

Визначення оптимальних умов організації технологічних циклів енерготехнологічних установок з високотемпературними газоохолоджувальними реакторами

- **Дубковський В'ячеслав Олександрович**, д-р техн. наук, проф.
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-7104>
- **Добронос Євген Олександрович**
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4524-4722>
- **Арсирій Василь Анатолійович**, д-р техн. наук, проф.
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3617-8487>

Створення та експлуатація високотемпературних газоохолоджувальних реакторів (ВТГР) і газотурбінних атомних електростанцій з такими реакторами дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії таких установок до 46 % – 50 % завдяки більш високій температурі теплоносія на виході з реактора 1000 °С – 1100 °С. Водночас ВТГР завдяки виробленій високопотенційній теплоті можна використовувати в неелектричних технологіях, як-то конверсія природного газу, газифікація вугілля та в хімічній, металургійній і нафтопереробній промисловості. Для отримання різних технологічних продуктів зазвичай використовуються ізобарно-ізотермічні реакції. Проте, в установках з ВТГР і гелієвим теплоносієм організація процесу підведення тепла за постійної температури теплоносія неможлива, причому в разі незначної зміни температури потрібно надмірне збільшення витрат теплоносія. У статті обґрунтовано можливість підвищення ефективності використання високопотенційної частини теплоти ВТГР для газифікації твердих органічних палив завдяки організації процесу газифікації за змінної температури процесу та розвиненій системі регенерації теплоти в енерготехнологічній установці.

Ключові слова: високотемпературний реактор, газифікація, енерготехнологічна установка; оптимальний технологічний процес, регенерація теплоти.

© Дубковський В. О., Добронос Є. О., Арсірій В. А., 2023

Ефективність використання ядерної енергії одночасно із підвищенням безпеки експлуатації атомних електростанцій (АЕС) є ключовою умовою розвитку атомної енергетики. Створення та експлуатація високотемпературних газоохолоджувальних реакторів (ВТГР) і газотурбінних АЕС (АГТУ) з такими реакторами дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) таких установок до 46 % – 50 % завдяки більш високій температурі

теплоносія на виході з реактора 1000 °С – 1100 °С, що значно перевищить значення ККД АЕС з водо-водяними реакторами [1].

Водночас високотемпературні реактори завдяки виробленій високопотенційній теплоті можна використовувати в неелектричних технологіях, як-то конверсія природного газу, газифікація вугілля та в хімічній, металургійній і нафтопереробній промисловості [1], [2].

Установки з ВТГР, які реалізують такі технології, є багатоцільовими і отримали назву енерготехнологічних. Теплота високого потенціалу 700 °С – 1100 °С використовується для технологічних цілей – газифікації вугілля, перетворення природного газу, виробництва водню та відновного газу в металургії тощо, а теплота середнього потенціалу 350 °С – 700 °С – для вироблення електроенергії.

Для отримання різних технологічних продуктів зазвичай рекомендуються ізобарно-ізотермічні реакції, наводяться методики розрахунку таких реакцій залежно від температури і тиску [3], [4]. Вибір температури і тиску реакцій визначається здебільшого виходом продуктів і надійними характеристиками застосовуваних матеріалів обладнання. Водночас, у низці випадків можуть бути визначені найвигідніші умови перебігу хіміко-технологічних процесів. Очевидно, що під час постійної температурної реакції найбільш доцільним є підведення теплоти від джерела за постійної температури за мінімального температурного напору (рисунк 1а)).

Однак в установках з ВТГР та гелієвим теплоносієм організація процесу підведення теплоти за постійної температури теплоносія неможлива, а у разі незначної зміни температури (див. процес 3'-4 на рисунку 1а)) потрібне надмірне збільшення витрат теплоносія. У реальних умовах температура теплоносія змінюється суттєво, а технологічні процеси виявляються можливими за температур на 200 °С – 250 °С нижче максимальної температури теплоносія (рисунк 1б)).

На рисунку 2 в «t-Q»-діаграмі показано рівноважний процес газифікації вугілля 1-2 по реакції $C+nCO_2 \rightleftharpoons 2CO+(n-1)CO_2$, яка протікає за змінної температури.

Процес має кілька характерних ділянок. Ділянка «a-b» характеризує підігрів вуглецю та газоподібних речовин до температури газифікації, а ділянка «b-c» виражає тепловий ефект реакції газифікації. Спочатку здійснюється підігрів компонентів, потім за температур 500 °С – 600 °С починається утворення CO. За температур 700 °С – 850 °С газифікація здійснюється найінтенсивніше.

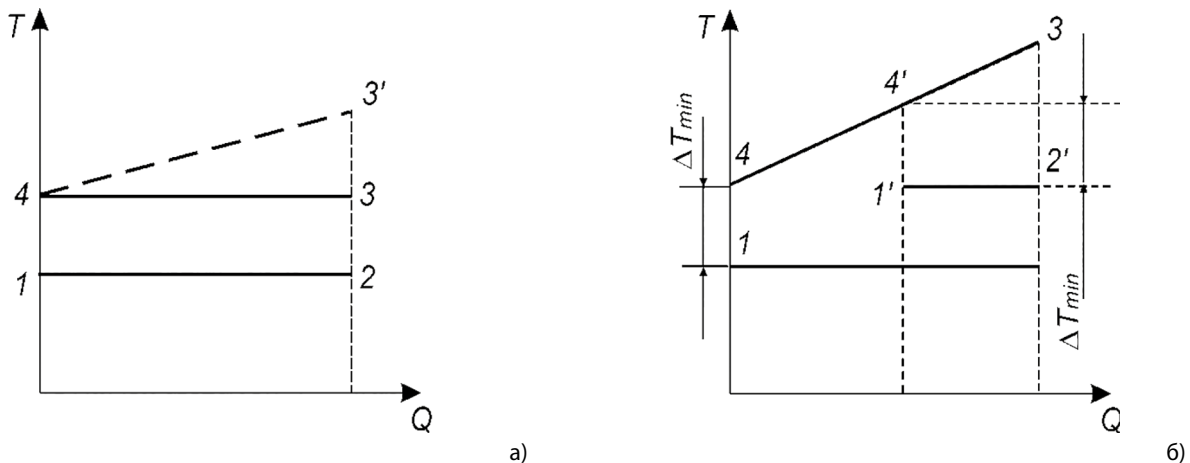


Рисунок 1 – T-Q діаграми підводу теплоти від ВТГР

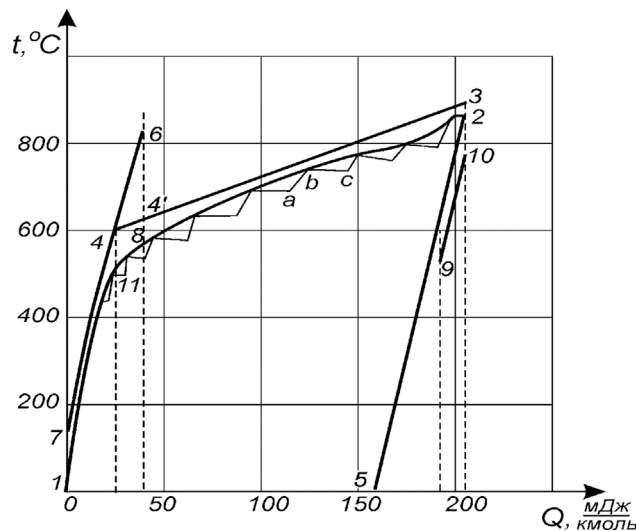


Рисунок 2 – Рівноважний процес газифікації вугілля за змінної температури в t-Q діаграмі

Вихід продуктів реакції визначається температурою останньої ділянки (850 °С). Лінія 3-4 характеризує підведення тепла від теплоносія. Співвідношення витрат теплоносія та реагентів завжди може бути підібране так, щоб забезпечити мінімальні температурні напори у процесі теплообміну. Підігрів вихідних речовин можливий у регенераторі завдяки теплу продуктів реакції (процес 2-5).

Під час охолодження продуктів газифікації в регенераторі до 100 °С (процес 6-7) проходить підігрів вихідних речовин до ~ 600 °С (точка 8), тобто реакція газифікації буде розвиватися вже в регенераторі, і витрата тепла гелію відповідно зменшиться (процес 3-4 ').

У схемі регенерації бувають значні різниці температур (до 250 °С), що призводить до відповідних ексергетичних втрат. Ці втрати можна зменшити, застосувавши паралельний підігрів реагентів у газифікаторі та в регенераторі. Регенеративний підігрів усього потоку вихідних речовин у цьому випадку проводиться (як показано на рисунку 2) до 500 °С, потім частина вуглецю газифікується в процесі 9-10 з використанням тепла продуктів реакції за підвищених температур. Ефективність такої схеми регенерації може бути оцінена ексергетичним ККД, який за умов, що розглядаються, визначається як ступінь регенерації енергії:

$$\mu_e = \frac{E_{1-11} + E_{9-10}}{E_{2-5}}, \quad (1)$$

де E_{1-11} , E_{9-10} , E_{2-5} – ексергія (працездатність) теплоти відповідно на ділянках 1-11, 9-10 та 2-5.

Розрахунки показують, що застосування такої паралельної схеми регенерації призводить до підвищення коефіцієнта перетворення енергії на 0,9 %, тому зайве ускладнення схеми недоцільно.

На рисунку 3 в координатах «Т-*S*» показано раціональний технологічний процес 1-2 та паросиловий цикл 8-5-6-9 комбінованої енерготехнологічної установки. Підведення теплоти від ВТГР здійснюється по лінії 3-4. Для наближення ізобари підведення тепла в паросиловій частині установки до ізобари охолодження теплоносія доцільне застосування пари надкритичних параметрів без вторинного перегріву.

У паровій частині прийнятий регенеративний підігрів живильної води, який здійснюється за звичайною схемою. Проте найвигідніша температура підігріву живильної води буде іншою, ніж у суто паротурбінних установках. Цю температуру можна визначити аналітично.

Запишемо коефіцієнт перетворення енергії установки у вигляді:

$$\eta_{EH} = \frac{I_n - \Delta I_n + e_{mn}}{q_p - \Delta q_p + Q_H^p}, \quad (2)$$

де ΔI_n і Δq_p – зміни корисної роботи парового циклу і кількості підведеної теплоти, відповідно;

e_{mn} – ексергія одиниці виробленої технологічної продукції;

I_n і q_p – відповідно робота парового циклу та кількість підведеної теплоти;

Q_H^p – теплота згоряння технологічної сировини.

Методи розрахунку ексергії технологічної продукції описані в [5], [6].

Наведемо ці величини у вигляді:

$$\Delta I_n = c_s(T_{пв} - T_0) - T_0 \Delta s,$$

$$\Delta q_p = c_s(T_{пв} - T_0),$$

де $\Delta s = c_s \ln(T_{пв}/T_0)$.

$T_{пв}$ – температура живильної води.

З урахуванням цього маємо:

$$\eta_{EH} = \frac{I_n - \left[c_s(T_{пв} - T_0) - T_0 c_s \ln \frac{T_{пв}}{T_0} \right] + e_{mn}}{q_p - c_s(T_{пв} - T_0) + Q_H^p}. \quad (3)$$

Взявши похідну по $T_{пв}$, після деяких перетворень, отримаємо:

$$T_{пв}^{наив} = \frac{T_0}{1 - \eta_{EH}^{max}}, \quad (4)$$

тобто термодинамічно найвигідніша температура підігріву живильної води визначається значенням коефіцієнта перетворення енергії всієї установки. Формула (4) отримана для теоретичного циклу з безліччю регенеративних підігрівачів. Облік реального числа підігрівачів може бути за методом, наведеним у [7].

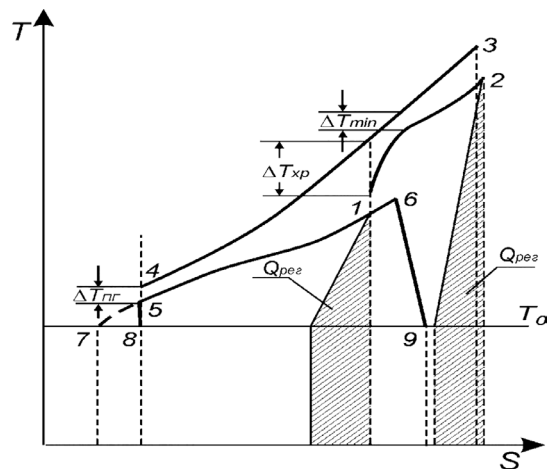


Рисунок 3 – Раціональний технологічний процес та паросиловий цикл комбінованої енерготехнологічної установки з ВТГР у координатах Т-*S*

За значенням температури підігріву живильної води може бути визначена температура охолодження теплоносія (рисунок 3, точка 4):

$$T_4 = T_{нв} + \Delta T_{пг} \quad (5)$$

де $\Delta T_{пг}$ – температурний напір на виході теплоносія з парогенератора.

Висновки

1. Обґрунтовано ефективність проведення процесу газифікації твердого органічного палива в енерготехнологічних установках із ВТГР за змінної температури.

2. Запропоновано раціональний технологічний процес та паросиловий цикл енерготехнологічної установки.

3. Аналітично визначено найвигіднішу температуру живильної води в паросиловій частині установки, яка визначається значенням коефіцієнта перетворення енергії всієї установки.

Список використаної літератури

1. Дмитренко Н. П. Современное состояние реакторов IV поколения с газовым теплоносителем (ВТГР) в мире и перспективы их использования в Украине. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2012. № 1(30). С. 27-33.
2. Zongxin Wu, Suyuan Yu. HTGR projects in China. *Nuclear engineering and technology*. 2007. Vol. 39(2). P. 103-110.
3. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. М.: Химия, 1975. 583 с.
4. Справочник азотчика. Том 1. М.: Химия, 1987.- 512 с.
5. Шаргут Я. Теплоэнергетика в металлургии. Пер. с польск. Я. П. Петраковского. М.: Metallurgizdat, 1976. 152 с.
6. Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия вещества. Новосибирск: Наука, 1985. 100 с.
7. Гохштейн Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969. 368 с.

References

1. Dmitrenko, N. P. (2012). The current state of fourth generation high-temperature gas-cooled reactors (HTGR) in the world and prospects for their use in Ukraine. *Energy: Economy, Technology, Ecology*, 1, 27-33.
2. Zongxin, Wu, Suyuan, Yu. (2007). HTGR projects in China. *Nuclear Engineering and Technology*, 2(39), 103-110.

3. Karapetyants, M. Kh. (1975). Chemical thermodynamics. Moscow, chemistry, 583 p.
4. Reference book for nitrogen experts. Volume 1. Moscow, Chemistry, 1987, 512 p.
5. Shargut, Ya. (1976). Thermal power engineering in metallurgy. Translated from Polish by Ya.P. Petrakovskiy. Moscow, Metallurgizdat, 152 p.
6. Stepanov, V. S. (1985). Chemical energy and exergy of matter. Novosibirsk, Nauka, 1985, 100 p.
7. Gokhshtein, D. P. (1969). Up-to-date methods of thermodynamic analysis for power plants. Moscow, Energiia, 368 p.

Determination of Optimal Conditions for the Organization of Technological Cycles for Energy Technological Installations with High-Temperature Gas-Cooled Reactors

V. Dubkovskiy¹, Ye. Dobronos¹, V. Arsiriy²

¹Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

²Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine

The creation and operation of high-temperature gas-cooled reactors (HTGR) and gas-turbine nuclear power plants (GNPP) with such reactors made it possible to increase the efficiency of such plants to (46-50) % due to a higher coolant temperature at the reactor outlet of (1000-1100) 0C. At the same time, high-temperature reactors, due to the high-potential heat produced, can be used in non-electric technologies, such as natural gas conversion, coal gasification, chemical, metallurgical, and oil refining industries. To obtain various technological products, isobaric-isothermal reactions are usually used. However, in plants with HTGR and a helium coolant, it is impossible to organize the process of heat supply at a constant temperature of the coolant, and with a slight change in temperature, an excessive increase in the flow rate of the coolant is required.

The article substantiates the possibility to increase the efficiency of using the high-potential part of the HTGR heat for the gasification of solid organic fuels by organizing the gasification process at a variable process temperature and a developed heat recovery system in an energy technological installation.

Keywords: high-temperature reactor, power plant, gasification, optimal technological process, heat recovery.

Отримано 07.06.2023