

В. О. Лесько
Д. Р. Солодкий
В. В. Нетребський

АТОМНО-ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА.

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Дослідження способів отримання водню та його застосування в атомних електричних станціях. Порівняння способів отримання водню. Розвиток атомно-водневої енергетики. Перспективи та переваги використання водневих технологій в енергетиці.

Ключові слова: водень, спосіб, електроліз, електрика.

Abstract

Research of methods of receipt of hydrogen and his application is in the nuclear power electric stations. Comparison of methods of receipt of hydrogen. Development of atomic-hydrogen energy. Prospects and advantages of the use of hydrogen technologies are in energy.

Keywords: hydrogen, method, electrolysis, electricity.

Вступ

Для отримання водню характерні великі питомі витрати енергії. У процесах з використанням викопних палив енергію отримують спалюванням цих палив - для здійснення технології програмно-методичного комплексу (ПМК) спалюється близько половини використовуваного газу. Процеси електролізу споживають в середньому 50 МВт електричної енергії на тонну водню. При реалізації термохімічних циклів потрібні температури близько 1000 К, що вимагає істотних матеріальних витрат на виробництво водню і результатом цього є віддалення перспективи широкомасштабного застосування водню в енергетиці. Змінити цю тенденцію може застосування атомної енергетики для виробництва водню. Ядерна технологія має практично необмежені ресурси дешевої енергії для виробництва водню, до того ж при виробництві електрики, тепла і водню ядерна енергетика чинить найменшу дію на довкілля порівняно з використанням вуглецевих ресурсів[1].

Результати дослідження

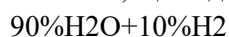
Використовуючи вироблену ядерною енергією електрику, можна, застосувавши електроліз, розділити воду на водень і кисень. Якщо електроліз робити за допомогою високотемпературної пари, то отримана з ядерного реактора тепла енергія може замінити частину електрики, і чиста ефективність (відношення зробленого водню високого нагріву (ННВ) до витраченої електроенергії) збільшиться. При термохімічних циклах розділення води можна отримувати усю вхідну енергію від виробленого в ядерних реакторах тепла, використовуючи комплексні, рухомі тепловою енергією хімічні реакції розкладання води на кисень і водень, і давати ефективність ~50 %[2].

Низькотемпературний електроліз. Цей метод є повністю доведеною комерційною технологією, що забезпечує зараз 4% виробництва водню в США. Установки електролізу комерційно доступні, в них застосовуються три різні технології - уніполярні і біполярні осередки, які використовують водний розчин гідроксиду калію (лужний електроліз), і осередки з протонно-обмінними мембранами (РЕМ електроліз). У великих установках зазвичай застосовують лужну технологію. Доступні установки різної продуктивності - аж до ~ 1000 кг Н₂ в день, і для збільшення

обсягу виробництва подібні блоки можна з'єднувати паралельно. Установки великої продуктивності зазвичай працюють при тиску, близькому до атмосферного; отриманий водень потім стискається, щоб досягти тиску трубопроводу (20-30 атмосфер). Розробляються установки з високим тиском, що зробить непотрібною компресію водню[3].

Межа чистої ефективності низькотемпературних систем електролізу, які виробляють водень при трубопровідних тисках, становить $\sim 75\%$. Якщо під'єднати установку низькотемпературного електролізу до реактору LWR, що проводить електроенергію з 32% -м тепловим ККД, то чиста ефективність виробництва водню складе 24% , а для вдосконаленого реактора з 48% -й теплової ефективністю вона буде дорівнює 36% . Втрата ефективності і збільшення кап. витрат при використанні двоступеневого процесу перетворення високотемпературного тепла в електрику з подальшим використанням електрики для отримання водню - істотний негативний аспект низькотемпературного електролізу. При типових витратах на виробництво електрики і електроліз вартість одержуваного водню висока: 4-6 дол./кг або більше. Корисний для застосування в малих масштабах, цей спосіб не може конкурувати з технологією отримання водню з природного газу, де типова вартість водню дорівнює 1,00-1,50 дол./кг. Там, де доступні великі кількості електрики за дуже низькою ціною, наприклад на ГЕС, низькотемпературний електроліз цілком прийнятний. Його можна легко і швидко запускати і зупиняти, і з його допомогою можна виробляти придатний для зберігання водень[4].

Високотемпературний електроліз. У цьому методі пар з температурою $\sim 800^\circ\text{C}$ розділяється так, що водень і кисень збираються на двох електродах.



Експлуатація осередку при високих температурах зменшує кількість електрики, потрібної для виробництва водню, оскільки близько 30% енергії може вводитися в процес у вигляді тепла, а не електрики. Крім того, при температурі $800-1000^\circ\text{C}$ набагато зменшується опір руху іонів кисню через стабілізований окислом ітрію або скандію цирконієвий електроліт, і усі хімічні реакції протікають дуже швидко. Нарешті, ефективність виробництва електрики реактором, працюючим при високій температурі, значно вище (близько 45%). Комбінація цих ефектів може привести до повної ефективності водневого виробництва - $45-50\%$ [5].

Концепція атомно-водневої енергетики

Розроблена в нашій країні на початку 70-х років ХХ століття концепція широкого використання водню що виробляється з води за допомогою ядерних реакторів як енергоносія в промисловості, в енергетиці, на транспорті і в побуті дістала назву "Атомно-воднева енергетика" (АВЕ). Ядерна енергія має практично необмежені ресурси палива. При виробництві електрики, тепла і водню ядерна енергетика чинить найменшу дію на довкілля порівняно з використанням вуглецевих ресурсів [6].

Крім того, у міру збільшення вартості природних вуглеводнів, визначальної вибір технології виробництва водню, буде рости і доля альтернативних, в першу чергу, ядерних технологій у водневій енергетиці.

При спалюванні водню в чистому кисні єдиними продуктами є високопотенційне тепло і вода, а при горінні водню в повітрі утворюється істотно менша кількість забрудників повітря, чим при спалюванні мінерального палива.

Сьогодні існує три основні способи виробництва водню, не пов'язані безпосередньо з неминучими значними викидами двоокису вуглецю, і так оцінені за кілограм зробленого водню в доповіді US National Academy of Engineering:

- дія на природний газ за допомогою пари, що дозволяє зв'язувати вуглець, що міститься в нім, для подальшого зберігання, собівартість - 1,72 дол.;
- дія пари і кисню на вугільний порошок, що знову ж таки дозволяє зв'язувати вуглець - 1,45 дол.;

- електроліз води - 3,93 долл.

Перші два способи, тобто, риформінг природного газу і вугілля, вимагають для подальшого застосування водню споживання з атмосфери кисню і, тим самим, роблять атмосферне природокористування в енергетиці неминучим. Тому такі технології є екологічно неприйнятними [7].

Електролітичний водень є найбільш доступним, але дорогим продуктом. Для розкладання чистої води за кімнатних умов потрібно напругу 1,24 В. Величина напруги залежить від температури і тиску, від властивостей електроліту і інших елементів електролізера. У промислових і дослідно-промислових установках реалізований ККД електролізера ~ 70-80 %, у тому числі для електролізу під тиском. Паровий електроліз - це різновид звичайного електролізу. Частина енергії, необхідної для розщеплення води, в цьому випадку вкладається у вигляді високотемпературного тепла в нагрів пари (до 900 оС), роблячи процес ефективнішим [8].

Важливо також відмітити, що молекулярний кисень має суто біогенне походження. В результаті еволюційних динамічних процесів у біосфері Землі були сформовані певні умови (у тому числі і підтримка певної кількості молекулярного кисню в атмосфері) для саморегуляції, що називається гомеостазом, постійність яких в часі потрібно для нормального функціонування усіх живих організмів, що становлять сьгоднішню біосферу. Отже, необхідно і збалансоване виробництво рослинами атмосферного кисню і його споживання природою, тваринами і людиною.

При збільшенні здобичі і спалювання органічного палива до 20 млрд тонни умовного палива в рік, у тому числі і воднів, промислове споживання кисню з атмосфери складе приблизно 50 млрд тонн, що в сукупності з природним споживанням перевищить нижню межу його відтворення в природі. У багатьох промислово розвинених країнах ця межа давно вже пройдена [9].

Нині великотоннажне виробництво водню і водневмісних продуктів здійснюється у світі в основному шляхом парової конверсії природного газу-метану. В цьому випадку близько половини початкового газу витрачається на проведення ендотермічного процесу парової конверсії. Крім того, спалювання природного газу призводить до забруднення довкілля продуктами його згорання. З метою економії газу і зниження навантаження на довкілля була розроблена технологічна схема парової конверсії метану з підведенням тепла від високотемпературного гелієвого реактора. Ядерна технологічна частина комплексу при проведенні парової конверсії метану акумулює тепло, що отримується від високотемпературного реактора, синтез-газ транспортується до централізованого споживача тепла, де в метанаторе проводиться зворотна реакція з виділенням тепла. Це тепло передається розподіленому споживачеві у вигляді гарячої води і/або пари [10].

При використанні парової конверсії метану у поєднанні з високотемпературним газоохолоджувальним реактором (ВТГР) необхідна теплова потужність ВТГР складає з розрахунку на 5 млн тонни водню близько 6,5 ГВт. У перспективі, коли вартість природного газу підвищуватиметься, доля водню, вироблюваного з води, може бути доведена до 100 % за рахунок замикання циклу відновлення метану з проміжного продукту - метанолу, з використанням електроенергії [11].

У теплових реакторах ВТГР можуть бути застосовані як замкнуті, так і відкриті паливні цикли з використанням урану, плутонію і торія. Для майбутньої великомасштабної ядерної енергетики, коли знадобиться розширене відтворення ядерного пального, унікальні можливості відтворення надають швидкі гелієві брідери. Поєднання високотемпературних реакторів з гелієвим теплоносієм як на теплових (ВТГР), так і на швидких (БГР) нейтронах вдало вирішує завдання ядерної енергетики майбутнього, як по ресурсу палива, так і по розширенню областей використання ядерної енергії. Загальний ККД для варіанту "термохімія + ВТГР" може досягати 45-48 %, тоді як ККД варіанту з традиційними реакторами "електроліз + ЛВР" не перевищує 25 %.

Перевага термохімічних процесів обумовлена разом з вказаним вище переходом з екстенсивних поверхневих систем розкладання води на електродах до інтенсивних об'ємних процесів в хімічних реакторах. Одним з істотних обмежень великомасштабного електролізного виробництва

водню є потреба в дорогочінних металах (платина, родій, паладій) для каталізаторів, яка пропорційна потужності і, отже, поверхні електродів. Наприклад, для виробництва 5 млн тонн/рік водню необхідно створити електролізери сумарною електричною потужністю більше 30 ГВт, для їх виготовлення знадобилася б уся вироблювана сьогодні у світі платина.

Мабуть, в найближчому майбутньому методи отримання водню з використанням природного газу будуть основними.

В той же час вивчення шляхів екологічно чистого забезпечення людського суспільства, що розвивається, енергією показує, що кардинальне рішення цієї глобальної проблеми необхідно зв'язувати з розробкою і здійсненням концепції, що передбачає великомасштабне виробництво на базі атомної енергетики не лише електроенергії і тепла, але і водню і подальше його використання для різноманітних потреб людини [13].

Висновки Атомно-воднева енергетика націлена на розширення використання ядерної енергії в енергоємних галузях хімічної, металургійної, будівельної, паливної промисловості, а також на транспорті. До них можна також віднести виробництво прісної води і енергопостачання розподілених споживачів. Така енергетика збереже нафту і газ для неенергетичних виробництв і забезпечить атмосферу від шкідливих викидів продуктів згорання. Важливо, що розвиток атомно-водневої концепції сприятиме зниженню ризику поширення ядерних матеріалів, завдяки можливості постачань енергоресурсів у вигляді водню і його похідних замість ядерних реакторів і ядерних матеріалів.

Тоді концепцію атомно-водневої енергетики (АВЕ) можна визначити як "вода на вході + чиста ядерна енергія => водень => кисень = чиста енергія + вода на виході". У далекій перспективі, можливо, до кінця століття, розвиток водневий економіки може зажадати до половини потужностей ядерної енергетики, що, по одному з прогнозів, складає більше 2000 ГВт[12].

Темпи і структура розвитку ядерної енергетики повинні відстежувати ці вимоги. Становлення атомно-водневої енергетики зажадає розвитку спеціальних інноваційних технологій. Серед них - високотемпературні реактори, агрегати для ефективного виробництва водню з води, водневий паливний елемент, хіміотермічні перетворювачі. Враховуючи паливні потреби ядерної енергетики таких масштабів, необхідною умовою є впровадження реакторів-бридерів і замкнутого паливного циклу з розширеним відтворенням ядерного пального.

При освоєнні атомно-водневої енергетики мають бути вирішені проблеми водневої безпеки на усіх ланках поводження з воднем: при його виробництві, зберіганні, транспортуванні, використанні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справочник. М. : Химия, 1989.
2. Водородная энергетика. [Электронный ресурс]. Режим доступа:<http://npi.spb.ru>; <http://lepfed.narod.ru/>.
3. Электролиз, или вода вместо бензина. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.skyzone.ru/tech/meyer_h2.htm.
4. Долежалъ Н. А. Атомно-водородная энергетика / Н. А. Долежалъ [и др.]. Вып. 2, М. : Атомиздат. 1979.
5. Пономарев - Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарев-Степной // Росэнергоатом. 2004, № 4.
6. Пономарев - Степной Н. Н., Столяревский А. Я. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарев - Степной, А. Я. Столяревский // ISJAEE, 2004, № 3 (11).
7. Физическая энциклопедия. В 5 т. / главн. ред. А. М. Прохоров. М. : Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988. Чуянов В. А. Различные подходы к ядерному синтезу / В. А. Чуянов. Препринт. ИПМ им. М. В. Келдыша. РАН. Москва, 2001
8. Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез /С. Ю. Лукьянов. М., 1975.

9. Велихов Е. П., Путвинский С. В. Термоядерный реактор. Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе // Доклад от 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists.
10. Kadomtsev V. B. Tokamak plasma a complex physical system / V. B. Kadomtsev. Institute of Physics : Bristol. 1992.
11. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арци- мович. 2 изд., М., 1963.
12. Ефремов И. В. На пути к термоядерному реактору / И. В. Ефремов. М. :, 1993.
13. Зельдович Я. Б., Герштейн С. С. Успехи физических наук. Ядерные реакции в холодном водороде / Я. Б. Зельдович, С. С. Герштейн // Мезонный катализ, т. LXXI, вып. 4, 1960.

Солодкий Дмитро Русланович — студент групи 1EE-176, факультет електроенергетики та електромеханіки.

Лесько Владислав Олександрович — доцент, к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Нетребський Володимир Васильович — доцент, канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Solodkiy Dmytro R. — student of group of 1EE-176, faculty of electroenergy and electromechanics.

Lesko Vladyslav O. — Associate Professor, Ph.D., Associate Professor of power stations and systems department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Netrebskiy Volodymyr V. — Associate Professor, associate professor of department of the electric stations and systems, Vinnytsya National Technical University, Vinnytsya