

УДК 621.039: 533.6

**О.В. КОШЕЛЬНИК**, канд. техн. наук; с.н.с. ІПМаш НАН України, Харків;  
**Н.А. ЧОРНА**, канд. техн. наук; н.с. ІПМаш НАН України, Харків

### **РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ СХЕМ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ВОДНЕВИХ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЮЮЧИХ УСТАНОВОК**

Проанализированы схемы энергопреобразующих установок с применением термосорбционного компрессора с водородной турбиной для утилизации теплоты отходящих газов, что способствует повышению эффективной мощности и КПД установок, а также снижению удельного расхода топлива на единицу мощности.

Проаналізовано схеми енергоперетворюючих установок із застосуванням термосорбційного компресора з водневою турбіною для утилізації теплоти газів, що відводяться, що сприяє підвищенню ефективної потужності й ККД установок, а також зниженню питомої витрати палива на одиницю потужності.

Diagrams of power installations of thermosorption compressor with hydrogen turbine for utilization of exhaust gases have been analyzed. The effective capacity and efficiency of plants and lower specific fuel consumption per unit of capacity has been increased.

Дослідження з водневої енергетики в промислово-розвинених країнах відносяться до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки та знаходять усе більшу фінансову підтримку з боку як державних, так і комерційних структур. Результати розробок останніх років та загострення екологічних проблем визначають як основні напрямки розвитку нового ринку водневих технологій в найближчій перспективі, так і загальні для всіх країн напрямки науково-дослідних робіт у даній області. Це, насамперед, технології виробництва, транспортування, зберігання й розподілу рідкого та стислого водню, водневі автомобілі, водневі системи енергозабезпечення на основі паливних елементів і потужні водневі енергоустановки паротурбінного циклу, металогідридні технології акумуляування й очищення водню, розробка та створення елементів водневої інфраструктури [1, 2]. В теперішній час в рамках крупних міжнародних і національних проєктів створюються основні елементи інтегрованих систем енергозабезпечення на базі водневих технологій і відновлюваних енергоресурсів. У ряді країн вже приймаються рішення про практичну реалізацію водневих систем паливо- та енергозабезпечення в близькій перспективі на регіональних рівнях. Але незважаючи на це, залишається ще невирішеним широке коло питань, пов'язаних з розробкою та експлуатацією водневого енерготехнологічного обладнання. Тому, дослідження, спрямовані на подальше удосконалення водневих технологій, є на сьогоднішній час досить актуальними.

Відомо, що в замкнених циклах енергетичних установок термодинамічна ефективність в значній мірі залежить від властивостей робочого тіла (його атомності, молекулярної маси й т.д.). Ефективність застосування той чи іншої речовини як робочого тіла у цьому випадку також залежить від значення газової сталої  $R$ , що й зумовлює використання газів з малою молекулярною масою [3]. Тому використання водню в якості робочого тіла в теплоенергетичних установках є більш переважним, ніж багатоатомних газів. Це відкриває перспективи створення вискоелективних енергоустановок з турбоперетворювачами, які мають ряд значних переваг в порівнянні з традиційними газотурбінними установками (ГТУ).

При створенні інфраструктури для водневої енергетики слід розглянути

можливість застосування металогідридної термохімічної технології при одержанні, транспортуванні, зберіганні і енерготехнологічній переробці водню. Для стиснення водню в подібних схемах можливо використовувати й традиційні механічні компресори. Але в такому випадку для перетворення теплоти в потенційну енергію стисненого газу необхідно здійснити додаткове перетворення теплоти в механічну роботу, що супроводжується значною втратою працездатності. Витрати енергії на стиск у термосорбційному компресорі практично не залежать від ступеня підвищення тиску  $\pi$ . У механічному компресорі навпроти, з ростом ступеня підвищення тиску відбувається значне зростання енергії, що витрачається на стиснення робочого тіла. У діапазоні  $\pi < 20$  має місце перевищення витрат енергії в термосорбційному компресорі, а в іншому випадку ( $20 < \pi < 100$ ) – в механічному. Але при цьому варто мати на увазі те, що ТСК використовує низькопотенційне тепло з високим ступенем термодинамічної досконалості. Тобто енергія, що підводиться у формі теплоти в процесі термохімічного стиску, перетворюється в роботу з ефективністю, рівною перетворенню теплоти в механічну енергію в циклі Карно в тому ж інтервалі температур.

Максимальну ефективність має цикл із ізотермічним розширенням робочого тіла якщо температура процесу більше температури десорбції, тобто  $T_{із} > T_{дес}$ . Крім того, для цього циклу характерним є мінімальна кількість робочого тіла, що циркулює в контурі. Це призводить до скорочення металоемності й габаритів основних елементів теплоутилізаційних установок на базі металогідридних ТСК. Схеми енергоперетворюючої установки з використанням водню в якості робочого тіла наведено на рис. 1.

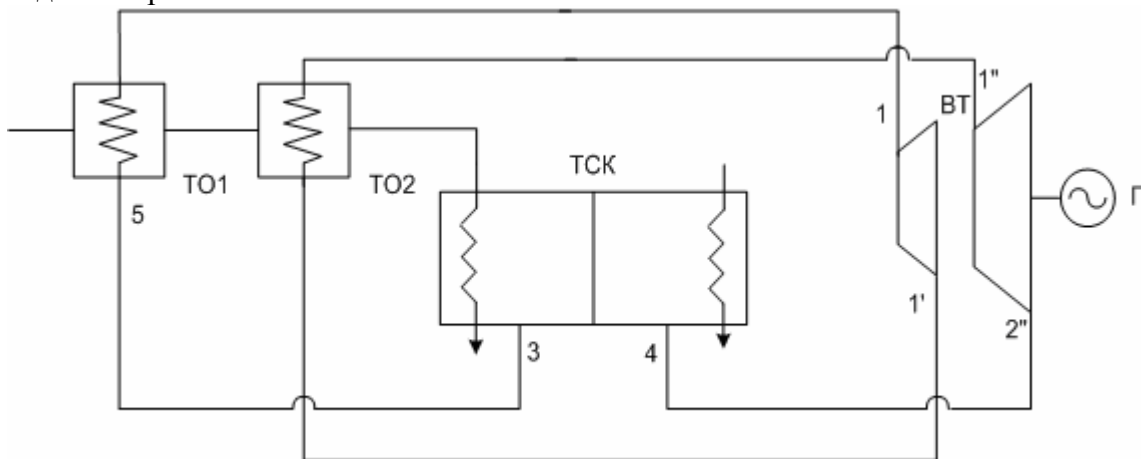


Рис. 1. Схеми утилізаційної водневої газотурбінної установки з термосорбційним компресором

Теплота димових газів в теплообмінному апараті (ТО) передається стислому водню і «гарячій» стороні термосорбційного компресора (ТСК). Процес нагрівання водню відбувається до температурного рівня  $T_1$ , а в турбогенераторі ВТ здійснюється його розширення до тиску  $P_2$ . Після цього водень низького тиску подається на «холодну» сторону компресора, де здійснюється процес сорбції водню металогідридом. Даний процес супроводжується виділенням певної кількості теплоти, яку необхідно відводити. Процес же стиску водню до значення  $P_1$  здійснюється на «гарячій» стороні ТСК.

Для визначення ефективності водневого циклу розглянемо роботу вищенаведеної схеми при наступних умовах: температура димових газів на вході – 553 К; масова витрата газів  $M_r = 70$  кг/с. Температура газів на виході складає

383 К. Кількість теплоти, що передається силовому контуру –  $Q_T = 12,7$  МВт. Розглянемо роботу термосорбційного компресора, у якому використовується гідрид  $\text{LaNi}_5\text{H}_{6,7}$ . Умови на вході в ТСК наступні:  $P_3 = 0,2$  МПа,  $T_3 = 298$  К. Теплота фазового переходу металогідриду  $q_s = 15,5$  МДж/кг. Ступінь підвищення тиску в компресорі  $P_5/P_3 = 10$ , що відповідає тиску на виході  $P_2 = 2,0$  МПа. Температура в точках 4 і 5 в області «ізотермічного плато»  $T_4 = T_5 = 371$  К, максимальна температура  $T_1 = 563$  К.

Для підвищення ефективності установки можливо використати схему із проміжним нагріванням робочого тіла при розширенні в турбіні, а також регенерацію теплоти. Схема з регенерацією теплоти припускає наявність мінімум двох теплообмінних апаратів ТО1 і ТО2. У теплообміннику водень, що частково розширився, з параметрами  $P_2$  і  $T_2$  нагрівається до температури  $T_1$ , а потім розширюється у циліндрі низького тиску турбіни. У іншому регенератору нагрівається водень, що після сорбційного компресора направляється в турбіну. Введення проміжного підігріву при тиску  $P = 0,5$  МПа для даної схеми дозволяє збільшити теоретичну потужність водневої турбіни до 2925 кВт. Із зростанням температури від 523 до 723 К значення  $\eta_c$  зменшується на 4,75 %, хоча приріст значення  $\Delta\eta_c$  у порівнянні із системою без утилізації теплоти збільшується.

Схема комбінованої ГТУ з використанням водневої турбіни та ТСК наведена на рис. 2.

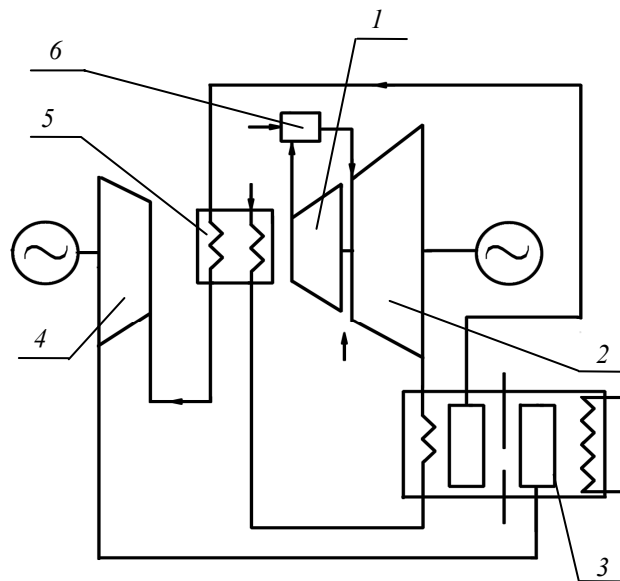


Рис. 2. Схема енергетичної установки для здійснення бінарного воднево-газотурбінного циклу:  
 1 – компресор; 2 – газова турбіна; 3 – ТСК;  
 4 – воднева турбіна; 5 – теплообмінник; 6 – камера згоряння

На рис. 3 представлено розрахункові значення ефективної потужності (суцільні криві) і ККД (штрихові криві) для комбінованої установки, що включає в себе газову і водневу турбіни з ТСК, залежно від ступеня утилізації теплоти  $\mu$  викидних газів і ступеня стиснення водню  $\pi_{\text{тск}}$  в термосорбційному компресорі. Параметри повітря після компресора і викидних газів ГТУ без регенерації наступні: температура повітря – 600 і 730 К, температура газів – 920 і 730 К відповідно.

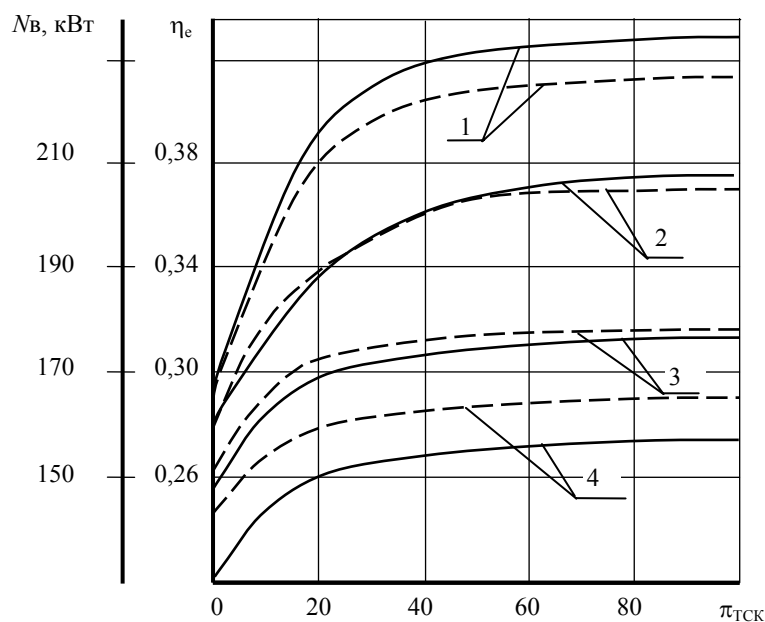


Рис. 3. Залежність техніко-економічних показників комбінованої ГТУ від ступеня стиснення водню в ТСК

Представлені результати свідчать, що утилізація теплоти відпрацьованих газів ГТУ у водневому контурі із ТСК та водневою турбіною при значеннях  $\mu = 0,75$  і  $\pi_{тск} = 30$  дозволяє підвищити ефективну потужність установок відповідно на 50 і 25 %, а ефективний ККД – на 40 і 18 %.

Основною величиною, що характеризує токсичність теплового двигуна, є контрольний параметр викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. При регенерації теплоти відпрацьованих газів ГТУ температура повітря на вході в камеру згоряння досягає 500–800 К. Це призводить до росту температури горіння й інтенсифікації процесу утворення оксидів азоту в камері згоряння. Застосування замкнутого контуру ТСК замість регенераторів теплоти відпрацьованих газів знижує температуру повітря на вході в камеру згоряння до 450–500 К, що позитивно позначається на характеристиці токсичності газів з погляду емісії оксидів азоту.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що застосування в даних схемах термосорбційного компресора з водневою турбіною для утилізації теплоти викидних газів буде сприяти істотному підвищенню ефективної потужності й ККД установок, і як наслідок зниженню питомої витрати палива на одиницю потужності. Крім того, включення водневого контуру із ТСК у схему поліпшує такий важливий показник роботи енергоперетворюючих систем, як питомий викид токсичних речовин.

**Список літератури:** 1. Шалимов, Ю.Н. Проблемы применения водорода в энергетике [Текст] / Ю.Н. Шалимов, В.И. Кудряш, А.Л. Гусев [и др.] // ISJAEE. – 2005. – № 7. – С. 21-28. 2. Соловей, В.В. Развитие водородгидридной техники и технологии [Текст] / В.В. Соловей, В.М. Кошельник, Ю.Ф. Шмалько, А.В. Кошельник // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 1. – С. 31-37. 3. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справочник: под общ. ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия, 1989. – 672 с.

© Кошельник О.В., Чорна Н.А., 2012  
Надійшла до редколегії 05.02.12