



KAPITEL 4 / CHAPTER 4⁴
**CALCULATION METHOD OF SOLID FUEL CONVERSION WITH
GASIFICATION PRODUCTS RECIRCULATION AND WITH THEIR PRE-
HEATING**

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-32-00-014

Вступ.

З кожним роком в усіх промислово розвинутих країнах інтерес до економії енергетичних ресурсів набуває особливої актуальності, як наслідок скорочення природних запасів традиційних паливних ресурсів (природний газ, нафта, кам'яне вугілля), постійного зростання попиту і цін на них, та зниження їх якості.

Ситуація в паливно-енергетичному комплексі України погіршується ще й тим, що внаслідок значного морального зносу енергетичного обладнання (ККД здебільш не перевищує 30-35%), а також його фізичного зносу (понад 90% відпрацювало гарантований ресурс роботи), ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів є дуже низькою. Наслідком цього є те, що енергоемність валового внутрішнього продукту більш ніж у двічі вища в порівнянні з промислово розвинутими країнами.

Вирішення ж даної проблеми є актуальним не тільки в розрізі зниження питомих витрат на вироблення електроенергії, тепла, пари і т.д., але й з екологічної точки зору – необхідність зниження викидів в атмосферу теплових і токсичних компонентів з продуктами згоряння палива.

В зв'язку з цим, задача підвищення енергоефективності, від виробництва енергії до її використання повинна стати стратегічною лінією розвитку економіки, соціальної сфери та науки країни.

В більшості випадків, режим ефективного використання викопних палив і виробленої енергії та зменшення шкідливого впливу на довкілля базується на удосконаленні технологічних процесів, впровадженні енергозберігаючих технологій і використанні альтернативних джерел енергії.

В найближчій перспективі, значна економія традиційних палив бачиться,

⁴*Authors: Sklyarenko Evgen Valentynovych, Vorobiov Leonid Yosypovych*



зокрема, в більш широкому використанні низькосортних палив. До низькосортних палив відносять вологі високозольні кам'яні вугілля з низьким виходом летких, важкі мазути, буре вугілля, торф, лігніти, а також різного роду органічні відходи промислового і сільського господарства (тирса, соняшникове лушпиння, солома і інша біомаса).

Можливість широкого використання цих палив в теплоенергетиці, в значній мірі, стримується їх специфічними теплотехнічними характеристиками і відсутністю необхідної спеціальної техніки для ефективного спалювання, що призводить до ускладнення і здорожчання процесів трансформації енергетичного потенціалу палива в корисну енергію.

Традиційно, енергія палива перетворюється в корисну енергію при допомозі різних теплоенергетичних установок: теплові електростанції, двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), газові турбіни (ГТУ), термоелектрогенератори, термоемісійні перетворювачі, МГД генератори і ін. В цих установках енергія палива перетворюється в корисну енергію за два етапи. На першому етапі вона перетворюється в теплоту, а на другому в роботу, тобто енергію (механічну, електричну) яку можна безпосередньо корисно використовувати. При цих перетвореннях якраз і виникають основні втрати енергії палива: в ГТУ втрачається 65-70% енергії палива, в ДВЗ -60 – 75%, на теплових електростанціях – 60 – 65%, в промислових печах -60 – 65 % [1].

При розгляді теплового балансу, наприклад, дизельного двигуна видно, що ефективна теплота становить всього 42...45%, а решта теплоти складають втрати: з охолоджуючою рідиною - 20...35%, з маслом – 2...4%, з відпрацьованими газами – 2...40%; втратами через огорожуючі конструкції - 2...7% і до 5% складає теплота, яка не виділилась внаслідок неповного згоряння палива [2]. Утилізація ж цих теплових втрат дозволяє, не тільки підвищити економічність двигуна, але й зменшити забруднення довкілля тепловими і шкідливими викидами.

В Інституті технічної теплофізики НАН України на протязі багатьох років проводяться роботи з підвищення ефективності використання енергетичного



потенціалу різних вуглеводневих палив та економічності існуючого енергетичного обладнання в транспортній і стаціонарній енергетиці.

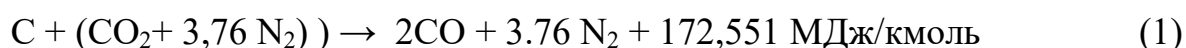
Зокрема, для підвищення ефективності використання органічних палив, був розроблений термохімічний метод, що базується на ендо- і екзотермічних процесах конверсії органічного палива із використанням термохімічної регенерації (утилізації) теплових втрат[1].

Метою роботи є розроблення методики розрахунку пристроїв з підвищеною ефективністю процесу термохімічної конверсії твердих палив за рахунок регенерації його теплових втрат.

4.1. Термохімічні процеси конверсії палива.

При термохімічній регенерації використовується здатність органічного палива вступати в ендотермічні реакції конверсії з водяною парою і двоокисом вуглецю, які є складовими продуктів згоряння.

Наприклад, реакція конверсії твердого палива з цими компонентами має вид:



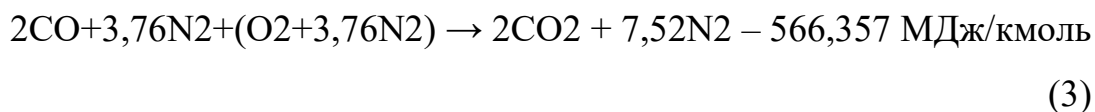
Внаслідок конверсії вихідного палива утворюється нове паливо, що містить окис вуглецю CO, водень H₂, вуглеводні C_nH_m, коксовий залишок і ін., а також рештки палива які не прореагували. Ступінь перетворення палив по реакціям (1) і (2) суттєво залежить від температури проведення процесу і кількості підведеної теплоти.

Підрахунки показують, що необхідна кількість цієї теплоти (при достатньо високих температурах), в залежності від виду палива, становить : для твердого палива до 45% від теплоти згоряння вихідного палива, для природного газу і рідкого палива до 31%. Часткова компенсація теплового ефекту реакцій відбувається за рахунок регенованої теплоти, що викидається в навколишнє

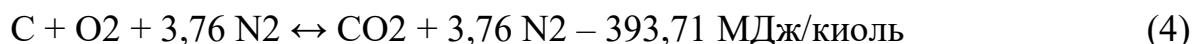


середовище (здебільш, через стінку чи з продуктами згоряння).

Теплота, що поглинається в процесі реакції конверсії, виділяється при спалюванні конвертованого палива за наступною реакцією:



Для порівняння, тепловий ефект при згорянні вихідного палива буде становити:



Як видно, теплота яка виділяється при згорянні конвертованого палива (реакція (3)) дорівнює сумі теплоти згоряння вихідного палива (реакція (4)) і регенованої теплоти процесу конверсії (реакція (1)), що знаходиться у повній відповідності із законом Гесса.

Внаслідок цього, можна отримати роботу з більш ефективним процесом використання енергетичного потенціалу вихідного палива.

$$L_{\text{ТСУ}} = \eta_{\text{T}} \cdot (Q_{\text{H}}^{\text{P}} + Q_{\text{ТХК}}) \quad (5)$$

де: Q_{H}^{P} – теплота згоряння вихідного палива; $Q_{\text{ТХК}}$ – теплота, яка пішла на проведення термохімічної конверсії органічного палива;

η_{T} – термічний ККД енергетичної установки.

Тобто, проводячи термохімічну конверсію вихідного органічного палива з використанням процесу термохімічної регенерації теплоти, що викидається з циклу, з'являється можливість суттєвого підвищення ККД теплотехнічної установки. Важливим є і те, що збільшення ККД установки відбувається без підвищення термічного ККД теплосилового циклу.

Проведені аналітичні і експериментальні дослідження показують [3, 4], що при використанні термохімічної регенерації в ході конверсії органічного палива, ККД теплосилових установок може бути суттєво підвищеним: для ТЕС – на 4-15%, для ГТУ – на 5-10%, для ДВС – на 7-12%, для промислових печей – на 20-30%.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що розробка таких технологій і пристроїв, є доволі актуальною задачею, вирішенню якої і присвячена дана



робота.

В попередній роботі авторів [5] детально розглянута загальна методика розрахунку пристроїв термохімічної конверсії твердих палив в горючий газ. Для інтенсифікації процесу конверсії, в розглянутій схемі процесу передбачена часткова термохімічна регенерація теплоти для підігрівання повітря і водяної пари за рахунок утилізації теплоти генераторного газу і продуктів згоряння коксового залишку. Разом з тим, одним з недоліків розглянутої схеми, особливо при конверсії дрібнофракційного палива, є виніс значної частини палива без його деструкції, що впливає на якість генераторного газу і неможливість його використання в силових установках, де наявність пилу і смол є строго регламентованою (не більше 0,3...0,5г/м³), Очистка такого газу потребує складного, громіздкого і вартісного обладнання.

Для вирішення даної проблеми запропоновано здійснювати попередній підігрів і рециркуляцію частини продуктів газифікації в термохімічний реактор (ТХР).

4.2. Структурна схема процесу конверсії твердого палива.

Принципову схему реалізації такого процесу приведено на рисунку 1, яка включає: 1 – підігрівач повітря I (ПП-I); 2 – газифікатор; 3 – топка; 4 – каупер I (регенеративний підігрівач водяної пари); 5 – каупер II (регенеративний підігрів генераторного газу); 6 – підігрівач повітря II (ПП – II).

Згідно приведеною схемою, частина генераторного газу після попереднього підігріву в каупері II повертається в ТХР. Це дозволяє збільшити час перебування частинок палива в високотемпературній реакційній зоні і досягти більш повного перетворення реагуючих компонентів та покращення якості горючого газу.

В даній роботі розглянута методика дослідження ефективності вибраного обладнання термохімічної конверсії твердого палива, шляхом складання балансу



теплоти і маси, як для кожного елемента приведеної схеми, так і всієї схеми загалом.

4.3. Порядок розрахунку параметрів елементів структури.

На першому етапі приймаються наступні спрощення: паливо складається з одного вуглецю і має постійні фізико – хімічні характеристики; втрати теплоти враховуються коефіцієнтом її збереження, притаманного кожному з застосованих апаратів; не враховується вихід летких при нагріванні палива і утворення золи при його згорянні.

Газифікатор (термохімічний реактор, далі ТХР)

Вихідними даними для розрахунку, які задаються є: вихідне паливо; продуктивність ТХР по вихідному паливу і його теплофізичні характеристики (температура, вологість, зольність, теплота згорання); співвідношення пара/паливо: температура пари; тиск в системі. Заданими необхідно вважати також ступінь рециркуляції генераторного газу і температуру його підігріву.

У відповідності з правилом фаз Гіббса, вважаємо заданим і склад продуктів конверсії на виході з газифікатора, а також їх температуру (при умові, що процес проходить при постійному тиску). Склад продуктів конверсії і температуру суміші отримуємо шляхом розрахунку рівноважного складу і рівноважної температури в даних умовах.

Розрахунок реального процесу конверсії, в значній мірі, залежить від вихідного палива, його теплофізичних характеристик та конструктивних особливостей елементів газифікатора.

Підігрівач повітря I (ПП-I)

В схемі приведений на рис.1 підігрівач повітря I слугує для підігрівання повітря і охолодження генераторного газу (з врахуванням ступеня рециркуляції), що надходить з ТХР.

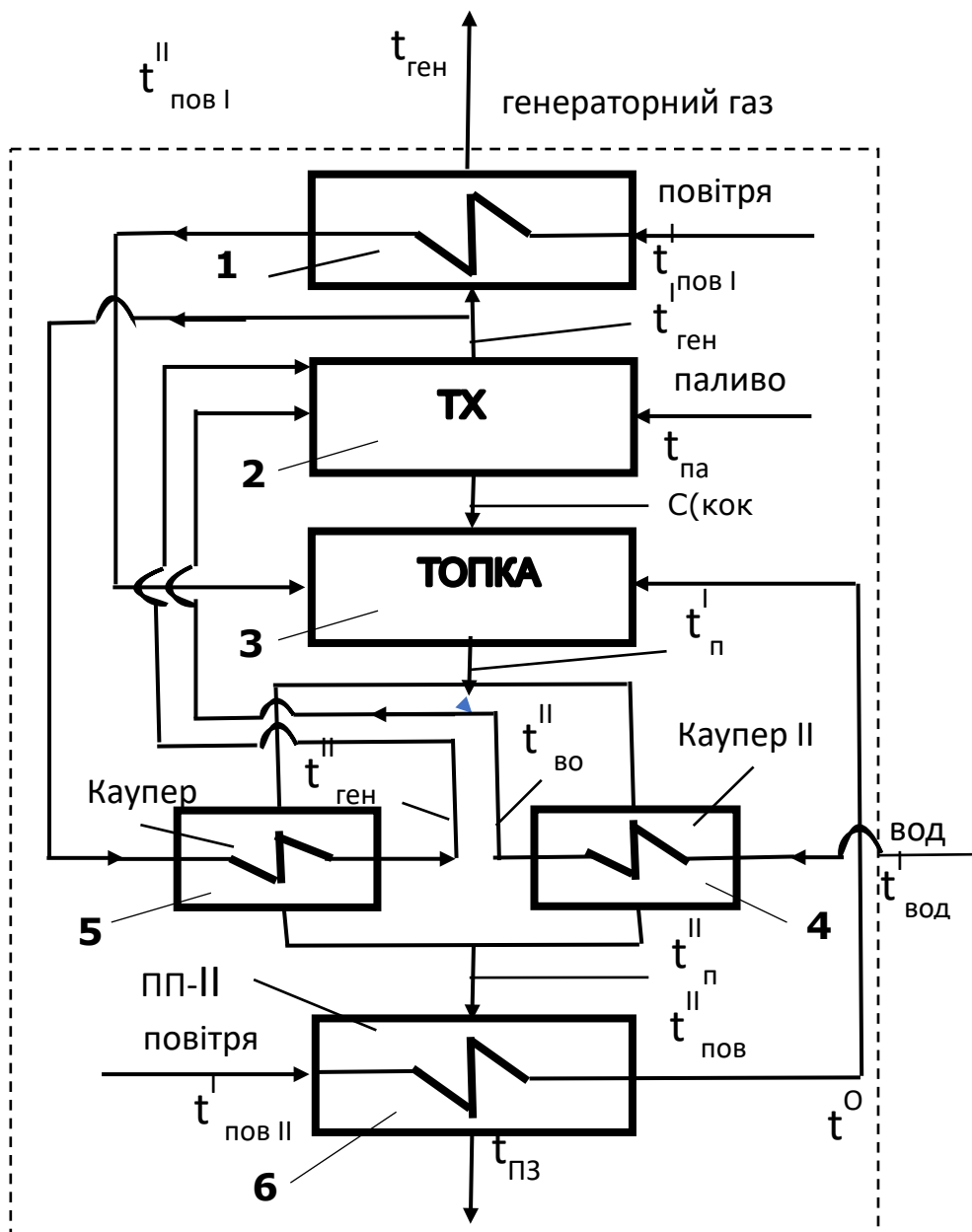


Рисунок 1 - Структурна схема процесу конверсії твердого палива з рециркуляцією продуктів його газифікації і термохімічною регенерацією ТЕПЛОТИ

Температуру повітря на вході і виході з ПП-I вважаємо заданими. Так, температуру повітря на вході приймаємо рівною температурі навколишнього середовища (20°C). Температурою ж повітря на виході задаємось, виходячи з технологічних міркувань (наприклад, конструктивних, матеріалу, досяжних максимальних температур, кислотостійкості і ін.), а також умов горіння



коксowego залишку в топці. Невідомими величинами є витрати повітря через ПП-I і температура генераторного газу на виході з ПП-I.

Балансове рівняння для ПП-I має вигляд:

$$G_{нов_I} c_p^{нов} (T)(t_{нов_I}^{II} - t_{нов_I}^I) = G_{ген} \sum_i c_{p_i} \chi_i (t_{ген}^I - t_{ген}^{II}) \quad (6)$$

де: G – витрати, кг/сек; t – температура, °C; T – температурв, К; $c_p(T)$ – ізобарна теплоємність, кДж / (кг·К); χ_i – масова доля i -го компоненту;

Індекси: *нов_I* – підігрівач повітря I; *нов_{II}* – підігрівач повітря II; *нов* – повітря; *ген* – генераторний газ; *I* – вхід; *II* – вихід; *0* – стандартний стан.

Топка

Витрати коксowego залишку, що надходять з газифікатора для спалювання і отримання газового теплоносія, та його температуру вважаємо відомими. Відомими також є загальні витрати повітря, що подається в топку для спалювання коксowego залишку (при заданому коефіцієнті надлишку повітря α) і його температура. Відповідно до цього, відомими є також витрати продуктів згоряння. Визначенню підлягають температура продуктів згоряння на виході з топки, а також витрати повітря з ПП – I і ПП – II. Тоді балансове рівняння для топки буде:

$$G_{кокс} c_p^{кокс} (T)(t_{ген} - t^0) + Q_H^P + G_{нов_I} c_p^{нов} (T)(t_{нов_I}^{II} - t^0) + G_{нов_{II}} c_p^{нов} (T)(t_{нов_{II}}^{II} - t^0) = G_{нз} c_p^{нз} (T)(t_{нз}^I - t^0) \quad (7)$$

де: Q_H^P – нижча теплота згоряння, кДж/ кг;

Індекси: *нз* – продукти згоряння; *кокс* – коксовий залишок.

Каупер I (регенеративний підігрівач водяної пари)

Витрати водяної пари на газифікацію, температура води на вході (приймається на рівні температури навколишнього середовища) а також температура водяної пари на виході з каупера вважаємо відомими. Невідомими величинами є температури продуктів згоряння на вході і виході з каупера, а також витрати димових газів через каупер. Балансове рівняння для каупера має



ВИД:

$$G_{вод} (c_P^{вод} (T)(t_S - t_{вод}^I) + q_S + c_P^{пара} (T)(t_{вод}^{II} - t_S)) = G_{nз_1} c_P^{nз} (T)(t_{nз}^I - t_{nз_1}^{II}) \quad (8)$$

де: q_S - питома теплота випаровування, кДж /кг;

Індекси: $nз$ – продукти згоряння; $вод$ – вода; $пара$ – пара;

Каупер II (регенеративний підігрівач генераторного газу)

Витрати генераторного газу на рециркуляцію, а також його температура на вході і виході каупера задаються (див.2.1). Невідомими величинами є температура продуктів згоряння на вході та виході з каупера, а також витрати димових газів через каупер. Балансове рівняння для даного каупера має вид:

$$G_{ген} \gamma (t_{ген}^{II} - t_{ген}^I) \sum_i c_{p_i} x_i = G_{nз_{II}} c_P^{nз} (T)(t_{nз}^I - t_{nз_{II}}^{II}) \quad (9)$$

Підігрівач повітря II (ПП – II)

Температура повітря на вході і виході з ПП – II є заданими. Так, температура повітря на вході приймаємо рівною температурі навколишнього середовища (20°C). Температурою повітря на виході задаємося виходячи з технологічних міркувань (див.1.2). Невідомими величинами є витрати повітря через ПП – II і температура продуктів згоряння коксового залишку на вході та виході з ПП – II. Балансове рівняння для ПП – II буде мати вид:

$$G_{нов_{II}} c_P^{нов} (T)(t_{нов_{II}}^{II} - t^0) = G_{nз} c_P^{nз} (T)(t_{nз}^I - t^0) \quad (10)$$

4.4. Визначення параметрів системи вцілому.

Відомими величинами є: температури палива, води і повітря, що надходять в систему конверсії, а також витрати палива і води. Згідно з описом газифікатора можна прийняти відомими витрати і склад генераторного газу на виході з газифікатора, а також витрати продуктів згоряння коксового залишку. Невідомими величинами є: витрати повітря через ПП - I, ПП – II; температури



генераторного газу і продуктів згоряння на виході з газифікатора. Балансове рівняння для всієї системи має вигляд:

$$\begin{aligned} & G_{нал} (c_P^{нал} (T)(t_{нал} - t^0) + Q_H^P) + G_{ное_I} c_P^{ное} (T)(t_{ное_I}^I - t^0) + \\ & + G_{ное_{II}} c_P^{ное} (T)(t_{ное_{II}}^I - t^0) + G_{вод} c_P^{вод} (T)(t_{вод}^I - t^0) = \\ & = G_{ген} \sum_i c_{P_i} \chi_i (t_{ген} - t^0) + G_{нз} c_P^{нз} (T)(t_{нз} - t^0) \end{aligned} \quad (11)$$

Таким чином, ми маємо 7 невідомих і 6 рівнянь (6)...(11). Для замикання системи додатково запишемо рівняння витрат повітря в газифікатор:

$$v(G_{ное_I} + G_{ное_{II}}) = G_{кокс} \quad (12)$$

Де: v – ваговий коефіцієнт пропорційності.

Система рівнянь, що описує приведену схему конверсії палива, прийме вигляд:

$$G_{ное_I} c_P^{ное} (T)(t_{ное_I}^{II} - t_{ное_I}^I) = G_{ген} \sum_i c_{p_i} \chi_i (t_{ген}^I - t_{ген}^{II});$$

$$\begin{aligned} & G_{кокс} c_P^{кокс} (T)(t_{ген} - t^0) + Q_H^P + G_{ное_I} c_P^{ное} (T)(t_{ное_I}^{II} - t^0) + \\ & G_{ное_{II}} c_P^{ное} (T)(t_{ное_{II}}^{II} - t^0) = G_{нз} c_P^{нз} (T)(t_{нз}^I - t^0); \end{aligned}$$

$$G_{вод} (c_P^{вод} (T)(t_S - t_{вод}^I) + q_S + c_P^{пара} (T)(t_{вод}^{II} - t_S)) = G_{нз_1} c_P^{нз} (T)(t_{нз}^I - t_{нз_1}^{II});$$

$$G_{ген} \gamma (t_{ген}^{II} - t_{ген}^I) \sum_i c_{p_i} \chi_i = G_{нз_1} c_P^{нз} (T)(t_{нз}^I - t_{нз_1}^{II});$$

$$G_{ное_{II}} c_P^{ное} (T)(t_{ное_{II}}^{II} - t^0) = G_{нз} c_P^{нз} (T)(t_{нз}^I - t^0);$$

$$\begin{aligned} & G_{нал} (c_P^{нал} (T)(t_{нал} - t^0) + Q_H^P) + G_{ное_I} c_P^{ное} (T)(t_{ное_I}^I - t^0) + \\ & + G_{ное_{II}} c_P^{ное} (T)(t_{ное_{II}}^I - t^0) + G_{вод} c_P^{вод} (T)(t_{вод}^I - t^0) = \\ & = G_{ген} \sum_i c_{P_i} \chi_i (t_{ген} - t^0) + G_{нз} c_P^{нз} (T)(t_{нз} - t^0) \end{aligned}$$

$$v(G_{ное_I} + G_{ное_{II}}) = G_{кокс};$$

Розв'язання приведеної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь відбувається з врахуванням нелінійної залежності теплоємності компонентів процесу від температури, яка особливо яскраво проявляється щодо CO_2 . Необхідно зазначити, що в процесі розрахунків, при необхідності, методика



дозволяє відозмінювати перебіг процесу, приймаючи як відомі інші величини.

Висновки.

Використання процесу термохімічної конверсії органічного палива в системах живлення теплосилових установок є доволі ефективним способом підвищення ККД теплотехнічних установок. Важливим є те, що збільшення ККД установки відбувається без підвищення початкових температур процесу, оскільки підвищення робочих температур теплоенергетичних процесів неминуче призводить до зростання тепловтрат у докілья через огорожувальні конструкції і з продуктами згоряння.

Приведена методика розрахунку пристроїв термохімічної конверсії твердого палива дозволяє:

- провести оцінку ефективності використаного теплоенергетичного обладнання з врахуванням реальних теплотехнічних характеристик вихідного палива;
- оцінити ефективність використання енергетичного потенціалу вихідного палива і при потребі, визначити додаткові джерела забезпечення процесу необхідною кількістю теплової енергії;
- визначити теплові втрати і шляхи їх зменшення;
- при потребі, змінюючи вихідні дані чи прийняту схему енергетичного обладнання, можливо проводити дослідження процесу конверсії, щодо пошуку найбільш оптимальних його технологічних параметрів.