

**ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО ЕНЕРГОБЛОКУ З
ГЕЛІЄВОЮ ГАЗОВОЮ ТУРБИНОЮ НА ККД УСТАНОВКИ В
КОМБІНОВАНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ**

Т.В. Доник, кандидат технічних наук

Інститут технічної теплофізики НАН України

e-mail: doniktv@ukr.net

О. О. Сафронова, студентка

Національний Технічний Університет України

«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: olenachugunova@yandex.ua

А. А. Філатов, студент

Національний Технічний Університет України

«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: artfil_94<@mail.ru

Анотація. *Проведено дослідження термодинамічного циклу модульного ядерного енергоблоку з тепловою потужністю реактора 250 МВт в комбінованому режимі вироблення електроенергії і комунального теплопостачання. Проведено оцінку впливу ефективності елементів установки на її електричний ККД і значення електричної та теплової потужності.*

Ключові слова: *модульний ядерний енергоблок, гелієвий реактор, газова турбіна, цикл Брайтона, компресор, комбінований режим роботи*

У час постійного зростання цін на паливні ресурси і скорочення їх запасів одним із шляхів вирішення енергетичних проблем людства є активний розвиток ядерної енергетики. На зміну працюючих у багатьох країнах світу реакторів

другого і третього покоління розробляють четверте покоління, яке характеризується підвищеними характеристиками ефективності та безпеки. У зв'язку з екологічними і економічними вимогами, які посилюються з кожним роком, з усіх розроблюваних схем особливу увагу слід приділити концепції ВТГР - високотемпературного газоохолоджувального реактора, в якому як теплоносієм використовується гелій [4, 6]. Принциповими особливостями енергоблоків з ВТГР є: висока ефективність виробництва електроенергії (ККД близько 50 %); можливість використання високо потенційного тепла в нових технологічних процесах; підвищена безпека, обумовлена принципом самозахисності і неможливості плавлення активної зони при важких аваріях; ефективне використання ядерного палива і можливість реалізації різних варіантів паливних циклів; зниження теплового і радіаційного впливу на навколишнє середовище; можливість утилізації скидної теплоти в комбінованому режимі вироблення електроенергії і комунального теплопостачання.

Концепція високотемпературного газоохолоджувального реактора лягла в основу міжнародного проекту «ГТ-МГР» - «Газова турбіна - модульний гелієвий реактор», в якій для перетворення теплової енергії нагрітого гелію в механічну роботу і після в електроенергію використовується газотурбінна установка. Такі енергоблоки можуть працювати як автономно, так і в складі великих електростанцій. Для України як регіональні станції виробництва електроенергії найперспективнішими є енергоблоки з тепловою потужністю 200...300 МВт, які можуть також працювати в комбінованому режимі виробництва електроенергії і комунального теплопостачання. У перспективі такі відносно невеликі енергоблоки могли б організувати більш ефективну енергомережу, і, можливо, частково зменшити частку теплових електростанцій в загальному виробленні електроенергії (зараз це більше 50 %), а значить, зменшити залежність від енергоносіїв і викиди в навколишнє середовище. Тому

як об'єкт дослідження була обрана модульна ядерна енергетична установка ГТ-МГР [5] з тепловою потужністю реактора 250 МВт, побудована по одноконтурній схемі. Як теплоносієм використовується газоподібний гелій.

Мета досліджень – аналіз термодинамічного циклу модульного ядерного енергоблоку з тепловою потужністю реактора 250 МВт у комбінованому режимі вироблення електроенергії і комунального теплопостачання, проведення оцінки впливу ефективності елементів установки на її електричний ККД і величини електричної та теплової потужності.

Матеріали та методика досліджень. Енергетична установка ГТ-МГР тепловою потужністю 250 МВт (рис. 1) складається з двох з'єднаних блоків: модульного гелієвого реактора (МГР) і блоку перетворення енергії - газотурбінної установки (БПЕ-ГТУ). Блок перетворення енергії, в свою чергу, складається з компресорів низького і високого тиску, газової турбіни, що знаходиться на одному валу з компресорами, регенератора, попереднього і проміжного теплообмінників і генератора, що приводиться в дію турбіною. Ця установка працює по складному замкнутому циклу Брайтона з регенерацією теплоти і проміжним охолодженням в компресорі, в якості робочого тіла використовується гелій.

Блок перетворення енергії може працювати в двох режимах - базовому режимі вироблення електроенергії і комбінованому, що включає в себе вироблення електроенергії і використання скидної теплоти для комунального теплопостачання. У базовому режимі енергоблок працює так: спочатку гелій стискається в компресорі низького тиску (КНТ), охолоджується в проміжному теплообміннику і після цього стискається в компресорі високого тиску. Стиснутий таким чином гелій надходить в регенератор, де частково підігрівається вже відпрацьованим в турбіні гарячим гелієм. Далі попередньо підігрітий гелій за допомогою насосів прокачується через активну зону реактора, нагрівається до 750 °С і надходить в турбіну, де розширюється і

робить корисну роботу. Після неї гелій знову йде в регенератор і попередній теплообмінник, де охолоджується і знову надходить в КНТ, таким чином, замикаючи цикл.

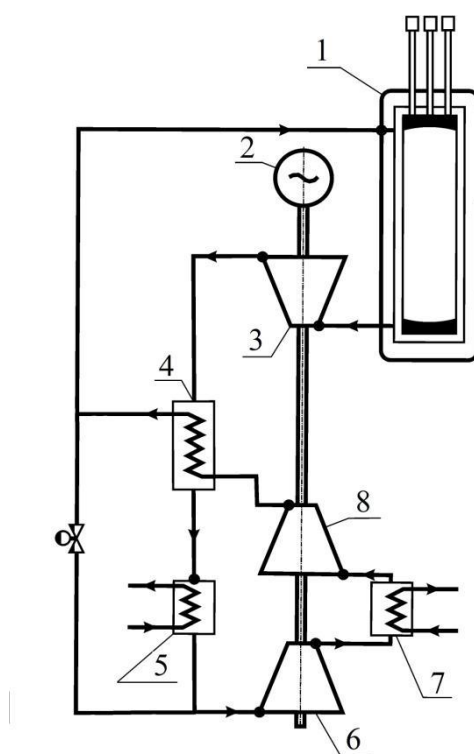


Рис. 1. Схема ГТ-МГР:

1 – реактор; 2 – генератор; 3 – турбіна; 4 – регенератор; 5 – попередній теплообмінник; 6 – компресор низького тиску; 7 – проміжний теплообмінник; 8 – компресор високого тиску

Робота установки в комбінованому режимі відрізняється від базового тим, що теплота, яка скидається при охолодженні теплоносія, не віддається в градирнях в повітря, а утилізується для потреб комунального теплопостачання. Згідно зі стандартами якості води [2, 3] в тепломережі, її температура у споживача повинна становити 65 - 75 °С, а на виході з водогрійного котла (в даному випадку в трубопроводі від теплообмінників) – 130 - 150 °С. Такі значення температури забезпечуються за рахунок зменшення витрат і підвищення тиску в контурі охолоджуючої води БПЕ.

Ефективність розглянутого термодинамічного циклу характеризується електричним ККД ГТУ, який є відношенням електричної потужності циклу $N_{\text{ел}}$ до теплової потужності реактора Q_p , а також значеннями величин електричної і теплової потужності установки $N_{\text{ел}}$ та $Q_{\text{т}}$.

Електрична потужність енергоблоку залежить від витрати гелію $G_{\text{г}}$, кг/с, значення роботи циклу $l_{\text{ц}}$, Дж, і коефіцієнта ефективності роботи електрогенератора $\eta_{\text{г}}$, рівного 0,987.

Величина вироблюваної теплової потужності в комбінованому режимі роботи установки залежить від абсолютних величин потужності попереднього і проміжного теплообмінників і значень коефіцієнтів їх ефективності. Для проведення дослідження ефективності роботи енергоблоку з параметрами нижче розрахункових, основними параметрами, що впливають одночасно на всі три досліджуваних величини, були обрані значення ККД турбіни і компресорів високого і низького тиску.

Результати досліджень. У цій роботі використовувалася математична модель складного циклу ГТУ, яка включає в себе послідовний розрахунок параметрів циклу для комбінованого режиму роботи енергоблоку. Ця модель була побудована і протестована на основі порівняння з наявними в літературі даними про гелієвий реактор МГР-100 ГТ електричною потужністю 100 МВт [1, 5].

Основні розрахункові дослідження виконані для циклу ГТУ модульного гелієвого реактора з тепловою потужністю 250 МВт. Вихідні дані для розрахунку циклу були обрані на основі аналізу наявних в літературі даних по ККД елементів ГТУ і ефективності теплообмінників, що відповідають максимально досягнутому технологічному рівню в сучасному газотурбобудуванні. У розрахунках використовувалися такі значення теплофізичних властивостей гелію: питома теплоємність при постійному тиску

$C_p = 5195$ Дж/кг·К, питома теплоємність при постійному об'ємі $C_v = 3117$ Дж/кг·К, показник адіабати $k=1,6667$.

Для розрахунку були прийняті такі значення параметрів циклу: ступінь регенерації і температурний коефіцієнт проміжного охолодження - 0,493 і 1,038 відповідно, ККД турбіни $\eta_m = 0,93$, ККД компресора високого тиску $\eta_{КВТ} = 0,85$, а ККД компресора низького тиску $\eta_{КНТ} = 0,875$.

Результати розрахунків циклу для комбінованого режиму роботи ГТУ представлені в таблиці, а розраховані термодинамічні діаграми показані на рис. 2.

Результати розрахунків циклу для комбінованого режиму роботи ГТУ

Параметр	Комбінований режим
Потрібна витрата гелію, кг/с	160,41
Ступінь підвищення тиску в КНТ	1,465
Ступінь підвищення тиску в КВТ	1,427
Ступінь зниження тиску в турбіні	1,78
Потрібна потужність регенератора, МВт	123,7
Потрібна потужність попереднього теплообмінника, МВт	132,74
Потрібна потужність проміжного теплообмінника, МВт	65,99
Корисна електрична потужність ГТУ, МВт	69,66
Корисна теплова потужність ГТУ, МВт	182,13
Електричний ККД циклу, %	27,7

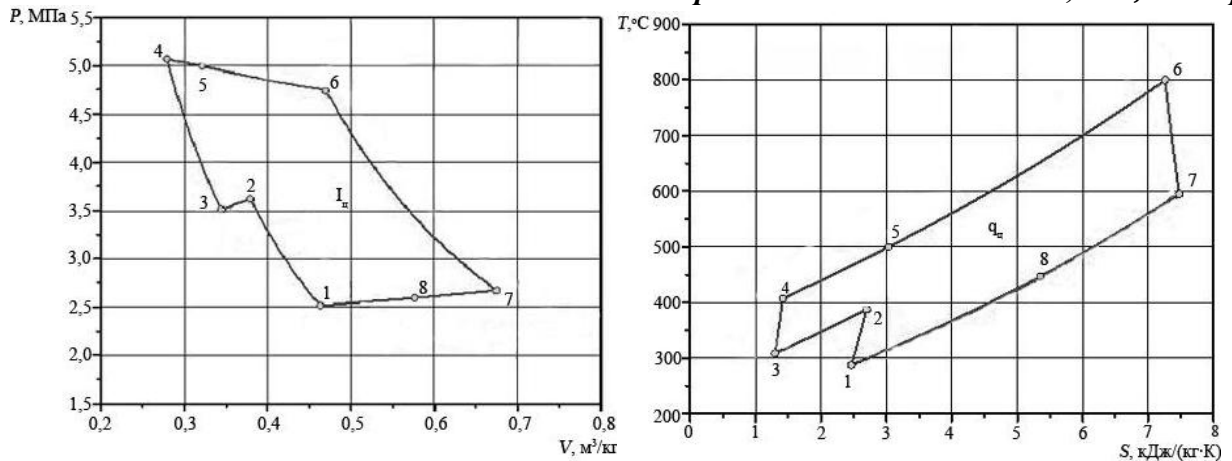


Рис.2. P-V та T-S діаграми термодинамічного циклу модульного енергоблоку з реактором потужністю 250 МВт

З отриманих результатів випливає, що при тепловій потужності реактора 250 МВт в комбінованому режимі роботи корисна електрична потужність установки становить 69,66 МВт при електричному ККД – 27,7 %. Теплова потужність, що йде на потреби споживача, склала 182,13 МВт. Необхідні потужності теплообмінного обладнання ГТУ складають: регенератор – 123,7 МВт; попередній теплообмінник – 132,74 МВт; проміжний теплообмінник – 65,99 МВт.

Наступним етапом було дослідження впливу на загальну ефективність циклу основних елементів установки – компресорів високого і низького тиску і турбіни в широкому діапазоні зміни їх ефективності. Це пов'язано з тим, що забезпечити на практиці високу ефективність кожного елемента не завжди технічно можливо і майже завжди економічно затратно. Тому такий підхід дозволяє дати оцінку прогнозованим змінам в роботі енергоблоку в разі невідповідності реального значення ефективності елемента тим, які були використані під час розрахунків.

Аналіз впливу ефективності елементів установки на загальну ефективність циклу.

На рис. 3 представлена залежність електричного ККД енергоблоку від ефективності компресора низького тиску, ефективності компресора високого тиску і ККД турбіни. На рис. 4 зображено залежність електричної і теплової потужності установки від цих же параметрів.

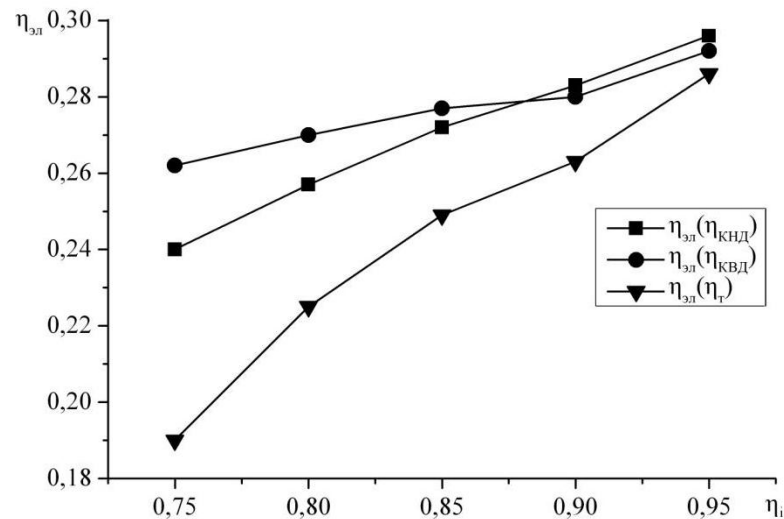


Рис. 3. Залежність електричного ККД енергоблоку від ефективності компресора низького тиску, ефективності компресора високого тиску і ККД турбіни

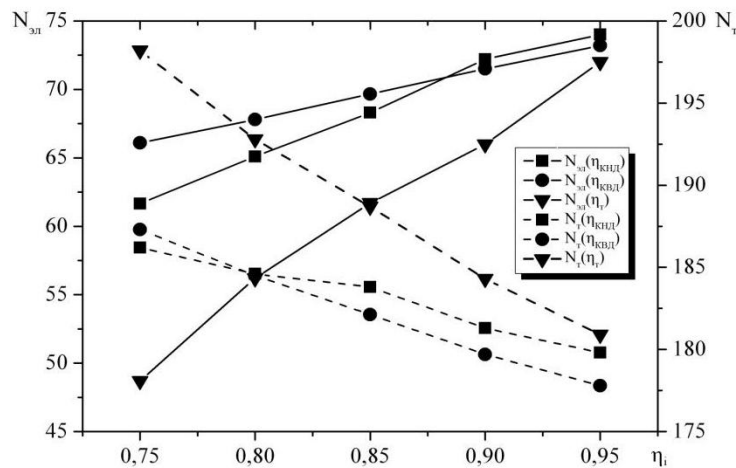


Рис.4. Залежність електричної і теплової потужності енергоблоку від ККД компресора низького тиску, компресора високого тиску і ККД турбіни

З графіків видно, що для компресора низького тиску при зниженні його ефективності від розрахункового значення 0,875 до технічно нормально досяжного 0,75 дає зниження електричного ККД енергоблоку на 3,5 %. Електрична потужність при цьому знижується на 4 МВт, а теплова збільшується з 182,13 до 185,3 МВт.

Ефективність компресора низького тиску за результатами розрахунків має більший вплив на ККД і електричну потужність циклу, ніж ККД компресора високого тиску. Зменшення його ефективності від розрахункового значення 0,85 до 0,75 знижує ККД установки і електричну потужність на 2 % і 3 МВт відповідно, а теплова потужність при цьому збільшується до 186,5 МВт.

Найбільший вплив на електричний ККД, а також електричну і теплову потужність ГТУ надає зміна величини коефіцієнта ефективності турбіни. З графіків видно, що при зниженні ККД турбіни від розрахункового значення 0,93 до 0,75 призводить до зниження електричного ККД енергоблоку на 8%, падіння електричної потужності на 21 МВт і збільшення теплової на 16 МВт.

Висновки

1. Розрахунки складного термодинамічної циклу БПЕ модульного енергоблоку з тепловою потужністю реактора 250 МВт при комбінованому режимі вироблення електроенергії і комунального теплопостачання показали, що корисна електрична потужність установки становить 69,66 МВт, електричний ККД – 27,7 %, корисна теплова потужність – 182, 13 МВт.

2. Основний вплив на ефективність циклу надає турбіна. Зниження ККД турбіни від розрахункового значення 0,93 до 0,75 призводить до зменшення електричного ККД енергоблоку на 8%, падіння електричної потужності на 21 МВт і збільшення теплової на 16 МВт.

3. Зниження ефективності компресора низького тиску сильніше впливає на електричний ККД і електричну потужність, ніж зниження ефективності

компрессора високого тиску. Для величини корисної теплової потужності спостерігається зворотна залежність.

Список літератури

1. Влияние КПД элементов блока преобразования энергии на эффективность цикла модульной ЯЭУ с газоохлаждаемым гелиевым реактором / А. А. Халатов, С. Д. Северин, Т. В. Доник // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – №16(1125).
2. Тепловые сети: СНиП 41-02-2003.
3. Стационарные газотурбинные установки / Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г., Богова И.А.[и д.р.]; под ред. Арсеньева Л.В. и Тырышкина В.Г. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. – 543с.
4. The Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) High Efficiency, Cost Competitive, Nuclear Energy for the Next Century GA-A21610 / Zgliczynski, J. B., Silady, F. A., Neylan, A. J. // General Atomics – 1994.
5. The use of high-Modular Helium Reactor for heating energy-intensive production / Столяревский А.Я., Кодочигов Н.Г., Васяев А.В., Головкин В.Ф., Ганин М.Е. // Новости теплоснабжения. – 2011. – №2. – С. 39-43.
6. Status of the GT-MHR for Electricity Production / M. P. LaBar, A. S. Shenoy, W. A. Simon and E. M. Campbell. – World Nuclear Association Annual Symposium 3-5, London, September 2003 – 15 p.

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНОГО ЭНЕРГОБЛОКА С ГЕЛИЕВОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНОЙ НА КПД УСТАНОВКИ В КОМБИНИРОВАННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Т. В. Доник, Е. О. Сафронова, А. А. Филатов

Аннотация. *Выполнено исследование термодинамического цикла модульного ядерного энергоблока с тепловой мощностью реактора 250 МВт в*

комбинированном режиме выработки электроэнергии и коммунального теплоснабжения. Проведена оценка влияния эффективности элементов установки на её электрический КПД и значения электрической и тепловой мощности.

Ключевые слова: *модульный ядерный энергоблок, гелиевый реактор, газовая турбина, цикл Брайтона, компрессор, комбинированный режим работы*

THE INFLUENCE OF ELEMENTS OF NUCLEAR POWER WITH A HELIUM GAS TURBINE ON EFFICIENCY THE INSTALLATION IN A COMBINED MODE

T. Donyk, O. Safronova, A. Philatov

Annotation. *There was one research of the thermodynamic cycle of the modular nuclear power reactors with a thermal capacity of 250 MW in combined cycle power generation and district heating. There was evaluated the influence of the efficiency of the installation elements on its electrical efficiency and value of electricity and thermal power.*

Keywords: *modular nuclear power reactors, helium reactor, gas turbine, Brayton cycle, compressor, the combined mode*