8]

Матеріали і сплави	Температурний діапазон акумулювання теплоти, °C	Зарядна ємкість, кВтч/м ³
Олівен, форстерит	250 - 750	395
Магнезит	250 - 750	437
Феоліт	250 - 750	512
Сплав чавуну	250 - 750	565
Розплавлена сіль	250 - 750	640
Алюміній	250 - 750	664

Для утилізації низькопотенційної теплової енергії використовують теплові



насоси, або середовища з фазовим перетворенням де теплота поглинається в процесі плавлення (розчинення), а віддається в процесі кристалізації. Тобто, акумулююча здатність такого матеріалу залежить від його прихованої теплоти плавлення. Приклад таких теплоносіїв і їх теплотехнічні характеристики приведено в таблиці 3.

Таблиця 3 - Середовища, що акумулюють теплоту плавлення [8,9]

Матеріали	Температура плавлення, °C	Густина, кг/м ³	Теплота плавлення	
			Дж/г	Дж/см ³
NaC ₂ H ₃ O ₂ •3H ₂ O	58	1297	265	340
Na ₂ S ₂ O ₃ •5H ₂ O	48	1650	209	344
Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	47	1858	154	283
P116(воск)	47	785	209	163
FeCl ₃ •6H ₂ O	36	1617	223	359
Na ₂ CO ₃ •12H ₂ O	36	1522	265	400
LiNO ₃ •3H ₂ O	30	-	307	410

Поряд з вище розглянутими середовищами, але менш поширено, для акумуляції теплової енергії застосовують теплоакумулятори з газовими середовищами.

До них можна віднести:

1. Теплоакумулятори на основі стисненого газу (CAES – Compressed Air Energy Storage) де тепло газу, що стискається, акумулюється для подальшого використання:

- підігрівання повітря, яке стискається в резервуарі;
- під час розширення газу (при зворотному використанні) його нагрівають акумульованою теплотою для підвищення ефективності;
- у системах енергонакопичення, що поєднують механічну та теплову енергію;
- для рекуперації теплоти відпрацьованих газів.

2. Теплоакумулятори на основі газів з високою теплоємністю (аргону, гелію, вуглекислого газу). Їх використовують для зберігання та передачі тепла у замкнених високотемпературних циклах.



3. Акумулявання тепла газів у теплоізованих резервуарах (аналогічно до рідинних теплоакумуляторів), яке потім використовують для нагрівання іншого теплоносія або генерації енергії.

4. Газові теплоакумулятори, що працюють на основі термохімічних процесів при використанні оборотних хімічних реакцій, в яких тепла енергія акумулюється або вивільняється при взаємодії газів з твердими чи рідкими речовинами. Вони мають високу питому теплоємність і можуть працювати при високих температурах.

Основними типами термохімічних газових теплоакумуляторів є:

1. Системи на основі оборотного поглинання та десорбції газів, наприклад, використовують сорбенти (цеоліти, силікагель, хлориди металів і ін.). При нагріванні вони десорбують газ, акумулюючи теплоту, а при охолодженні газ поглинається назад, вивільняючи тепло.

Застосування - акумулювання теплоти для теплопостачання, охолодження та теплових насосів.

2. Реакції з розкладанням і синтезом газоподібних сполук, розкладанням та рекомбінуванням гідридів металів (наприклад, $\text{MgH}_2 \rightleftharpoons \text{Mg} + \text{H}_2$). При нагріванні відбувається розкладання гідриду металу і виділяється водень, а при охолодженні відбувається рекомбінування водню з металом, виділяючи тепло.

Застосування: водневі системи зберігання енергії, термохімічні акумулятори для високотемпературних процесів.

3. Карбонатні та оксидні реакції. Наприклад, розкладання карбонатів ($\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$). При нагріванні карбонати розкладаються, поглинаючи тепло, а при охолодженні CO_2 знову реагує з CaO , виділяючи тепло.

Застосування: акумулювання теплоти в промислових процесах та сонячної енергії.

4. Реакції на основі аміаку, наприклад, розклад $2\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + 3\text{H}_2$. При високих температурах (близько 500°C) аміак розкладається на азот і водень, поглинаючи теплоту, а при зниженні температури гази рекомбінують у аміак, виділяючи тепло.



Застосування: високотемпературні системи теплової акумуляції в промисловості.

5. Солі-гідрати та реакції гідратації/дегідратації. Наприклад, карбонат натрію (Na_2CO_3) використовується в термохімічних теплоакумуляторах завдяки його оборотним реакціям з CO_2 і водяною парою.

Гідрати солей при нагріванні виділяють воду у пароподібному стані, акумулюючи тепло і його виділення при охолодженні води.

Застосування: опалення, кондиціонування, використання сонячної енергії.

Газові теплоакумулятори можуть бути ефективними, хоча вони є більш складнішими та дорожчими за рідинні чи твердотільні аналоги. Доцільність використання кожного їх типу залежить від робочих температур процесу:

- для низьких температур ($50\text{--}200^\circ\text{C}$) застосовують сорбційні системи;
- для середніх температур ($200\text{--}600^\circ\text{C}$) застосовують гідриди металів, аміачні реакції;
- для високих температур ($600\text{--}1000^\circ\text{C}$) застосовують карбонати, оксиди металів.

6.4 Приклад розрахунку термохімічного теплоакумулятора

Для прикладу, розглянемо основні термохімічні реакції з Na_2CO_3

1. Розкладання Na_2CO_3 з виділенням CO_2 є високотемпературним процесом ($850\text{--}1000^\circ\text{C}$), що проходить за реакцією: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

При нагріванні карбонат натрію розкладається, поглинаючи тепло, а при охолодженні та взаємодії з CO_2 знову утворюється Na_2CO_3 і виділяється тепло.

2. Реакція гідратації/дегідратації: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + 10\text{H}_2\text{O}$.

При нагріванні $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ віддає воду, у вигляді пари ($\sim 32\text{--}35^\circ\text{C}$), а при охолодженні водяна пара зв'язується з Na_2CO_3 і виділенням тепла.

Використання теплоакумуляторів на основі Na_2CO_3 :

1. Акумулювання сонячної енергії. Теплоакумулятори працюють при $600\text{--}1000^\circ\text{C}$, акумулюючи тепло вдень, яке вночі використовують для парових турбін.



2. Промислові процеси, при використанні CO_2 -регульованих акумуляторів теплоти.

3. Гібридні системи з фазозмінними матеріалами, для оптимізації теплоємності.

4. Для опалення. Теплоакумулятори на основі гідратованого Na_2CO_3 що працюють при $30\text{--}100^\circ\text{C}$.

Таким чином, якщо необхідно утилізувати тепло відпрацьованих газів двигуна з температурою ($500\text{--}600^\circ\text{C}$), краще використовувати реакції карбонатів з CO_2 . А при акумуляуванні низькотемпературного тепла, варіанти з гідратами Na_2CO_3 будуть більш ефективними.

Розглянемо потенційні можливості термохімічного теплоакумулятора, на основі гідратованого Na_2CO_3 , при акумуляуванні тепла відпрацьованих газів двигуна з наступними вихідними даними:

- потужність двигуна 10 кВт;
- витрата відпрацьованих газів 20 кг/год, (5,5 г/с);
- температура відпрацьованих газів $350\text{--}400^\circ\text{C}$;
- для спрощення, приймаємо середню питому теплоємність відпрацьованих газів, що складає $c_p=1$ кДж/(кг·К).

Кількість теплоти, що міститься у відпрацьованих газах, визначається за формулою:

$$Q_r = m^r \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

де: m^r – маса (витрата) газів; $m^r=5,5$ г/с $=0.0055$ кг/с; теплоємність $c_p = 1$ кДж/(кг·К); $\Delta T=(400\text{--}100)^\circ\text{C}=300$ К.

$$Q_r=0.0055 \times 1 \times 300=1.65 \text{ кДж/с}=1.65 \text{ кВт}.$$

Теоретично, протягом 1 години (3600 с), декагідрат $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ зможе акумуляувати $Q_A = 1.65 \cdot 3600=5940$ кДж/год теплової енергії. Для цього маса $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ повинна становити

$$m = Q_A / \lambda_r = 5940 / 217 = 27,4 \text{ кг} \quad (5)$$

де: λ_r - питома теплота гідратації Na_2CO_3 становить $\lambda_r=217$ кДж/кг [10].

Для порівняння, для утилізації $Q_A = 5940$ кДж/год теплової енергії, розглянемо можливості твердотілого (чавунного) теплоакумулятора, з



наступними вихідними даними:

- питома теплоємність чавуну $c_p = 0.54 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ [11];
- робочий температурний діапазон відпрацьованих газів: $\Delta T = 100 - 400 = 300 \text{ K}$;

Маса чавунного теплоаккумулятора буде становити

$$m^ч = Q_A / c_p \cdot \Delta T = 5940 / 0.54 \cdot 300 = 36,7 \text{ кг} \approx 37 \text{ кг чавуну.} \quad (6)$$

Таблиця 4 - Порівняння теплоаккумуляторів

Параметр	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (термохімічний)	Чавун (твердотільний)
Необхідна маса	24 кг	37 кг
Робоча температура	32–35°C (гідратація)	100–400°C
Теплоємність	Висока завдяки фазовому переходу	Нижча, лінійне нагрівання
Швидкість накопичення	Висока (хімічна реакція)	Помірна (теплопровідність чавуну)
Температура вихідної теплоти	30–50°C (теплова енергія від пари)	100–200°C (відведення через теплообмінник)
Ефективність використання теплоти	Дуже висока ($\approx 90\%$)	Досить висока ($\approx 75\text{--}85\%$)
Габарити	Компактний, можна зберігати пару в окремій камері	Потребує більшого об'єму
Сфера застосування	Опалення, кондиціонування, утилізація низькопотенційного тепла	Опалення, гаряча вода, промислові системи
Термін служби	5000 циклів (можливе поступове деградування)	10 000 циклів, довговічний
Складність системи	Потенційна деградація солі, потрібні додаткові компоненти (конденсатор, ізоляція), більш складна система регулювання тепловіддачі	Простий, лише теплоізований блок
Вартість	Середня	Низька (чавун дешевий)

Висновки.

Доцільність впровадження когенераційних технологій з акумулюванням скидної теплоти обумовлена:

- економією традиційного палива;
- зменшенням теплових і інших шкідливих викидів у довкілля;
- автономністю енергозабезпечення (паралельно із зовнішніми мережами, чи в аварійному режимі), що підвищує надійність системи енергозабезпечення, особливо в періоди пікових навантажень чи при порушенні її роботи.



Якщо потрібно утилізувати тепло відпрацьованих газів ДВЗ (малої потужності) і використовувати його для опалення, ГВП або кондиціонування то термохімічний($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) теплоаккумулятор підходить краще. Він може ефективно працювати в низькотемпературних системах і з тепловими насосами.

Якщо ж потрібен простий, надійний та довговічний теплоаккумулятор для систем опалення – чавун виграє, завдяки надійності та дешевизні.