

Використання високотемпературних ядерних реакторів для енерготехнології

- **Дубковський В'ячеслав Олександрович**, д-р техн. наук, проф.
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-7104>
- **Сегеда Володимир Олегович**
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8364-6344>
- **Добронос Євген Олександрович**
Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4524-4722>

Можливість 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. Розглянуто застосування таких реакторів в атомних енерготехнологічних установках, що виробляють електричну енергію і забезпечують високопотенційною тепловою енергією процеси конверсії викопного палива – природного газу та вугілля. Визначено напрями та проблеми використання високотемпературних газоохолоджувальних ядерних реакторів у неелектричних технологіях, зокрема для виробництва водню, синтез-газів та відновлювального газу для чорної металургії. До теплотехнологічного дослідження атомних енерготехнологічних установок входить, по-перше, вибір хіміко-технологічних процесів, що реалізуються у відповідних схемах, як-от парова конверсія природного газу, газифікація твердого палива водяною парою або двоокисом вуглецю, відновлення заліза з руди, доконверсія окису вуглецю в синтез-газі та інших; по-друге, визначення зв'язків між технологічними та енергетичними характеристиками процесів; по-третє, розроблення критеріїв, що оцінюють ефективність установок та на їх основі вибір раціональних технологічних процесів, найвигідніших параметрів схем та оптимальних технологічних та енергетичних параметрів процесів, оптимальних конструктивних та габаритних характеристик обладнання. Визначено задачі теплотехнологічного дослідження атомних енерготехнологічних установок. Наведено принципові технологічні схеми атомних енерготехнологічних установок з вироблення водню паровою конверсією природного газу та з вироблення водню та електроенергії. Показано результати розрахунків наведених технологічних схем з визначенням можливої економії викопного органічного палива.

Ключові слова: високотемпературний реактор, вугілля, енерготехнологія, теплові схеми, природний газ.

© Дубковський В. О., Сегеда В. О., Добронос Є. О., 2024

Вступ

Дослідження з використання теплоти атомних реакторів у неелектричних технологіях проводяться в США, Німеччині, Японії, Китаї та інших країнах [1].

Для реалізації таких технологій потрібен температурний потенціал 700 °С – 1000 °С. Таку умову задовольняють високотемпературні газоохолоджувальні ядерні реактори (далі – ВТГР), у яких температура теплоносія (гелію) на виході може досягати від 900 °С до 1000 °С, а в деяких випадках і вище [2]–[3].

Використання ВТГР у неелектричних технологіях можливе за такими напрямками:

виробництво водню – одного з основних можливих енергоносіїв та сировинних компонентів хімічного виробництва [2], [4];

виробництво сінез-газу для потреб чорної металургії [5];

конверсія природного газу чи газифікація твердого органічного палива [6];

забезпечення енергетичних потреб у хімічній та азотній промисловості, які є великими споживачами теплової та електричної енергії та органічного палива [5] та інші.

Установки з ВТГР, що реалізують такі технології, отримали назву атомних енерготехнологічних установок (далі – АЕТУ). Тепло високого потенціалу (від 700 °C до 1000 °C) використовується для технологічних цілей – газифікації вугілля, конверсії природного газу, виробництва водню та відновлювального газу в металургії тощо, а тепло середнього потенціалу (від 350 °C до 700 °C) для вироблення електроенергії.

Постановка задачі дослідження

Можливість використання ВТГР для виробництва не тільки електричної енергії, а й для забезпечення високопотенційною тепловою енергією інших (неелектричних) технологій дозволить значно розширити застосування ядерної енергії та зменшить витрати органічних палив і, відповідно, знизить техногенне навантаження на довкілля.

Проблеми, які повинні бути вирішені під час використання ВТГР у неелектричних технологіях окрім джерела енергії – високотемпературного ядерного реактора, містять питання технології ядерного палива в таких реакторах, гідродинаміку та теплообмін в активній зоні, накопичення досвіду експлуатації. Розглядаються технологічні схеми передачі теплоти від реактора до технологічного контуру, альтернативні можливості використання теплоти високотемпературного реактора в різних технологіях, вибір вхідної технологічної сировини, аналіз структури та технологічних принципів вироблення продукції.

АЕТУ можуть бути і багатоцільовими, тобто виробляти як технологічну, так і енергетичну продукцію – електричну та теплову енергію.

Отже, в АЕТУ, як об'єкті дослідження, відбуваються нерозривно пов'язані енергетичні та технологічні процеси.

Одними з важливих проблем розроблення АЕТУ є створення теплових (технологічних) схем, вибір раціональних циклів, процесів та оптимальних параметрів, які б дозволили найбільш ефективно використовувати теплову енергію, яку виробляє ВТГР [7].

До теплотехнологічного дослідження АЕТУ входить, по-перше, вибір хіміко-технологічних процесів, що реалізуються у відповідних схемах, як-от парова конверсія природного газу, газифікація твердого палива водяною парою або двоокисом вуглецю, відновлення заліза з руди за різними схемами, доконверсія окису вуглецю в синтез-газі та інших; по-друге, визначення зв'язків між технологічними та енергетичними характеристиками процесів; по-третє, розроблення критеріїв, що оцінюють ефективність установок та на їх основі вибір раціональних технологічних процесів, найвигідніших параметрів схем і оптимальних технологічних й енергетичних параметрів процесів, а також оптимальних конструктивних та габаритних характеристик обладнання [7].

Загалом до АЕТУ входить великий клас установок, попри конкретно обране джерело теплоти і вхідної технологічної сировини [7].

Атомне джерело забезпечує тепловою енергією технологічні та енергетичні процеси: перероблення технологічної сировини (конверсія природного газу, газифікація твердого органічного палива), відновлювальні процеси (вони можуть бути різноманітними), 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. Технологічне виробництво потребує теплоти високого потенціалу – від 700 °C до 1000 °C. 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. Необхідний рівень температури цієї частини АЕТУ – від 300 °C до 700 °C. Різний потенціал, а отже, і цінність теплоти ядерного реактора, що використовується у різних частинах АЕТУ, перехід теплової енергії до хімічно пов'язаної енергії технологічних агентів, розподіл теплової потужності реактора між різними частинами АЕТУ, наявність перетворення, як енергії, так і матерії, зв'язок технологічних та енергетичних процесів і параметрів унеможлиблює використання традиційних методів дослідження, що застосовуються в енергетиці та в технологічних виробництвах.

Дослідження теплових схем багатоцільових енерготехнологічних комплексів з атомним джерелом теплоти, що випускають як енергетичну, так і неенергетичну (технологічну) продукцію, мають багато різних аспектів. Основними можна вважати такі [7]:

1) поєднання параметрів атомного джерела теплоти з параметрами енергетичних та технологічних процесів;

2) створення структури та визначення оптимального співвідношення виробленої установкою продукції;

3) раціональна організація технологічних процесів;

4) оптимізація параметрів теплових схем та процесів.

Термодинамічний, а також термoeкономічний методи аналізу дозволяють розв'язати ці завдання, як і низку інших завдань, пов'язаних з розвитком енергозберігаючих технологій, раціональним використанням сировинних та паливно-енергетичних ресурсів [7].

Технологічні схеми та параметри АЕТУ з ВТГР

Технологічні схеми АЕТУ з ВТГР загалом складаються з трьох частин:

ядерної частини, до якої входить реакторний контур;

технологічної частини, де здійснюються технологічні процеси: конверсія природного газу, реформінг вугілля, отримання відновлювального газу в чорній металургії тощо;

енергетичної частини, яка забезпечує генерацію електроенергії та вироблення теплової енергії для побутового та промислового теплопостачання.

Загальною частиною теплових схем АЕТУ є реакторний контур, який містить високотемпературний газоохолоджуваний реактор з гелієвим теплоносієм, газодувку, трубопроводи, комплекс допоміжних систем та систем безпеки. Для унеможливлення проникнення радіоактивності в енергетичну та технологічну частини АЕТУ в цих схемах зазвичай використовують проміжний контур, що містить 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 за нещільностей і розривів окремих трубок поверхні теплообмінника промконтур. На основі досвіду експлуатації ВТГР отримано основні параметри теплоносія. Температура гелію на виході з реактора становить від 950 °С до 1000 °С, тиск гелію на вході в реактор – від 5,0 МПа до 5,5 МПа. Температура гелію перед газодувкою – 350 °С. Початкова температура гелію проміжного контуру – від 900 °С до 950 °С, тиск гелію промконтур після газодувки – 5,5 МПа, температура гелію перед газодувкою промконтур – 300 °С. Технологічні процеси забезпечуються високопотенційною теплою реактора з рівнем температур від 750 °С до 950 °С. Теплота середнього потенціалу від 350 °С до 750 °С використовується для вироблення електроенергії, виробництва технологічної пари, побутового та промислового теплопостачання.

Вибір паросилової установки для енергетичної частини АЕТУ ґрунтується на забезпеченні специфічних вимог до параметрів пари за умовами роботи технологічної частини установки, а також на потенціалі теплоти ВТГР, що йде на виробництво електроенергії. Температура гелію на вході в парогенератор перебуває в межах від 700 °С до 750 °С. Необхідну кількість пари на технологічні потреби можна отримувати з конденсаційної турбіни з регульованими відборами пари або з вихлопу турбіни з протитиском.

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.

На рисунку 1 наведено схему вироблення водню паровою конверсією природного газу. Теплоносій – гелій першого контуру, нагрітий у високотемпературному реакторі через теплообмінник промконтур 2 передає тепло високотемпературному теплообміннику 4 і парогенератору 5. У високотемпературному теплообміннику технологічної частини суміш водяної пари, яка генерується в парогенераторі 4, та природного газу, що на 98 % складається з метану, подається в трубчасті контактні апарати першого ступеня конверсії метану 7 та 8, де конвертується ~ 70 % метану, а потім через рекуперативні теплообмінники 11 – на другий ступінь конверсії – шахтний конвертор метану 9, куди також додається повітря для здійснення екзотермічної реакції остаточної конверсії метану. Конвертований газ охолоджується в рекуперативних теплообмінниках 11 та охолоджувачі 10. Охолоджений конвертований газ подається в конвертор оксиду вуглецю, де здійснюється автотермічна реакція конверсії, потім у систему очистки від діоксиду вуглецю та в систему виділення водню.

На рисунку 2 наведено схему багатопільової АЕТУ, у якій виробляються водень за допомогою парової конверсії природного газу та електроенергія. Пара, яка генерується парогенератором, направляється на паротурбінну установку, у якій застосовано турбіну з протитиском.

У таблицях 1 та 2 наведено основні параметри та показники, зазначених на рисунках 1 і 2, схем АЕТУ. Метод розрахунку параметрів схем АЕТУ наведено в [7]. Розрахунки проводились для вибраної теплової потужності ВТГР 3000 МВт, температур гелію на вході та виході в реактор відповідно 350 °С та 950 °С, температурний тиск в теплообміннику проміжного контуру – 50 °С.

Температура гелію на виході з високотемпературного теплообмінника технологічної частини у схемі АЕТУ з виробництва водню (рисунку 1) визначалась з розв'язання рівнянь матеріально-енергетичних балансів парогенератора та високо-

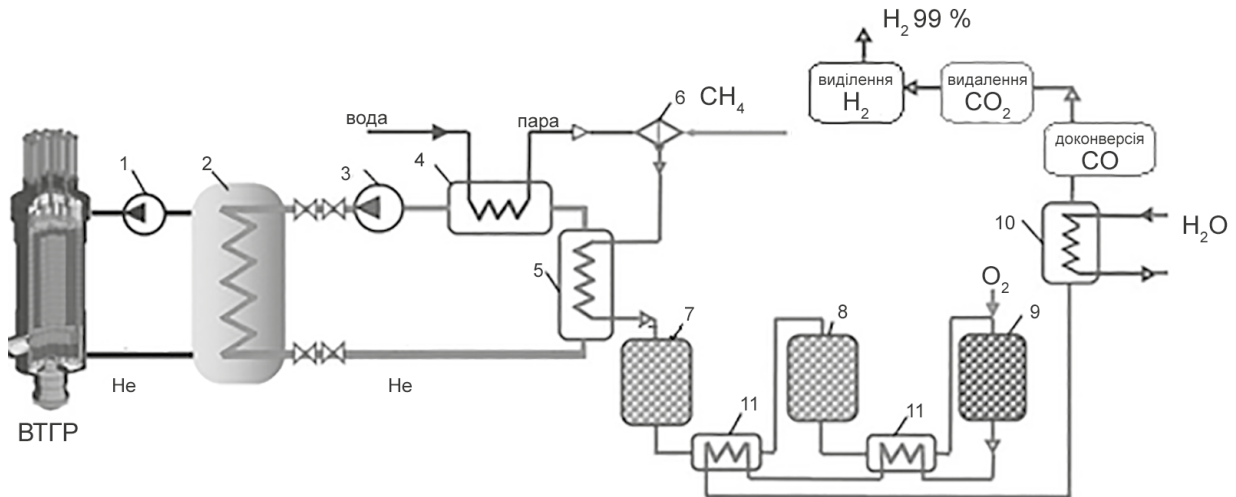


Рисунок 1 – Схема АЕТУ з ВТГР для виробництва водню, де 1,3 – газодувки; 2 – теплообмінник проміжного контуру; 4 – парогенератор; 5 – високотемпературний теплообмінник технологічної частини; 6 – змішувач водяної пари та метану; 7, 8 – трубочасті контактні апарати першого ступеня конверсії метану; 9 – шахтний конвертер метану; 10 – охолоджувач конвертованого газу; 11 – рекуперативні теплообмінники

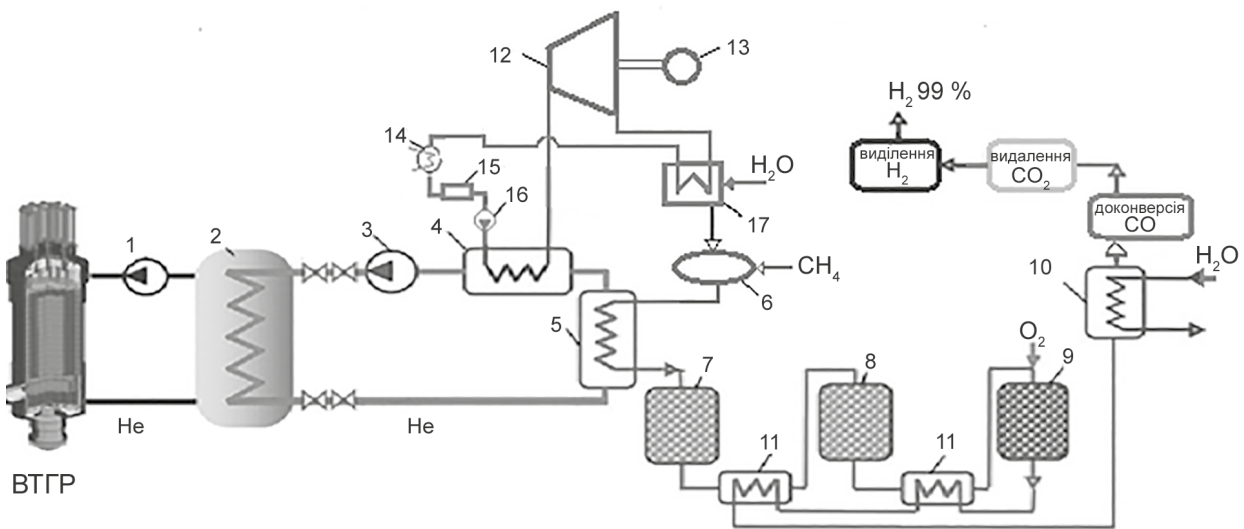


Рисунок 2 – Схема АЕТУ з ВТГР для виробництва водню та електроенергії, де 1,3 – газодувки; 2 – теплообмінник проміжного контуру; 4 – парогенератор; 5 – високотемпературний теплообмінник технологічної частини; 6 – змішувач водяної пари та метану; 7, 8 – трубочасті контактні апарати першого ступеня конверсії метану; 9 – шахтний конвертер метану; 10 – охолоджувач конвертованого газу; 11 – рекуперативні теплообмінники; 12 – парова турбіна; 13 – електрогенератор; 14 – конденсатор турбіни; 15 – регенеративна система; 16 – живильний насос; 17 – генератор технологічної пари

температурного теплообмінника технологічної частини з урахуванням стехіометричного співвідношення водяної пари та природного газу в хімічній реакції конверсії.

Використання теплоти ВТГР для конверсії природного газу, як видно з таблиць 1 і 2, призводить до зниження його витрати на 3,10 кмоль/с

або 23,3 % у схемі АЕТУ з виробництва водню та на 1,245 кмоль/с або 30 % у схемі з виробництва водню та електроенергії. Відповідно знижуються і викиди CO₂ у навколишнє середовище порівняно з традиційними технологіями, де енергетика процесів конверсії забезпечується завдяки згоранню природного газу.

Таблиця 1 – Основні параметри та показники АЕТУ з виробництва водню (схема – рисунок 1)

Параметри	Значення	Показники	Значення
Температура процесу конверсії природного газу, °С	800	Теплова потужність високотемпературного теплообмінника технологічної частини, МВт	2491
Температура гелію на виході з високотемпературного теплообмінника технологічної частини, °С	404	Теплова потужність парогенератора, МВт	509
Загальне споживання природного газу, кмоль/с, зокрема:	13,25	Вироблення водню, кмоль/с	36,90
як сировини у першій стадії конверсії, кмоль/с	8,61	Зокрема з використанням теплоти ВТГР, кмоль/с	25,83
як сировини у другій стадії конверсії, кмоль/с	3,69		
як палива для забезпечення другої стадії конверсії, кмоль/с	0,95		

Таблиця 2 – Основні параметри та показники АЕТУ з виробництва водню та електроенергії (схема – рисунок 2)

Вхідні дані	Значення	Параметр	Значення
Температура процесу конверсії природного газу, °С	800	Теплова потужність ВТГР, передана в технологічну частину, МВт	1000
Температура гелію на виході з високотемпературного теплообмінника технологічної частини, °С	700	Теплова потужність ВТГР, передана в енергетичну частину, МВт	2000
Витрата пари на конверсію, кг/с	67,14	Загальне споживання природного газу, кмоль/с, зокрема:	4,018
		як сировини у першій стадії конверсії, кмоль/с	2,610
		як сировини у другій стадії конверсії, кмоль/с	1,120
		як палива для забезпечення другої стадії конверсії, кмоль/с	0,288
Електрична потужність, МВт	745,5	Вироблення водню, кмоль/с, зокрема:	11,190
		з використанням теплоти ВТГР, кмоль/с	7,830

Висновки

1. Проаналізовано напрями використання ВТГР для забезпечення технологічних процесів: конверсії викопного палива, чорної металургії, виробництва водню, хімічної промисловості.

2. Визначено особливості АЕТУ з ВТГР та основні технологічні параметри їх роботи.

3. Наведено принципові технологічні схеми АЕТУ з ВТГР, що використовують як технологічну сировину природний газ та виробляють як продукцію енергетичного виду – електричну та теплову енергію, так і технологічний продукт – водень.

4. Розраховано показники роботи наведених технологічних схем АЕТУ, визначено можливу економію природного газу для виробництва водню під час застосування ВТГР.

Список використаної літератури

1. High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications. NEA No. 7629. OECD/NEA, 2022. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_70442/high-temperature-gas-cooled-reactors-and-industrial-heat-applications.
2. Hydrogen production using nuclear energy. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.2. Vienna: IAEA, 2013. 379 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1577_web.pdf.
3. Дмитренко Н. П. Современное состояние реакторов IV поколения с газовым теплоносителем (ВТГР) в мире и перспективы их использования в Украине. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2012. № 1. С. 27–33.
4. Шрайбер О. А., Дубровський В. В., Тесленко О. І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енергетики у світі. *Вчені записки НТУ ім. І.В. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32(71), № 5. С. 199–209. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>.
5. Назаров Э. К., Столяревский А. Я. Энерготехнологическое применение высокотемпературных ядерных реакторов. *Атомно-водородная энергетика и технология*. 1980. Вып. 3. С. 58–128.
6. Столяревский А. Я. Производство альтернативного топлива на основе ядерных энергоисточников. *Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева*. 2008. № 5. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2008-6/73.pdf>.
7. Дубковский В. А. Рациональные процессы, циклы и схемы энергоустановок. Одесса: Наука и техника, 2003. 224 с.

References

1. High-temperature gas-cooled reactors and industrial heat applications. NEA No. 7629. OECD/NEA, 2022. Retrieved from: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_70442/high-temperature-gas-cooled-reactors-and-industrial-heat-applications.
2. Hydrogen production using nuclear energy. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-4.2. Vienna, IAEA, 2013, 379 p. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1577_web.pdf.
3. Dmytrenko, N. (2012). The present day state of generation IV reactors with gas coolant (HTGR) in the world and aspects of using them for Ukraine. *Energy: Economics, Technology and Ecology*, 1, 27–33.
4. Shraiber, O., Dubrovskiy V., Teslenko, O. Current state and prospects of hydrogen energy development in the world. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical sciences*, 32(71), 5, 199–209. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>.
5. Nazarov, E., Stoliarevskiy, A. (1980). Energy and technological application of high-temperature nuclear reactors. *Nuclear-Hydrogen Energy and Technology*, Moscow, 3, 58–128.
6. Stoliarevskiy, A. (2008). Production of alternative fuel based on nuclear energy sources. *Mendeleev Chemistry Journal*, 5. <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2008-6/73.pdf>.

7. Dubkovskiy, V. (2003). Rational processes, cycles and diagrams of power facilities. *Science and Technology*, Odesa, 224 p.

Use of High-Temperature Nuclear Reactors for Energy Technology

V. Dubkovskiy, V. Szegeda, Ye. Dobronos

Odesa Polytechnic National University,
Odesa, Ukraine

The possibility of using high-temperature gas-cooled nuclear reactors (HTGR) for the production of not only electrical energy, but also for providing high-potential thermal energy for other (non-electric) technologies will allow to significantly expand the use of nuclear energy and reduce the consumption of organic fuels and, accordingly, reduce the technology-related burden on the environment. The article examines the possibilities of using HTGR in nuclear power technological installations (NPTI), which produce both electrical energy and provide high-potential thermal energy for the conversion processes of fossil fuels – natural gas and coal; production of hydrogen, synthetic gases and reducing gas for ferrous metallurgy. The areas and issues of using HTGR in non-electrical technologies have been determined. The thermal and technological research of NPTI includes, firstly, the selection of chemical and technological processes implemented in relevant schemes, such as steam conversion of natural gas, gasification of solid fuel with water vapor or carbon dioxide, recovery of iron from ore according to various schemes, pre-conversion of carbon monoxide into synthesis – gases and others; secondly, the determination of connections between technological and energy characteristics of the processes; thirdly, the development of criteria that assess the efficiency of installations and, based on them, the selection of rational technological processes, the most profitable parameters of the schemes and optimal technological and energy parameters of the processes; optimal design and overall characteristics of the equipment. The tasks of NPTI thermal and technological research have been defined. The principal technological diagram of NPTI for the production of hydrogen by steam conversion of natural gas and for the production of hydrogen and electricity has been presented. The calculation results for the above technological diagrams have been presented with determining the possible saving of fossil organic fuel.

Keywords: high-temperature reactor, energy technology, thermal circuits, natural gas, coal.

Отримано 16.02.2024