

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДОБРОНОС ЄВГЕН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.039.588

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЯДЕРНИХ
РЕАКТОРІВ ДЛЯ КОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА**

Спеціальність 143 – Атомна енергетика
Галузь знань 14 - Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Є. Добронос

Науковий керівник Дубковський Вячеслав Олександрович, доктор
технічних наук, професор, професор кафедри атомних електростанцій

ОДЕСА- 2025

АНОТАЦІЯ

Добронос Є.О. - Застосування високотемпературних ядерних реакторів в конверсії органічного палива.- Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 «Атомна енергетика» (14 - Електрична інженерія). - Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, 2025.

Ядерна енергія може використовуватися для забезпечення різних промислових технологій, включаючи: вироблення синтез-газу, водню та метанолу; опріснення морської води; централізованого тепlopостачання та охолодження; генерації технологічної теплоти для виробництв; інтенсифікації видобутку нафтових ресурсів та переробки нафти; конверсії природного газу та газифікації вугілля; в хімічної та металургійної промисловості.

Очікується, що завдяки неухильно зростаючому глобальному споживанню енергії, обмеженій доступності викопного палива та підвищеному навантаженні при спалюванні викопного палива на навколишнє середовище, попит на ядерну енергію для промислового застосування буде зростати.

Використання високотемпературних газоохолоджувальних ядерних реакторів (ВТГР) для виробництва не тільки електричної енергії, а і для забезпечення високопотенційною тепловою енергією інших (неелектричних) технологій дозволить значно розширити застосування ядерної енергії та зменшити витрати органічних палив і, відповідно, знизити техногенне навантаження на довкілля.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету та завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відображено її зв'язок з науково-дослідними роботами, що виконувались в Національному університеті «Одеська політехніка» за напрямком підвищення енергетичної ефективності атомних енергоустановок, відзначений особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** роботи проведено аналіз сучасного стану високотемпературних реакторів у світі, зокрема у США, Великобританії, Німеччині, Японії, КНР. Визначено тренд світового попиту на теплову енергію та дослідження використання теплоти ВТГР у промислових технологічних процесах. Розглянуто технологічні процеси та схеми установок для конверсії природного газу та газифікації вугілля.

У **другому розділі** роботи визначено та проаналізовано проблеми, які треба вирішувати при створенні атомних енерготехнологічних установок з ВТГР та розглянуті принципи побудови технологічних схем атомних енерготехнологічних установок (АЕТУ). Наведені необхідні рівні температур протікання ендотермічних технологічних процесів. Розроблена узагальнена схема енерготехнологічної установки з застосуванням енергії, виробленої ядерним реактором.

Наведено принципові технологічні схеми АЕТУ з пароводяною конверсією природного газу та газифікацією вугілля з розробленими $T-S$ –діаграмами оптимального використання регенерації теплоти.

У **третьому розділі** роботи розглянуто методи дослідження енергетичної ефективності енерготехнологічних установок з ВТГР. Зроблено огляд традиційних методів дослідження енергетичної ефективності технічних систем.

Доведено, що традиційні методи оцінки енергетичної ефективності робочих процесів атомних та теплових електростанцій та теплоелектроцентралей не можуть бути застосовані до установок, виробляючих продукцію як енергетичного, так і неенергетичного виду.

Обгрунтовано вибір методу термодинамічного дослідження атомних енерготехнологічних установок, який дозволяє на єдиній основі визначати критерії енергетичної ефективності вироблення різномірної продукції. Розраховані значення теплових та ексергетичних еквівалентів для технологічних речовин АЕТУ.

У **четвертому розділі** роботи проведено дослідження енергетичної ефективності установок з ВТГР для конверсії органічного палива.

Розроблено розрахункові технологічні схеми одно- та двоцільових АЕТУ, які використовують у якості технологічної сировини природний газ та вугілля. На основі визначеного у третьому розділі роботи термодинамічного методу аналізу АЕТУ розроблена методика розрахунку та визначення показників ефективності використання теплоти та ексергетичної досконалості як установок в цілому, так і для технологічних частин установок двоцільового призначення. На основі визначених показників проведено порівняльний аналіз енергетичної ефективності досліджених технологічних схем АЕТУ.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблені $T-S$ – діаграми циклів АЕТУ з визначенням максимально можливої регенерації, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічних схем;
- розроблено методику розрахунку та визначення показників використання теплоти та ексергетичної досконалості одно- та двоцільових АЕТУ з конверсією природного газу та газифікацією вугілля;
- розроблені розрахункові технологічні схеми, за допомогою яких проведено дослідження енергетичної ефективності використання ВТГР в технологіях конверсії органічних палив;
- вперше запропоновано отримання додаткової кількості технологічної пари для проведення процесу газифікації вугілля за рахунок теплоти продуктів газифікації;
- визначена енергетична ефективність застосування АЕТУ з ВТГР для виробництва синтез-газу при використанні у якості технологічної сировини природного газу та вугілля.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- отримані результати можуть бути застосовані при виборі технологічних схем та техніко-економічному обґрунтуванні АЕТУ з ВТГР;
- результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі № 193-42 «Ядерна та радіаційна безпека і ефективність

енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці» (№ д/р 0121U108086);

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 143 – атомна енергетика.

Ключові слова: високотемпературний ядерний реактор, температура, регенератор, термодинамічний аналіз, конверсія, ядерне паливо, газифікація, ядерна енергетична установка, теплота.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Дубковський В., Добронос Є. Арсірій В. Визначення оптимальних умов організації технологічних циклів енерготехнологічних установок з ВТГР. Ядерна та радіаційна безпека. Вип.3(99),2023, с.63-66. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).06). Автором запропоновано раціональний технологічний процес та паросиловий цикл енерготехнологічної установки з високотемпературним газоохолодженням реактором.

2. Дубковський В., Сегеда В., Добронос Є. Використання високотемпературних ядерних реакторів для енерготехнології. Ядерна та радіаційна безпека. Вип.2(102),2024, с.68-73. [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2\(102\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2(102).07). Автором проаналізовано напрями використання високотемпературних реакторів для забезпечення технологічних процесів: конверсії викопних палив, чорної металургії, виробництва водню, хімічної промисловості.

3. Дубковський В., Сегеда В., Добронос Є. Можливості застосування модульних високотемпературних реакторів для конверсії органічних палив. Праці Одеського політехнічного університету. Вип.2(70), 2024. с. 39-47. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.05>. Автором визначені можливості та переваги модульних високотемпературних

газоохолоджуваних реакторів малої потужності при їх застосуванні для конверсії органічних палив.

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. V.O.Dubkovsky, **E.O. Dobronos**, V.O.Segeda. Use of high-temperature nuclear reactors in non-electrical technologies. /International conference nuclear energy for the people.28 September - 1 October, 2022, Burgas, Bulgaria.
2. Дубковський В., **Добронос Є** Визначення оптимальної організації технологічних процесів енерготехнологічних установок з високотемпературними газоохолоджуваними реакторами. / 32 Міжнародна науково-практична конференція «Global Trends and Direction of Scientific Research Development» Секція «Технічні науки». 31.07-02.08.2024, Гамбург, Німеччина.
3. V.O.Dubkovsky, **E.O. Dobronos**, V.O.Segeda. Thermodynamic efficiency of nuclear energy technology plants with high-temperature gas-cooled reactors. /International conference nuclear energy for the people. 01-04 October, 2024, Burgas, Bulgaria.
4. V.O. Dubkovsky 1 , **E.O. Dobronos**, V.O. Segeda Use of High-Temperature Nuclear Reactors in Non-Electrical Technologies. BgNS TRANSACTIONS volume 26 number 1 (2022/23) pp. 9–14.

ABSTRACT

Dobronos E.O. - Application of high-temperature nuclear reactors in the conversion of organic fuel.- Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 143 "Nuclear Energy" (14 - Electrical Engineering). - National University "Odesa Polytechnic", Odesa, 2025.

Nuclear energy can be used to provide various industrial technologies, including: production of synthesis gas, hydrogen and methanol; desalination of sea water; centralized heat supply and cooling; generation of process heat for production; intensification of oil resources extraction and oil refining; conversion of natural gas and gasification of coal; in the chemical and metallurgical industries.

It is expected that due to the steadily increasing global energy consumption, limited availability of fossil fuels and increased environmental burden from fossil fuel combustion, the demand for nuclear energy for industrial applications will increase.

The use of high-temperature gas-cooled nuclear reactors to produce not only electrical energy, but also to provide high-potential thermal energy for other (non-electric) technologies will significantly expand the use of nuclear energy and reduce the consumption of organic fuels and, accordingly, reduce the man-made burden on the environment.

The **introduction** substantiates the relevance of the work, defines the purpose and objectives of the study, the scientific novelty and practical significance of the results obtained, reflects its connection with the research work carried out at the National University "Odesa Polytechnic" in the direction of increasing the energy efficiency of nuclear power plants, and notes the personal contribution of the applicant.

Chapter 1 of the work analyzed the current state of high-temperature reactors in the world, in particular in the USA, Great Britain, Germany, Japan, and the People's Republic of China. The trend of global demand for thermal energy and research into the use of HTGR heat in industrial technological processes are determined. Technological

processes and schemes of plants for natural gas conversion and coal gasification are considered.

Chapter 2 of the work identifies and analyzes the problems that need to be solved when creating nuclear power technological plants with HTGR on the considered principles of constructing technological schemes of nuclear energy technology installations (NETI). The necessary temperature levels for the flow of endothermic technological processes are given. A generalized scheme of an energy technology installation using energy generated by a nuclear reactor has been developed.

The principle technological schemes of an NETI with steam-water conversion of natural gas and coal gasification with developed T - S - diagrams of optimal use of heat regeneration have been presented.

Chapter 3 of the work considers methods for studying the energy efficiency of energy-technological installations with HTGR. A review of traditional methods for studying the energy efficiency of technical systems is made.

It is proved that traditional methods for assessing the energy efficiency of working processes of nuclear and thermal power plants and combined heat and power plants cannot be applied to installations producing both energy and non-energy products.

The choice of the method of thermodynamic research of nuclear energy-technological installations is justified, which allows determining the criteria for the energy efficiency of the production of heterogeneous products on a single basis. The values of thermal and exergy equivalents for technological substances of AETU are calculated.

Chapter 4 of the work, a study of the energy efficiency of installations with HTGR for the conversion of organic fuel is carried out.

Calculation technological schemes of single- and dual-purpose NETIs, which use natural gas and coal as technological raw materials, are developed. Based on the thermodynamic method of NETI analysis defined in the third section of the work, a methodology for calculating and determining the indicators of heat utilization efficiency and exergy perfection of both the installations as a whole and for the technological parts

of dual-purpose installations has been developed. Based on the determined indicators, a comparative analysis of the energy efficiency of the investigated technological schemes of NETI has been carried out.

Scientific novelty of the obtained results:

- for the first time developed T - S - diagrams of NETI cycles with the determination of the maximum possible regeneration, which allows to increase the energy efficiency of technological schemes;
- developed a methodology for calculating and determining the indicators of heat use and exergy perfection of single- and dual-purpose NETIs with natural gas conversion and coal gasification;
- developed calculation technological schemes, with the help of which a study of the energy efficiency of the use of HTGR in organic fuel conversion technologies was conducted;
- for the first time proposed obtaining an additional amount of process steam for the coal gasification process at the expense of the heat of gasification products;
- determined the energy efficiency of using NETI with HTGR for the production of synthesis gas when using natural gas and coal as technological raw materials.

The practical significance of the obtained results is that:

- the obtained results can be applied in the selection of technological schemes and feasibility study of NETI with HTGR;
- the results of the dissertation are used in the state budget research work No. 193-42 "Nuclear and radiation safety and efficiency of NPP power units taking into account modern problems and trends in nuclear power" (No. d/r 0121U108086);
- the results of the dissertation are used in the educational process of the National University "Odesa Polytechnic" for the training of specialists in the specialty 143 - nuclear power.

Keywords: high-temperature reactor, temperature, regenerator, thermodynamic analysis, conversion, nuclear fuel, gasification, nuclear power plant, heat.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Dubkovsky V., **Dobronos E.** Arsiriy V. Determination of optimal conditions for organizing technological cycles of energy technology installations with HTGR. Nuclear and radiation safety. Issue 3(99), 2023, pp. 63-66. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).06).

2. Dubkovsky V., Segeda V., **Dobronos E.** The use of high-temperature nuclear reactors for energy technology. Nuclear and radiation safety. Issue 2(102), 2024, pp. 68-73. [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2\(102\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2(102).07).

3. Dubkovsky V., Segeda V. , **Dobronos E.** Possibilities of using modular high-temperature reactors for conversion of organic fuels. Proceedings of Odessa Polytechnic University. Issue 2(70), 2024. c.39-47. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.05>.

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials:

1. V.O.Dubkovsky, **E.O. Dobronos**, V.O.Segeda. Use of high-temperature nuclear reactors in non-electrical technologies. /International conference nuclear energy for the people.28 September - 1 October, 2022, Burgas, Bulgaria.

2. Dubkovsky V., **Dobronos E.** Determination of the optimal organization of technological processes of energy technological installations with high-temperature gas-cooled reactors. / 32nd International Scientific and Practical Conference "Global Trends and Direction of Scientific Research Development" Section "Technical Sciences". 31.07-02.08.2024, Hamburg, Germany.

3. V.O.Dubkovsky, **E.O. Dobronos**, V.O.Segeda. Thermodynamic efficiency of nuclear energy technology plants with high-temperature gas-cooled reactors. /International conference nuclear energy for the people. 01-04 October, 2024, Burgas, Bulgaria.

4. V.O. Dubkovsky 1 , **E.O. Dobronos**, V.O. Segeda Use of High-Temperature Nuclear Reactors in Non-Electrical Technologies. BgNS TRANSACTIONS volume 26 number 1 (2022/23) pp. 9–14.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	13
Вступ.....	14
1 Принципи використання ВТГР у промислових технологіях.....	20
1.1 Стан розвитку ВТГР.....	20
1.2 Дослідження використання ВТГР у технологічних процесах.....	23
1.3 Використання ВТГР у процесах конверсії природного газу.....	27
1.4 Використання ВТГР у процесах газифікації вугілля.....	32
Висновки до розділу 1.....	38
2 Технологічні схеми та параметри установок з ВТГР для конверсії органічного палива.....	40
2.1 Принципи та задачі розробки технологічних схем АЕТУ.....	40
2.2 Технологічні схеми атомних енерготехнологічних установок...	43
2.2.1 Технологічні схеми для конверсії природного газу.....	45
2.2.2 Технологічні схеми для газифікації вугілля.....	46
2.3 Визначення оптимальної організації технологічних процесів та циклів енерготехнологічних установок з ВТГР.....	48
Висновки до розділу 2.....	54
3 Методи дослідження енергетичної ефективності енерготехнологічних установок з ВТГР	56
3.1 Огляд традиційних методів дослідження енергетичної ефективності технічних систем.....	56
3.2 Термодинамічні методи дослідження енерготехнологічних установок з ВТГР.....	65
3.3 Особливості визначення показників енергетичної ефективності енерготехнологічних установок	71

3.4 Метод ексергетичного аналізу складних енерготехнологічних систем.....	77
Висновки до розділу 3	81
4 Дослідження енергетичної ефективності АЕТУ з ВТГР для конверсії органічного палива.....	83
4.1 АЕТУ з застосуванням у якості технологічної сировини природного газу	85
4.1.1 Одноцільова АЕТУ для конверсії природного газу.....	85
4.1.2 Двоцільова АЕТУ з конверсією природного газу та виробленням електроенергії.....	89
4.2 АЕТУ з застосуванням у якості технологічної сировини твердого органічного палива	94
4.2.1 Одноцільова АЕТУ для газифікації твердого органічного палива.....	96
4.2.2 Двоцільова АЕТУ з газифікацією твердого органічного палива та виробленням електроенергії.....	101
4.3 Аналіз та співставлення енергетичної ефективності технологічних схем АЕТУ з конверсією природного газу та газифікацією твердого органічного палива.....	106
Висновки до розділу 4.....	109
Загальні висновки.....	110
Перелік джерел посилання.....	112
Додаток А Список публікацій за темою дисертації і відомості про апробацію результатів дисертації.....	119
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертації.....	121

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЯР – ядерний реактор
АЕС – атомна електростанція
ПГ – парогенератор
ПТ – парова турбіна
ТПК – теплообмінник промконтуру
ВТГР – високотемпературний газоохолоджуваний реактор
АЕТУ – атомна енерготехнологічна установка
ТВЗ – тепловиділяюча збірка
ЯМК – ядерно-металургійний комплекс
ТПГ – технологічний парогенератор
ПТ – парова турбіна
КН – конденсатний насос
РС ПТУ – регенеративна система паротурбінної установки
КТ – конденсатор парової турбіни
ТО – теплообмінник
ТЕЦ - теплоелектроцентрально

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з основних принципів збереження довкілля та безпечного існування населення нашої планети є створення та впровадження в енергетиці та промислового виробництві безоксидних технологій. Цьому принципу цілком відповідає ядерна енергетика, за допомогою якої можна виробляти електричну та теплову енергію без викидів парникових газів.

У Паризькій угоді (2015 р.), яка була присвячена кліматичній проблемі нашої планети, атомній енергетиці надано особливий «зелений статус», як безоксидному виду енергетики, що сприяє сповільненню підвищення температури на планеті.

Ядерна енергія може використовуватися для забезпечення різних промислових технологій, включаючи: вироблення синтез-газу, водню та метанолу; опріснення морської води; централізованого тепlopостачання та охолодження; генерації технологічної теплоти для виробництв; інтенсифікації видобутку нафтових ресурсів та переробки нафти; конверсії природного газу та газифікації вугілля; в хімічної та металургійної промисловості.

Очікується, що завдяки неухильно зростаючому глобальному споживанню енергії, обмеженій доступності викопного палива та підвищеному навантаженні при спалюванні викопного палива на навколишнє середовище, попит на ядерну енергію для промислового застосування буде зростати [1-2].

На сьогодні ядерна електроенергетика базується в основному на двох типах енергетичних реакторів: реакторах з водою під тиском та киплячих реакторах. Поряд з удосконаленням цих реакторів в усіх ведучих країнах розробляються реактори інших типів. Таких типів реакторів практично теж два. Це реактори на швидких нейтронах та високотемпературні реактори з газовим охолодженням (ВТГР). Розглядання багаточисленних варіантів розвитку ядерної енергетики, яке ґрунтується на аналізі можливостей реакторів різного типу, підтверджує, що до 2030 року частка високотемпературних реакторів повинна значно зрости, а їх потужність складе, за даними різних авторів, до 20% потужності всіх АЕС [1].

Таке значне місце високотемпературних реакторів в ядерній енергетиці зумовлене їх специфічними особливостями та високими енергетичними характеристиками.

Використання високотемпературних газоохолоджувальних ядерних реакторів для виробництва не тільки електричної енергії, а і для забезпечення високопотенційною тепловою енергією інших (неелектричних) технологій дозволить значно розширити застосування ядерної енергії та зменшити витрати органічних палив і, відповідно, знизити техногенне навантаження на довкілля.

В роботах [3-6] наведені можливості використання високотемпературних ядерних реакторів у складі енерготехнологічних установок для забезпечення ендотермічних технологічних процесів тепловою енергією різних потенціалів.

В технічних звітах МАГАТЕ [1],[7] та інших роботах визначені проблеми та завдання, які необхідно вирішити для широкомасштабного впровадження ВТГР у світову енергетику та індустрію. Основними з них є наступні:

- створення ВТГР IV покоління з підвищеним рівнем безпеки;
- вибір конструкції активної зони та паливного циклу;
- визначення технологій для найбільш ефективного застосування ВТГР;
- розробка технологічних схем установок з пристосуванням параметрів ВТГР до параметрів технологічних процесів;
- створення технологічного обладнання;
- передача теплоти від реактора до технологічної частини;
- накопичення досвіду експлуатації.

Дисертаційна робота присвячена четвертому з визначених завдань, а саме: розробці технологічних схем установок з пристосуванням параметрів ВТГР до параметрів технологічних процесів з визначенням енергетичної ефективності використання ВТГР для атомних енерготехнологічних установок (АЕТУ) для вироблення синтез-газу шляхом конверсії природного органічного палива.

Мета роботи – визначення енергетичної ефективності атомних енерготехнологічних установок з ВТГР, призначених для конверсії природного газу та газифікації твердого органічного палива.

Для досягнення мети роботи повинно було виконати наступні завдання:

- провести аналіз світового досвіду використання ВТГР у неелектричних технологіях;
- визначити оптимальної організації технологічних процесів та циклів енерготехнологічних установок з ВТГР;
- вибрати та обґрунтувати метод дослідження АЕТУ;
- розробити розрахункові технологічні схеми;
- на основі вибраного метода досліджень розробити методику розрахунку технологічних схем;
- по розробленій методиці провести розрахункові дослідження з визначенням показників енергетичної ефективності;
- провести порівняльний аналіз технологічних схем АЕТУ.

Об'єктом дослідження є технологічні схеми атомних енерготехнологічних установок з ВТГР, які використовують у якості технологічної сировини природний газ та тверде органічне паливо (вугілля).

Предметом дослідження є показники ефективності використання теплоти та ексергетичної досконалості АЕТУ з ВТГР.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань було використано метод термодинамічного дослідження енерготехнологічних установок, які виробляють продукцію як енергетичного, так і неенергетичного (технологічного) виду, запропонований В. Дубковським. Цей метод на єдиній енергетичній основі дозволяє визначати ефективність вироблення різномірних видів продукції. Для розрахунку хіміко-технологічних процесів пароводяної конверсії природного газу та пароводяної газифікації вугілля - складу вхідних та вихідних продуктів хімічних реакцій та теплових ефектів хімічних реакцій використані методи хімічної термодинаміки.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблені T - S – діаграми циклів АЕТУ з визначенням максимально можливої регенерації, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічних схем;
- розроблено методику розрахунку та визначення показників використання теплоти та ексергетичної досконалості одно- та двоцільових АЕТУ з конверсією природного газу та газифікацією вугілля;
- розроблені розрахункові технологічні схеми, за допомогою яких проведено дослідження енергетичної ефективності використання ВТГР в технологіях конверсії органічних палив;
- вперше запропоновано отримання додаткової кількості технологічної пари для проведення процесу газифікації вугілля за рахунок теплоти продуктів газифікації;
- визначена енергетична ефективність застосування АЕТУ з ВТГР для виробництва синтез-газу при використанні у якості технологічної сировини природного газу та вугілля.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- отримані результати можуть бути застосовані при виборі технологічних схем та техніко-економічному обґрунтуванні АЕТУ з ВТГР;
- результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі № 193-42 «Ядерна та радіаційна безпека і ефективність енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці» (№ д/р 0121U108086);
- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 143 – атомна енергетика.

Результати дисертації впроваджені у навчальний процес кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 143 – атомна енергетика

загальною кількістю 45 студентів, що підтверджується відповідним актом впровадження (див. Додаток Б).

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими напрямами Університету та кафедри. Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи одержані при виконанні НДР відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2050 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р., та у рамках Комплексної кафедральної науково-дослідної роботи №193-42 «Ядерна та радіаційна безпека і ефективність енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці». У кафедральний звіт увійшов підрозділ «Можливості застосування модульних високотемпературних реакторів для конверсії органічних палив », виконаний Доброносом Є.О.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів полягає у постановці цілей та задач дисертації, аналізу літературних джерел по розробці по застосуванню ВТГР у неелектричних технологіях та принципів створення атомних енерготехнологічних установок, розробці $T-S$ – діаграм циклів АЕТУ з визначенням максимально можливої регенерації, вибору та обґрунтуванні методу дослідження АЕТУ, розробленні методики розрахунку та визначення показників використання теплоти та ексергетичної досконалості одно- та двоцільових АЕТУ, визначенні енергетичної ефективності застосування АЕТУ з ВТГР для виробництва синтез-газу при використанні у якості технологічної сировини природного газу та вугілля.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на трьох міжнародних конференціях.

Публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи викладено в трьох наукових статтях, опублікованих у виданнях, включених до Переліку фахових видань України (всі видання індексуються у міжнародних науково-метричних базах даних, зокрема: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals 21 Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar та ін.), дві з них опублікована в журналі, який входить до науко-метричної бази SCOPUS, а також

у двох опублікованих докладах наукових конференцій, одних тезах наукової конференції та міжнародному збірнику наукових статей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел з 68 найменувань, 25 рисунків та 10 таблиць, додатків на 3 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 121 сторінку, в тому числі 120 сторінок основного тексту.

1 ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ ВТГР У ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

1.1 Стан розвитку ВТГР

Розвиток ВТГР почався у 40-50 роках XIX століття. Перший реактор такого типу був розроблений у США в 1945 році; також реактори з газовим теплоносієм були побудовані у Великобританії, США та Німеччині в 1960-70-х роках, а потім пілотні ВТГР у США та Німеччині. Першими атомними електростанціями з ВТГР були дослідницькі станції тепловою потужністю 20 МВт у Великобританії та 15 МВт у Німеччині. МВт [1-2].

У США було розроблено та введено а експлуатацію промислові енергетичних реактора. Перший реактор – тепловою потужністю 40 МВт в Піч Боттом (Peach Bottom) знаходився в експлуатації з 1965 по 1975 роки, другий тепловою потужністю 330 МВт Форт Сент Врейн (Fort St Vrain) і знаходився в експлуатації з 1976 по 1988 рік. Досвід експлуатації довів технічну обґрунтованість створення ВТГР.

У Німеччині був першим високотемпературним реактором з кульковими засипкою був реактор AVR, який експлуатувався з 1967 по 1988 роки, продемонструвавши можливості ВТГР з кульковими твелями потужністю 46 МВт. Теплоносій - гелій надходив в активну зону знизу. На виході з реактора температура гелію становила 900– 950 °С. AVR був призначений для виробництва електроенергії та виробив протягом терміну служби близько $1,7 \times 10^6$ МВт·год [3-4].

У 1985 році споруджено високотемпературний ядерний реактор THTR (Thorium Hochtemperatur Reaktor) потужністю 750 МВт(т) з кульковими твелями та температурою теплоносія на вході в реактор 250 °С та на виході - 750 °С. Вироблення електричної енергії забезпечував паротурбінний цикл потужністю

300 МВт. У 1989 році реакторна установка була зупинена та виведена з експлуатації з соціально-політичних чинників [1].

У 2023 році Китай ввів в експлуатацію два реактори HTR-PM (високотемпературний газоохолоджуваний реактор) з кульовими тепловиділяючими елементами [5-9]. HTR-PM – це модульний реактор потужністю 250 МВт(т) з паротурбінною установкою, яка забезпечується двома реакторами. Перегріта пара, яка генерується установкою, має температуру 556°C та тиск 13,6 МПа. Ефективність АЕС з HTR-PM є вищою у порівнянні з АЕС, які використовують водо-водяні реактори. Хоча демонстраційний реактор HTR-PM створено виключно для виробництва електроенергії, цей реактор також розглядається як ядерне джерело тепла для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії.

У Сполучених Штатах Америки спроектовано модульний високотемпературний реактор з теплоносієм-гелієм потужністю 600 МВт(т) - GT-MHR, в якому використаний прямий цикл Брайтона з гелієвою турбіною. Активна зона сформована з гексагональних ТВЗ збірок з диспергованими в графітову матрицю мікротвелами. Електроенергетична частина включає електрогенератор, гелієву турбіну та компресорну групу, змонтовані на єдиному валу. Температура гелію на вході до реактора складала 490-500 °С, на виході – 840-850 °С. Потужність установки дорівнює 288 МВт(е). У паливному циклі реактора може бути застосовувано збройний плутоній [10].

В таблиці 1.1 наведені параметри сучасних ВТГР.

Високотемпературні реактори, які виробляють теплоту потенціалу 850-950 °С можливо використовувати не тільки для електрогенерації, а і в неелектричних технологіях та виробництвах, таких як реформінг природного газу та вугілля, вироблені хімічної продукції, металургійній та нафтопереробній промисловостях [11].

Таблиця 1.1 – Параметри сучасних ВТГР

Параметр	ТНТР	GT-MHR	МНТГР	GTНТР300	НТР-РМ
Потужність, МВт(т)	750	600	350	600	250
Питома потужність, МВт/м ³	6.0	6.5	5.9	5.8	6.5
Теплоносій	гелій	гелій	гелій	гелій	гелій
Тиск теплоносія, МПа	4.0	7.0	6.4	5.02	7.0
Паливна матриця	Гексагональна	Гексагональна	Гексагональна	Гексагональна	Сферична
Температура гелія на вході в активну зону, °С	250	491	258	587-633	250
Температура гелія на виході з активної зони, °С	750	850	686	850-950	750
Паливо	(U,Th) O ₂	Можливі різні композиції	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Сповільнювач нейтронів (конструктивний матеріал)	графіт	графіт	графіт	графіт	графіт
Збагачення, %	93	середнє - 19	19	-----	8.5
Початок/кінець експлуатації, рік	1985-1991	-----	-----	2030-ті роки	з 2000 р.

Установки з високотемпературними газоохолоджуваними реакторами, в яких застосовуються поряд з виробленням електричної енергії вироблення технологічної продукції, є багатоцільовими і отримали назву енерготехнологічних. Теплова енергія високого потенціалу 800 °С -1100 °С використовується для технологічних цілей – газифікації вугілля, перетворення природного газу, виробництва водню та відновлювального газу в металургії та ін., а теплота середнього потенціалу 350 -750 °С – для вироблення електроенергії.

1.2 Дослідження використання ВТГР у технологічних процесах

Використання безоксидних технологій в промисловому виробництві енергетиці та будівництві є нагальною необхідністю для збереження навколишнього середовища. За сучасними даними тільки в енергетиці припадає 38-40% викидів двоокису вуглецю [1].

На рисунку 1.1 наведено структуру техногенної емісії вуглекислоти у атмосферу планети у 2020 [1].

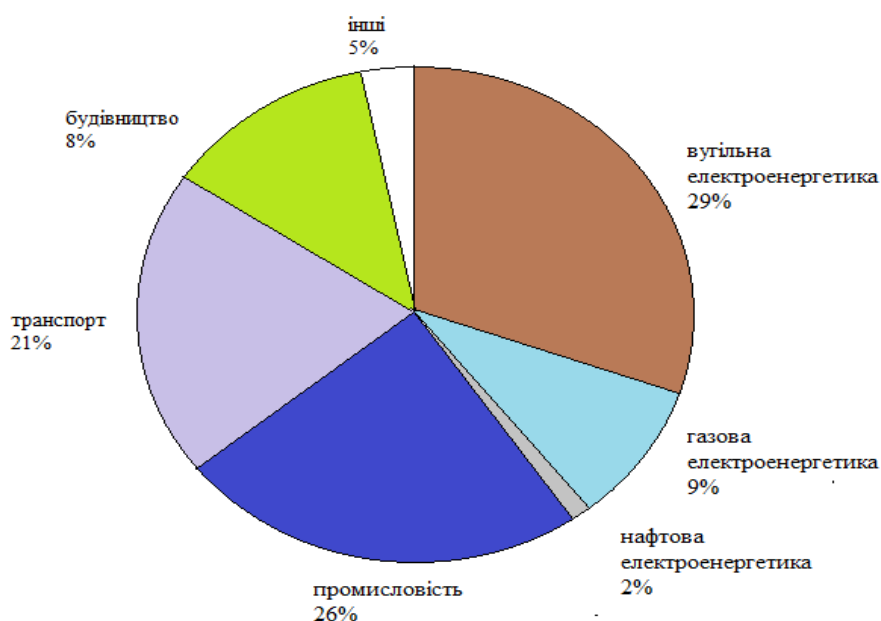


Рисунок 1.1 - Емісія вуглекислоти у атмосферу планети у 2020 році

Глобальний попит на енергію зростає і перевищить $(200-250) \cdot 10^9$ ГДж у 2025 році, що становитиме більше 50% світового кінцевого споживання енергії [1]. Промислова технологічна теплота становило близько половини загального попиту на тепло у 2020 році, і близько 90% цього попиту залежатиме від викопних видів палива, більшість з яких потребують високотемпературного тепла. В країнах Європи понад 75% попиту на тепло для промислових процесів потребують температур 250°C та вище, з яких більше половини припадає на діапазон $250 - 550^\circ\text{C}$ [12-13]. Промисловість потребує великої кількості джерел тепла при високих температурах, а відсутність доступних ефективних низьковуглецевих або безоксидних технологій

ускладнює вирішення питання скорочення викидів CO_2 . Як одна з ядерних технологій IV покоління, високотемпературні реактори здатні генерувати високопотенційну теплову енергію для потужних промислових виробництв, а їх технологічні можливості ґрунтуються на більш ніж півстолітньому досвіді розробки та експлуатації експериментальних і енергетичних ВТГР.

Високотемпературні реактори можуть забезпечити суттєві переваги в енергопостачанні для промислових технологій, а саме:

- це безокисне джерело виробництва електричної та теплової енергії. Ядерна енергетика - одна з найнижчих за рівнем парникових газів з усіх доступних технологій. Тому широке впровадження ВТГР може допомогти зменшити використання викопного палива і пов'язаних з ним викидів вуглецю не лише за рахунок виробництва електроенергії, але й за рахунок постачання технологічного тепла;

- високопотенційне теплопостачання. Високотемпературні реактори можуть здійснювати забезпечення промислових процесів технологічною теплотою у діапазоні температур від $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для такого рівня температур теплопостачання не існує низьковуглецевих технологій, які могли б задовольнити потреби технологічних процесів у промислових масштабах;

- безпека та надійність енергопостачання. Термін експлуатації високотемпературних реакторів IV покоління складає 60 років.

Світові поклади ядерного палива в енергетичному еквіваленті суттєво перевищують поклади викопного органічного палива. На сьогодні запаси нафти становлять близько $(1700-1800) \cdot 10^9$ барелів, що при середній щільності нафти ($885 - 900$) кг/м^3 складає $(252-255) \cdot 10^9$ тон та в енергетичному виразі - $(10.8- 11.0) \cdot 10^9$ ГДж. Доведені світові запаси природного газу становлять 192-195 трлн. м^3 , що в енергетичному виразі складає $(6.44-6.50) \cdot 10^{12}$ ГДж. Світові запаси вугілля складають 850- 900 млрд. тон, а в енергетичному еквіваленті $24.0 \cdot 10^{12}$ ГДж.

Розвідані поклади урану оцінюються у $\sim 17.0- 17.5$ млн. тон. Оцінка кількості енергії, яку можливо отримати тільки від використання від сировинного ізотопу U^{235} , який використовується у сучасних ядерних реакторах, кількість енергії становить

$8.62 \cdot 10^{12}$ ГДж. При врахуванні ізоотопу U^{238} для застосування ядерних реакторів на швидких нейтронах, то можлива отримана енергії збільшується на два порядки.

Експериментальні дослідження по застосуванню високотемпературних реакторів для технологічних цілей почались проводитись з 60-х років минулого століття.

У Німеччині, яка має великі запаси вугілля, досліджено виробництво синтез-газу та метанолу (CH_3OH) на основі пароводяної газифікації кам'яного або бурого вугілля з використанням ВТГР [15-16]. Процес виробництва метанолу складається з двох стадій:

- пароводяної газифікація вугілля з утворенням синтез-газу;
- реакція оксиду вуглецю та діоксиду вуглецю з воднем з утворенням метанолу.

При виробництві метанолу [17] була розроблена модульна установка з використанням високотемпературного технологічного реактора HTR-Modul [15] тепловою потужністю 170 МВт. Пароводяна або паровуглекіслотна газифікація вугілля проходить при температурі 920-950 $^{\circ}C$ і тиску 7- 8 МПа з утворенням синтез-газу, з якого синтезується метанол.

Була розроблена технологічна схема процесу пароводяної газифікації вугілля з ВТГР. У [13] наведені визначені коефіцієнти ефективності використання енергії установкою пароводяної газифікації вугілля в залежності від температури гелію на виході з реактора. Значення становлять 48-54% при температурі гелію на вході 900 $^{\circ}C$ та 60-73% при 1100 $^{\circ}C$. При використанні ядерного реактора еквівалентна вартість одиниці тепла вдвічі нижча, ніж вартість одиниці тепла при крекінгу нафти, і втричі нижча, ніж вартість одиниці тепла при автотермічній газифікації вугілля [13].

На основі отриманих даних по застосуванню тепла ВТГР у процесах газифікації бурого вугілля в Німеччині розроблений проект промислової установки з газифікацією вугілля 39-70 тон/год в залежності від температури гелію на виході з реактора.

У Японії розроблено дослідницький високотемпературний модульний реактор GTNTR300 потужністю 300 МВт(т). Температура гелію на вході в активну

зону становить $587 - 633\text{ }^{\circ}\text{C}$, на виході $850 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9]. Установка включає, виробництво водню за допомогою термохімічних циклів, опріснення морської води, виробництва сталі а також виробництво електроенергії. Потужність таких реакторів може бути збільшена до 600 МВт(т). Виробництво водню на одному реакторі досягає 120 тон на добу, чого достатньо, наприклад, для заправки близько 1 млн автомобілів, виробництва близько 280-300 МВт електроенергії, опріснення близько $(55-560) \cdot 10^3\text{ м}^3$ морської води на добу для виробництва питної води. При застосуванні реактора для вироблення відновлювального газу для ЯМК можлива потужність вироблення сталі становить 0,65-0.68 млн. тон на рік. Комерційну експлуатацію планується розпочати у 2030-х роках [9].

США розробили програму «Атомна електростанція наступного покоління» (NGNP). Метою проекту NGNP є демонстрація першої в світі ядерно-енергетичного комплексу, здатного виробляти електроенергію і технологічне тепло для виробництва синтез-газу, метанолу, водню, та застосуванні інших технологій. Атомна електростанція базується на прототипі ВТГР потужністю 400-600 МВт(т), що виробляє електроенергію та технологічне тепло при температурі $950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Частина загальної теплової потужності буде використовуватися для виробництва водню за допомогою термохімічних циклів і високотемпературного електролізу [15].

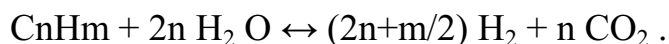
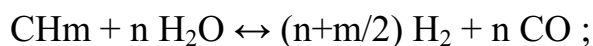
Корпорація General Atomics (США) провела дослідження з використання модульних високотемпературних газоохолоджуваних реакторів (МНТГР) для виробництва метанолу з вугілля без утворення діоксиду вуглецю. Досліджувались два альтернативні процеси реформінгу: пароводяна газифікація вугілля і гідрогазифікація [18].

У КНР застосування ВТГР планується у нафтогазовій промисловості для підвищення ефективності видобутку нафти. Проведено дослідження щодо покращення вилучення сирої нафти з постачанням пари та електроенергії від ВТГР у хімічній промисловості для вироблення моторних палив та використання високотемпературних реакторів для нафтопромислових технологій [19].

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що завдяки високому потенціалу теплової енергії ВТГР можуть бути ефективно використані не тільки для виробництва електроенергії, але й для широкого спектру неелектричних технологій.

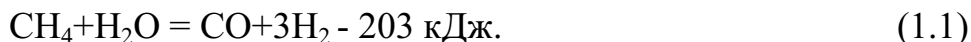
1.3 Використання ВТГР у процесах конверсії природного газу

Процес парової конверсії (реформінгу) — це розкладання легких вуглеводнів (метану, природного газу, нафти) при їх реакції з перегрітою водяною парою у присутності каталізатора, в результаті чого утворюється газова суміш, багата воднем та оксидом вуглецю. Реакції конверсії є ендотермічними та протікають при температурах понад 500 °С:



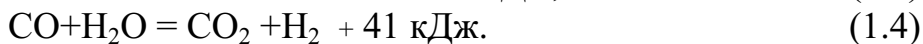
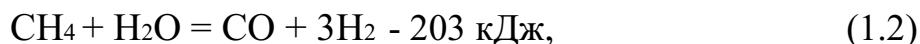
Парометановий реформінг зазвичай відбувається при температурі 800 °С – 900 °С і при тиску від 2,5 до 5.0 МПа в присутності нікелевого каталізатора [20].

Хімічна реакція процесу парової конверсії метану:



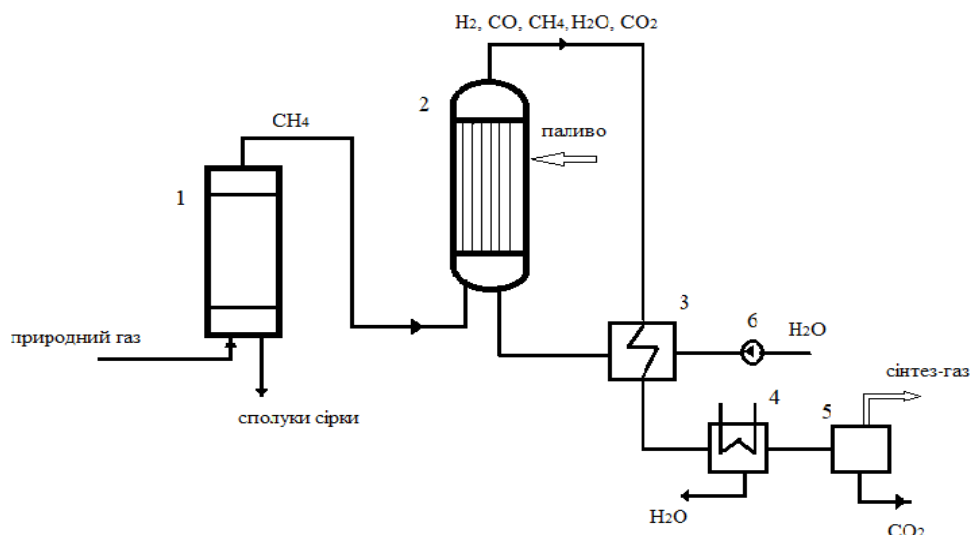
Реакцію (1.1) можна проводити також без каталізатора при високій температурі – 1400-1800 °С (високотемпературна конверсія).

Для конверсії метану застосовують також процес паровуглекислотної конверсії :



Паровуглекислотна конверсія природного газу також застосовується для вироблення синтез газу та метанолу.

Принципова схема парової та паровуглекислотної конверсії метану наведена на рисунках 1.2 та 1.3.



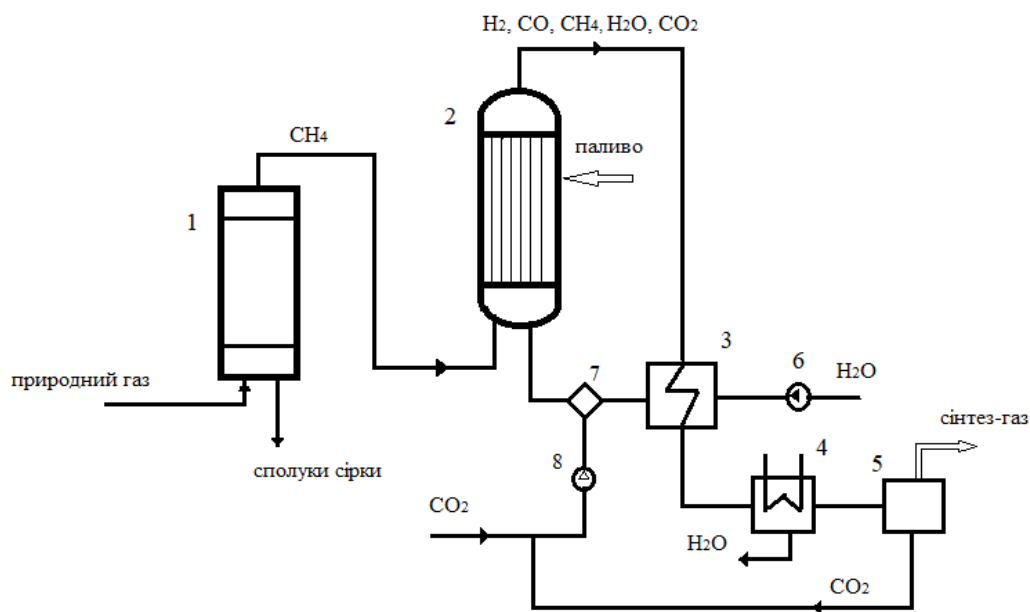
1 – система очищення природного газу від сірних сполук; 2 – конвертор метану; 3 – регенеративний генератор водяної пари продуктами конверсії метану; 4 – охолоджувач-конденсатор водяної пари з конвертованого газу; 5- очищення продуктів конверсії від CO_2 ; 6 – насос.

Рисунок 1.2 - Принципові схема парової конверсії метану

Основною технологією виробництва синтез-газу є парова конверсія метану. Синтез-газ використовується як важливий компонент у виробництві палив для двигунів і для забезпечення процесів органічного синтезу для отримання метанолу, формальдегіду, бутілових спиртів, багатьох інших продуктів хімічної промисловості [21-22]. Крім того, синтез-газ можна використовувати в чорній металургії у процесах відновлення заліза [23-24].

При очевидних перевагах отримання синтез-газу у процесі парової конверсії метану, ця технологія має і ряд недоліків. Це, по-перше, необхідність мати невеликі об'ємні швидкості (середня об'ємна швидкість по метану складає 1200 год^{-1}), по-друге, високе співвідношення $H_2:CO$, так як для багатьох сучасних хімічних технологій потрібен синтез-газ з низьким співвідношенням – від 2:1 до 1:1 [25].

Процес вуглекислотної або паровуглекислотної конверсії метану дозволяє отримувати синтез-газ з низьким співвідношенням $H_2:CO$.



1 – система очищення природного газу від сірних сполук; 2 – конвертор метану; 3 – регенеративний генератор водяної пари продуктами конверсії метану; 4 – охолоджувач-конденсатор водяної пари з конвертованого газу; 5- очищення продуктів конверсії від CO_2 ; 6 – насос; 7 – змішувач водяної пари та CO_2 , 8-компресор.

Рисунок 1.3 - Принципові схема паровуглекислотної конверсії метану

Вуглекислотна та паровуглекислотна конверсія метану також дає можливість споживати вуглекислий газ, запаси якого величезні, а масштаби промислового використання невеликі. Крім того, вуглекислотна та паровуглекислотна конверсія метану мають позитивний екологічний ефект, оскільки, як відомо, вуглекислий газ є парниковим газом.

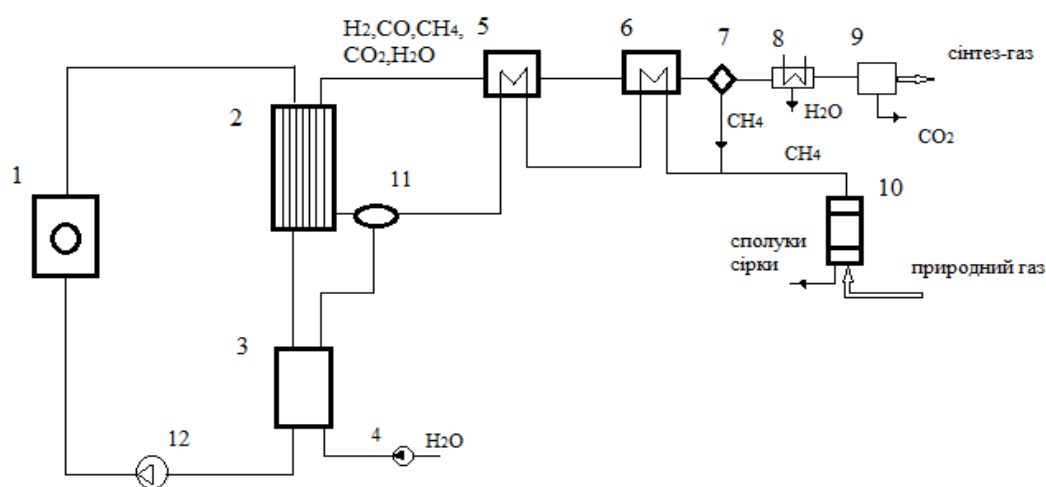
Основним недоліком вуглекислотної конверсії метану є утворення коксу в реакції Будуара, що призводить до швидкої дезактивації звичайних каталізаторів реформінгу. Коксування також є проблемою парового реформінгу, але вона менш серйозна, оскільки вуглець, що утворюється, може випаровуватися. Тільки при підвищенні температури вище $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ при вуглекислотній конверсії нагар вуглецю зводиться до мінімуму. Каталізатори на основі благородних металів виявилися менш чутливими до коксування, ніж каталізатори вуглекислотної конверсії на основі нікелю, але їх недоліком є висока вартість і обмежена доступність. Утворення синтез-газу шляхом вуглекислотної конверсії метану може забезпечити значне використання CO_2 з промислових і природних джерел. Нові методи

комбінованого та сухого реформінгу значно покращують енергетичну економічність виробництва синтез-газу [25,26].

У порівнянні з традиційною паровою конверсією застосування парової конверсії за допомогою теплоти ядерного реактора вимагає певних змін, оскільки умови експлуатації ядерного реактора відрізняються від умов експлуатації конвертора, що працює на викопному паливі. Крім того, вимоги безпеки для ядерної конверсії набагато суворіші, ніж для установки, що працює на викопному паливі.

Принципові технологічні схеми АЕТУ з ВТГР, призначені для парової та паровуглекислотної конверсії природного газу наведені на рисунках 1.4 та 1.5.

Нагрітий в реакторі теплоносій-гелій направляється до конвертора метану, де забезпечує ендотермічну реакцію конверсії, після чого направляється у технологічний парогенератор, де генерується водяна пара для конверсії метану.



1 - ВТГР, 2 – конвертор метану; 3 – технологічний парогенератор; 4 – насос подачі води; 5,6 – регенеративні підігрівачі CH_4 ; 7 – віддільник CH_4 з синтез-газу; 8 - охолоджувач-конденсатор водяної пари; 9 - очищення продуктів конверсії від CO_2 ; 10 - система очищення природного газу від сірних сполук; 11 – змішувач водяної пари та метану; 12 - гелієва газодувка.

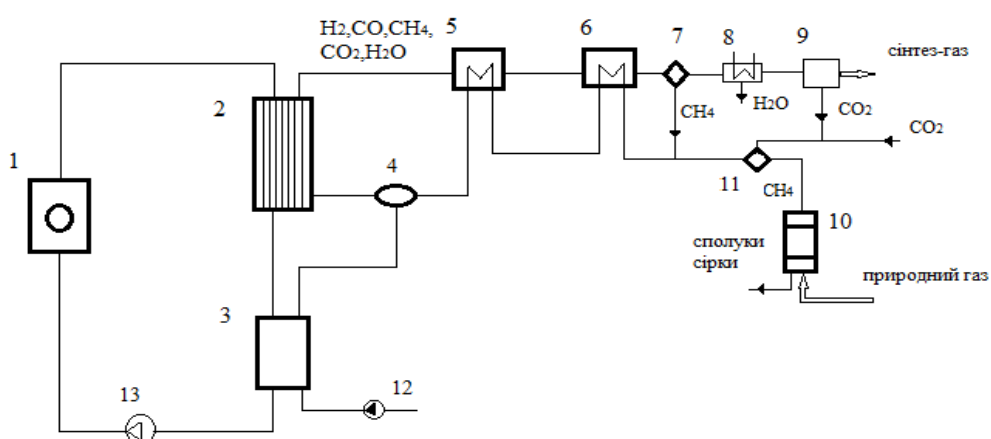
Рисунок 1.4 - Принципова схема АЕТУ з ВТГР для парової конверсії природного газу

В залежності від домішок у природному газі до установки включають систему очищення від сполук сірки. В схемі АЕТУ з паровуглекислотною конверсією природного газу додатково подається діоксид вуглецю.

Продукти конверсії регенеративно підігрівають метан або вуглекислотно-метанову суміш, після чого послідовно очищуються від залишків метану, водяної пари та діоксиду вуглецю.

На вході в конвертор температура гелію дорівнює $900-950^{\circ}\text{C}$, на виході $700-750^{\circ}\text{C}$. На виході з технологічного парогенератора температура гелію дорівнює $300-350^{\circ}\text{C}$. Температура конверсії - $800-850^{\circ}\text{C}$, тиск процесу $2.5-5.0$ МПа. Для парової конверсії відношення $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ дорівнює $2.5-3.0$, для паровуглекислотної конверсії відношення $\text{CH}_4:\text{H}_2\text{O}:\text{CO}_2$ дорівнює $1:(1-1.5):(1-2)$ [20-22], [26].

Експериментальні дослідження можливості застосування гелієвого теплоносія для парової конверсії природного газу дозволили змодельювати технологічний процес конверсії з використанням ядерної енергії [27-28]. Для каталітичної конверсії були визначені основні параметри процесу у конверторі, який забезпечувався теплом, необхідним для проведення конверсії метану від



1 - ВТГР, 2 - конвертор метану; 3 - технологічний парогенератор; 4 - змішувач водяної пари та вуглекислотно-метанової суміші; 5, 6 - регенеративні підігрівачі вуглекислотно-метанової суміші; 7 - відділювач CH_4 з синтез-газу; 8 - охолоджувач-конденсатор водяної пари; 9 - очищення продуктів конверсії від CO_2 ; 10 - система очищення природного газу від сірних сполук; 11 - змішувач CO_2 та метану; 12 - насос подачі води; 13 - гелієва газодувка.

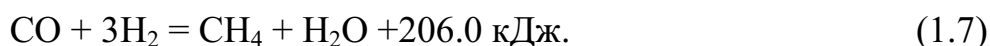
Рисунок 1.5 - Принципова схема АЕТУ з ВТГР для паровуглекислотної конверсії природного газу

гелієвого теплоносія. Об'ємна швидкість реакції склала 103 м^3 метану на м^3 об'єму каталізатора за годину при температурі процесу 800°C , тиску 4.0 МПа та співвідношенню $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4=4$. Щільність теплового потоку склала близько 60 кВт/м^2 поверхні конвертора [26-28].

У перших проектах установок з ВТГР для енерготехнології завжди розглядався проміжний контур для відокремлення ядерної та технологічної частин установки. Але для ядерних енергетичних реакторів четвертого покоління з підвищеною системою безпеки з'являється можливість відмови від проміжного контуру, що значною мірою спрощує таку установку та одночасно підвищує ефективність використання енергії.

1.4 Використання ВТГР у процесах газифікації вугілля

Газифікація вугілля є найстарішою технологією виробництва синтез-газу, але вона застосовується і сьогодні. Газоподібне або рідке паливо, отримане з вугілля, використовується як сировина в багатьох галузях промисловості. У традиційному процесі парової газифікації частина вугілля частково окислюється під час нагрівання до $500\text{-}600^\circ\text{C}$ на першій стадії, після чого залишкові тверді речовини вугілля перетворюються на синтез-газ з діоксидом вуглецю і парою в результаті пароводяної гетерогенної реакції на другій стадії:



Існують декілька способів газифікації вугілля.

Газифікація в стаціонарному шарі – це самий давній спосіб газифікації. Її проводять в циліндричній шахті (реакторі). В цьому випадку паливо подається зверху, газифікуючий агент – знизу. Газифікація відбувається за температури понад 1000°C .

При газифікації з використанням повітря одержують газ з низькою теплотою згорання $Q_p^p = 5,2$ кДж/ моль, склад якого становить (% об.): CO ~ 27-28; H_2 ~ 12 -12,5; CO_2 ~3,5- 3,6; CH_4 ~ 0,2; N_2 ~ 56-57.

При газифікації водяною парою одержують синтез-газ, що містить переважно понад 40 % об. CO та 50 % об. H_2 .

При газифікації вугілля під тиском кисню і водяної пари отримують більш високий вихід метану і вищу теплоту згорання синтез-газу. Для усіх видів вугілля підвищення тиску сприяє утворенню метану, діоксиду вуглецю та зменшенню водню.

Газифікація у псевдозрідженому шарі – це газифікація дрібнозернистого вугілля. Подрібнене вугілля подають шнеком в газогенератор. Зола, температура плавлення якої вища за температуру газифікації виводять знизу. Одержаний синтез-газ повторно газифікують у верхній частині газогенератора, а потім обробляють в конденсаторі- холодильнику. Ступінь газифікації сягає 90 %. Склад газу (% об.): CO – 30-50; H_2 – 35-46; CO_2 – 13-25; CH_4 – 1-2; N_2 – 0,5-1,5. Теплота згорання синтез-газу сягає $Q_p^p = 12300$ кДж/м³. Переваги цього способу визначаються менш жорсткими умовами щодо вимог до зернистості вугілля.

Газифікація пилоподібного вугілля відбувається прямоютоком при атмосферному тиску. Пилоподібне вугілля потоком азоту подають у витратний бункер газогенератора. Поступаючи на шнек воно перемішується з киснем і водяною парою і надходить у реакційну камеру. Температура газифікації становить 1500-1600 °С. При цьому досягається висока ступінь перетворення вуглецю. Цей спосіб використовується для одержання синтез-газу, що йде на виробництво аміаку. Склад такого газу (% об.): CO – 57; H_2 – 31; CO_2 – 10,5; CH_4 – 0,1; N_2 – 1,2; H_2S – 0,3. Теплота згорання газу становить $Q_p^p = 11,2$ кДж/кг.

Процеси газифікації класифікуються за типом газифікатора. Основними технологіями, які використовуються сьогодні, є технології Лургі , Вінклера та Копперса-Тотцека, схеми яких наведені на рисунку 1.6. Всі вони були розроблені в Німеччині і використовуються у промислових масштабах [29].

Розроблені модифіковані варіанти процесів, такі як Техасо, Shell-Koppers і багато інших, спрямованих на коригування якості сировини, оптимізацію газового складу продукту і підвищення ефективності [26]. Варіанти відрізняються діапазоном температур і тиску, розміром зерен вугілля і часом перебування. Часткове окислення пиловугільного палива киснем/повітрям (чистий кисень застосовують для виробництва водню) і парою в киплячому шарі відбувається при атмосферному тиску, де 30-40 % вугілля перетворюється в CO_2 для забезпечення енергії розщеплення води.

Швидкість реакції газифікації сильно збільшується з температурою; зазвичай вибирають температуру до 2000°C і тиск до 3 МПа. Промислові установки працюють в автотермічному режимі. Подальша переробка дозволяє оптимізувати генерацію водню, метану або синтез-газу. Конверсія вугілля оцінюється приблизно в 95%, а загальна ефективність оцінюється в $\sim 70\%$.

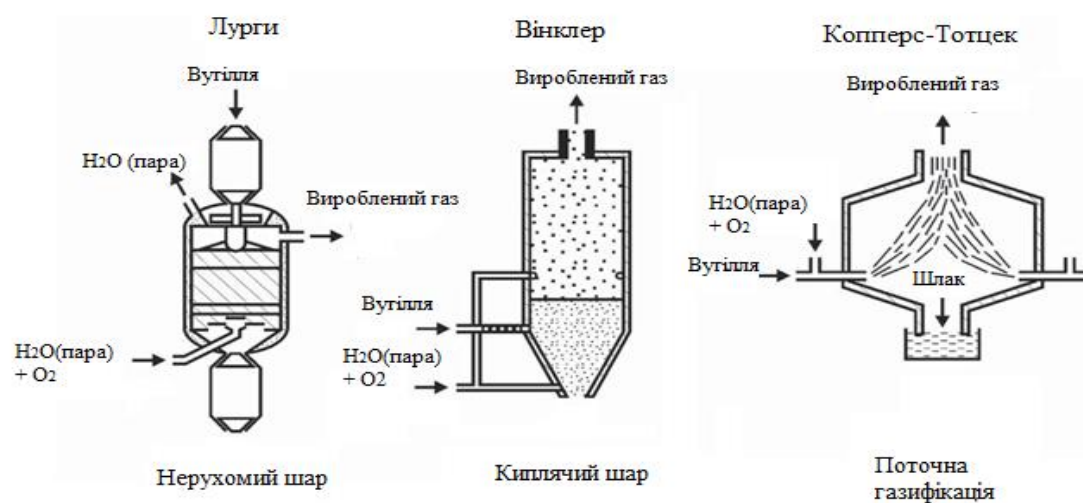


Рисунок 1.6 - Основні схеми газифікації вугілля

Основними недоліками газифікації вугілля є обробка потоків твердих матеріалів і велика кількість CO_2 , SO_2 і золи, що вимагає складної системи очищення. Однак нові методи газифікації вугілля дозволяють знизити рівень домішок у синтез-газі. У таблиці 1.2 наведені деякі основні параметри різних типів паровугільних процесів газифікації [30-31].

У німецькому варіанті виробництва метанолу джерелом енергії була модульна установка з високотемпературним реактором HTR-Modul потужністю 170 МВт (т) [32]. Процес газифікації вугілля здійснюється при температурі 900-930 °С і тиском 8.0 МПа для отримання синтез-газу з послідовним синтезом CH_3OH . Після відділення від залишкових газів і після синтезу метанолу метан переробляється у ядерному паро-метановому конверторі для отримання водню для процесу гідрогазифікації. Парогенератор подає пару в процес реформінгу, а також забезпечує турбіну для вироблення електроенергії. Чотирьохмодульна установка потужністю 680 МВт розрахована на виробництво 2530 т/добу метанолу при пропускній здатності вугілля 2690 т/добу. Крім того, виробляється 1050 т/добу деревного вугілля.

Таблиця 1.2 - Основні параметри процесів паровугільної газифікації

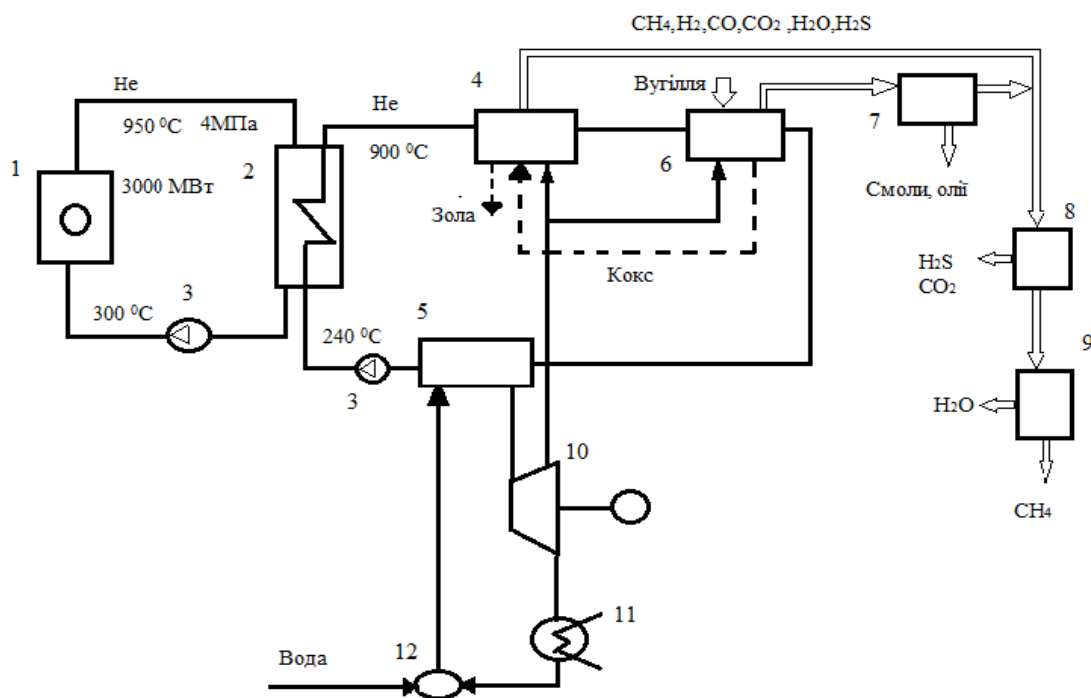
Параметр	Лургі	Вінклер	Копперс-Тотцек
Принцип роботи газифікатора	Нерухомий шар	Киплячий шар	Поточна газифікація
Розмір фракції вугілля, мм	10-30	0.5-8	< 0.09
Відношення пара/кисень	9-5	2.5-1	0.5-0.02
Рух агентів	протитечія	вихровий прямоточний потік	прямоточний потік
Час перебування вугілля у реакторі, хв.	60-90	15-60	< 0.02
Вимоги до вугілля	Не повинен злежуватись або розкладатися	Високореактивний, не повинен розпадатися	Температура плавлення золи <1450°C
Максимум виходу газу при температурі, °C	370-600	800-950	1400-1600
Тиск, МПа	2-3	0.1	0.1
Склад газу(об.%) $\text{CO} + \text{H}_2$ CH_4	62 12	84 2	89 0.1
Побічні продукти	смоли, нафта, феноли, бензин, стічні води	невелика кількість пилу, смоли	не має

Газифікація вугілля за допомогою ядерного тепла вивчається в Німеччині в рамках проекту PNP (Prototype nuclear process heat projec) протягом більше двох десятиліть. Проект був результатом спільних зусиль між галузями промисловості HTGR (Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Мангейм та Gesellschaft für Hochtemperatur-reaktortechnik mbH, Бенсберг), вугільною промисловістю (Bergbauforschung GmbH, Ессен та Rheinische Braunkohlenwerke AG, Кельн) та Центром ядерних досліджень Юліха (сьогодні: Forschungszentrum Jülich, FZJ). Основною метою була розробка, проектування та будівництво енергетичної установки на основі газифікації вугілля за допомогою ядерної енергії, включаючи розробку та випробування прототипу ядерної теплогенеруючої системи, яка працюватиме при температурі гелію на виході з реактора на рівні 950°C , матиме проміжний контур, забезпечує ядерною теплотою процеси пароводяної газифікації вугілля та вироблення електроенергії [26], [32].

У [35] наведена технологічна схема атомної енерготехнологічної установки з пароводяною газифікацією вугілля (рисунк 1.7). Для процесу газифікації передбачалося, що тепло від теплоносія реактора буде передаватися в додатковий проміжний контур через проміжний теплообмінник 2 «гелій-гелій».

Це зроблено для того, щоб уникнути знаходження вугілля і золи в реакторному контурі, а також щоб уникнути складних ремонтних і профілактичних робіт. Гелій реакторного контуру з температурою на виході з активної зони 950°C , протікає по зовнішній стороні трубок теплообмінника промконтуру, передає своє тепло гелію промконтуру, що надходить в паровий газифікатор при температурі 900°C .

Тиск гелію у промконтурі трохи вищий, ніж на реакторному контурі з метою запобігання потраплянню радіоактивності у промконтур у разі витоку. Водяна пара з парогенератора 5 направляється у газифікатор 4 та дегазатор 6 для газифікації та на парову турбіну.



1 –ВТГР, 2 -теплообмінник промконтуру, 3 – газодувка; 4 – газифікатор; 5 – парогенератор; 6 – дегазатор; 7 – охолоджувач; 8 – очисник газів; 9 – метанатор; 10 – турбогенератор; 11 – конденсатор турбіни; 12 – змішувач.

Рисунок 1.7 - Схема АЕТУ з пароводяною газифікацією вугілля

Вугілля подається у дегазатор 6, де проходить його перетворення у кокс, а потім кокс подається у газифікатор. Протікання ендотермічних процесів у дегазаторі та газифікаторі забезпечуються теплоносієм промконтуру. Були розроблені газифікатори (газогенератори) вугілля з промисловою продуктивністю по вугіллю ~ 50000 кг/год [36]. На відміну від традиційних установок, що працюють на викопному паливі, обладнання АЕТУ повинно відповідати більш суворим вимогам безпеки з точки зору надійності конструкції та забезпечення якості при експлуатації установки. Теплообмінник промконтуру виконує важливу функцію утворення радіоактивного бар'єру між первинним гелієм і технологічним газом.

В Німеччині були розроблені проекти енерготехнологічних установок з високотемпературними реакторами для демонстрації здатності використання високотемпературних реакторів для газифікації вугілля. Концепція атомної

технологічної установки з високотемпературним реактором з кульковою засипкою активної зони спочатку базувався на теплових розмірах 500 МВт (PR-500) і 3000 МВт (PNP-3000). Реактор з кульковою засипкою PR-500, близький до THTR-300, був розрахований на виробництво 523 т/год пари при температурі 265 °С і тиску 2 МПа, плюс електрична потужність 55 МВт. Теплоносій гелій нагрівається від 265 °С до 865 °С. Реактор був поміщений в попередньо напружений бетонний корпус під тиском (також подібну до THTR-300), оточений трьома блоками, кожен з яких містив теплообмінник і газодувку у зовнішньому розташуванні [26].

Демонстраційний високотемпературний реактор PR-500 тепловою потужністю 500 МВт був спроектований для газифікації як бурого, так і кам'яного вугілля із застосуванням теплообмінника промконтуру для пароводяної газифікації вугілля або парометанового конвертора для ядерної гідрогазифікації вугілля [26].

Експлуатація цієї ядерної установки була розрахована на отримання 41000 м³ конвертованого газу при пароводяної газифікації 50 т/год кам'яного вугілля та 26500 м³ конвертованого газу і 18,4 т/год деревного вугілля (charcoal) при гідрогазифікації 166 т/год бурого вугілля.

У підсумку можна констатувати, що доведена можливість ефективного використання високотемпературних реакторів для забезпечення процесу газифікації вугілля.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз сучасного стану високотемпературних газоохолоджувальних реакторів у світі, зокрема у США, Великобританії, Німеччині, Японії, КНР.

2. Визначено тренд світового попиту на теплову енергію та дослідження використання теплоти високотемпературних газоохолоджуваних ядерних реакторів у промислових технологічних процесах.

3. Розглянуто технологічні процеси та схеми установок для конверсії природного газу та газифікації вугілля.

4. Доведена можливість ефективного використання високотемпературних реакторів для забезпечення процесу газифікації вугілля.

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ТА ПАРАМЕТРИ УСТАНОВОК З ВТГР ДЛЯ КОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА

2.1 Принципи та задачі розробки технологічних схем АЕТУ

При розробці енерготехнологічних установок з ВТГР слід розв'язати низку основних науково-технічних проблем, а саме:

- удосконалення конструкцій ВТГР;
- вибір оптимального паливного циклу;
- технології фабрикації ядерного палива;
- конструкції ТВЗ та тепловиділяючих елементів;
- моделювання газодинаміки та теплообміну активної зони;
- створення технологічного обладнання;
- обґрунтування можливості використання ВТГР у неелектричних технологіях;
- розробка теплових (технологічних) схем АЕТУ;
- підвищення теплотехнічної ефективності установок.

Розробка, дослідження та вдосконалення теплових (технологічних) схем, а також пов'язані з ними задачі підвищення теплотехнічної та технологічної ефективності – це одна з нагальних проблем, без розв'язання якої неможливо створити ефективні та конкурентоспроможні енерготехнологічні установки з ВТГР.

Об'єктом аналізу при дослідженні АЕТУ є взаємопов'язані технологічні та енергетичні процеси.

Використання ВТГР у різноманітних секторах промисловості в основному зумовлене наступними аспектами:

- параметри технологічного процесу. Термічні параметри - температура та тиск, співвідношення вхідних речовин та склад технологічного продукту, необхідна рециркуляція технологічних агентів тощо дає первинну інформацію про можливість застосування високотемпературного реактора. Температура

теплоносія сучасних ВТГР задовольняє технологічні процеси, для яких потрібна температура 750–850 °С. Для технологічних процесів, в яких рівень температур складає 850-950 °С, треба проводити експериментально-дослідницькі роботи, спрямовані на створення технологічних схем установок, розробку раціональних технологій та визначення найвигодніших робочих параметрів [14], [37] [38] ;

На рисунку 2.1 представлено запропоновану узагальнену схему атомної енерготехнологічної установки як об'єкта дослідження. На схемі визначено основні потоки вхідної сировини, технологічних агентів, робочих тіл та теплоносіїв. Високотемпературний реактор забезпечує тепловою енергією технологічні та енергетичні процеси: переробку технологічної сировини (конверсія природного газу, газифікація твердого органічного палива); виробництво водню методом електролізу або за допомогою термохімічних циклів; відновлювальні процеси (вони можуть бути різноманітними); виробництво рідких вуглеводнів (процеси Фішера-Тропша); виробництво водяної пари для енергетичних та технологічних цілей. Вироблений синтез-газ є вторинною сировиною для різних технологічних процесів: виробництва газоподібних (водень) та рідких (метанол) енергоносіїв, виробництва відновлювального газу тощо. Більшість технологічних виробництв потребує теплоту високого потенціалу – 700 -1000 °С (таблиця 2.1). ВТГР забезпечує також тепловою енергією і енергетичні процеси: вироблення пари для виробництва електроенергії та для забезпечення технологічних процесів; виробництво теплоти різного потенціалу для сторонніх промислових та побутових теплоспоживачів. Рівень температури цієї частини установки складає 300 -700 °С.

Різний потенціал, а отже, і цінність теплоти атомного реактора, що використовується у різних частинах установки; перехід теплової енергії до хімічно пов'язаної енергії технологічних агентів; розподіл теплової потужності реактора між різними частинами установки; наявність перетворення як енергії, так і матерії; зв'язок технологічних та енергетичних процесів і параметрів унеможливорює використання традиційних методів дослідження, що застосовуються в енергетиці та технологічних виробництвах.

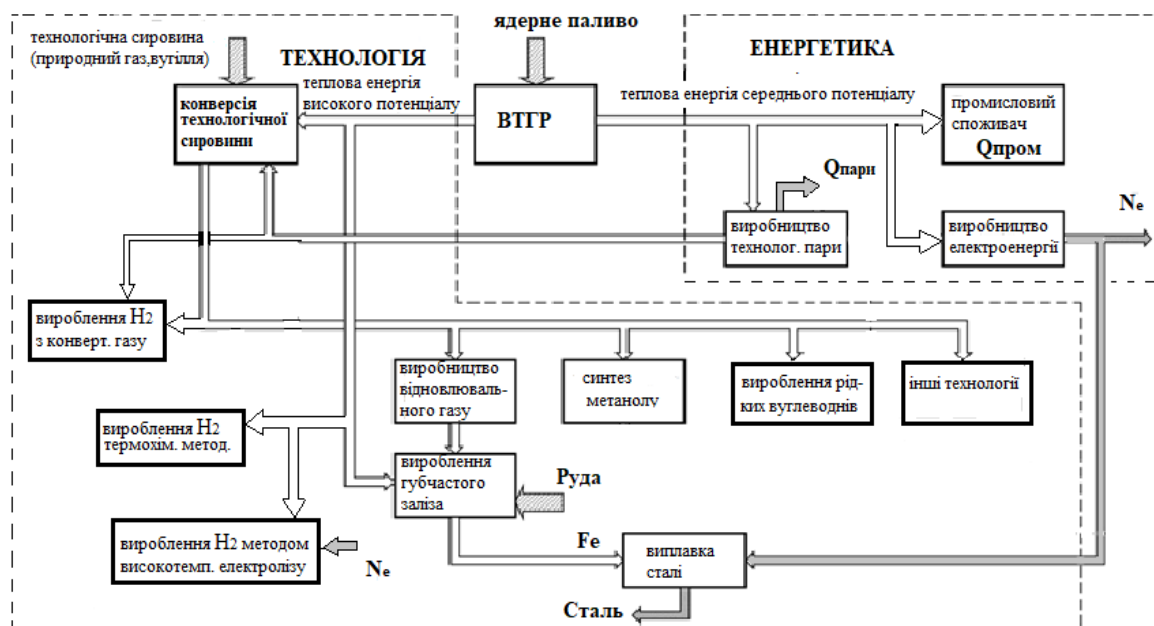


Рисунок 2.1 - Узагальнена схема енерготехнологічної установки

Розробка та дослідження технологічних (теплових) схем енерготехнологічних установок з високотемпературним ядерним реактором, що випускають як енергетичну, так і неенергетичну (технологічну) продукцію, має багато аспектів. В теплотехнічній частині дослідження АЕТУ основними можна вважати наступні:

- визначення необхідних параметрів ВТГР для забезпечення відповідних технологічних процесів;
- поєднання технологічних та енергетичних параметрів установок;
- створення структури та визначення оптимального співвідношення виробленої установкою продукції;
- раціональна організація технологічних процесів;
- оптимізація параметрів технологічних схем та процесів.

На початковому етапі розробки енерготехнологічних установок вважається доцільним використовувати термодинамічні методи аналізу. Вони дають змогу визначити найвигідніші схеми, цикли та параметри таких установок, а також визначити ступінь енергетичної та технологічної досконалості. Крім того, це дає

можливість порівняти їх з наявними технологіями виготовлення аналогічних продуктів.

2.2 Технологічні схеми енерготехнологічних установок з ВТГР

Як зазначено в попередньому підрозділі роботи технологічні схем енерготехнологічних установок з ВТГР можна розділити на два основних типи:

- установки, в яких виробляється тільки технологічний продукт: синтез-газ, водень, метанол, поновлювальний газ для чорної металургії, забезпечення процесів переробки нафти тощо;
- установки, в яких крім технологічного продукту виробляється електроенергія і, можливо, теплова енергія для забезпечення споживачів.

Енерготехнологічні установки першого типу отримали назву одноцільових атомних енерготехнологічних установок.

Енерготехнологічні установки другого типу отримали назву багатоцільових атомних енерготехнологічних установок.

Одноцільові АЕТУ, які виробляють тільки технологічну продукцію використовують тоді, коли для забезпечення технологічного процесу потрібна теплова енергія ВТГР як високого, так і середнього потенціалів. Навпаки, багатоцільові АЕТУ доцільно використовувати, якщо технологічний процес потребує температурний рівень 750- 950 °С.

Багатоцільові АЕТУ мають загальну особливість: високопотенційна теплота ВТГР використовується для технологічних процесів: конверсії природного газу, реформінгу вугілля, отримання відновлювального газу, високотемпературного електролізу тощо, а за рахунок теплоти середнього потенціалу забезпечується вироблення електроенергії та теплопостачання споживачів.

Загальною частиною технологічних схем атомних енерготехнологічних установок є реакторний контур, який включає високотемпературний газоохолоджуваний реактор з гелієвим теплоносієм, газодувку, трубопроводи,

комплекс допоміжних систем та систем безпеки. Для виключення можливості проникнення радіоактивності в енергетичну та технологічну частини установки у цих схемах зазвичай використовують проміжний контур, що включає теплообмінник типу «гелій-гелій», газодувку та трубопроводи. Тиск теплоносія, що циркулює в проміжному контурі вище, ніж у контурі реактора, що запобігає проникненню теплоносія реактора в проміжний контур при нещільностях і розривах окремих трубок поверхні теплообмінника промконттуру. Температура гелію на виході з реактора $900 - 1000^{\circ}\text{C}$, тиск гелію на вході в реактор $5,0-5,5$ МПа. Температура гелію перед газодувкою 350°C . Початкова температура гелію проміжного контуру – $850 - 950^{\circ}\text{C}$, тиск гелію промконттуру після газодувки – $5,5$ МПа, температура гелію перед газодувкою промконттуру – 300°C . Технологічні процеси забезпечуються високопотенційною теплотою реактора з рівнем температур $700 - 950^{\circ}\text{C}$. Теплота середнього потенціалу $350-700^{\circ}\text{C}$ використовується для вироблення електроенергії, виробництва технологічної пари, побутового та промислового теплопостачання.

Для високотемпературних реакторів IV покоління, які мають новий рівень безпеки, стає можливим відмовитись від теплообмінника проміжного контуру, що дає змогу підвищити температурний потенціал у технологічній частині АЕТУ.

Вибір паросилової установки для енергетичної частини багатоцільових атомних енерготехнологічних установок ґрунтується на задоволенні специфічних вимог до параметрів пари за умовами роботи технологічної частини установки, а також потенціалом теплоти ВТГР, що йде на виробництво електроенергії. Температура гелію на вході в технологічний парогенератор знаходиться в області $(700-750)^{\circ}\text{C}$. Необхідну кількість пари на технологічні потреби можна отримувати з конденсаційної турбіни з регульованими відборами пари, теплофікаційних турбін або з турбіни з протитиском. Вибір типу турбіни залежить від кількості та параметрів пари, необхідної для технологічної частини установки.

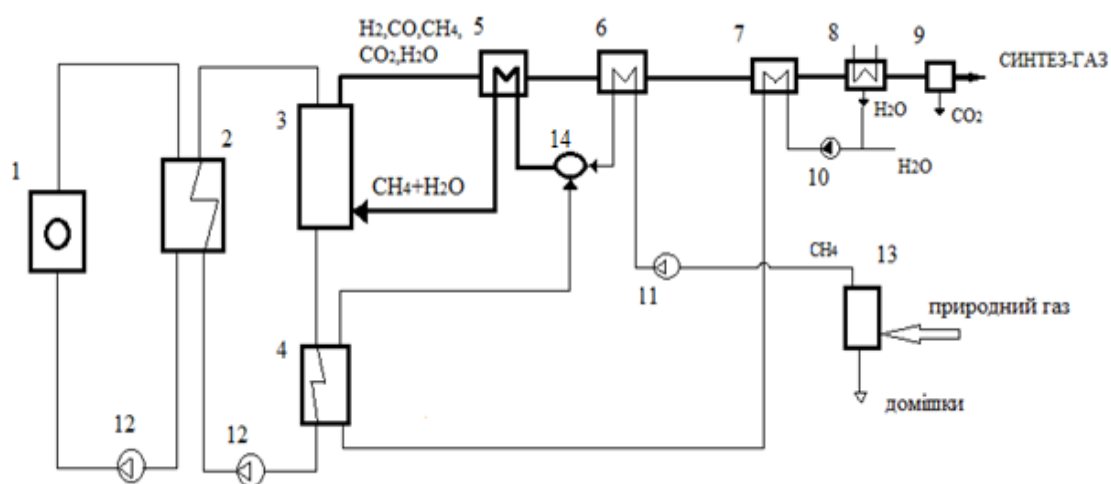
Технологічною сировиною для енерготехнологічних установок з ВТГР може бути газоподібне (природний газ) або тверде (вугілля) органічне паливо.

Залежно від цього розрізняють схеми таких установок на природному газі чи вугіллі.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є технологічні схеми установок, які виробляють тільки технологічний продукт та технологічний продукт і електроенергію та використовують у якості технологічної сировини природний газ або вугілля.

2.2.1 Технологічні схеми для конверсії природного газу

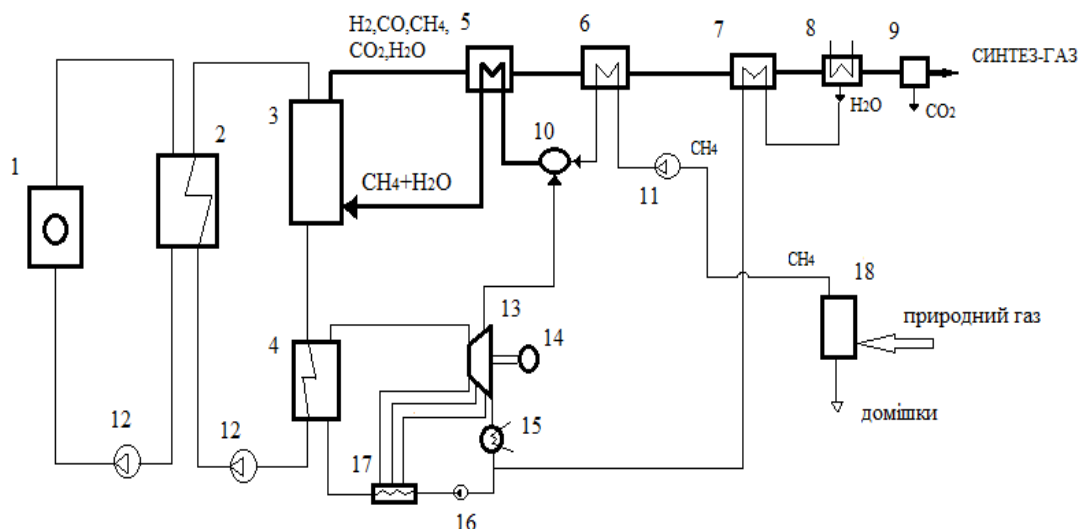
На рисунку 2.2 наведена технологічна схема одноцільової АЕТУ, призначеної для конверсії природного газу.



1-ЯР; 2- ТПК; 3 – конвертор CH_4 ; 4 – ТПГ; 5- регенератор; 6- підігрівач CH_4 ; 7- підігрівач технологічної води; 8- конденсатор водяної пари; 9- очищення конвертованого газу від CO_2 ; 10 –насос; 11 – компресор CH_4 ; 12 – газодувки; 13- очищення природного газу; 14 – змішувач пари та CH_4 .

Рисунок 2.2 - Технологічна схема одноцільової АЕТУ для конверсії природного газу

На рисунку 2.3 наведена технологічна схема двоцільової АЕТУ, призначеної для конверсії природного газу та вироблення електроенергії.



1-ЯР; 2- ТПК; 3 – конвертор CH_4 ; 4 – ПГ; 5- регенератор; 6- підігрівач CH_4 ; 7- підігрівач технологічної води; 8- конденсатор водяної пари; 9- очищення конвертованого газу від CO_2 ; 10 – змішувач водяної пари та CH_4 ; 11 –компресор; 12 – газодувки; 13 –ПТ; 14 – генератор; 15 – КТ; 16 – КН; 17 – РС ПТУ; 18- видалення домішок з природного газу.

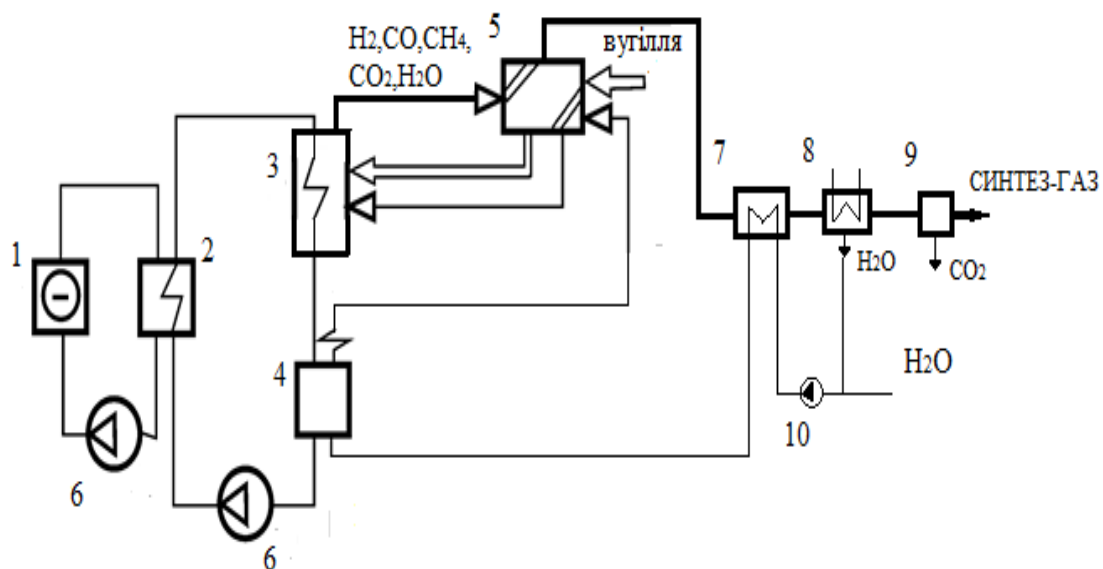
Рис.2.3 -Технологічна схема двоцільової АЕТУ для конверсії природного газу та вироблення електроенергії

Двоцільова енерготехнологічна установка включає енергетичну та технологічну частини. Технологічна частина на відміну від одноцільової установки для процесу конверсії природного газу отримується з відборів паротурбінної установки. Паротурбінна установка повинна мати відповідні параметри відборів – насамперед температуру, тиск та витрату, які б задовольняли потреби технологічної частини установки у технологічній парі.

Енергія теплоносія високотемпературного реактора, передана в технологічну та енергетичну частини двоцільової установки визначається температурою гелію на виході з конвертора метану.

2.2.2 Технологічні схеми для газифікації вугілля

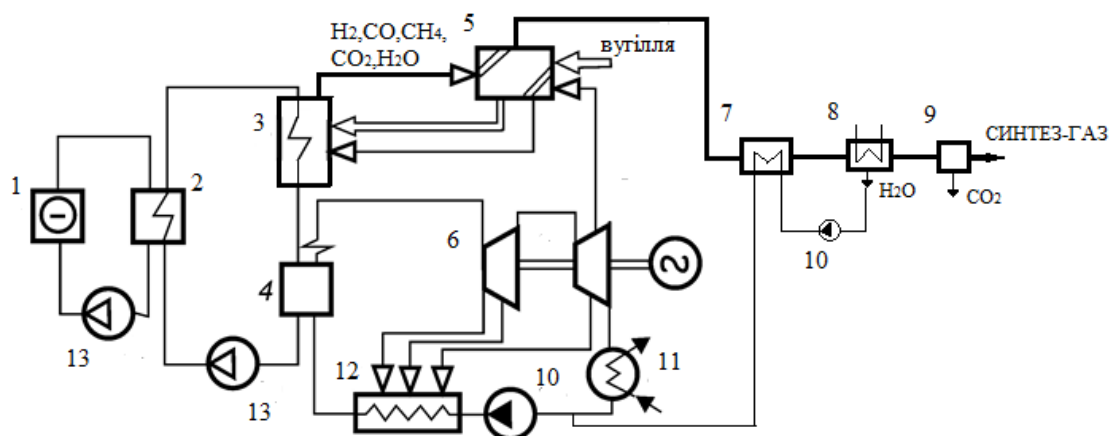
На рисунку 2.4 наведена схема одноцільової енерготехнологічної установки, призначеної для пароводяної газифікації вугілля.



1-ЯР; 2- ТПК; 3 – газифікатор; 4 – ПТП; 5-регенератор; 6– газодувки; 7- підігрівач технологічної води; 8- ТО видалення водяної пари; 9- очищення продуктів газифікації від CO_2 ; 10 – насос.

Рисунок 2.4 - Технологічна схема одноцільової енерготехнологічної установки для газифікації вугілля

На рисунку 2.5 наведена технологічна схема двоцільової енерготехнологічної установки для газифікації вугілля та вироблення електроенергії.



1-ЯР; 2- ТПК; 3 – газифікатор; 4 – ПГ; 5-регенератор; 6- ПТ з електрогенератором; 7- підігрівач конденсату; 8- ТО видалення водяної пари; 9- очищення продуктів газифікації від CO_2 ; 10 –насос; 11- КТ; 12- РС ПТУ; 13 – газодувки.

Рисунок 2.5 - Технологічна схема двоцільової АЕТУ для газифікації вугілля та вироблення електроенергії

Як і у двоцільовий енерготехнологічній установці для конверсії природного газу та вироблення електроенергії водяна пара для забезпечення технологічної частини установки подається з відборів парової турбіни з регульованими відборами або з вихлопу турбіни з протитиском.

Метою роботи є енергетичне дослідження наведених технологічних схем АЕТУ з застосуванням термодинамічних методів аналізу установок, виробляючих як енергетичну продукцію – електричну та теплову енергію, так і технологічну продукцію; визначення оптимальних способів організації та параметрів технологічних процесів, найвигідніше поєднання технологічної та енергетичної частин установок між собою та з параметрами високотемпературного ядерного реактора.

2.3 Визначення оптимальної організації технологічних процесів та циклів енерготехнологічних установок з ВТГР

Використання ядерного джерела енергії – високотемпературного газоохолоджуваного ядерного реактора для енергетичного забезпечення технологічних процесів конверсії органічних палив – природного газу, вугілля, нафти тощо потребує специфічної організації циклів та технологічних процесів таких установок, які у значній мірі визначаються параметрами ядерного реактора.

Хімічні та технологічні процеси, як правило, протікають ізобарно та ізотермічно. У літературі [39-40] описані методи розрахунку хімічних реакцій залежно від температури і тиску та співвідношення реагентів. Вибір температури, тиску і співвідношення реагентів визначається для забезпечення максимального виходу корисних продуктів реакції і оптимальної продуктивності технологічного устаткування. При цьому в деяких випадках можна визначити оптимальні умови проведення хіміко-технологічного процесу.

В енерготехнологічних установках з високотемпературними реакторами, як і в усіх інших ядерних енергетичних установках незалежно від типу ядерного

реактора, передача теплоти від теплоносія до робочого тіла або до ендотермічних хіміко-технологічних процесів проходить за рахунок зниження температури теплоносія.

У циклах АЕТУ температура теплоносія змінюється суттєво, і технологічні процеси виявляються можливими при температурах на 150 – 250 °С нижче початкової температури теплоносія.

Таки обставини значно знижують можливості використання високотемпературних реакторів у тих неелектричних технологіях, необхідний рівень температур яких складає 800-900 °С. Насамперед це стосується процесів конверсії органічних палив та застосування ВТГР у ядерно-металургійних комплексах.

Для вирішення цієї проблеми В.Дубковським запропоновано проводити підвід теплоти від теплоносія-гелію для забезпечення ендотермічних хімічних реакцій при змінній температурі процесу [14],[41].

На рисунку 2.6 в “Т-Q”- діаграмі показаний рівноважний процес вуглекислотної газифікації вуглецю «1-2» по реакції



яка протікає при змінній температурі [14].

Процес має кілька характерних ділянок. Ділянка “a-b” характеризує підігрів вуглецю та газоподібних речовин до температури газифікації, ділянка “b-c” виражає тепловий ефект реакції газифікації. Спочатку здійснюється підігрів компонентів, потім при температурах 500-600 °С починається утворення СО та Н₂. При температурах 700-850 °С газифікація здійснюється найінтенсивніше.

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 таким чином, щоб забезпечити мінімальні температурні напори в процесі теплообміну. Підігрів вихідних речовин можливий у регенераторі за рахунок тепла продуктів реакції (процес «2-5»).

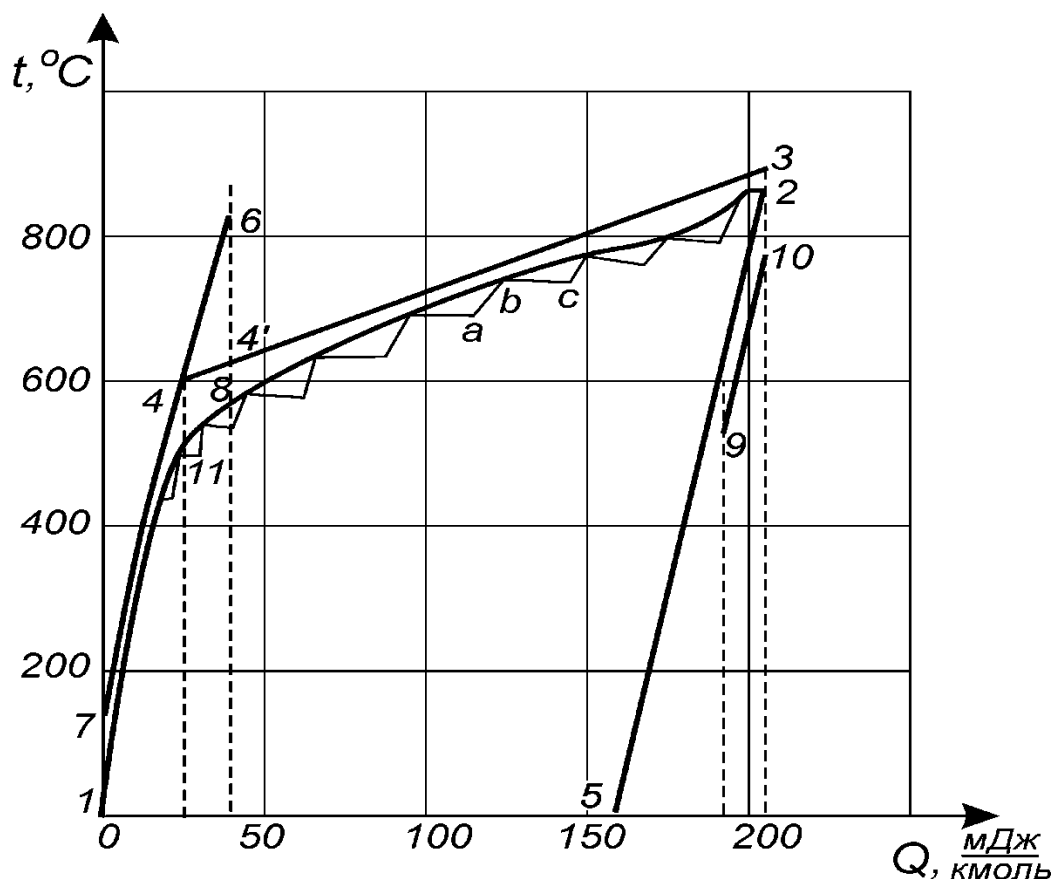


Рисунок 2.6 - Рівноважний процес вуглекислотної газифікації вуглецю при змінній температурі в T-Q діаграмі

При охолодженні продуктів газифікації в регенераторі до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (процес «6-7») проходить підігрів вихідних речовин до $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка 8), тобто реакція газифікації буде розвиватися вже в регенераторі, і витрата тепла гелію відповідно зменшиться (процес «3-4'»). У схемі регенерації мають місце значні різниці температур (до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$), що призводить до відповідних ексергетичних втрат. Ці втрати можна зменшити, застосувавши паралельний підігрів реагентів в газифікаторі та в регенераторі. Регенеративний підігрів всього потоку вихідних речовин у цьому випадку проводиться (як показано на рисунку 2.6) до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, потім частина вуглецю газифікується в процесі 9-10 з використанням тепла продуктів реакції при підвищених температурах [14].

Відповідно до викладеного підходу до організації протікання технологічних процесів розроблені T-S-діаграми технологічних схем АЕТУ.

T-S діаграма одноцільової АЕТУ з конверсією природного газу

На рисунку 2.7 наведена розроблена T-S діаграма одноцільової АЕТУ з конверсією природного газу (схема АЕТУ наведена на рисунку 2.2). Гелій промконтур охолоджується в конверторі природного газу 3 та технологічному парогенераторі 4 (процес «1-2»). Конверсія природного газу проводиться при змінній температурі (процес «4-3»). Конвертований газ регенеративно охолоджується (процес «3-12»), утворюючи три зони регенерації. У першій зоні регенерації ($Q_1^{\text{рег}}$) підігрівається парометанова суміш у регенераторі 5 (умовно зображений процес «7-6-5-4»), при цьому на останніх ступенях підігріву починається процес пароводяної конверсії метану. У другій зоні регенерації ($Q_2^{\text{рег}}$) метан підігрівається в підігрівачі 6 (процес «9-8»). У третій зоні регенерації ($Q_3^{\text{рег}}$) здійснюється підігрів живильної води в підігрівачі 7 (процес «9-8»).

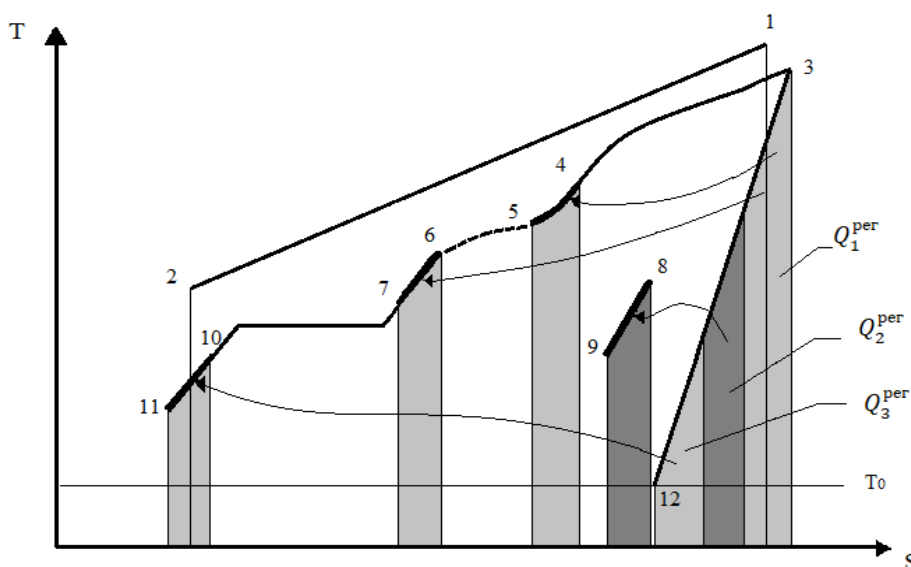


Рисунок 2.7 - T-S діаграма одноцільової АЕТУ з конверсією природного газу

T-S діаграма двоцільової АЕТУ з конверсією природного газу та виробленням електроенергії

На рисунку 2.8 наведена розроблена T-S діаграма двоцільової АЕТУ з конверсією природного газу та виробленням електроенергії (схема АЕТУ

наведена на рисунку 2.3). Гелій промконтур охолоджується в конверторі природного газу 3 та у парогенераторі 4 паротурбінної установки (процес «1-2»). Конверсія природного газу проводиться при змінній температурі (процес «5-3»). Конвертований газ регенеративно охолоджується (процес «3-4»), утворюючи дві зони регенерації. У першій зоні регенерації (Q_1^{per}) підігрівається парометанова суміш у регенераторі 5 (процес «6-5») та метан в підігрівачі метану 6 (процес 7-7'), при цьому на останніх ступенях підігріву парометанової суміші починається процес пароводяної конверсії метану. У другій зоні регенерації (Q_2^{per}) конвертований газ підігріве живильну воду для паротурбінної установки (процес «8-9»).

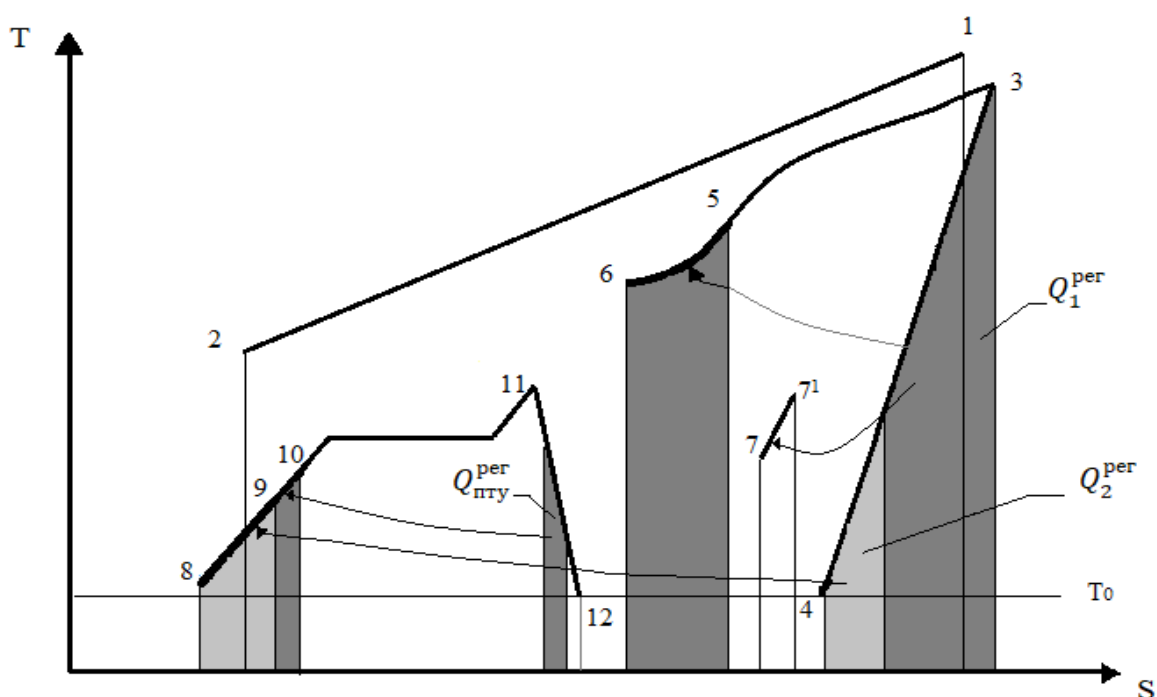


Рисунок 2.8 - T-S діаграма двоцільової АЕТУ з конверсією природного газу та виробленням електроенергії

З парової турбіни («11-12»- процес розширення пари в проточній частині) здійснюється відбір пари у технологічну частину установки та регенеративний підігрів живильної води перед входом у парогенератор (процес «9-10»).

T-S діаграма одноцільової АЕТУ для газифікації вугілля

На рисунку 2.9 наведена розроблена T-S діаграма одноцільової АЕТУ для парової газифікації вугілля (схема АЕТУ наведена на рисунку 2.4). Гелій промконтур охолоджується в газифікаторі 3 та технологічному парогенераторі 4 (процес «1-2»). Газифікація вугілля проводиться при змінній температурі (процес «5-3»).

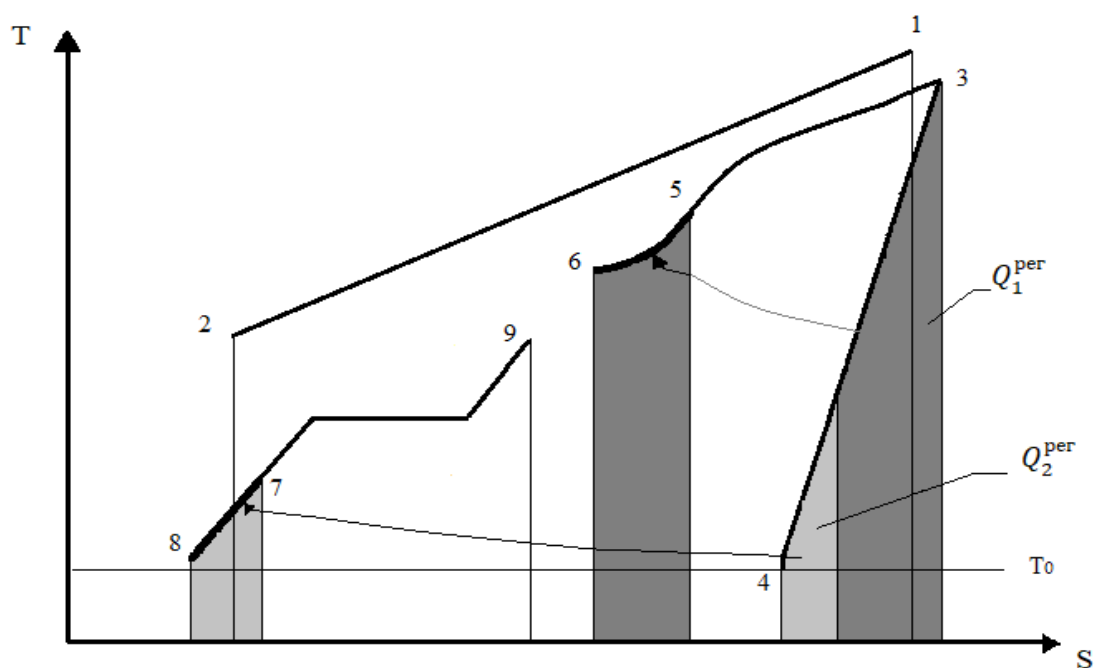


Рисунок 2.9- T-S діаграма одноцільової АЕТУ для газифікації вугілля

Газоподібні продукти газифікації регенеративно охолоджуються (процес «3-4»), утворюючи дві зони регенерації. У першій зоні регенерації (Q_1^{per}) пара та вугілля підігрівається у регенераторі 5 (процес «6-5»), при цьому на останніх ступенях підігріву починається процес пароводяної газифікації. У другій зоні регенерації (Q_2^{per}) живильна вода підігрівається в підігрівачі 7 (процес «8-7»).

T-S діаграма двоцільової АЕТУ для газифікації вугілля та виробленням електроенергії

T-S діаграма двоцільової АЕТУ для газифікації вугілля та вироблення електроенергії, схема якої наведена на рисунку 2.5, повністю тотожна

багатоцільовий АЕТУ з конверсією природного газу. Відмінності складаються у параметрах – температурах та тиску деяких точок діаграми.

Для двоцільових АЕТУ, в яких в енергетичній частині застосовується паротурбінний цикл, вибір паротурбінної установки повинен задовольняти умовам вироблення необхідної кількості пари для забезпечення роботи технологічної частини.

Розглянуті схеми АЕТУ та відповідні T - S діаграми є предметом подальших досліджень дисертаційної роботи, які включають енергетичний аналіз АЕТУ, визначення їх термодинамічної ефективності та оптимальних параметрів роботи установок.

Висновки до розділу 2

1. Визначено та проаналізовано проблеми, які треба вирішувати при створенні атомних енерготехнологічних установок з ВТГР та розглянуті принципи побудови технологічних схем атомних енерготехнологічних установок. Наведені необхідні рівні температур протікання ендотермічних технологічних процесів. Розроблена узагальнена схема енерготехнологічної установки з застосуванням енергії, виробленої ядерним реактором.

2. Для оптимальної організації технологічних процесів та циклів одноцільових та двоцільових атомних енерготехнологічних установок з конверсією природного газу та газифікацією вугілля вперше розроблені T - S – діаграми циклів АЕТУ з визначенням максимально можливої регенерації, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічних схем

3. Обґрунтовано доцільність застосування термодинамічних методів дослідження, які дозволяють визначити оптимальні цикли, схеми та найвигідніші параметри роботи АЕТУ, визначити їх енергетичну та технологічну досконалість, провести порівняльний аналіз з сучасними промисловими технологіями виробництва аналогічної продукції.

4. Наведено принципові технологічні схеми АЕТУ з пароводяною конверсією природного газу та газифікацією вугілля з розробленими T - S – діаграмами оптимального використання регенерації теплоти.

3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК З ВТГР

3.1 Огляд традиційних методів дослідження енергетичної ефективності технічних систем

Під терміном «технічна система» розуміють штучно створену сукупність кінцевого числа елементів - матеріальних об'єктів та зв'язків між ними, які утворюють цілісну структуру та призначені для виконання заданих функцій [42-43].

Методи дослідження технічних систем залежать від вибору цільової функції, яка визначає певні властивості системи, наприклад такі як експлуатаційна надійність, довготривалість, економічна доцільність тощо.

Важливе місце при дослідженні технічних систем займають методи визначення енергетичної ефективності, особливо для тих технічних систем, де мають місце процеси перетворення енергії [44-46]. Теоретичним підґрунтям при створенні методів визначення енергетичної ефективності є технічна термодинаміка.

Існуючи термодинамічні методи дослідження можна поділити на три групи:

- методи, засновані тільки на Першому початку термодинаміки, тобто законі збереження та перетворення енергії, які відомі як методи енергетичних балансів;
- методи, засновані на використанні Першого та Другого початків термодинаміки, які отримали назву ексергетичних методів;
- методи, які на єдиній основі дають змогу оцінювати енергетичну ефективність перетворення як енергії, так і матерії.

Перша група методів розроблялась для дослідження та оцінки ефективності насамперед енергетичних установок – ТЕС, ТЕЦ, котельних тощо.

Одним з авторів методу енергетичних балансів є А.С.Горшков. В [46] їм викладено метод енергетичної ефективності електро- та теплогенеруючих установок на органічному паливі. У [47-48] метод використовується для аналізу робочих процесів, що виробляють «однорідну енергію» - тепло або електроенергію, процесів, пов'язаних з «однорідною енергією», наприклад, процесів рекуперації тепла або процесів, пов'язаних зі споживанням енергії на технічні потреби, а також процесів, що виробляють «неоднорідну енергію» - тепло та електроенергію. Енергоефективність виробництва «однорідної енергії» оцінюється загальновідомим коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta = \frac{A}{BQ_H^P} \quad (3.1)$$

де A - вироблена установкою електрична або теплова енергія;

B - витрата палива;

Q_H^P - теплота згорання органічного палива.

При виробництві електричної енергії та теплоти, наприклад на теплоелектроцентралях (ТЕЦ), ступінь досконалості оцінюється окремими показниками виробництва електроенергії та теплоти:

$$\eta^e = \frac{E}{B^e Q_H^P}, \quad (3.2)$$

$$\eta^T = \frac{Q_T}{B^T Q_H^P}. \quad (3.3)$$

Тут B^e та B^T відповідно витрати палива на виробництво електричної та теплової енергії.

Наявність двох коефіцієнтів, якими оцінюється ступінь досконалості виробництва електричної та теплової енергії значно ускладнює визначення енергетичної ефективності установки в цілому та робить практично неможливим проведення порівняльного аналізу різних установок та оптимізацію параметрів її роботи.

Крім рівнянь (3.2) і (3.3), для оцінки ефективності роботи ТЕЦ були введені додаткові показники, що характеризують роботу ТЕЦ: питоме виробництво електроенергії при споживанні тепла, коефіцієнт використання тепла палива і т.д. В той же час, цей метод не дає рівняння для оцінки загальної досконалості установки: Метод «еквівалентності теплоти і роботи», відображений в роботі Гриневецького і Фукса [49], є різновидом методу енергетичного балансу. Відповідно до цього методу, рівняння для оцінки ефективності ТЕЦ виглядає наступним чином:

$$\eta = \frac{E + Q_T}{B^e Q_H^p} \quad (3.4)$$

Вираз (3.4) у багатьох випадках призводить до некоректних результатів.

Так, цей вираз не може бути використаний при порівнянні ефективності роботи теплоелектроцентралі на різних режимах роботи, тобто при різних співвідношеннях вироблених електричній та тепловій енергії. Чим більше буде співвідношення Q_T/E , тим вище буде значення ККД, не залежно від дійсної енергетичної ефективності роботи ТЕЦ. Цей факт визначається тим, що теплова енергія не може повністю перетворитися у роботу (у даному випадку у електричну енергію) і, відповідно, чим більше виробляється електричної енергії, тим більше теплової енергії відводиться у навколишнє середовище.

Також, якщо за цим виразом проводити порівняльну оцінку двох теплоелектроцентралей, на одній з яких встановлена теплофікаційна турбіна, а на іншій турбіна з протитиском, то за інших рівних умов незалежно від ступеня досконалості процесу виробництва електроенергії ТЕЦ з турбіною з протитиском буде мати більш високе значення ККД, розрахованим по (3.4).

Крім того, у випадку установок з турбоустановкою з протитиском значення ККД, визначене за формулою (3.4), дорівнює 1, якщо не враховувати втрати тепла в обладнанні, втрати теплоносія, механічні та електричні втрати, тоді як у випадку турбінних ТЕЦ з регульованим відбором пари це, в принципі, так і є, оскільки певна кількість тепла втрачається в конденсаторі. Тут це неможливо. При цьому

ККД ТЕЦ, розрахований за рівнянням (3.4), перевищує ККД відповідного циклу Карно, що порушує другий закон термодинаміки.

Щоб уникнути суттєвих недоліків, притаманних методу енергетичних балансів було розроблено “ фізичний” методу розподілу витрат енергії при визначенні енергетичної досконалості енергоустановок.

Цій метод заснований на припущенні , що для електростанції двоцільового призначання (тобто виробляючих електричну та теплову енергію) не існує єдиного ККД і для аналізу таких об'єктів слід застосовувати одночасно два коефіцієнта: ККД по виробництву електроенергії та ККД виробництва електроенергії на тепловому споживанні [50-53]. Необхідність застосування для визначення енергетичної ефективності ТЕЦ двох коефіцієнтів обґрунтовується тим, що тепло відпрацьованого пару турбін, що йде на технологічні потреби станції, або тепло, що відпускається тепловому споживачу (Q_T) також є частиною первинної енергії, яка не використовується у процесі її перетворення в електричну енергію. Але ж і це не можна віднести до витрат турбоагрегату на виробництво електроенергії, так як воно використовується поза турбоагрегатом.

До витрат на виробництво електроенергії відноситься тільки частина підведеного тепла за відрахуванням тепла , яке використовується поза енергетичною установкою.

У зв'язку з такою трактовкою автори “фізичного методу “ пропонують такий вираз для ККД по виробництву електроенергії :

$$\eta^e = \frac{E}{E + q_{\text{теп}} + q_{\text{мех}} + q_{\text{ген}}}, \quad (3.5)$$

де: $q_{\text{теп}}$ - теплові втрати тепла у навколишнє середовище ;

$q_{\text{мех}}$ - механічні страти (тертя у муфтах, підшипниках і таке інше) ;

$q_{\text{ген}}$ - втрати енергії у генераторі.

Але якщо зневажити сумою :

$$q_{\text{теп}} + q_{\text{мех}} + q_{\text{ген}} ,$$

яка у дійсності не перевищує 1-2 %% для кожного показника , то значення η^e стане дорівнювати одиниці, тобто можна досягти процесу виробництва електроенергії з ідеальною досконалістю.

Другою характеристикою робочого процесу ТЕЦ є відношення електричної енергії E_T , виробленої тепловим потоком, (Q_T), який направляється до споживача , до величини цього потоку :

$$\omega = \frac{E_T}{Q_T} . \quad (3.6)$$

Такий же показник використовується і у методі енергетичних балансів.

Значення ω не вкладається у звичайну шкалу ККД , у якій діапазон змін знаходиться між нулем та одиницею. Заміна у “фізичному методі” одного коефіцієнта, прийнятого для характеристики робочого процесу конденсаційної електростанції, двома не залежними друг від друга коефіцієнтами не тільки ускладнює аналіз енергетичної ефективності роботи енергоустановки, але й унеможлиблює порівнювати досконалість ефективності установок з різними параметрами відпрацьованого тепла.

Ні рівняння (3.5), ні (3.6) не в змозі самотійно характеризувати увесь комбінований процес у цілому. Взагалі , збільшення (більш одного) числа коефіцієнтів , які характеризують досконалість комбінованого виробництва різнорідних видів енергії не має сенсу.

Основний недолік формул (3.5) та (3.6) – відсутність правильного фізичного змісту. По цьому методу вважається , що комбінований процес виробництва теплової та електричної енергії є механічним поєднанням двох рівноцінних процесів. Принципова помилка авторів “фізичного методу” є у тому, що оперую винятково кількістю тепла, вони вважають, що передані тепловому споживачу з відпрацьованим паром або водою Q_T не бере участі у процесі перетворення тепла в роботу, незважаючи на те, що якість Q_T змінюється при проходженні робочого тіла крізь турбіну. Але ж саме у цієї зміні якості тепла (параметрів робочого тіла) і полягає участь Q_T у перетворенні тепла в механічну енергію валу турбіни [60].

Точно також невірно було б стверджувати, що кількість теплоти, відданої у конденсаторі турбіни охолоджуючій воді не використовується у процесі виробництва механічної енергії на валу турбіни і тому не відноситься до витрат на виробництво електроенергії. В той час , коли частина витраченої теплоти змінює саму форму руху , перетворюючись у механічну енергію , друга частина змінює свою якість без зміни форми руху [60].

Але без цієї якісної зміни (зниження потенціалу робочого тіла) неможливий перехід тепла у роботу відповідно до Другого початку термодинаміки.

Таким чином група методів, заснованих на використанні тільки Першого початку термодинаміки має суттєвий, непереборний недолік – не врахування того, що теплова та електрична енергія мають різну якість, в наслідок чого теплова енергія не може повністю перетворитися в роботу, у даному випадку в електричну енергію.

Не врахування якості теплової та електричної енергії призводить до того, що навіть при аналізі лише енергетичних процесів існують цілі системи показників, що оцінюють ступінь їхньої досконалості. Найчастіше ці показники мають слабкий взаємозв'язок і з їх допомогою неможливо визначити термодинамічну досконалість всієї установки [41]. Це значно ускладнює інженерні розрахунки. Кількісна оцінка виробленої енергетичної продукції та витрат енергії у багатьох випадках не дає можливості провести порівняльний аналіз ефективності різних процесів та установок і дає спотворене уявлення про ступінь їх досконалості.

Вади підходу та розроблених методів, заснованих лише першому початку термодинаміки потребували створення нових термодинамічних методів аналізу робочих процесів енергетичних установок. Такі методи були розроблені та названі ексергетичними методами термодинамічного аналізу.

Термін «ексергія» був введений З. Рантом [54]. Ексергетичний метод базується на повному використанні обох принципів термодинаміки. Про досконалість будь-якого реального процесу судять за ступенем відхилення від оборотного процесу за тих самих умов. Існує два підходи до термодинамічного

аналізу на основі ексергії, які враховують всі наслідки другого початку термодинаміки [45], [49]. Перший - це метод потоків ексергії (ексергетичний метод). Основи цього методу були закладені Ж. Гюї та А. Стодолою і розвинуті в роботах вітчизняних і закордонних термодинаміків. Особливо слід відзначити внесок у розвиток методу потоків ексергії П. Грассмана, В. Бродяньського, Д. Гохштейна, В. Фратшера.

Особливістю ексергетичного методу є визначення всіх струмів ексергії. Ексергетичний баланс будь-якої технічної системи записується в загальному вигляді:

$$\sum E' = \sum E'' + D, \quad (3.7)$$

тут: $\sum E'$ і $\sum E''$ — сумарна ексергія, що включає ексергію потоку робочого тіла, ексергію теплового потоку, а також роботу (механічну або електричну) відповідно на вході та виході із системи;

D – втрати ексергії.

Для оборотних процесів ексергетичні втрати дорівнюють нулю ($D=0$) і вираз (3.7) перетворюється на рівність. Ступінь досконалості визначається ексергетичним ККД:

$$\eta^e = \frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{\sum E''}{\sum E' + D}. \quad (3.8)$$

Дослідження технічної системи за допомогою методу потоків ексергії передбачає відокремлення всієї системи або частини системи від інших систем або об'єктів (або інших частин системи) замкненою контрольною поверхнею і визначення всіх потоків ексергії вздовж цієї контрольної поверхні. Автори ексергетичного методу показали, що значення ексергії для новостворених систем можуть бути визначені обчислювальним шляхом [4]. При використанні ексергетичного методу необхідно визначити всі потоки ексергії, що входять в систему. Це не завжди можливо. Наприклад, проблема визначення ексергії багатьох хімічних сполук досі не вирішена [55], [57-59].

Д. Гохштейн розробив так званий «ентропійний метод», який обчислює втрати ексергії на основі методу віднімання Клаузіуса [60]. При використанні ентропійного методу ексергію слід визначати лише для вхідної частини системи. Використовуючи адитивну природу втрат ентропії та ексергії, пропонується відняти всі втрати ексергії, включені в досліджувану систему, від розрахованої вхідної ексергії:

$$\Pi = T_0 \Delta_c S. \quad (3.9)$$

В результаті віднімання з ексергії (організованої енергії), що вводиться в систему, всіх ексергетичних втрат, отримується ексергія, яка відводиться з системи:

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^n \Pi_i. \quad (3.10)$$

Рівняння (3.10) є основою балансу ексергії. Ентропійний метод дозволяє виміряти історію організованої енергії, кількісно врахувати перевитрату організованої енергії, що вводиться в систему по відношенню до втрат ексергії в кожному елементі або вузлі системи за допомогою коефіцієнта втрат ексергії:

$$\Omega_i = \frac{\Pi}{E_{\text{вх}}}. \quad (3.11)$$

Сумарна ексергетична втрата всієї системи завжди дорівнює сумі всіх втрат її елементів та повний коефіцієнт ексергетичних втрат є сума всіх окремо взятих коефіцієнтів:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n \Pi}{E_{\text{вх}}} = \Omega_1 + \Omega_2 + \dots + \Omega_i = \sum_{i=1}^n \Omega_i. \quad (3.12)$$

Коефіцієнт термодинамічної досконалості будь-якої ексергетичної установки визначається через коефіцієнти ексергетичних втрат:

$$\eta^e = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = \frac{E_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^n \Pi_i}{E_{\text{вх}}} = 1 - \Omega. \quad (3.13)$$

Ентропійний метод термодинамічного аналізу дозволяє спростити розрахунок досконалості використання енергії, оскільки відпадає необхідність визначати всі потоки ексергії. Якщо первинна енергія є відомою або розрахованою величиною, то ексергія виробленої енергетичної продукції визначається шляхом рівномірного віднімання втрат ексергії, що відбуваються у всіх вузлах і елементах об'єкта, від вхідної енергії. Всі втрати ексергії розраховуються як добуток температури навколишнього середовища на зміну ентропії, або всі втрати ексергії розраховуються одночасно як добуток температури навколишнього середовища на суму змін ентропії всіх об'єктів, що беруть участь у процесі. В той же час, ентропійний метод починає свій аналіз з теплової ексергії, що підводиться до об'єкта. Однак для електростанцій здебільшого характерним є початкове надходження організованої енергії, наприклад, хімічної енергії з викопного палива або ядерної енергії. У цьому випадку ентропійний метод розраховує ексергію, отриману при спалюванні організованої енергії палива або перетворенні ядерної енергії в теплову. Загалом, ексергетичний метод термодинамічного аналізу (баланс ексергії та ентропії) базується на двох фундаментальних законах термодинаміки та всіх їхніх наслідках. При правильному використанні в аналізі робочих процесів електростанцій обидва методи дають результати, які добре узгоджуються між собою. Метод ентропії більш корисний при аналізі теплових електростанцій та їх компонентів, систем рекуперації тепла і різного теплообмінного обладнання, тобто коли мова йде про процеси перетворення теплової енергії. Метод ексергетичного балансу може бути використаний для оцінки та аналізу процесів, пов'язаних з перетворенням різних джерел енергії. Тому він може бути покладений в основу розробки спеціальних методів термодинамічного аналізу об'єктів енергетичних технологій [14], [61].

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 таким чином, щоб забезпечити мінімальні температурні напори в процесі теплообміну. Підігрів вихідних речовин можливий у регенераторі за рахунок тепла продуктів реакції (процес «2-5»).

3.2 Термодинамічні методи дослідження енерготехнологічних установок з ВТГР

Традиційні методи термодинамічного аналізу енергоустановок –теплових та атомних електростанцій, теплоелектроцентралій тощо, в яких первинна енергія – хімічна енергія горючих копалин або ядерна енергія поділу важких ізотопів перетворюється в електричну та утилізовані види теплової енергії, як показано у попередньому підрозділі мають істотні вади, які у багатьох випадках не дозволяють провести якісний аналіз ефективності робочих процесів установок, порівняльний аналіз та співставлення установок, визначити досконалість перетворення первинної енергії.

Робочі процеси енерготехнологічних установках з ВТГР в загальному вигляді складаються з процесів перетворення енергії (енергетичні процеси) та процесів перетворення матерії (технологічні процеси). Тому термодинамічні методи дослідження таких установок повинні на єдиній основі визначати енергетичну ефективність як процесів перетворення енергії, так і процесів перетворення матерії.

Як зазначалося вище, наявність двох однорідних енергетичних продуктів - електричної та теплової енергії - характерна для ТЕЦ ускладнює аналіз енергетичної ефективності роботи енергоустановки. Наразі існує декілька методів аналізу ТЕЦ, які по-різному оцінюють їх ефективність [46], [52-53]. Більше того, аналіз різними методами може призвести до діаметрально протилежних

результатів. У випадку з багатоцільовими енерготехнологічними установками завдання є більш складним, оскільки вони виробляють не тільки різні енергетичні продукти, але й водень, синтез-газ і метанол, а також продукти неенергетичного типу, такі як губчасте залізо і сталь, відновлювані гази і хімічні продукти. Також необхідно враховувати наявність в енерготехнологічних установках використання кількох видів вхідної енергетичної та технологічної сировини: ядерного палива, природних копалин (природний газ, вугілля), яке використовується як технологічна сировина, оксидів металів тощо.

Методи визначення ефективності виробництва технологічної продукції, які застосовані в металургії, хімічній та інших галузях промисловості, засновані на законах збереження матерії та енергетичному балансі і не торкаються питань енергоперетворення в системі [14], [58-59]. Сучасні методи аналізу в енергетиці засновані на Першому або на Першому та Другому початках термодинаміки. Поява нового об'єкта дослідження - багатоцільової енерготехнологічної установи поставило завдання створення методів термодинамічного дослідження енергетичної ефективності технологічних схем таких установок, які б дозволили проводити дослідження теплових схем, процесів та циклів, вибір найбільш раціональних схем та визначення оптимальних параметрів їх роботи [14], [64].

Теплотехнічне дослідження схем енерготехнологічних установок з атомним джерелом теплоти включає, по-перше, визначення та обґрунтування технологічних процесів, що реалізуються у відповідних схемах, таких як газифікація твердого палива водяною парою або двоокисом вуглецю, конверсія природного газу, відновлення заліза з руди, вироблення синтез-газу та інших; по-друге, визначення зв'язків між технологічними та енергетичними параметрами процесів; по-третє, розроблення критеріїв, що оцінюють ефективність установок та на їх основі визначення технологічних процесів, розробка оптимальних технологічних схем та енергетичних параметрів процесів.

Впровадження термодинамічних методів дослідження в технологічні процеси зумовила енергоємність технологічних виробництв, серйозні екологічні проблеми при застосуванні традиційних оксидних технологій та пов'язана з цим зростаюча

напруженість з енергоресурсами. Термодинамічний аналіз у багатоцільових технологічних системах, де поруч із перетворенням енергії є й перетворення сировини (матерії), зажадав розширення фундаментальних понять термодинаміки. Поняття "ексергія" як "частина енергії", дане З. Рантом було перенесено і на матерію взагалі. Я. Шаргутом було дано визначення ексергії матерії, як "максимальної роботи, яку ця матерія може здійснювати в оборотному процесі з навколишнім середовищем як джерело дарових теплоти і речовин, якщо в кінці процесу всі види матерії, що беруть участь у ньому, приходять у стан термодинамічної рівноваги з усіма компонентами довкілля" [62]. На відміну від визначення навколишнього середовища для систем, де відбуваються тільки перетворення енергії, і яка характеризується термічними параметрами: температурою T_0 і тиском P_0 , поняття навколишнього середовища, коли склади потоків речовини змінюються, включаються також її хімічний склад [55].

Я.Шаргутом для обчислення цієї максимальної роботи (ексергії) запропоновані для кожного елемента, що бере участь у процесі, умовні речовини відліку. Як речовина відліку для даного елемента вибирається найбільш поширена в навколишньому просторі речовина. Це робиться в припущенні, що ексергія повсюдно поширених речовин, що знаходяться в навколишньому середовищі, дорівнює нулю.

Для вибраних речовин відліку необхідно скласти рівняння хімічної реакції, в якому поряд з елементом, ексергія якого визначається, беруть участь лише речовини відліку. Таке рівняння було названо рівнянням реакції відліку. З урахуванням прийнятої системи речовин відліку, найпоширеніших у навколишньому середовищі, ці рівняння реакції відліку було названо реакціями девальвації. Я. Шаргутом введені термодинамічні функції: ентальпія девальвації (α_{Π}), ентропія девальвації (σ_{Π}) та вільна ентальпія девальвації (ξ_{Π}), які розраховуються за прийнятими реакціями девальвації. Ці функції пов'язані виразом [62]:

$$\xi_{\Pi} = \alpha_{\Pi} - T_{\Pi} \cdot \sigma_{\Pi} , \quad (3.14)$$

де: $T_{\Pi} = 298,15\text{K}$ - нормальна температура стану чистих твердих і рідких речовин.

У [62] наводяться таблиці цих функцій для низки речовин. У загальному вигляді термічна ексергія речовини, що бере участь у процесі, розраховується за формулою:

$$e_t = \Delta_0 e_n + e_n + \frac{T_n - T_0}{T_n} (\alpha_n - e) + RT_0 \left(\sum_j n_j \ln \frac{k_j}{k_{nj}} - \sum_k n_k \ln \frac{k_k}{k_{nk}} \right) \quad (3.15)$$

Тут: $\Delta_0 e_n$ - фізична (теплова) складова ексергії, що визначається за відомим виразом:

$$\Delta_0 e_n = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (3.16)$$

e_n - питома хімічна нормальна ексергія;

$$e_n = \xi_n + RT_n \left(\sum_j n_j \ln k_{nj} - \sum_k n_k \ln k_{nk} \right) \quad (3.17)$$

n - кількість речовини відліку, кмоль;

k - відносна концентрація речовини відліку в навколишньому середовищі;

k_n - нормальна відносна концентрація речовини відліку в навколишньому середовищі;

R - універсальна газова стала.

Індекси "j" і "k" відносяться відповідно до вихідних і результуючих речовин відліку;

T_0 - температура навколишнього середовища.

Для розрахунку ексергії (3.15) необхідно визначити ентальпію девальвації, вільну ентальпію девальвації та відносні концентрації речовин відліку в навколишньому середовищі.

Метод Я. Шаргута, який уперше відніс поняття ексергії до матерії, безумовно розширив можливості використання термодинамічного аналізу, насамперед у системах, де має місце поряд із перетворенням енергії перетворення матерії.

Разом з тим, цей метод має низку істотних недоліків, деякі з яких мають принциповий характер. Поняття ексергії застосовується тільки до теплоти та

теплових процесів, але не до матерії взагалі. Тому, строго кажучи, необхідно завжди враховувати умовність введеного Я.Шаргутом поняття.

Визначення введених термодинамічних функцій вимагає вибору речовин відліку та складання реакції девальвації. Це значно ускладнює практичні інженерні розрахунки. Існуючі таблиці для ентальпії та ентропії девальвації, розраховані Я. Шаргутом [55], а також В. С. Степановим [59], не охоплюють багато класів хімічних сполук. Принципи вибору речовин відліку - нульовий ексергетичний рівень окремих елементів і поширеність у навколишньому середовищі, не дозволяють однозначно визначати їх для багатьох речовин, оскільки, по-перше, в деяких випадках широко поширені в природі речовини включають елементи не в стехіометричних співвідношеннях і тому не можуть бути прийняті як речовини відліку і, по-друге, не всі "девальвовані" речовини широко поширені в природі. Навколишнє середовище, за Шаргутом, прийнято складається з атмосфери та літосфери. Для розрахунку концентраційної складової ексергії атмосфера та літосфера подаються у вигляді ідеальних розчинів. Таке припущення призводить до того, що обчислена концентраційна складова ексергії не характеризує реальну працездатність речовини [14].

В. Дубковським та В. Лапшовим було запропоновано метод визначення термодинамічної ефективності атомних енерготехнологічних установок, заснований на введених поняттях теплових та ексергетичних еквівалентів вироблення технологічної продукції [14],[61],[63]. Автори методу використовують класичне визначення ККД як відношення всіх видів отриманої корисної продукції в енергетичному вимірі до витраченої первинної енергії. При цьому для визначення енергетичного виміру виробленого технологічного продукту пропонується визначати кількість теплоти та ексергії, витрачену в оборотній хімічній реакції отримання продукту.

Кількість витраченої теплоти, яка підводиться в оборотних хімічних процесах визначається відповідним тепловим ефектом реакції при стехіометричному відношенні усіх вхідних речовин.

Під тепловим еквівалентом виробництва технологічного продукту ($Q_j^{\text{екв}}$) слід розуміти кількість теплоти, що підводиться в оборотному процесі утворення одиниці маси цього продукту ($Q_{nj}^{\text{утв}}$). Якщо при цьому, крім теплоти, що безпосередньо підводиться, як технологічна сировина використовується якесь паливо, то величиною теплового еквівалента необхідно також враховувати теплоту згоряння цього палива.

$$Q_j^{\text{екв}} = Q_{nj}^{\text{утв}} + BQ_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (3.19)$$

де B - витрата палива, що припадає на одиницю маси виробленого продукту.

Ексергетичний еквівалент виробництва технологічного продукту визначається по класичній формулі зв'язку ексергії та теплоти:

$$E_j^{\text{екв}} = Q_j^{\text{екв}} - T_0 \Delta S_j^{\text{екв}}, \quad (3.20)$$

де: $\Delta S_j^{\text{екв}} = \Delta S_j^0 - B_j \Delta S_{\text{зг}}^0$ - зміна ентропії у оборотних хімічних реакціях утворення технологічного продукту (ΔS_j^0) та згоряння використаного палива ($\Delta S_{\text{зг}}^0$);

B_j — витрата використаного палива на одиницю виробленого технологічного продукту.

Перевагою цього метода є те, що для визначення запропонованих еквівалентів використовуються стандартні теплоти (ΔH_{298}^0) і стандартні ентропії (S_{298}^0) утворення речовини та не потребує введення додаткових понять та термодинамічних функцій, таких як «речовини відліку», «концентрація речовини відліку», «ентальпія девальвації», «ентропія девальвації», «вільна ентальпія девальвації» тощо.

Наведені методи дозволяють проводити на єдиній термодинамічній основі енергетичний аналіз атомних енерготехнологічних установок, що дає змогу створювати та удосконалювати технологічні схеми та визначати оптимальні параметри їх роботи.

3.3 Особливості визначення показників енергетичної ефективності енерготехнологічних установок

Енергетична ефективність атомних енерготехнологічних установок визначається витратою теплоти ядерного реактора на виробництво відповідного виду продукції: електричної та відпущеної споживачу теплової енергії, а також та виробництво технологічного продукту: синтез-газу, водню, метанолу, металургійної продукції, будь-яких інших продуктів.

Як зазначалось вище (див. 2.1 та 2.2) атомні енерготехнологічні установки розділяють на одно – та багатоцільові. Однак як для перших, так і для других енергетичну ефективність необхідно визначати на єдиній основі, оскільки в іншому випадку буде неможливо проводити порівняльний аналіз.

Енергетична ефективність таких установок може бути оцінена відомими показниками, що характеризують ефективність відпуску електричної та теплової енергії з теплоцентралів на органічному або ядерному паливі. Це відомі ККД з вироблення електроенергії (η_e), відпуску теплоти (η_T), питоме вироблення електроенергії на тепловому споживанні, та повний ККД (η). Але ж тими показниками неможливо визначити енергетичну ефективність протікання технологічних процесів з перетворення сировини в будь-якому технологічному процесі.. Разом з тим застосування атомного джерела теплоти – високотемпературного реактора сприяє використанню специфічних технологічних процесів, нерозривно пов'язаних з параметрами теплоносія реактора і енергетичним циклом установки.

Таким чином виникає необхідність створення таких критеріїв, які характеризували б термодинамічну ефективність як технологічних процесів, так і установки в цілому. Такі показники, як витрати теплоти ядерного реактора на конверсію одиниці природного газу чи вугілля, витрата відновлювального газу на одиницю маси виробленого технологічного продукту, безумовно визначають ефективність відповідних технологічних процесів. Але ці показники є розмірними, тому їх неможливо порівнювати з показниками, що характеризують

виробництво електроенергії або вироблення теплоти i , у зв'язку з цим, їх використання при оцінці термодинамічної ефективності атомної енерготехнологічної установки в принципі неможливо.

Враховуючи вказані особливості у [14] для сумісного вироблення атомною енерготехнологічною установкою продукції як енергетичного, так і технологічного виду доцільним є застосування системи відносних показників, що характеризують за аналогією з ККД відношення корисно використаної теплоти до витрачено:

$$\eta_i = \frac{Q_j^{\text{вик}}}{Q_j^{\text{витр}}} , \quad (3.21)$$

де j – вид виробленої продукції.

Стосовно електроенергії та теплоти вираз (3.21) набуває вигляду відповідних ККД. Для технологічних процесів величину $Q_j^{\text{вик}}$ визначає введене авторами методу поняття «тепловий еквівалент» виробництва продукції, розрахований по (3.19), а величиною $Q_j^{\text{витр}}$ – кількість теплоти, фактично витраченої в робочому процесі.

При цьому кількість теплоти, що підводиться у оборотних процесах, визначається сумарним тепловим ефектом хімічних реакцій при стехіометричному співвідношенні вхідних речовин.

При $T_0 = 298,15$ °С теплової еквівалент виробництва продукту визначається величиною стандартного теплового ефекту реакцій:

$$\Delta H_{298}^0 = \sum_{i=1}^n \Delta H_{\text{пр}i}^0 - \sum_{i=1}^m \Delta H_{\text{вх}i}^0 , \quad (3.22)$$

де: $\Delta H_{\text{пр}i}^0$, $\Delta H_{\text{вх}i}^0$ — стандартні теплоти утворення відповідно продуктів реакції та вхідних речовин;

n та m — число компонентів продуктів реакції та вихідних речовин. Залежність теплового ефекту реакції від температури, що виражається рівнянням Кірхгофа, призводить до співвідношення:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298}^0 + \sum_{i=1}^n I_{\text{пр}i} - \sum_{i=1}^m I_{\text{вх}i} , \quad (3.23)$$

де: $I_{\text{пр}_i}$, $I_{\text{вх}_i}$ — ентальпії відповідно, продуктів реакцій і вихідних речовин при температурі реакції, відраховані від 298,15 К.

Тому, якщо припустити, що температури вихідної речовини і продуктів реакції дорівнюють температурі навколишнього середовища, то загальна кількість теплоти, необхідна для нагрівання вхідних речовин, і теплота, що підводиться під час хімічної реакції, як випливає з (3.23), не залежать від температури реакції, вони будуть однакові:

$$\Delta H_{298}^0 = \Delta H_T - (\sum_{i=1}^n \Delta I_{\text{пр}_i} - \sum_{i=1}^m \Delta I_{\text{вх}_i}) . \quad (3.24)$$

Визначення використаного тепла під час виробництва будь-якої продукції величиною стандартного теплового ефекту стехіометричних реакцій значно спрощує завдання розрахунку теплового еквівалента виробництва технологічної продукції.

Аналогічним чином враховується залежність теплоти згоряння палива, що використовується, від температури:

$$\Delta H_{T_{\text{згор}}} = \Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 + \sum_{i=1}^n I_{\text{пр}_i} - \sum_{i=1}^m I_{\text{вх}_i} . \quad (3.25)$$

Ефективність процесів конверсії органічних палив з використанням теплоти атомного реактора також оцінюється формулою (3.21). При цьому тепловий еквівалент виробництва продуктів газифікації твердих та рідких палив, а також продуктів конверсії газоподібних палив

$$Q^{\text{екв}} = \Delta H_{298}^0 + B \Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 . \quad (3.25)$$

виявляється рівним теплоті згоряння отриманого продукту.

Розглянемо процеси парової та вуглекислотної конверсії метану та газифікації вуглецю.

1. Процес пароводяної конверсії метану.



Стандартний тепловий ефект цієї реакції становить:

$$\Delta H_{298}^0 = 206,2 \text{ кДж/моль} .$$

Теплоту згорання метану при T_0 визначим з реакції:



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -802,2 \text{ кДж/моль}.$$

По відношенню до реакції конверсії метану ця величина є позитивною.

Таким чином тепловий еквівалент виробництва 1 моля CO та 3 молів H_2 складе:

$$Q^{\text{екв}} = 1008,4 \text{ кДж/моль } \text{CH}_4.$$

Теплоту згорання отриманого продукту - 1 моль CO та 3 молі H_2 визначим по відповідним реакціям:



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = 1008,4 \text{ кДж/моль}.$$

2. Процес пароводяної газифікації вуглецю.



Стандартний тепловий ефект цієї реакції становить:

$$\Delta H_{298}^0 = 131,3 \text{ кДж/моль}.$$

Теплоту згорання вуглецю при T_0 визначим з реакції:



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -393,5 \text{ кДж/моль}.$$

По відношенню до реакції газифікації вуглецю ця величина є позитивною.

Таким чином тепловий еквівалент виробництва 1 моля CO та 1 моля H_2 відповідно до (3.25) складе:

$$Q^{\text{екв}} = 524,8 \text{ кДж/моль } \text{C}.$$

Теплоту згорання отриманого продукту - 1 моль CO та 1 моля H_2 визначим по відповідним реакціям:



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = 524,8 \text{ кДж/моль}.$$

3. Процес вулєкїслотної конверсії метану.



Стандартний тепловий ефект цієї реакції становить:

$$\Delta H_{298}^0 = 247,4 \text{ кДж/моль}.$$

Теплоту згоряння метану при T_0 (див. (3.27))

$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -802,2 \text{ кДж/моль}.$$

По відношенню до реакції конверсії метану ця величина є позитивною.

Таким чином тепловий еквівалент виробництва 2 молів СО та H_2 складе:

$$Q^{\text{екв}} = 1049,6 \text{ кДж/моль } \text{CH}_4.$$

Теплоту згоряння отриманого продукту - 2 молів СО та H_2 визначим по відповідним реакціям:



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = 1049,6 \text{ кДж/моль}.$$

4. Процес вуглекїслотної газифікації вуглецю.



Стандартний тепловий ефект цієї реакції становить:

$$\Delta H_{298}^0 = 172,5 \text{ кДж/моль}$$

Теплоту згоряння вуглецю при T_0 визначим з реакції (3.31)

$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -393,5 \text{ кДж/моль}.$$

По відношенню до реакції газифікації вуглецю ця величина є позитивною.

Таким чином тепловий еквівалент виробництва 2 молів СО відповідно до (3.25) складе:

$$Q^{\text{екв}} = 566,0 \text{ кДж/моль } \text{C}.$$

Теплоту згорання отриманого продукту - 2 молів СО визначим по відповідній реакції:



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -566,0 \text{ кДж/моль}.$$

З наведених розрахунків можна зробити висновок, що при оборотному протіканні реакцій теплоти згоряння продуктів реакцій конверсії метану та газифікації вуглецю (3.26), (3.30), (3.34) та (3.37) дорівнюють тепловому еквіваленту виробництва цих продуктів. Коефіцієнт перетворення, аналогічний ККД конверсії органічних палив [40], може бути визначений, як:

$$\eta_{\text{пер}} = \frac{Q^{\text{екв}}}{\Delta H_{298\text{згор}}^0}, \quad (3.39)$$

де $\Delta H_{298\text{згор}}^0$ - тепловий ефект згоряння використаного палива.

В таблиці 3.1 наведені результати розрахунків коефіцієнта перетворення використаного палива.

Таблиця 3.1 - Коефіцієнти перетворення використаного палива

Технологічний процес	Вуглекіслотна газифікація	Пароводяна газифікація	Вуглекіслотна конверсія	Пароводяна конверсія
$\eta_{\text{пер}}$	1,4384	1,3337	1,3084	1,2570

Величина $(\eta_{\text{пер}}-1)$ визначає максимально можливу долю зниження витрати технологічної сировини у відповідному технологічному процесі при застосуванні у якості джерела, яке забезпечує протікання процесу, високотемпературного реактора.

Ефективність використання теплоти при аналізі атомних енерготехнологічних установок в загальному вигляді може бути визначена відповідним показником:

$$\eta_{\text{уст}}^{\text{т}} = \frac{E + \sum_1^n G_i \Delta H_{\text{згор}i}^0 + \sum_1^m G_j Q_j^{\text{екв}} + Q_{\text{т}}}{Q_{\text{р}} + B_{\text{т}} Q_{\text{н(т)}}^{\text{р}}}, \quad (3.40)$$

де E – вироблена електроенергія;

G_i – i -вид технологічної продукції енергетичного виду;

G_j – j - вид технологічної продукції неенергетичного виду;

$Q_{\text{т}}$ – теплова енергія, відпущена споживачу;

Q_p – теплова потужність реактора;

B_T – витрата технологічного палива (технологічної сировини);

$Q_{H(T)}^p$ – нижча теплотворна здатність технологічного палива (технологічної сировини).

При цьому ефективність використання теплоти при виробництві окремого виду продукції можна визначати відповідними коефіцієнтами. Наприклад, ефективність вироблення технологічної продукції енергетичного виду визначається як:

$$\eta_{\text{техн}}^T = \frac{\sum_1^n G_i \Delta H_{\text{згорі}}^0}{Q_p^{\text{техн}} + B_T^{\text{техн}} Q_{H(T)}^p}, \quad (3.41)$$

де $Q_p^{\text{техн}}$ та $B_T^{\text{техн}}$ - відповідно потужність реактора та витрата технологічного палива на виробництво продукції.

Термодинамічна ефективність атомних енерготехнологічних установок може оцінюватися системою відносних коефіцієнтів (3.40), (3.41), які визначають рівень використання теплоти як установкою в цілому, так і при виробництві окремого виду продукції, як енергетичного, так і технологічного виду.

3.4 Застосування ексергетичного методу визначення ефективності енерготехнологічних установок

Наведені у 3.3 показники дозволяють лише кількісно оцінити використання теплоти при виробництві атомною енерготехнологічною установкою енергетичної та технологічної продукції. Але ж якість теплоти, що використовується, виявляється різною.

Наприклад, при виробництві синтез-газу, водню, метанолу з твердих палив, при застосуванні високотемпературного реактора в ядерно-металургійних комплексах потрібен температурний потенціал становить 700 – 1000 °С. Звичайно, потенціал цієї теплоти та відповідно його працездатність будуть більшими, ніж при виробництві електроенергії, де рівень температур близько 500 – 600 °С. Також

по-різному слід оцінювати і продукцію, що виробляється. Електроенергія та теплота зовсім не рівноцінні. Не рівноцінні і продукти неенергетичного виду, на виробництво яких витрачається теплота різного потенціалу, а отже і різної працездатності.

Тому при енергетичному дослідженні ефективності енерготехнологічних установок багатоцільового призначення паралельно з системою кількісної оцінки ступеня використання теплоти при аналізі термодинамічної ефективності доцільно використовувати систему ексергетичних показників, які **якісно** оцінюють первинну енергію яка витрачається при виробництві різної продукції.

В [14] оцінку виробництва неенергетичних товарів пропонується оцінювати ексергією теплоти, що пішла на виробництво продукту, тобто. за аналогією з тепловим еквівалентом ввести ексергетичний еквівалент виробництва продукту, який визначається по (3.20). Тепловий еквівалент визначається за параметрами навколишнього середовища, тому зміна ентропії в хімічних процесах також визначається за T_0 і P_0 . При $T_0=298,15\text{K}$ зміну ентропії зручно визначити за абсолютними значеннями ентропії речовин, що використовуються в хімічних реакціях [39]:

$$\Delta S_j^0 = \sum_{j=1}^n M_j^{\text{пр}} s_{\text{пр}j}^0 - \sum_{i=1}^m M_i^{\text{вх}} s_{\text{вх}i}^0, \quad (3.42)$$

$$\Delta S_{\text{зг}}^0 = \sum_{j=1}^n M_j^{\text{пр}} s_{\text{пр(згор)}j}^0 - \sum_{i=1}^m M_i^{\text{вх}} s_{\text{вх(згор)}i}^0, \quad (3.43)$$

де s^0 – стандартна ентропія утворення відповідної компоненти,

M - кількість компоненти.

При виробництві продуктів газифікації твердих і рідких палив, а також конверсії природного газу, ексергетичний еквівалент газоподібних горючих продуктів визначається за формулою:

$$E_j^{\text{екв}} = \Delta H_{298\text{згор}}^0 - T_0 \Delta S_{\text{згор}}^0, \quad (3.44)$$

де

$$\Delta S_{\text{згор}}^0 = \sum_{j=1}^n M_j^{\text{пр}} s_{\text{пр(згор)}j}^0 - \sum_{i=1}^m M_i^{\text{вх}} s_{\text{вх(згор)}i}^0 \quad (3.45).$$

Аналізуючи визначення ексергетичного еквіваленту (3.44) треба зазначити, що у зв'язку з тим, що тепловий ефект реакції згоряння негативний, а у реакції отримання продукту теплота згоряння палива використовується, то по відношенню до цієї реакції тепловий ефект виявляється позитивним і при визначенні сумарної зміни ентропії знак величини $\Delta S_{\text{зг}}^0$ змінюється.

1. Розрахунок ексергетичного еквіваленту метану.

Теплоту згорання метану при T_0 та зміну ентропії при згорянні метану визначим з реакції (3.27):

$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -802,2 \text{ кДж/моль.}$$

Знак мінус визначає, що реакція (3.27) протікає екзотермічно.

$$\Delta S_{\text{згор}}^0 = -5,2670 \text{ Дж/мольК.}$$

Стандартні ентропії утворення s^0 вхідних речовин та продуктів реакції згоряння метану (3.27) визначались по [39].

Таким чином ексергетичний еквівалент метану складе:

$$E_j^{\text{екв}} = 800,630 \text{ кДж/моль.}$$

2. Розрахунок ексергетичного еквіваленту вуглецю.

Теплоту згоряння вуглецю при T_0 та зміну ентропії при згорянні вуглецю визначим з реакції (3.31):

$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -393,5 \text{ кДж/моль.}$$

Знак мінус визначає, що реакція (3.31) протікає екзотермічно.

$$\Delta S_{\text{згор}}^0 = 2,9015 \text{ Дж/мольК.}$$

Стандартні ентропії утворення s^0 вхідних речовин та продуктів реакції згоряння вуглецю (3.31) визначались по [39].

Ексергетичний еквівалент вуглецю складе:

$$E_j^{\text{екв}} = 394,365 \text{ кДж/моль.}$$

1. Розрахунок ексергетичного еквіваленту водню.

Теплоту згорання водню при T_0 та зміну ентропії при згорянні водню визначим з реакції :



$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -241,8 \text{ кДж/моль.}$$

Знак мінус визначає, що реакція (3.46) протікає екзотермічно.

$$\Delta S_{\text{згор}}^0 = -44,3444 \text{ Дж/мольК.}$$

Стандартні ентропії утворення s^0 вхідних речовин та продуктів реакції згорання водню (3.45) визначались по [39].

Ексергетичний еквівалент водню складе:

$$E_j^{\text{екв}} = 228,579 \text{ кДж/моль.}$$

4. Розрахунок ексергетичного еквіваленту оксиду вуглецю.

Теплоту згорання оксиду вуглецю при T_0 та зміну ентропії при згорянні метану визначим з реакції (3.28):

$$\Delta H_{298_{\text{згор}}}^0 = -283,000 \text{ кДж/моль.}$$

Знак мінус визначає, що реакція (3.28) протікає екзотермічно.

$$\Delta S_{\text{згор}}^0 = -86,4428 \text{ Дж/мольК.}$$

Стандартні ентропії утворення s^0 вхідних речовин та продуктів реакції згорання оксиду вуглецю (3.28) визначались по [39].

Таким чином ексергетичний еквівалент оксиду вуглецю складе:

$$E_j^{\text{екв}} = 257,2271 \text{ кДж/моль.}$$

З наведених розрахунків видно, що у ряді випадків ексергетичний еквівалент речовин виявляється меншим теплоти згорання. Для метану ця величина майже не відрізняється від теплоти згорання і для вуглецю ексергетичний еквівалент є дещо більшим (за абсолютною величиною), ніж теплота згорання.

Ексергетичні коефіцієнти, що характеризують ступінь термодинамічної досконалості процесів виробництва різної, у тому числі і неенергетичної продукції, виражається в загальному вигляді:

$$\eta_{ei} = \frac{E_j}{\sum_{i=1}^n E_{ji}^n}, \quad (3.47)$$

де E_j - ексергія, або ексергетичний еквівалент продукції виду j ,

$\sum_{i=1}^n E_{ji}^n$ - сумарна ексергія усіх видів використаних енергетичних та технологічних ресурсів на виробництво даного виду продукції.

Ексергетичний коефіцієнт, визначаючий термодинамічну ефективність атомної енерготехнологічної установки в цілому, може бути записаний у виді:

$$\eta_{e_{уст}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_j}{E_p + E_T}, \quad (3.48)$$

де $\sum_{i=1}^n E_j$ - сума ексергій енергетичної продукції та ексергетичних еквівалентів усіх видів технологічної продукції, які виробляє установка;

E_p та E_T - ексергія відповідно теплоти ядерного реактора та технологічного палива.

Ексергетичний аналіз при термодинамічному дослідженні атомних енерготехнологічних установок дозволяє якісно оцінити витрати первинних видів енергії - енергії ядерного палива та хімічної енергії технологічної сировини. Це дає можливість визначати оптимальний розподіл енергії ядерного реактора при виробництві різних видів енергетичної та технологічної продукції.

Висновки до розділу 3

1. Розглянуто методи дослідження енергетичної ефективності енерготехнологічних установок з ВТГР. Зроблено огляд традиційних методів дослідження енергетичної ефективності технічних систем.

2. Доведено, що традиційні методи оцінки енергетичної ефективності робочих процесів атомних та теплових електростанцій та теплоелектроцентралей не можуть бути застосовані до установок, виробляючих продукцію як енергетичного, так і неенергетичного виду.

3. Обґрунтовано вибір методу термодинамічного дослідження атомних енерготехнологічних установок, який дозволяє на єдиній основі визначати критерії енергетичної ефективності вироблення різномірної продукції.

4. Розраховані значення теплових та ексергетичних еквівалентів для технологічних речовин АЕТУ, які будуть використані при дослідженні енергетичної ефективності АЕТУ, призначених для конверсії органічних палив.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК З ВТГР ДЛЯ КОНВЕРСІЇ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА

Дослідження енергетичної ефективності енерготехнологічних установок з високотемпературними газоохолоджуваними реакторами проводилось шляхом розрахунку параметрів технологічних схем з паровою конверсією природного газу та газифікацією твердого органічного палива [53],[58],[67-68]. Метою дослідження було визначення показників енергетичної досконалості.

У другому розділі роботи були наведені технологічні схеми конверсії природного газу та газифікації твердого органічного палива та можливості використання високотемпературних газоохолоджуваних реакторів у відповідних технологічних процесах. Визначені параметри ВТГР, які є вхідними даними для дослідження енергетичної ефективності використання ВТГР у технологіях конверсії органічних паливних копалин.

Дослідження енергетичної ефективності атомних енерготехнологічних установок проводилось методом термодинамічного аналізу, запропонованим В. Дубковським [14], наведеним у третьому розділі роботи, в якому визначені показники теплової та ексергетичної досконалості енерготехнологічних установок з ВТГР.

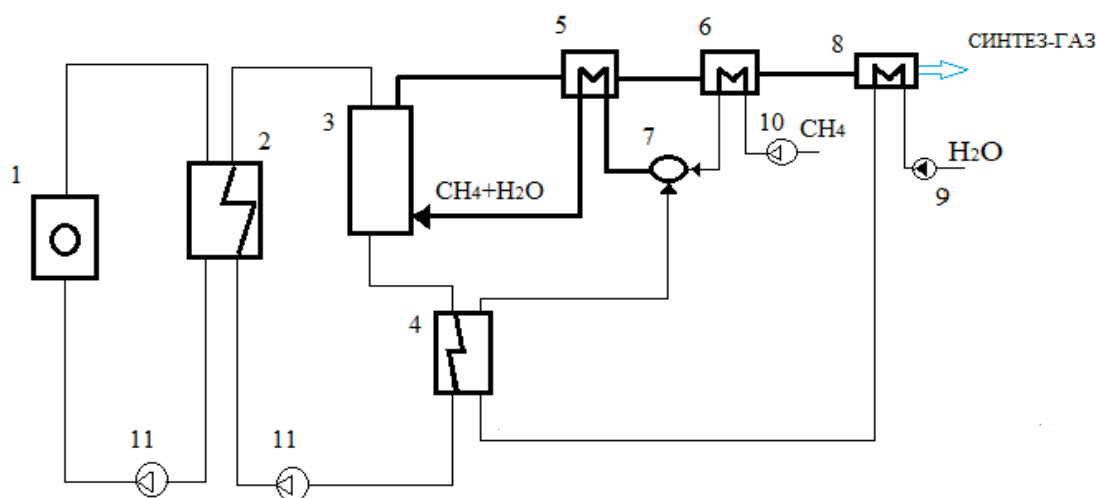
Чисельні значення використаних при дослідженнях енергетичної досконалості технологічних схем теплових та ексергетичних еквівалентів визначені в підрозділах 2.3 та 2.4.

Розроблено розрахункові технологічні схеми, методики та проведено розрахунки схем АЕТУ з паровою конверсією природного газу та газифікації твердого органічного палива з визначенням енергетичних параметрів та показників ефективності використання теплоти та ексергетичної досконалості.

4.1 АЕТУ з застосування у якості технологічної сировини природного газу

4.1.1 Одноцільова АЕТУ для конверсії природного газу

Принципова схема одноцільової АЕТУ, призначеної для парової конверсії природного газу наведена у другому розділі роботи. На її основі розроблена розрахункова технологічна схема одноцільової енерготехнологічної установки, наведена на рисунку 4.1.



1 - ЯР; 2- ТПК; 3 – конвертор CH_4 ; 4 – ТПГ; 5- регенератор; 6- підігрівач CH_4 ; 7- змішувач CH_4 та технологічної пари; 8- підігрівач технологічної води; 9 –насос; 10 –компресор; 11 – газодувки.

Рисунок 4.1 – Розрахункова технологічна схема одноцільової АЕТУ, призначеної для конверсії природного газу

Вхідними параметрами є теплова потужність ВТГР - Q_p , температура та тиск гелію на виході з активної зони відповідно - $t_p^{\text{вих}}$ та P_p , температура та тиск гелію на виході з проміжного теплообмінника відповідно - $t_{\text{пт}}^{\text{вих}}$ та $P_{\text{пт}}$ а також температура та тиск процесу конверсії – t_k та P_k . Приймалося, що в процесі конверсії використовується очищений від домішок природний газ, тобто метан.

Для визначення температури вхідних речовин - суміші водяної пари та метану в конвертор проведено енергетичний розрахунок регенератора 5, підігрівача метану 6 та підігрівача технологічної води 8.

Співвідношення кількості конвертованого метану та водяної пари, а також продуктів конверсії H_2 та CO визначались при умовах стехіометрично протікаючої реакції конверсії. При розрахунках приймалось значення конвертованого метану $M_{CH_4} = 1$ кмоль.

Методика розрахунку технологічної схеми

Температура продуктів конверсії на виході з регенератора $t_{пр}^{вих}$ визначалась з рівнянь енергетичного балансу при значенні конвертованого метану $M_{CH_4} = 1$ кмоль.

$$Q_{рег} = M_{CH_4} c_p^{CH_4} (t_p^{вих} - t_p^{вх}) + M_{H_2O} (i_p^{вих} - i_p^{вх}) = (M_{H_2} C_p^{H_2} + M_{CO} C_p^{CO}) \cdot (t_{пр}^{вх} - t_{пр}^{вих}), \quad (4.1)$$

$$t_{пр}^{вих} = t_{пр}^{вх} - \frac{Q_{рег}}{M_{H_2} C_p^{H_2} + M_{CO} C_p^{CO}}, \quad (4.2)$$

де M_{CH_4} , M_{H_2O} - витрати метану та водяної пари ;

M_{H_2} , M_{CO} - кількість водню та оксиду вуглецю, виробленого при конверсії 1 кмолу метану;

$t_p^{вих}$, $t_p^{вх}$ - температури виходу та входу метану;

$i_p^{вих}$, $i_p^{вх}$ - ентальпії виходу та входу водяної пари;

$t_{пр}^{вх}$ - температура входу продуктів конверсії в регенератор;

$c_p^{CH_4}$, $C_p^{H_2}$, C_p^{CO} - ізобарні теплоємності.

Температура входу продуктів конверсії в регенератор дорівнює температурі процесу конверсії.

З рівнянь енергетичного балансу підігрівача метану визначалась температура виходу продуктів конверсії ($t_{вих}^{ПК}$) з підігрівача:

$$Q_{під}^{CH_4} = M_{CH_4} c_p^{CH_4} (t_{CH_4}^{вих} - t_{CH_4}^{вх}) = (M_{H_2} C_p^{H_2} + M_{CO} C_p^{CO}) \cdot (t_{вих}^{ПК} - t_{вих}^{ПК}), \quad (4.3)$$

$$t_{вих}^{ПК} = t_{вих}^{ПК} - \frac{Q_{під}^{CH_4}}{M_{H_2} C_p^{H_2} + M_{CO} C_p^{CO}}, \quad (4.4)$$

де $t_{CH_4}^{ВІХ}$, $t_{CH_4}^{ВХ}$ – температури виходу та входу метану;

$t_{ВХ}^{ПК}$ – температура входу продуктів конверсії в підігрівач метану.

З рівняння енергетичного балансу підігрівача технологічної води визначалась його теплова потужність та температура продуктів конверсії на виході:

$$Q_{під}^{H_2O} = (M_{H_2} C_p^{H_2} + M_{CO} C_p^{CO}) \cdot (t_{ВХ}^{ПК} - t_{ВІХ}^{ПК}) = M_{H_2O} c_p^{H_2O} (t_{H_2O}^{ВІХ} - t_{H_2O}^{ВХ}), \quad (4.5)$$

$$t_{ВІХ}^{ПК} = t_{ВХ}^{ПК} - \frac{Q_{під}^{H_2O}}{M_{H_2} C_p^{H_2} + M_{CO} C_p^{CO}}, \quad (4.6)$$

де $t_{H_2O}^{ВІХ} = t_s(P_k)$;

$c_p^{H_2O}$ - ізобарна теплоємність технологічної води.

Кількість теплоти, необхідна для підігріву 1 кмоля метану та 1 кмоля водяної пари в конверторі до температури конверсії визначалась як:

$$q_{під} = M_{CH_4} c_p^{CH_4} (t_k - t_p^{ВІХ}) + M_{H_2O} (i_{t_k} - i_p^{ВІХ}) \quad (4.7)$$

Розподіл теплоти, виробленої реактором, між конвертором метану та технологічним парогенератором визначається температурою теплоносія-гелію на виході з конвертора, яка є температурою на вході в технологічний парогенератор - $t_{ПГ}^{ВХ}$. Таким чином:

$$Q_k = Q_p \cdot \frac{t_{ПГ}^{ВІХ} - t_{ПГ}^{ВХ}}{t_{ПГ}^{ВІХ} - t_{ПГ}^{ВІХ}}, \quad (4.8)$$

$$Q_{ПГ} = Q_p \cdot \frac{t_{ПГ}^{ВІХ} - t_{ПГ}^{ВХ}}{t_{ПГ}^{ВІХ} - t_{ПГ}^{ВІХ}}, \quad (4.9)$$

де Q_k , $Q_{ПГ}$ – теплові потужності конвертора та технологічного парогенератора;

$t_{ПГ}^{ВІХ}$ – температура теплоносія-гелію на виході з технологічного парогенератора.

Кількість метану (кмоль/с), конвертованого при тепловій розрахованій потужності конвертора Q_k визначалась як:

$$M_{CH_4} = \frac{Q_k}{\Delta H_T + q_{\text{під}}}, \quad (4.10)$$

де: ΔH_T – тепловий ефект хімічної реакції конверсії, який визначається як:

$$\Delta H_T = \Delta H^0 + \sum_{i=1}^n \Delta I_{\text{при}} - \sum_{i=1}^m \Delta I_{\text{вхi}}. \quad (4.11)$$

Тут:

ΔH^0 – стандартний тепловий ефект хімічної реакції конверсії;

$\Delta I_{\text{при}}, \Delta I_{\text{вхi}}$ - ентальпії відповідно продуктів реакцій та вхідних речовин при температурі хімічної реакції, відраховані від T_0 .

Відповідно до розрахованої по (4.10) кількості метану визначались кількості водяної пари (M_{H_2O}) та продуктів конверсії (M_{CO} та M_{H_2}) та розраховувались потужності регенератора $Q_{\text{рег}}$, підігрівача метану $Q_{\text{під}}^{CH_4}$ та технологічної води $Q_{\text{під}}^{H_2O}$.

Фактична кількість виробленої технологічним парогенератором пари визначалась як:

$$G_{\text{пг}}^{\text{факт}} = \frac{Q_{\text{пг}}}{i_p^{\text{вх}} - i_{t_{H_2O}}^{\text{вих}}}. \quad (4.12)$$

Ефективність використання теплоти установкою:

$$\eta = \frac{M_{H_2} \cdot Q_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot Q_{CO}^{\text{екв}}}{Q_p + M_{CH_4} \cdot Q_H^p}. \quad (4.13)$$

Ексергетична досконалість установки:

$$\eta^e = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot E_{CO}^{\text{екв}}}{E_p + M_{CH_4} \cdot E_{CH_4}^{\text{екв}}}. \quad (4.14)$$

Ексергія теплової енергії, яка виробляється реактором, визначалась по відомому виразу:

$$E_p = Q_p - T_0 \cdot \Delta S,$$

де $\Delta S = S_{t_p^{\text{вих}}} - S_{t_p^{\text{вх}}}$ – зміна ентропії теплоносія в активній зоні реактора.

В таблиці 4.1 наведені визначені параметри одноцільової АЕТУ з ВТГР тепловою потужністю $Q_p = 600$ МВт.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків одноцільової АЕТУ з конверсією природного газу

Показник	Значення	Показник	Значення
1	2	3	4
Теплова потужність реактора, МВт	600	Температура парогазової суміші на виході з регенератора, °C	750
Температура гелію на виході з реактора, °C	950	Теплова потужність регенератора, МВт	8.63
Температура гелію на вході в реактор, °C	350	Температура продуктів конверсії на виході з регенератора, °C	625
Температура гелію на виході з теплообмінник промконтур , °C	900	Теплова потужність підігрівача метану, МВт	11.52
Температура гелію на виході з конвертора, °C	770	Температура метану на виході з підігрівача, °C	560
Температура гелію на виході з технологічного парогенератора	300	Температура продуктів конверсії на виході з підігрівача метану, °C	392
Тиск гелію на виході з реактора, МПа	5.0	Теплова потужність підігрівача технологічної води, МВт	8.54
Тиск гелію на виході з теплообмінник промконтур, МПа	5.5	Температура технологічної води на виході з підігрівача, °C	212
Температура процесу конверсії метану, °C	800	Тепловий ефект конверсії метану (ΔH_T), кДж/моль	216.54
Тиск процесу конверсії метану, МПа	2.0	Кількість теплоти для підігріву метану та водяної пари в конверторі до температури конверсії ($q_{\text{під}}$), кДж/моль	4.08
Теплова потужність конвертора, МВт	130		
Теплова потужність парогенератора, МВт	470	Необхідна кількість водяної пари для конверсії, кг/с	10.01
1	2	3	4
Температура та тиск пари на виході з технологічного парогенератора, °C /МПа	560/2.0	Теплова потужність, необхідна для генерації технологічної пари, МВт	35,32
Ексергія теплової енергії, виробленої реактором, МВт	421.8	Надлишок теплоти, виробленої технологічним парогенератором, МВт	394.68

В таблиці 4.2 наведено кількість витрачених установкою метану та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ.

Таблиця 4.2 - Кількість витрачених установкою метану та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ

Показник	Значення
Кількість спожитого метану, кмоль/с	0.5892
Кількість витраченої водяної пари, кмоль/с	0.5892
Кількість виробленого синтез-газу, кмоль/с , у тому числі : водню , кмоль/с оксиду вуглецю, кмоль/с	2.3568 1.7676 0.5892
Ефективність використання теплоти установкою (η)	0.5547
Показник ексергетичної досконалості (η^e)	0.6221

На рис 4.2 наведена залежність показників енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ від температури гелію на виході з конвертора.

4.1.2 Двоцільова АЕТУ з конверсією природного газу та виробленням електроенергії

На рисунку 4.2 наведена розрахункова технологічна схема двоцільової установки, призначеної для конверсії природного газу та вироблення електроенергії.

Двоцільова енерготехнологічна установка складається з технологічної та енергетичної частини.

Для визначення кількості виробленої продукції та показників енергетичної ефективності установки були прийняті слідуєчі вхідні параметри. Теплова потужність ВТГР - 600 МВт, температура гелію на виході з реактора - 950 °С , тиск гелію на вході в реактор 5.0 МПа.

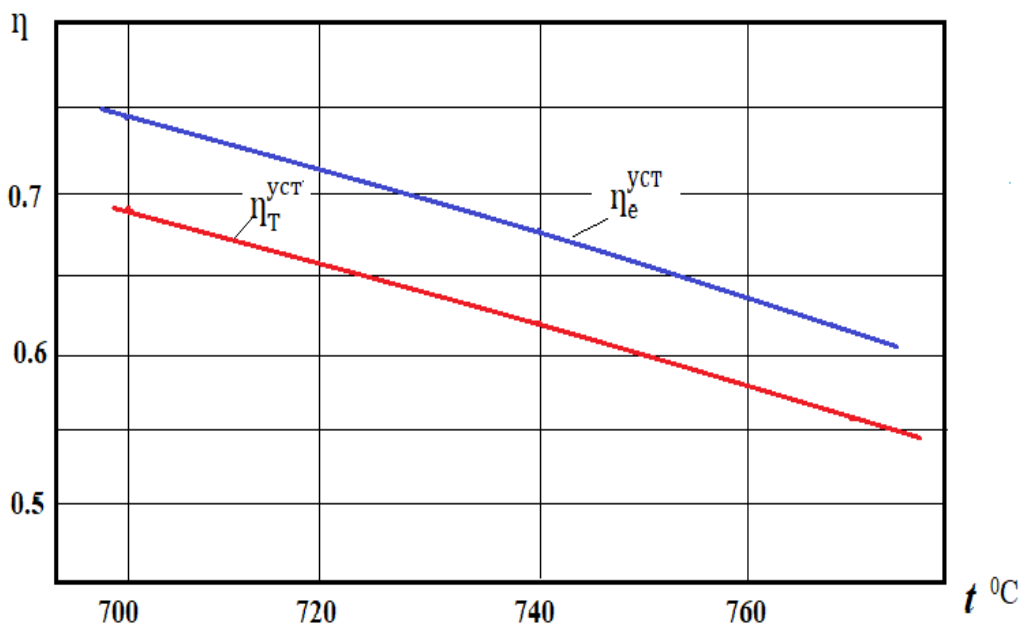


Рисунок 4.2 - Залежність показників енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ від температури гелію на виході з конвертора

Температура гелію перед газодувкою реактора - 350 °С. Температура гелію на виході з теплообмінника проміжного контуру – 900 °С, тиск гелію у промконтурі – 5.5 МПа, температура гелію перед газодувкою промконтуру – 300 °С.

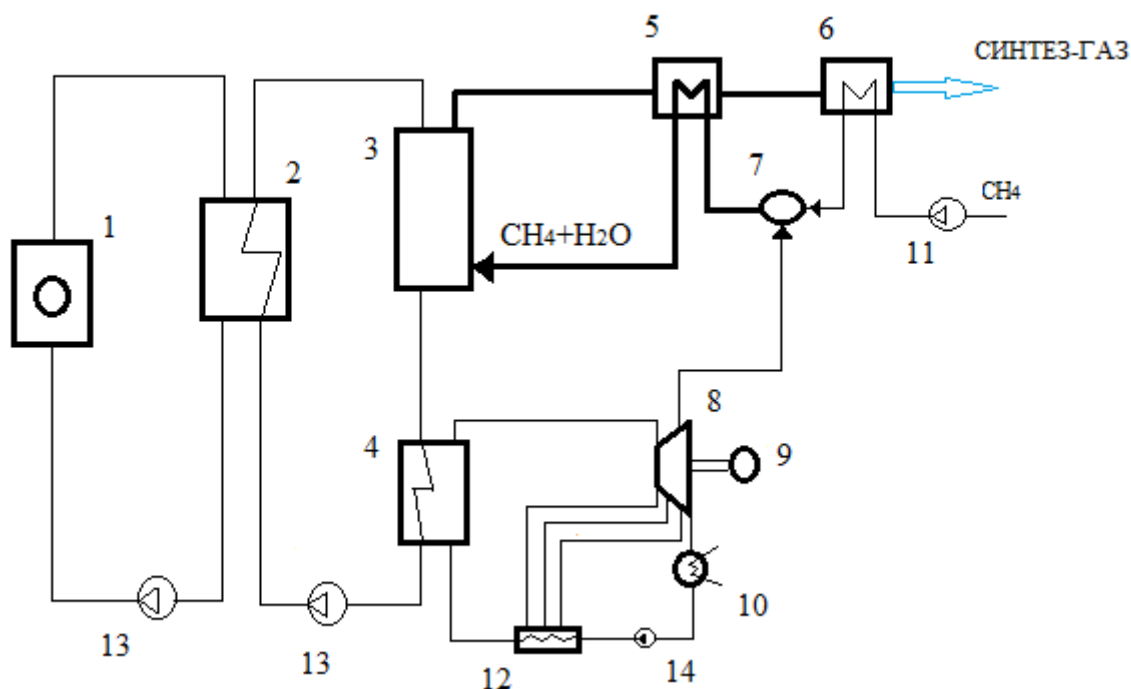
Важливим параметром, який визначає для двоцільових установок розподіл енергії ВТГР між технологічною та енергетичною частинами є температура гелію на виході з конвертора. Значення цієї температури залежить від температури основного технологічного процесу та температури вхідних технологічних агентів на виході з регенератора 5.

Методика розрахунку технологічної схеми

Тепловий розрахунок регенератора з визначенням температури продуктів конверсії (синтез-газу) на виході з регенератора проводились по (4.1) та (4.2).

Тепловий розрахунок підігрівача метану 6 з визначенням температури продуктів конверсії на виході з підігрівача проводились по (4.3) та (4.4).

Кількість теплоти, необхідна для підігріву метану та водяної пари в конверторі до температури конверсії визначалася по (4.7).



1- ЯР; 2- ТПК; 3 – конвертор CH_4 ; 4 – ПГ; 5- регенератор; 6 - підігрівач CH_4 ; 7- змішувач водяної пари та метану; 8– ПТ; 9- електрогенератор; 10 – КТ; 11 –компресор; 12 – РС ПТУ; 13 - газодувки; 14 – КН.

Рисунок 4.2 - Розрахункова технологічна схема двоцільової АЕТУ, призначеної для конверсії природного газу та вироблення електроенергії

Розподіл теплоти, виробленої реактором, між конвертором метану - Q_K та парогенератором - $Q_{ПГ}$ визначається температурою теплоносія-гелію на виході з конвертора , яка є температурою на вході в парогенератор - $t_{ПГ}^{ВХ}$. Розрахунок потужності конвертора та парогенератора проводився по (4.8) та (4.9).

Кількість конвертованого установкою метану (кмоль/с) визначалась по (4.10) з урахуванням (4.11).

Відповідно до розрахованої по (4.10) кількості метану визначались кількості водяної пари (M_{H_2O}) та продуктів конверсії (склад синтез-газу) - M_{CO} та M_{H_2} .

В енергетичній частині використовувались параметри та показники парової турбіни ТЕС К-800-240 з температурою гострої пари 560°C .

Електрична потужність турбіни (нетто) :

$$N_e^H = Q_{\text{ПГ}} \eta_T - \Delta N_T, \quad (4.14)$$

де η_T - ККД турбоустановки.

Зниження електричної потужності турбіни за рахунок технологічного відбору :

$$\Delta N_T = G^{\text{техн.доб}} (i_{\text{парі}}^{\text{техн}} - i_{\text{вих}}) \eta_{oi}, \quad (4.15)$$

де $i_{\text{вих}}$ - ентальпія пари на виході з турбіни,

η_{oi} - внутрішній відносний ККД турбіни.

Теплова потужність технологічного відбору:

$$Q_{\text{доб}} = G^{\text{техн.доб}} (i_{\text{парі}}^{\text{техн}} - i_k), \quad (4.16)$$

де i_k - ентальпія конденсату пари.

Енергетична ефективність АЕТУ визначалась показниками ефективності використання теплоти та ексергетичної досконалості для всієї установки та її технологічної частини.

Показники використання теплоти:

$$\eta_T^{\text{уст}} = \frac{M_{H_2} \cdot Q_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot Q_{CO}^{\text{екв}} + N_e^H}{Q_p + M_{CH_4} \cdot Q_H^p}, \quad (4.17)$$

$$\eta_T^{\text{техн}} = \frac{M_{H_2} \cdot Q_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot Q_{CO}^{\text{екв}}}{Q_k + M_{CH_4} \cdot Q_H^p + Q_{\text{доб}}}. \quad (4.18)$$

Показники ексергетичної досконалості:

$$\eta_e^{\text{уст}} = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot E_{CO}^{\text{екв}} + N_e^H}{E_p + M_{CH_4} \cdot E_{CH_4}^{\text{екв}}}, \quad (4.19)$$

$$\eta_e^{\text{техн}} = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot E_{CO}^{\text{екв}}}{E_k + M_{CH_4} \cdot E_{CH_4}^{\text{екв}} + E_{\text{доб}}}. \quad (4.20)$$

Ексергія реактора E_p , конвертора E_k та відбору пари на конверсію $E_{\text{доб}}$ визначалась як:

$$E_i = Q_i - T_0 \cdot \Delta S,$$

де ΔS – зміна ентропії у відповідному пристрої або процесі.

В таблиці 4.3 наведено результати розрахунку двоцільової установки з конверсією природного газу та виробленням електроенергії. Значення вхідних параметрів наведені на початку підрозділу.

Таблиця 4.3 - Результати розрахунку двоцільової установки з конверсією природного газу та виробленням електроенергії

Показник	Значення	Показник	Значення
Температура гелію на виході з конвертора, $^{\circ}\text{C}$	770	Теплова потужність підігрівача метану, МВт	11.61
Температура процесу конверсії метану, $^{\circ}\text{C}$	800	Температура метану на виході з підігрівача, $^{\circ}\text{C}$	450
Тиск процесу конверсії метану, МПа	2.0	Температура продуктів конверсії на виході з підігрівача метану, $^{\circ}\text{C}$	340
Теплова потужність конвертора, МВт	130	Тепловий ефект конверсії метану (ΔH_T), кДж/моль	216.54
Теплова потужність парогенератора, МВт	470	Кількість теплоти для підігріву метану та водяної пари в конверторі до температури конверсії ($q_{\text{під}}$), кДж/моль	4.08
Температура та тиск пари з відбору парогенератора, $^{\circ}\text{C}$ /МПа	450/2.0	Необхідна кількість водяної пари для конверсії, кг/с	10.61
Температура парогазової суміші на виході з регенератора, $^{\circ}\text{C}$	750	Теплова потужність технологічного добору пари, МВт	34,74
Теплова потужність регенератора, МВт	13.56	Електрична потужність турбіни (нетто), МВт	188.2
Температура продуктів конверсії на виході з регенератора, $^{\circ}\text{C}$	526	Ексергія теплової енергії, виробленої реактором, МВт	421.8
Ексергія теплової енергії реактора передана в конверторі, МВт	97.6	Ексергія технологічного добору пари, МВт	13,01

В таблиці 4.4 наведено кількість витрачених установкою метану та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ.

Таблиця 4.4 - Кількість споживаних установкою метану та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ

Показник	Значення
Кількість спожитого метану, кмоль/с	0.5892
Кількість витраченої водяної пари, кмоль/с	0.5892
Кількість виробленого синтез-газу, кмоль/с , у тому числі : водню , кмоль/с оксиду вуглецю, кмоль/с	2.3568 1.7676 0.5892
Ефективність використання теплоти установкою, $\eta_T^{уст}$	0.7294
Ефективність використання теплоти в технологічній частині установки, $\eta_T^{техн}$	0,9322
Показник ексергетичної досконалості установки, $\eta_e^{уст}$	0.8335
Показник ексергетичної досконалості технологічній частині установки, $\eta_e^{техн}$	0.9543

На рисунку 4.3 показана залежність показників енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ від розподілу енергії ВТГР між технологічною та енергетичною частинами установки, якій визначається температурою теплоносія на виході з конвертора природного газу.

4.2 АЕТУ з застосуванням у якості технологічної сировини твердого органічного палива

Основні процеси газифікації вуглецю у газифікаторі описуються хімічними реакціями наведеними (1.5) – (1.7), в підрозділі 1.4 дисертаційної роботи. Однак, як відомо [16], [24], [34], [36] тверди органічні палива складаються з горючої та

негорючої маси. Також складовою частиною палив є волога. До складу горючої маси входять насамперед вуглець, а також водень, сірка у складі сполук. Негорюча маса складається з внутрішнього баласту - азоту та кисню та зовнішнього баласту – води та мінеральних негорючих речовин.

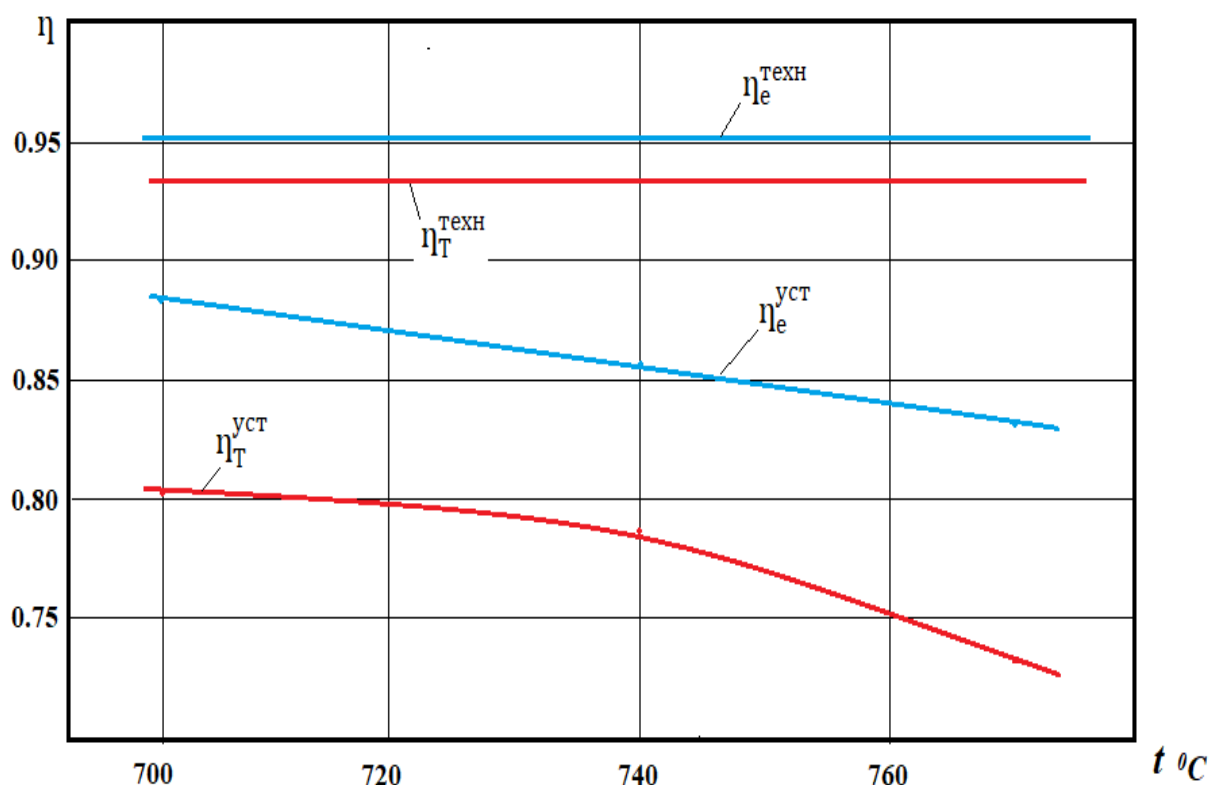


Рисунок 4.3 - Залежність показників енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ від температури теплоносія на виході з конвертора природного газу

Таким чином при газифікації твердого органічного палива склад газоподібних продуктів газифікації визначається не тільки хімічними реакціями (1.5) – (1.7), а також може включати ряд додаткових компонент, таких як H_2S , N_2 , C_mH_n та деяку кількість кисню.

Разом з тим з урахуванням того, що в схемах енерготехнологічних установок з високотемпературними реакторами газифікація твердого палива здійснюється без згорання частини технологічної сировини, при будь-якій технологічній реалізації процесу газифікації кількість вищенаведених супутніх

компонент не перевищує 2-4 % від загального об'єму продуктів газифікації для бурого та кам'яного вугілля. Тому при дослідженні параметрів та показників технологічних схем з газифікацією твердого органічного палива склад продуктів газифікації та вхідних агентів процесу газифікації визначався основними наведеними рівняннями, а також хімічними та теплофізичними властивостями вуглецю.

4.2.1 Одноцільова АЕТУ для газифікації твердого органічного палива

На рисунку 4.4 наведена розрахункова технологічна схема одноцільової енерготехнологічної установки, призначеної для пароводяної газифікації твердого органічного палива.

Вхідні параметри – температури та тиск теплоносія контуру ВТГР та проміжного теплообмінника прийняті як для технологічних схем АЕТУ з конверсією природного газу. У процесі парової газифікації вугілля використовується газифікація у киплячому шарі (метод Вінклера або його модифікації) [1],[15],[65] при тиску в газифікаторі ~ 0.1 МПа.

Методика розрахунку технологічної схеми

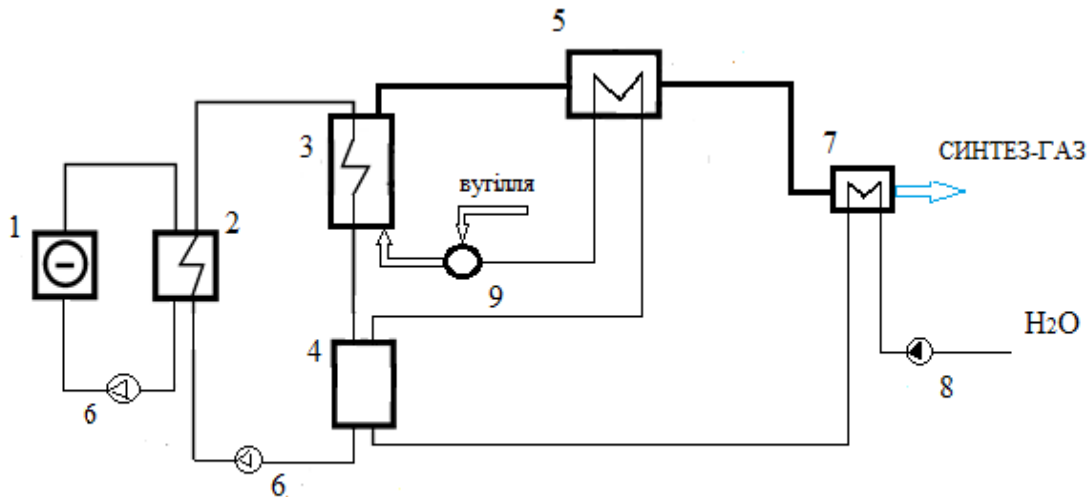
Вхідні дані по тепловій потужності ВТГР та параметрах теплоносія-гелію у контурі реактора та промконтурі приймалися такими ж, як і для АЕТУ з конверсією природного газу.

Кількість теплоти, яка передана в газифікаторі $Q_{\text{газ}}$ а технологічному парогенераторі $Q_{\text{пг}}$ визначалась по (4.8) та (4.9).

Температура продуктів газифікації на виході з регенератора-підігрівача технологічної пари $t_{\text{пр}}^{\text{вих}}$ визначалась з рівнянь енергетичного балансу:

$$Q_{\text{р-п}} = (M_{\text{CO}} c_p^{\text{CO}} + M_{\text{H}_2} c_p^{\text{H}_2}) (t_{\text{пр}}^{\text{вх}} - t_{\text{пр}}^{\text{вих}}) = M_{\text{H}_2\text{O}} (i_p^{\text{вих}} - i_p^{\text{вх}}), \quad (4.21)$$

$$t_{\text{пр}}^{\text{вих}} = t_{\text{пр}}^{\text{вх}} - \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} (i_p^{\text{вих}} - i_p^{\text{вх}})}{(M_{\text{CO}} c_p^{\text{CO}} + M_{\text{H}_2} c_p^{\text{H}_2})}, \quad (4.22)$$



1-ВТГР; 2- теплообмінник промконтур; 3 – газифікатор; 4 – парогенератор технологічної пари; 5-регенератор – підігрівач технологічної пари; 6 – гелієві газодувки; 7- підігрівач технологічної води; 8 - насос, 9 – змішувач вугілля та технологічної пари.

Рисунок 4.4 - Розрахункова технологічна схема одноцільової атомно-водневої установки для газифікації вугілля

де M_{CO} , M_{H_2} - кількість продуктів газифікації;

M_{H_2O} - кількість технологічної води;

$t_{пр}^{вх}$ – температура входу продуктів газифікації в регенератор-підігрівач;

$i_p^{вих}$, $i_p^{вх}$ - ентальпії виходу та входу водяної пари;

$C_p^{H_2}$, C_p^{CO} – ізобарні теплоємності водню та оксиду вуглецю.

З рівняння енергетичного балансу підігрівача технологічної води визначалась температура продуктів газифікації на виході з підігрівача $t_{під}^{вих}$:

$$Q_{під} = (M_{CO}C_p^{CO} + M_{H_2}C_p^{H_2})(t_{під}^{вх} - t_{під}^{вих}) = M_{H_2O}(i_{під}^{вих} - i_{під}^{вх}), \quad (4.23)$$

$$t_{під}^{вих} = t_{під}^{вх} - \frac{Q_{під}}{M_{CO}C_p^{CO} + M_{H_2}C_p^{H_2}}, \quad (4.24)$$

де $i_{під}^{вих}$, $i_{під}^{вх}$ - ентальпії технологічної води на виході та вході в підігрівач.

Кількість теплоти, необхідна для підігріву 1 кмоля вугілля та 1 кмоля водяної пари в газифікаторі до температури газифікації визначалась як:

$$q_{\text{під}} = M_C c_p^C (t_{\text{газ}} - t_c^{\text{ВХ}}) + M_{H_2O} (i_{t_{\text{газ}}} - i_p^{\text{ВХ}}), \quad (4.25)$$

де M_C – витрата вугілля ;

c_p^C – теплоємність вугілля;

$t_{\text{газ}}$, $t_c^{\text{ВХ}}$ – температури процесу газифікації та входу вугілля у змішувач вугілля та технологічної пари;

$i_{t_{\text{газ}}}$ – ентальпія технологічної пари при температурі газифікації.

Кількість вугілля (кмоль/с), газифікованого при розрахованій тепловій потужності газифікатора $Q_{\text{газ}}$ визначалась як:

$$M_C = \frac{Q_{\text{газ}}}{\Delta H_T + q_{\text{під}}} . \quad (4.26)$$

Відповідно до визначеної по (4.25) кількості вугілля перераховувались значення M_{H_2O} , M_{CO} та M_{H_2} .

Фактична кількість виробленої технологічним парогенератором пари визначалась по (4.12).

Ефективність використання теплоти установкою:

$$\eta = \frac{M_{H_2} \cdot Q_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot Q_{CO}^{\text{екв}}}{Q_p + M_C \cdot Q_H^p} . \quad (4.27)$$

Ексергетична досконалість установки:

$$\eta^e = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot E_{CO}^{\text{екв}}}{E_p + M_C \cdot E_C^{\text{екв}}} . \quad (4.28)$$

В таблиці 4.5 наведені результати розрахунків одноцільової АЕТУ з газифікацією твердого органічного палива.

В таблиці 4.6 наведено кількість спожитого установкою вугілля та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ .

Таблиця 4.5 - Результати розрахунків одноцільової АЕТУ з газифікацією твердого органічного палива

Показник	Значення	Показник	Значення
Теплова потужність реактора, МВт	600	Температура технологічної пари на виході з регенератора - підігрівача, °C	700
Температура гелію на виході з реактора, °C	950	Теплова потужність регенератора-підігрівача, МВт	0.118
Температура гелію на вході в реактор, °C	350	Температура продуктів газифікації на виході з регенератора-підігрівача, °C	682
Температура гелію на виході з теплообмінник промконтур , °C	900	Теплова потужність підігрівача технологічної води, МВт	0.127
Температура гелію на виході з газифікатора, °C	720	Температура метану на виході з підігрівача, °C	560
Температура гелію на виході з технологічного парогенератора	300	Температура продуктів газифікації на виході з підігрівача технологічної води, °C	555
Тиск гелію на виході з реактора, МПа	5.0	Залишкова кількість теплоти продуктів газифікації, МВт	31.3
Тиск гелію на виході з теплообмінник промконтур, МПа	5.5	Температура технологічної води води на виході з підігрівача, °C	100
Температура процесу газифікації, °C	800	Тепловий ефект реакції газифікації, (ΔH_T), кДж/моль	130.9
Тиск процесу газифікації, МПа	0.1	Кількість теплоти для підігріву вугілля та водяної пари в газифікаторі до температури газифікації ($q_{\text{під}}$), кДж/моль	15.0
Теплова потужність газифікатора, МВт	180	Необхідна кількість водяної пари для газифікації, кг/с	22.19
Теплова потужність технологічного парогенератора, МВт	420	Кількість водяної пари, виробленої парогенератором, кг/с	131.3
Температура та тиск пари на виході з технологічного парогенератора, °C /МПа	560/0.1	Теплова потужність, необхідна для генерації технологічної пари, МВт	35,32
Ексергія теплової енергії, виробленої реактором, МВт	421.8	Надлишок теплоти, виробленої технологічним парогенератором, МВт	385.5

Таблиця 4.6 - Кількість спожитого установкою вугілля та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ

Показник	Значення
Кількість споживаного вугілля (вуглецю) , кмоль/с	1.234
Кількість витраченої водяної пари, кмоль/с	22
Кількість виробленого синтез-газу, кмоль/с , у тому числі : водню , кмоль/с оксиду вуглецю, кмоль/с	2.468 1.234 1.234
Ефективність використання теплоти установкою (η)	0.5968
Показник ексергетичної досконалості (η^e)	0.6202

На рисунку 4.5 наведена залежність показників енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ від температури гелію на виході з газифікатора.

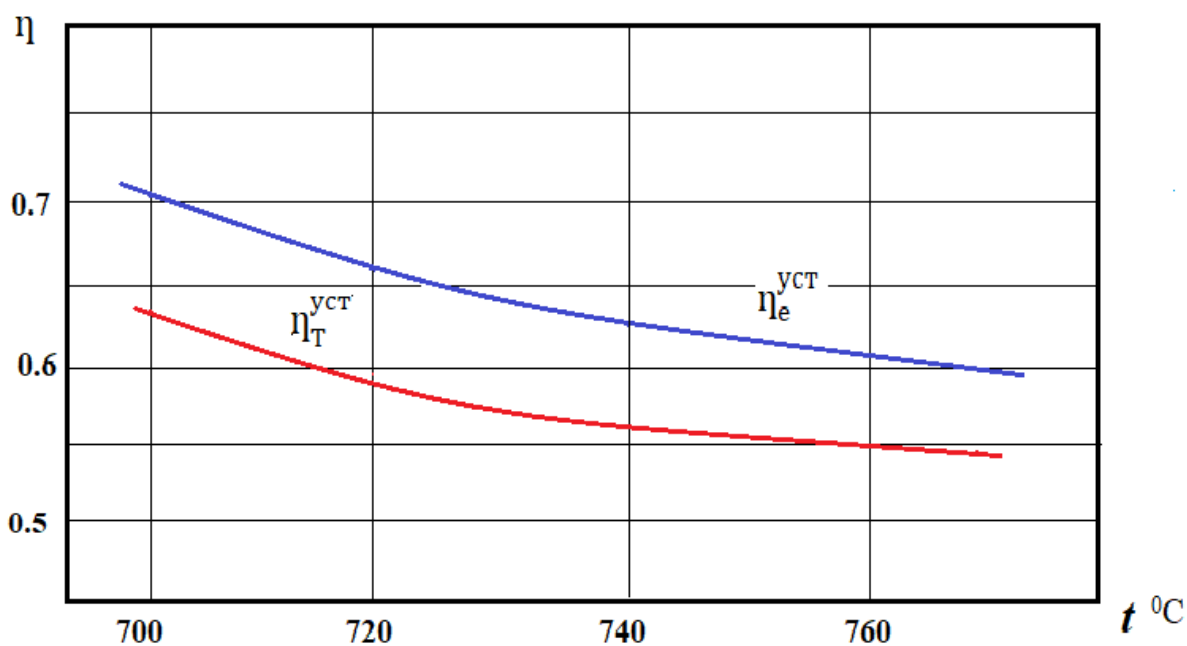
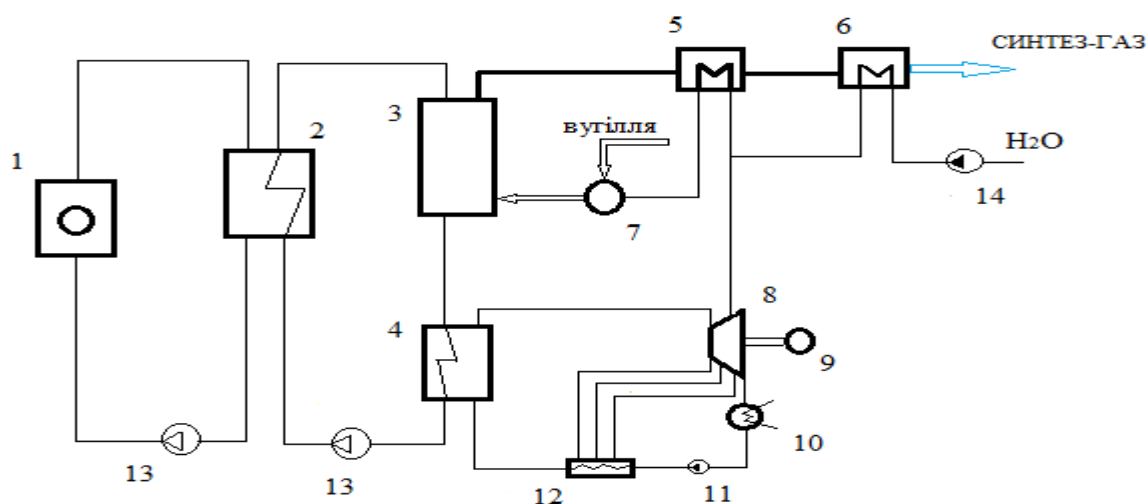


Рисунок 4.5 - Залежність показників енергетичної ефективності одноцільової АЕТУ від температури гелію на виході з газифікатора

4.2.2 Двоцільова АЕТУ з газифікацією твердого органічного палива та виробленням електроенергії

Двоцільова енерготехнологічна установка з газифікацією твердого органічного палива та виробленням електроенергії також як двоцільова АЕТУ з конверсією природного газу складається з технологічної та енергетичної частини. Для процесу парової газифікації вугілля з застосуванням високопотенційної частини теплоти ВТГР використовується газифікація у киплячому шарі (метод Вінклера або його модифікації) [1],[15],[65] при тиску в газифікаторі ~ 0.1 МПа. Технологічна пара для процесу газифікації отримується від паротурбінної установки. Але оскільки тиск при протіканні технологічних процесів конверсії та газифікації різний, то й параметри відбору пари на газифікацію вугілля відрізняються, що призводить до відмінності технологічних частин схем.

Розрахункова технологічна схема двоцільової АЕТУ, призначеної для газифікації твердого органічного палива та вироблення електроенергії представлена на рисунку 4.6.



1- ЯР; 2- ТПК; 3 – газифікатор; 4 – ПГ; 5- регенератор; 6 – підігрівач-випаровувач технологічної пари; 7- змішувач водяної пари та вугілля; 8 – ПТ; 9- електрогенератор; 10 – КТ; 11 – КН; 12 – регенеративна система паротурбінної установки; 13 - гелієві газодувки; 14 – насос технологічної води.

Рисунок 4.6 – Розрахункова технологічна схема двоцільової АЕТУ, призначеної для газифікації твердого органічного палива та вироблення електроенергії

Вхідні параметри теплоносія контуру ВТГР та проміжного теплообмінника відповідають параметрам одноцільової АЕТУ з газифікацією твердого органічного палива.

Особливістю розрахункової схеми є використання температурного потенціалу продуктів газифікації для вироблення частини технологічної пари в підігрівачі-випаровувачі 6.

Методика розрахунку технологічної схеми

З енергетичного балансу регенератора (на 1 кмоль вуглецю) по (4.21) та (4.22) визначалась температура продуктів газифікації на виході з регенератора $t_{\text{пр}}^{\text{вих}}$.

З енергетичного балансу підігрівача-випаровувача визначалась кількість додаткової технологічної пари, яку можна отримати при газифікації 1 кмоль вугілля:

$$M_{H_2O}^{\text{дод}} = \frac{(C_p^{H_2} + C_p^{CO})(t_{\text{прп}}^{\text{вих}} - t_{\text{прп}}^{\text{вих}})}{i_{H_2O}^{\text{вих}} - i_{H_2O}^{\text{вх}}}, \quad (4.29)$$

де $t_{\text{прп}}^{\text{вих}} = t_{\text{пр}}^{\text{вих}}$ – температура продуктів газифікації на вході в підігрівача-випаровувач;

$i_{H_2O}^{\text{вих}}$ - ентальпія додаткової пари на виході з підігрівача-випаровувача;

$i_{H_2O}^{\text{вх}}$ - ентальпія додаткової води на вході в підігрівач-випаровувач.

Кількість теплоти, необхідна для підігріву 1 кмоль вугілля та 1 кмоль водяної пари в газифікаторі до температури газифікації $q_{\text{під}}$ визначалась по (4.24).

Кількість вугілля M_C (кмоль/с), газифікованого при розрахованій тепловій потужності газифікатора $Q_{\text{газ}}$ визначалась по (4.25). Відповідно до визначеної кількості вугілля перераховувались значення M_{H_2O} , M_{CO} , M_{H_2} та кількість додаткової пари $M_{H_2O}^{\text{дод}}$.

Відбір пари з турбоустановки на газифікацію визначався як різниця:

$$M_{H_2O}^{\text{від}} = M_{H_2O} - M_{H_2O}^{\text{дод}}. \quad (4.30)$$

В енергетичній частині використовувались параметри та показники парової турбіни ТЕС К-800-240 з температурою гострої пари 560 °С.

Електрична потужність турбіни (нетто) N_e^H визначалась по (4.14). Зниження електричної потужності турбіни за рахунок технологічного відбору ΔN_T - по (4.15).

Теплова потужність технологічного відбору $Q_{\text{від}}$ визначалась по (4.16)

Ексергія реактора E_p , газифікатора E_k та відбору пари турбоустановки на газифікацію $E_{\text{від}}$ визначалась як:

$$E_i = Q_i - T_0 \cdot \Delta S,$$

де ΔS – зміна ентропії у відповідному пристрої або процесі.

Енергетична ефективність АЕТУ визначалась показниками ефективності використання теплоти та ексергетичної досконалості для всієї установки та її технологічної частини.

Показники використання теплоти:

$$\eta_T^{\text{уст}} = \frac{M_{H_2} \cdot Q_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot Q_{CO}^{\text{екв}} + N_e^H}{Q_p + M_C \cdot Q_H^p}, \quad (4.31)$$

$$\eta_T^{\text{техн}} = \frac{M_{H_2} \cdot Q_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot Q_{CO}^{\text{екв}}}{Q_k + M_C \cdot Q_H^p + Q_{\text{від}}}. \quad (4.32)$$

Показники ексергетичної досконалості:

$$\eta_e^{\text{уст}} = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot E_{CO}^{\text{екв}} + N_e^H}{E_p + M_C \cdot E_C^{\text{екв}}}, \quad (4.33)$$

$$\eta_e^{\text{техн}} = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}^{\text{екв}} + M_{CO} \cdot E_{CO}^{\text{екв}}}{E_k + M_C \cdot E_C^{\text{екв}} + E_{\text{від}}}. \quad (4.34)$$

В таблиці 4.7 наведено кількість спожитого установкою вугілля та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ з газифікацією твердого органічного палива.

Таблиці 4.7 - Результати розрахунку двоцільової установки з газифікацією вугілля та виробленням електроенергії

Показник	Значення	Показник	Значення
Температура гелію на виході з газифікатора, $^{\circ}\text{C}$	700	Теплова потужність підігрівача-випаровувача, МВт	17.52
Температура процесу газифікації, $^{\circ}\text{C}$	800	Температура додаткової пари на виході з підігрівача, $^{\circ}\text{C}$	150
Тиск процесу газифікації, МПа	0.1	Температура продуктів газифікації на виході з підігрівача-випаровувача, $^{\circ}\text{C}$	70
Теплова потужність газифікатора, МВт	200	Тепловий ефект газифікації (ΔH_T), кДж/моль	130.9
Теплова потужність парогенератора, МВт	400	Кількість теплоти для підігріву вугілля та водяної пари в газифікаторі до температури газифікації ($q_{\text{під}}$), кДж/моль	3.00
Температура та тиск пари з відбору парогенератора, $^{\circ}\text{C}$ /МПа	150/0.12	Необхідна кількість водяної пари для газифікації, кг/с, у тому числі: - з відбору турбіни - з підігрівача-випаровувача	28.89 20.33 8.56
Температура технологічної пари на виході з регенератора, $^{\circ}\text{C}$	750	Теплова потужність технологічного добору пари, МВт	54,73
Теплова потужність регенератора, МВт	34.07	Електрична потужність турбіни (нетто), МВт	159.85
Температура продуктів газифікації на виході з регенератора, $^{\circ}\text{C}$	319	Ексергія теплової енергії, виробленої реактором, МВт	421.8
Ексергія теплової енергії реактора передана в газифікаторі, МВт	144.0	Ексергія технологічного відбору пари, МВт	11,15

В таблиці 4.8 наведено кількість витрачених установкою метану та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ.

Таблиця 4.8 - Кількість споживаних установкою вугілля та водяної пари, виробленого синтез-газу та показники енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ

Показник	Значення
Кількість спожитого вугілля, кмоль/с	1.494
Кількість витраченої водяної пари, кмоль/с	1.494
Кількість виробленого синтез-газу, кмоль/с , у тому числі : водню , кмоль/с оксиду вуглецю, кмоль/с	2.984 1.494 1.494
Ефективність використання теплоти установкою, $\eta_T^{уст}$	0.7949
Ефективність використання теплоти в технологічній частині установки, $\eta_T^{техн}$	0,9308
Показник ексергетичної досконалості установки, $\eta_e^{уст}$	0.8763
Показник ексергетичної досконалості технологічній частині установки, $\eta_e^{техн}$	0.9754

На рис 4.7 наведена залежність показників енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ від температури гелію на виході з газифікатора.

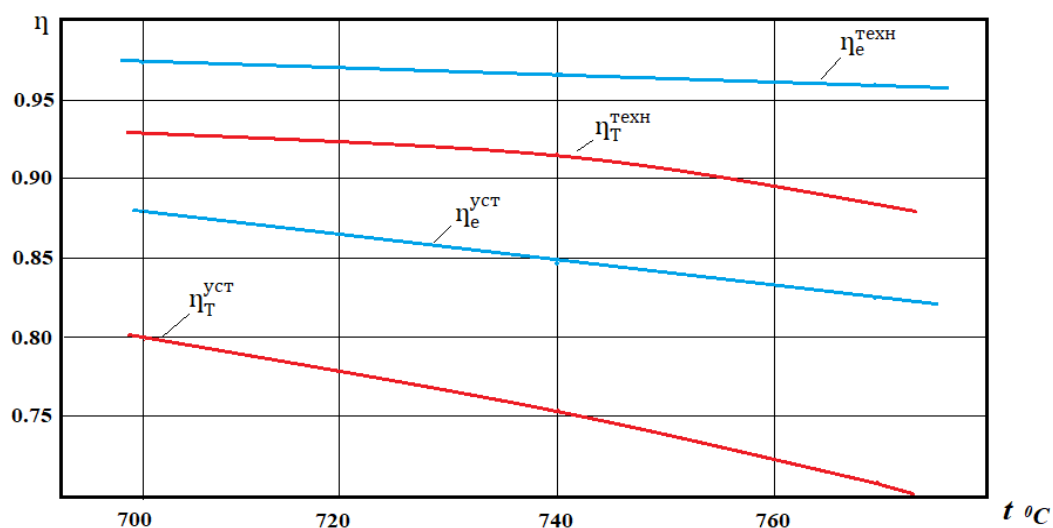


Рисунок 4.7 - Залежність показників енергетичної ефективності двоцільової АЕТУ від температури гелію на виході з газифікатора

4.3 Аналіз та співставлення енергетичної ефективності технологічних схем АЕТУ з конверсією природного газу та газифікацією твердого органічного палива

Результати дослідження енергетичної ефективності технологічних схем АЕТУ дозволяють провести їх порівняльний аналіз та визначити найкращі параметри роботи установок при використанні у якості джерела енергії високотемпературного реактора.

Отримані показники ефективності використання теплоти та ексергетичної досконалості є верхньою досяжною межею енергетичної ефективності, оскільки теплові ефекти протікання хімічних реакцій конверсії природного газу та газифікації твердого органічного палива визначались при стехіометричних співвідношеннях вхідних речовин та продуктів в хімічних реакціях, тобто з мінімально можливим сумарним тепловим ефектом, що, як відомо [41], [66] є основною ознакою оборотних процесів.

Звичайно, підсумкове стехіометричне співвідношення вхідних речовин та продуктів можна забезпечити надлишковою циркуляцією речовин, але ж це призводить до необхідності підігріву та охолодження циркулюючих речовин, додаткових витрат енергії на організацію циркуляції, теплових втрат та збільшення габаритів технологічного обладнання.

На рисунках 4.8 та 4.9 показана порівняльна ефективність використання теплоти ВТГР та ексергетична досконалість розглянутих технологічних схем.

Двоцільові АЕТУ мають значення показників ефективності використання теплоти ВТГР на рівні 0,71- 0,79 та ексергетичної досконалості на рівні 0,82-0,87 при газифікації твердого органічного палива та відповідно 0,73-0,80 та 0,83- 0,88 при конверсії природного газу в залежності від розподілу енергії ВТГР між технологічною та енергетичною частинами установки.

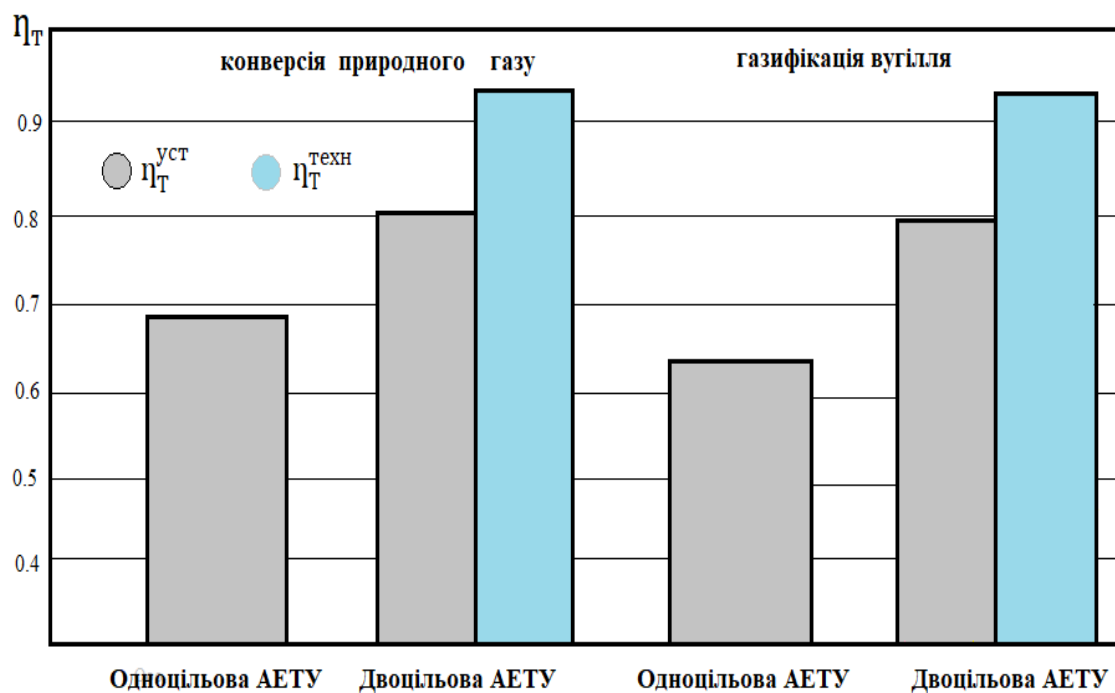


Рисунок 4.8 - Порівняльна ефективність використання теплоти ВТГР при температурі теплоносія на виході з конвертора (газифікатора) 700 °C

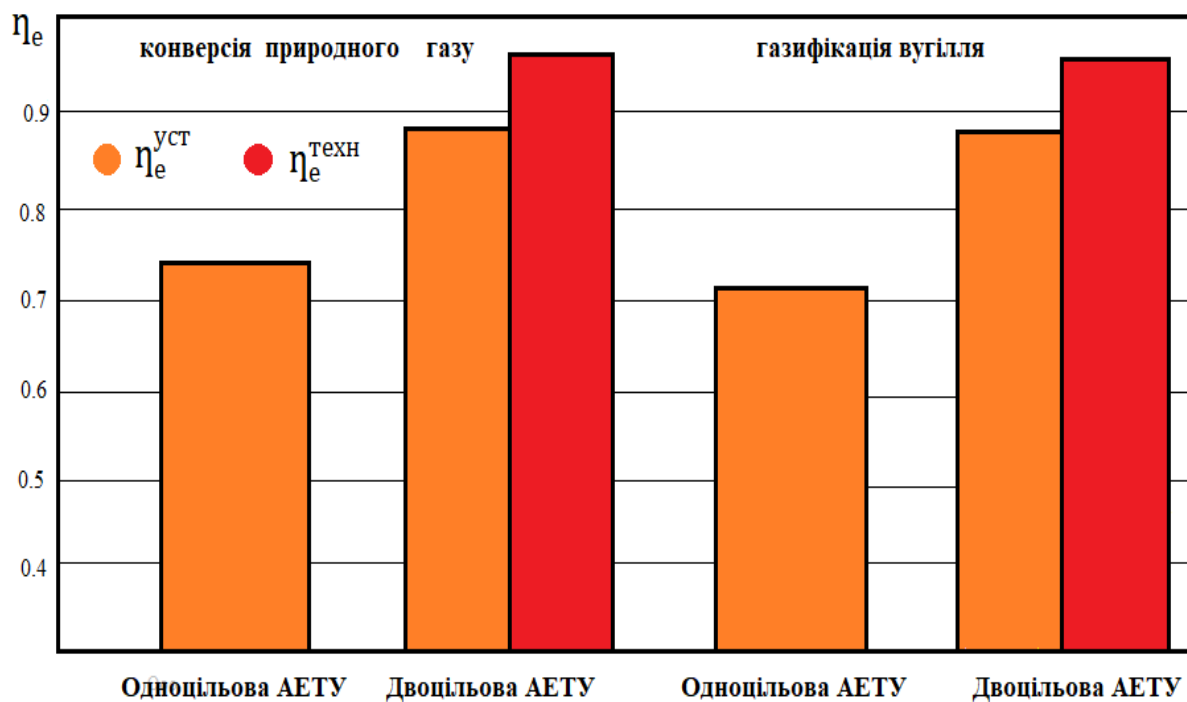


Рисунок 4.9 - Порівняльна ефективність ексергетичної досконалості АЕТУ при температурі теплоносія на виході з конвертора (газифікатора) 700 °C

Збільшення частки енергії ВТГР, переданої в технологічну частину підвищують значення показників, що зумовлено більш високою ефективністю технологічної частини установок, в яких значення показників ефективності використання теплоти знаходяться у межах 0,88- 0,93 та ексергетичної досконалості 0,95-0,97 для АЕТУ обох типів.

Порівняно більш низькі показники енергетичної ефективности для одноцільових установок, у яких значення показників ефективності використання теплоти знаходяться у межах 0,56- 0,69 та ексергетичної досконалості 0,60-0,74 для АЕТУ обох типів визначається тим, що кількість, виробленої парогенератором пари значно перевищує кількість пари, необхідну для забезпечення технологічного процесу. Надлишкова кількість пари для одноцільової АЕТУ при вибраній тепловій потужності ВТГР 600 МВт з конверсією природного газу при температурі на виході з конвертора 700 °С складає 130,3 кг/с або в енергетичному виразі 353,2 МВт. Для одноцільової установки з газифікацією вугілля при температурі на виході з конвертора 720 °С це відповідно 109,8 кг/с та 349,4 МВт. Тобто в одноцільових установках на виробництво синтез-газу витрачається менше, ніж 50% потужності ВТГР.

Застосування одноцільових АЕТУ доцільно, якщо є додаткова потреба в промисловому або побутовому теплопостачанні.

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що застосування високотемпературних газоохолоджуваних ядерних реакторів для конверсії природного газу та газифікації вугілля підвищують ефективність використання енергії ядерного реактора у порівнянні з використанням ВТГР тільки для вироблення електричної енергії у складі атомної газотурбінної установки, ККД якої не перевищує 50-52 % при однаковій з розглянутими установками температурі гелію на виході з реактора [1], [9], [53],[58],[67-68].

Висновки до розділу 4

1. Розроблені технологічні схеми енерготехнологічних установок з ВТГР для парової конверсії природного газу та газифікації вугілля, призначені як тільки для забезпечення технологічного процесу (одноцільові), так і для забезпечення технологічного процесу та вироблення електричної енергії (двоцільові).

2. Визначена енергетична ефективність застосування АЕТУ з ВТГР. Для доцільових установок показники ефективності використання теплоти ВТГР знаходяться на рівні 0,71- 0,79 та ексергетичної досконалості на рівні 0,82-0,87 при газифікації твердого органічного палива та відповідно 0,73-0,80 та 0,83- 0,88 при конверсії природного газу в залежності від розподілу енергії ВТГР між технологічною та енергетичною частинами установки. Двоцільові АЕТУ мають вищі показники ефективності у порівнянні з одноцільовими за рахунок наявності енергетичної частини, яка дає змогу повністю використовувати теплоту ВТГР.

3. Порівняно більш низькі показники ефективності для одноцільових установок пояснюється тим, що кількість пари, вироблена у парогенераторах значно перевищує кількість пари, необхідну для технологічного процесу. Застосування одноцільових АЕТУ з ВТГР стає доцільним, якщо є додаткова потреба в промисловому або побутовому теплопостачанні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та отримані автором результати для вирішення актуальної наукової проблеми застосування високотемпературних газоохолоджуваних ядерних реакторів в неелектричних технологіях, до вирішення якої у тому числі входить задача визначення енергетичної досконалості технологічних схем атомних енерготехнологічних установок, призначених для конверсії природного газу та газифікації вугілля.

У представлений до захисту роботі отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз сучасного стану розвитку високотемпературних газоохолоджуваних реакторів, їх енергетичних параметрів та можливості використання у промислових технологічних процесах конверсії газоподібного та твердого органічного палива для вироблення синтез-газу, водню, метанолу; металургійній та хімічній галузі; у нафтопереробній та нафтохімічній промисловості. Визначені принципи побудови технологічних схем атомних енерготехнологічних установок з урахуванням параметрів ВТГР та відповідних технологічних процесів.

2. Для оптимальної організації технологічних процесів та циклів одноцільових та двоцільових атомних енерготехнологічних установок з конверсією природного газу та газифікацією вугілля вперше розроблені $T-S$ – діаграми циклів АЕТУ з визначенням максимально можливої регенерації, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічних схем.

3. Визначено метод термодинамічного аналізу об'єкту дослідження - технологічних схем атомних енерготехнологічних установок з ВТГР та на його основі розроблено методику розрахунку та визначення показників використання теплоти та ексергетичної досконалості одно- та двоцільових АЕТУ з конверсією природного газу та газифікацією вугілля.

4. На принципах побудови технологічних схем АЕТУ розроблені розрахункові технологічні схеми, за допомогою яких проведено дослідження енергетичної ефективності використання ВТГР в технологіях конверсії органічних палив.

5. Вперше запропоновано отримання додаткової кількості технологічної пари для проведення процесу газифікації вугілля за рахунок теплоти продуктів газифікації.

6. Визначена енергетична ефективність застосування АЕТУ з ВТГР для вироблення синтез-газу, які використовують у якості технологічної сировини природний газ або вугілля. Для доцільових установок показники ефективності використання теплоти ВТГР знаходяться на рівні 0,71- 0,79 та ексергетичної досконалості на рівні 0,82-0,87 при газифікації твердого органічного палива та відповідно 0,73-0,80 та 0,83- 0,88 при конверсії природного газу в залежності від розподілу енергії ВТГР між технологічною та енергетичною частинами установки. Багатоцільові АЕТУ мають вищі показники енергетичної ефективності у порівнянні з одноцільовими за рахунок наявності енергетичної частини, яка дає змогу повністю використовувати теплоту ВТГР. Порівняно більш низькі показники для одноцільових установок пояснюється тим, що кількість пари, вироблена у парогенераторах значно перевищує кількість пари, необхідну для технологічного процесу. Застосування одноцільових АЕТУ з ВТГР стає доцільним, якщо є додаткова потреба в промисловому або побутовому теплопостачанні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. OECD/NEA “High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications”, 2022 https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_70442/high-temperature-gas-cooled-reactors-and-industrial-heat-applications
2. Дмитренко Н.П. Современное состояние реакторов IV поколения (ВТГР) в мире и перспективы их использования в Украине Энергетика: економіка, технології, екологія. 2012. № 1(30). С. 27-33.
3. Ziermann E., Ivens G., Abschlußbericht über den Leistungsbetrieb des AVR-Versuchskraftwerkes, Jül-3448, Forschungszentrum Jülich, Jülich (1997).
4. BARNERT, H., SINGH, Y., HOHN, H., “Nukleare Prozeßwärme: AVR-Lehren für die Zukunft”, VDI-Berichte No. 729, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1989), p. 301–315.
5. MAJUMDAR, D., “Desalination and other non-electric applications of nuclear energy”, Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors: Physics, Design and Safety (Proc. IAEA Workshop, Trieste, 2002) 233–251.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.1, IAEA, Vienna (2017).
7. Safa, H., Borgard, J.M., “Non-electric applications of fast reactors”, Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (Proc. Int. Conf. FR13, Paris, 2013), Track 8, IAEA, Vienna (2015) CD-ROM.
8. CNNC (2021), World’s first HTR-PM nuclear power plant connected to grid, 20 December 2021. https://en.cnncc.com.cn/2021-12/20/c_692103.htm (accessed 2 February 2022).
9. Advances In Small Modular Reactor Technology Developments, 2020 Edition, 343 p. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
10. . Beck, L.M. and L.F. Pincock (2011), High Temperature Gas-Cooled Reactors: Lessons Learned Applicable to the Next Generation Nuclear Plant, Idaho National Laboratory, Next Generation Nuclear Plant Project, INL/EXT-10-19329,

<https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/5026001.pdf>

11. IAEA “Industrial Applications of Nuclear Energy“, 2017 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1772_web.pdf

12. Bredimas, A. (2014), “Results of a European industrial heat market analysis as a pre-requisite to evaluating the HTR market in Europe and elsewhere”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 271, pp. 41-45, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.11.006>.

13. Корчовий Ю.П., Майстренко А.Ю. Розробка чистих енергозберігаючих технологій спалювання та газифікації твердих палив для енергетики.// Проблеми енергозбереження. - 1995. - №4-6. - С.88-91.

14. В.О.Дубковський. Рациональні процеси, цикли та схеми енергоустановок. – Одеса. Наука та техніка, 2003. - 224 с.

15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Hydrogen Production Using Nuclear Energy, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.2, IAEA, Vienna (2013).

16. Verfondern, K., “Nuclear coal gasification”, Nuclear Hydrogen Production Handbook (YAN, X.L., HINO, R., Eds), CRC Press, Boca Raton, FL (2011) 547–554.

17. JÄGER, W., WEISBRODT, I., HÖRNING, H., Nuclear process heat applications for the modular HTR, Nucl. Eng. Design 78 (1984) 137–145.

18. CANDELI, R., ARNDT, E., BARNERT, H., Status of the high-temperature reactor (HTR): Applications, Nucl. Eng. Design 121 (1990) 249–258.

19. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Applications for Steam and Hot Water Supply, IAEA-TECDOC-615, IAEA, Vienna (1991).

20. Jianguo Xu, Gilbert F. Froment, “Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics”, AIChE Journal, Volume 35, Issue 1, January 1989, Pages 88-96.

21. Ghoneim, S. A., El-Salamony, R. A., & El- Temtamy, S. A. (2016). Review on innovative catalytic reforming of natural gas to syngas. World Journal of Engineering and Technology, 4(01), 116.

22. Oyama S. T., Hacıoğlu, P., Gu, Y., & Lee, D. (2012). Dry reforming of methane has no future for hydrogen production: Comparison with steam reforming at high pressure in standard and membrane reactors. *International journal of hydrogen energy*, 37(13), 10444- 10450.
23. Yan, X., Kasahara, S., Tachibana, Y., Kunitomi, K., Study of a nuclear energy supplied steelmaking system for near-term application, *Energy* 39 (2012) 154–165 .
24. Зітте Ст, Франке Ф.Х. Поєднання газифікації бурого вугілля та відновлення заліза // Чорні метали. - 1979. - №11. - С. 3-8.
25. Pakhare D., & Spivey, J. (2014). A review of dry (CO₂) reforming of methane over noble metal catalysts. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7813-7837.
25. Pakhare D., & Spivey, J. (2014). A review of dry (CO₂) reforming of methane over noble metal catalysts. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7813-7837.
26. Hydrogen production using nuclear energy. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2013. IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807 ; no. NP-T-4.2.
27. Kugeler, K., et al., “Technical and safety aspects of processes of hydrogen production using nuclear energy”, *Proc. Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants ICAPP’05*, Seoul (2005) paper 5729.
28. Kugeler, K., et al., The pebble-bed High Temperature Reactor as a source of nuclear process heat, Volume 4: System considerations on nuclear-heated steam reformers, Report Jül-1116-RG, Research Center Jülich (1974).
29. Peters W. Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiete der Kohletechnik, *Technische Mitteilungen* 71 (1978), 358–364.
30. Franck H.-G., Knop A., Kohleveredlung an der Schwelle der 80er Jahre, *Die Naturwissenschaften* 67 (1980) 421–430
31. Schmieder H., Henrich E., Dinjus E., Wasserstoffgewinnung durch Wasserspaltung mit Biomasse und Kohle, Report FZKA 6556, Research Center Karlsruhe (2000).

32. Reutler, H., Lohnert, G.H., Advantages of going modular in HTRs, Nucl. Eng. Design 78 (1984) 129–136
33. Minchener, A.J., Coal gasification for advanced power generation, Fuel 84 (2005) 2222–2235.
34. Kirchhoff, R., Van Heek, K.H., Jüntgen, H., Peters W., Operation of a semi-technical pilot plant for nuclear aided steam gasification of coal, Nuclear Engineering and Design 78 (1984) 233–239.
35. Fröhling W., Neef H.J., “Synthetisches Naturgas aus Kohle und Hochtemperatur-Reaktorwärme“, KFA Jahresbericht 1976/77, Research Center Jülich (1977) 15–24.
36. Jüntgen H., Van Heek K.H., Gasification of coal with steam using heat from HTRs, Nuclear Engineering and Design 34 (1975) 59–63.
37. Van Heek K.H., Jüntgen H., Peters W., Wasserdampfvergasung von Kohle mit Hilfe von Prozeßwärme aus Hochtemperatur-Kernreaktoren, Atomkernenergie/Kerntechnik 40 (1982) 225–246.
38. Kasahara, S., Y. Inagaki and M. Ogawa (2014), “Process flow sheet evaluation of a nuclear hydrogen steelmaking plant applying very high temperature reactors for efficient steel production with less CO₂ emissions”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 271, pp. 11-19, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.11.002>.
39. Карапет'янц М.Х. Хімічна термодинаміка. -М. : Хімія, 1975. - 583 с.
40. Справочник азотчика. Том 1. – М.: Химия, 1987.- 512 с.
41. Дубковський В.О. Рациональні процеси та цикли атомних енерготехнологічних установок. Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування та технічні науки. №36(103), квітень 1998. –с.12-15.
42. Технічна система [Електронний ресурс]. <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
43. Technological systems [Електронний ресурс]. <http://technology.tki.org.nz/Technology-in-the-NZC/Technological-knowledge/Technological-systems>.
44. Ексергетичні розрахунки технічних систем: Справ. посібник/Бродянський В.М., Верхівкер Г.П., Карчев Я.Я. та ін. За ред.

Долінського О.О., Бродяньського В.М., АН УРСР, Ін-т технічної теплофізики. - Київ: Наук. Думка, 1991. - 360 с. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973. – 226 с.

45. Горшков А.С. Техніко – економічні показники теплових електростанцій. - М.: Енергія, 1974. - 240 с.

46. Рижкін В.Я. Теплові електричні станції. Підручник для вузів за редакцією Гіршфельда В. Я. - 3-тє вид., Перероб. та дод. - М; Вища школа, 1987. - 328 с.

47. Соколов Є.Я. Теплофікація та теплові мережі. Підручник для вузів. - 7-е вид. - М.: Видавництво МЕІ, 2001. - 472 с.

48. Гохштейн Д.П. Сучасні методи термодинамічного аналізу енергетичних установок - М.: Енергія, 1969. - 368 с.

49. Дудовський С.В. Термодинамічний метод визначення об'єктивних показників теплової економічності ГТУ-ТЕЦ простого циклу // Промислова теплоенергетика, 2000. - Т. 22. - № 2. - С. 85-89.

50. Чепурний М.М. Ефективність роботи паротурбінних і газотурбінних теплоелектроцентралей. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2008, №2. – С. 36-40.

51. Андрющенко О. І. Про показники досконалості проєктованих та ефективності експлуатації діючих ПТУ-ТЕЦ // Изв. вузів . Енергетика. - 2001. - № 4. - С. 78-85.

52. Кисельов Г.П., Астахов Н.Л. Про теплову ефективність теплоелектроцентралей // Енергетик. - 2006. - № 3. - С. 19-22.

53. Дубковський В., Добронос Є., Арсірій В. Визначення оптимальних умов організації технологічних циклів енерготехнологічних установок з ВТГР. Ядерна та радіаційна безпека. Вип.3(99),2023, с.63-66.
[https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).06).

54. Рант З. Ексергія - новий термін для позначення "технічної працездатності" / / Питання термодинамічного аналізу (ексергетичний метод) - М.: Світ, 1965. - С. 11-14.

55. Шаргут Я. Межі можливого застосування поняття ексергія// Енергія та ексергія/Пер. з ним. Н.В.Калініна; За ред. В.М.Бродяньського. - М: Мир, 1968. - С.176-185.

56. Шаргут Я. Теплоенергетика в металургії /Пер. с польск. Я.П. Петраковського.- М.: Металургіздат, 1976.-152 с.

57. Рант З. Ексергетичні характеристики процесів горіння// Ексергія та енергія/Пер. з ним. Н.В.Калініна; за ред. В.М.Бродяньського.- М.: Мир, 1968.- С.38-43.

58. Дубковський В., Сегеда В., Добронос Є. Використання високотемпературних ядерних реакторів для енерготехнології. Ядерна та радіаційна безпека. Вип.2(102),2024, с.68-73.
[https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2\(102\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2(102).07).

59. Степанов В.С. Аналіз енергетичної досконалості технологічних процесів. - Наука, 1984. - 273 с.

60. Гохштейн Д.П. Ентропійний метод розрахунку ексергетичних втрат.- Держенерговидав, 1963. -111 с.

61. Дубковський В.О., Лапшов В.М. Деякі загальні властивості термодинамічних процесів: Монографія. - К. : ІСДО, 1995. - 112 с.

62. Шаргут Я., Петела Р. Ексергія/Пер. з польськ. Ю.І.Батуріна та Д.Ф.Стржижовського під.ред. В.М.Бродяньського. - М.: Енергія, 1968. - 379 с.

63. Гохштейн Д.П., Лапшов В.М., Дубківський В.А. Критерії термодинамічної ефективності атомних енерготехнологічних установок Питання атомної науки та техніки. Сер.: Атомно-воднева енергетика та технологія. Вип.2 (7),1980. -С. 31-33.

64. Дубковський В.О. Енерготехнологічне використання нетрадиційних та атомних енергоустановок. Дис. на здобуття уч. степ. докт. техн. наук. ОГПУ, Одеса, 1998. - 336 с.

65. GNANAPRAGASAM, N.V., REDDY, B.V., ROSEN, M.A., Hydrogen production from coal using coal direct chemical looping and syngas chemical looping

combustion systems: Assessment of system operation and resource requirements, International Journal of Hydrogen Energy 34 (2009), p. 2606–2615.

66. GOLDSTEIN, S., BORGARD, J.M., VITART, X., Upperbound and best estimate of the efficiency of the IS cycle, International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005) 619–626.

67. Дубковський В., Сегеда В. , Добронос Є. Можливості застосування модульних високотемпературних реакторів для конверсії органічних палив. Праці Одеського політехнічного університету. Вип.2(70), 2024, с. 39-47. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.05>.

68. V.O. Dubkovsky , **E.O. Dobronos**, V.O. Segeda Use of High-Temperature Nuclear Reactors in Non-Electrical Technologies. BgNS TRANSACTIONS volume 26 number 1 (2022/23) pp. 9–14.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дубковський В., **Добронос Є.**, Арсірій В. Визначення оптимальних умов організації технологічних циклів енерготехнологічних установок з ВТГР. Ядерна та радіаційна безпека. Вип.3(99),2023, с.63-66.
[https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).06).
2. Дубковський В., Сегеда В., **Добронос Є.** Використання високотемпературних ядерних реакторів для енерготехнології. Ядерна та радіаційна безпека. Вип.2(102),2024, с.68-73.
[https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2\(102\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.2(102).07).
3. Дубковський В., Сегеда В. , **Добронос Є.** Можливості застосування модульних високотемпературних реакторів для конверсії органічних палив. Праці Одеського політехнічного університету. Вип.2(70), 2024, с. 39-47. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.05>.

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. V.O.Dubkovsky, **E.O. Dobronos**, V.O.Segeda. Use of high-temperature nuclear reactors in non-electrical technologies. /International conference nuclear energy for the people. 28 September - 1 October, 2022, Burgas, Bulgaria.
2. Дубковський В., **Добронос Є** Визначення оптимальної організації технологічних процесів енерготехнологічних установок з високотемпературними газоохолоджуваними реакторами. / 32 Міжнародна науково-практична конференція «Global Trends and Direction of Scientific Research Development» Секція «Технічні науки». 31.07-02.08.2024, Гамбург, Німеччина.
3. V.O.Dubkovsky, **E.O. Dobronos**, V.O.Segeda. Thermodynamic efficiency of nuclear energy technology plants with high-temperature gas-cooled reactors.

/International conference nuclear energy for the people. 01-04 October, 2024, Burgas, Bulgaria.

4. V.O. Dubkovsky , **E.O. Dobronos**, V.O. Segeda Use of High-Temperature Nuclear Reactors in Non-Electrical Technologies. BgNS TRANSACTIONS volume 26 number 1 (2022/23) pp. 9–14.

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Національного університету
«Одеська політехніка»
з кафедр інженерних наук

Сергій Нестеренко

14 березня 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цей акт є підтвердженням того, що результати дисертаційної роботи аспіранта Національного університету «Одеська політехніка» **Доброноса Євгена Олександровича** «Застосування високотемпературних ядерних реакторів в конверсії органічного палива» впроваджені в навчальний процес кафедри атомних електричних станцій Національного університету «Одеська політехніка», а саме:

- в методичні матеріали «Атомні електростанції ч.1» та «Термодинамічний аналіз та оптимізація АЕС» за результатами, отриманими в дисертаційній роботі внесені доповнення в частини «Термодинамічна ефективність регенеративних циклів», «Ексергетичні критерії термодинамічної досконалості АЕТУ»;
- при виконанні кваліфікаційних робіт:
 - магістра Масенкова Василя Святославовича, ст. гр. ТЯ- 1904. Тема роботи: «Визначення параметрів енерготехнологічної установки з високотемпературним реактором»;
 - магістра Антропова Сергія Сергійовича, ст. гр. ПТЯ 202/Імю. Тема роботи «Визначення показників ефективності схеми енерготехнологічної установки з модульним високотемпературним реактором».

Завідуюча кафедри АЕС

Володимир КРАВЧЕНКО