

УДК 544.6.018.42

КОМБІНУВАННЯ ЕЛЕКТРО- І РАДІОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ І КИСНЮ

¹ **В. В. Соловей**, д-р техн. наук
solovey@ipmach.kharkov.ua
ORCID: 0000-0002-5444-8922

² **J. Kleperis**, Dr. Phys.
janis.kleperis@h2lv.eu
ORCID: 0000-0002-1463-902X

¹ **М. М. Зіпунніков**, канд. техн. наук
zipunnikov_n@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0579-2962

¹ Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10

² Institute of Solid State Physics,
University of Latvia
LV-1063, Latvia, Riga, Kengaraga str., 8

Показано, що підвищення ефективності процесу одержання водню може бути забезпечене шляхом інтеграції радіохімічних та електрохімічних процесів. У цьому випадку отримуваний ефект залежить не тільки від прямого радіолізу води, а й від залучення в процес електролізу енергії іонізуючого випромінювання для збудження молекул води, які піддаються електролізу, що призводить до зниження споживання електроенергії для розкладання її газових компонентів. Наведено аналіз основних факторів, що впливають на зниження електроспоживання при електролізі, і показано спорідненість спектрів радикал-іонів, що беруть участь у радіаційних та електрохімічних процесах розкладання води. У результаті радіаційного впливу починається найбільш енергоємна стадія розкладання води, пов'язана з розривом міжмолекулярних зв'язків та утворенням активних частинок, що залучаються до електрохімічного процесу. Встановлено, що утворення водню збільшується завдяки додаванню його прямого виходу при радіолізі й опосередкованого одержання при електролізі, ініційованому активаційними ефектами, зумовлених іонізованим випромінюванням. Показано, що для підвищення прямого радіолітичного виходу водню в міжелектродному просторі електролізера слід розмістити елементи, які містять нанорозмірний порошок діоксиду цирконію. Доведено також, що опромінення діоксиду цирконію, поміщеного у воду, призводить до збільшення в 4 рази виходу водню в порівнянні з варіантом опромінення чистої води. Для підвищення коефіцієнта використання енергетичного потенціалу ядерного палива на АЕС доцільно для застосування запропонованої технології використовувати енергію ТВЕлів, що розміщуються в басейнах витримки відпрацьованого ядерного палива. Це забезпечить утилізацію енергії іонізуючого випромінювання, яке в існуючих технологіях безповоротно втрачається, тому що відводиться у вигляді низькотемпературних теплових викидів у навколишнє середовище, що призводить до теплового забруднення атмосфери.

Ключові слова: водень, електроліз, відпрацьовані ТВЕли, енергія, молекули води.

Вступ

Отримання водню електролізом води є одним із найбільш освоєних у промисловості технологічних процесів [1–4]. Його основним недоліком є висока енергоємність і металомісткість обладнання, що зумовлено низькою щільністю енергії на електродах через поверхневий характер протікання електролізу. З огляду на це актуальним є пошук нових шляхів вирішення проблеми зниження витрат електроенергії на одержання водню й вдосконалення конструкції електролізного обладнання. Одним із можливих шляхів вирішення цього завдання є накладання енергетичних полів різної фізичної природи для енергетичного збудження води, що розкладається в електродних процесах. Наприклад, відомі спроби об'єднання фотолізу й електролізу для отримання водню [5]. У запропонованому матеріалі розглядається принципова можливість використання енергії іонізуючого випромінювання, що виникає в ядерних реакціях, для активації електрохімічних процесів і покращення їх енергетичних характеристик.

Теоретичні аспекти використання енергії іонізуючого випромінювання в процесах розпаду води

Причиною особливого інтересу до радіохімічних методів є можливість, що важливо, прямого перетворення енергії ядерних випромінювань на енергію, запасену у водні. Коефіцієнт корисної дії

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© В. В. Соловей, J. Kleperis, М. М. Зіпунніков, 2023

процесу радіолізу води й водних розчинів при щільності нейтронного потоку до $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ не перевищує 6%. Однак процес радіолізу становить практичний інтерес, оскільки відбувається при невисоких температурах і може бути поєднаний з іншими методами одержання водню. Підвищення виходу молекулярних продуктів радіолізу можливе за рахунок зменшення швидкості рекомбінації радикалів H^\cdot та OH^\cdot та зворотних реакцій, зменшення швидкості останніх досягається завдяки введенню в розчин речовин, здатних до окислювально-відновних реакцій, таких як солі заліза, щавлева кислота та ін.

У запропонованому варіанті дану роль відіграватимуть електромагнітні явища, що індукуються в міжелектродному просторі різницею електричних потенціалів при електролізі води. Слід зазначити, що проблема ефективного отримання товарного водню з використанням ядерних випромінювань є перспективною, але малорозробленою, оскільки донедавна дослідження фахівців у галузі атомної енергетики були спрямовані на вирішення зворотного завдання, а саме – придушення виділення водню й кисню у водних контурах атомних енергетичних і технологічних установок із метою запобігання наводненню конструкційних матеріалів або утворенню гримучої суміші водню й кисню.

Атомний реактор є джерелом тепла і випромінювання [6]. Тому, на додаток до використання теплоти для генерації електроенергії або технологічного застосування їх у хімічній та металургійній промисловостях, перспективним є використання іонізуючого випромінювання для створення радіаційно-хімічної технології одержання водню.

Цей ефект може проявитися лише в тому випадку, коли енергія іонізуючого випромінювання використовується у спосіб, відмінний від теплового (пряме призначення), а саме, одержання високореакційних компонентів для подальшої трансформації у продукти електролізу води. Із радіаційно-хімічних процесів може бути використано трохи більше 6% теплової потужності ядерного випромінювання. Однак, враховуючи величезні потужності ТВЕЛів, що вимірюються тисячами мегават, обсяг енергії, що залучається в процес отримання водню, буде достатнім для організації його великомасштабного виробництва. У зв'язку з цим використання ядерної енергії як джерела випромінювання для отримання водню розглядається деякими дослідниками як дуже перспективне для великомасштабного виробництва водню [2, 4].

Вбачається за доцільне розглянути питання об'єднання радіаційних і електрохімічних процесів, за якого іонізуюче випромінювання забезпечуватиме активацію води при електролізі, знижуючи витрати електричної енергії на цей процес.

Основною метою цієї роботи є оцінка принципової можливості використання енергії відпрацьованих ТВЕЛів для підвищення ефективності генерації водню шляхом проведення електрохімічних процесів у поєднанні з іонізуючим випромінюванням, що дозволить розглядати басейни витримки як елемент атомно-водневого енерготехнологічного комплексу, що забезпечує більш повне використання потенціалу ядерного палива.

Інтеграція радіохімічних та електрохімічних процесів при електролізі води

Підвищення ефективності процесу одержання водню може бути забезпечене шляхом інтеграції радіохімічних та електрохімічних процесів. У цьому випадку ефект можна отримати не тільки в прямому радіолізі води, а й від залучення в процес електролізу енергії іонізуючого випромінювання для збудження молекул води, які піддаються електролізу, що призводить до зниження споживання електроенергії для розкладання їх газових компонентів шляхом електролізу. У електролізерах струм обміну на електродах є важливою кінетичною характеристикою електрохімічної реакції, яка залежить від активності реагуючих іонів й енергії активації електродних процесів. Із точки зору великомасштабного виробництва водню за рахунок використання атомної енергії раціональнішим є процес високотемпературного електролізу водяної пари з одночасним накладенням фізичного впливу іонізуючого випромінювання на процес розкладання молекули води під дією електричного струму. У цьому випадку забезпечується повніше використання потенціалу ядерного палива, оскільки не тільки використовується тепловий ефект опромінення, а й залучається до технологічного процесу отримання водню радіаційна складова енергії поділу ядерного палива.

Матеріал, що знаходиться у зоні іонізаційного випромінювання, поглинає енергію трьох видів випромінювання: 1) швидких нейтронів, що виникли при розподілі, які уповільнюються й термалізуються під час зіткнень з атомами присутнього матеріалу; 2) γ -променів, які в основному утворюються

при розподілі, а також випускаються продуктами розподілу; 3) β -променів, які можуть утворитися за рахунок радіоактивності, індукованої в самому матеріалі, і від радіоактивного випромінювання, що залежить від типу реактора і змінюється від точки до точки в об'ємі реактора.

Незалежно від того, чи є початкове випромінювання проникаючими електромагнітними хвилями (γ -промені), або зарядженими частинками (β -промені), при всіх видах випромінювання агент, який впливає на воду, є той самий – електрон, що швидко рухається. Зазвичай β - й γ -промені від радіоактивних речовин мають енергії від 0,3 до 3 МеВ. Цього потенціалу достатньо для деструкції молекули води [7].

Порушення в рідкій воді може передаватися водневими зв'язками і локалізуватися, приводячи до утворення Н, ОН, H_2 і H_2O_2 [8]. Можливі два шляхи утворення збуджених молекул води: 1) при захопленні іоном H_2O^+ вибитого електрона (гіпотеза Самюеля – Маги); 2) за рахунок зіткнень повільних електронів із молекулами води, у результаті яких можуть виникнути молекули води в нерівноважному синглетному і триплетному станах у співвідношенні 1 до 3.

Опромінення приводить до розкладання води на водень і кисень й утворення перекису водню, а також вільних радикалів. Молекулярні продукти розкладання, що утворюються, називають стабільними. Вони електронейтральні на відміну від короткоживучих вільних радикалів. Хоча кисень є серед продуктів розкладання, він, мабуть, утворюється не безпосередньо з води, а в результаті дії радикалів на перекис водню. Усі випромінювання, які виникають в атомному реакторі в результаті ядерної реакції, передають свою енергію через швидкі заряджені частинки, які можна поділити на легкі і важкі (електрони або атомні іони, відповідно). У результаті утворюються молекулярні продукти реакції і цілий спектр вільних радикалів, що мають високу реакційну здатність. При цьому молекулярні продукти утворюються в істотно меншій кількості, ніж вільні радикали, що одночасно виникають й ініціюють процес розкладання води. Величину іонізаційного потенціалу води можна знайти з даних щодо іонізаційних потенціалів газоподібних кисню й водню. Він лежить у діапазоні значень від 66 до 69 еВ [9].

Для оцінки ефективності хімічних процесів, що збуджуються радіацією, використовують величину радіаційного виходу водню в процесах розкладання води – кількість молекул водню на 100 еВ енергії, що поглинається [10].

Незважаючи на те, що за пояснення хімічних реакцій в опромінених розчинах можна прийняти незалежні шляхи утворення радикальних і молекулярних продуктів, насправді обидва типи продуктів є результатом одного і того самого процесу, а різниця між важким і легким випромінюванням зумовлена різним просторовим розташуванням радикалів, що виникають. Швидкий електрон передає воді енергію близько 100 еВ. Її достатньо, щоб розкласти кілька молекул води з утворенням груп вільних радикалів, розташованих на відстані 10–20 Å один від одного. Вільні радикали виникають у результаті сукупності фізичних і хімічних процесів, ініційованих проходженням іонізуючої частки через воду. Передача воді енергії іонізуючого випромінювання відбувається за дуже незначний час (10^{-16} – 10^{-18} с). При цьому виникають збуджені молекули води, іони H_2O^+ і вторинні електрони. Останні мають значну енергію, достатню для іонізації та збудження кілька молекул води [3, 11]. Це спонукає протікання наступних реакцій у воді, що опромінюється, з утворенням вільних радикалів, іонів і молекулярних продуктів:



Потім електрон притягується до іону



Частка H_2O може зазнавати термічної дисоціації двома шляхами:



Утворення частинок ОН та H_3O відбувається за рахунок іонізації однієї з двох молекул води, з'єднаних водневим зв'язком.

Таким чином, після проходження іонізуючої частинки в треку є радикали ОН, e^-_{aq} , іони H_3O^+ і збуджені молекули води. Концентрація їх задовільно висока ($\sim 0,1$ – $1,0$ М), і тому вони за допомогою дифузії взаємодіють один з одним



Зазначені процеси мають високі константи швидкості, що лежать у діапазоні ($5 \times 10^9 - 10^{11}$ л/моль·сек²⁷⁻⁵²). Реакції (9)–(12) призводять до утворення так званих молекулярних продуктів радіолізу води (H_2 і H_2O_2), а реакція (8) – до виникнення атомів H .

Порівняльний аналіз спектрів іон-радикалів, що утворюються в процесі іонізуючого випромінювання, показує схожість складу їх і радикалів, що беруть участь у процесі електролізу і потребують витрат електричної енергії на їх утворення. Таким чином, у запропонованому варіанті радіаційна складова забезпечує активацію води за рахунок кінетичної енергії поділу радіоактивного матеріалу з накопиченням активних частинок і подальшою їх конверсією за рахунок енергообміну між собою й з молекулами води.

Іонізуюче випромінювання, що впливає на воду, переводить її молекулу в енергетично збуджений стан за рахунок взаємодії зарядженими частинками, які підтримують її в термодинамічно нерівноважному стані. Наявність радіаційно-активованої частини в зоні проходження електролізу призводить до зміни кінетичних й енергетичних характеристик процесів розкладання води [12]. Значимо, що інтегральний ефект від усіх видів радіаційного випромінювання, характерних для ядерних реакцій, визначається електронною компонентою, що впливає на ступінь активування електролізних процесів, а роль електрохімічних процесів на відміну від традиційного електролізу зводиться практично до електрохімічної сепарації утворюємих газів, що вимагає істотно менших витрат електроенергії. Додатковим чинником, що впливає на енергоємність процесу, може бути ефект появи радіаційних дефектів на поверхні електродів, що підвищує їх активність і знижує поляризаційний потенціал перенапруги на межі розділу фаз, від величини якого залежить енергоємність електролізу.

Із метою підвищення прямого радіолітичного виходу водню у міжелектродному просторі електролізера слід встановити елементи, до складу яких входить порошок нанорозмірного діоксиду цирконію. У роботах [13–16] показано, що опромінення у воді діоксиду цирконію або металогідридів призводить до збільшення в 4 рази виходу водню в порівнянні з варіантом опромінення чистої води.

Автори пояснюють експериментально встановлений ефект радіаційно-хімічного виходу водню інтенсивним перенесенням енергії від твердої фази до молекул води. Через участь у цьому процесі радіаційно генерованих активних центрів на поверхні останні є джерелами емісії вторинних електронів [17].

При використанні електролізної системи, що працює за принципом розділених у часі процесів генерації водню та кисню [18–20], у комплексній електро- й радіохімічній технології слід очікувати істотного (до 80%) зниження витрат електричної енергії на стимулювання процесу окислення залізного



Рис. 1. Конструкція електролізної комірки

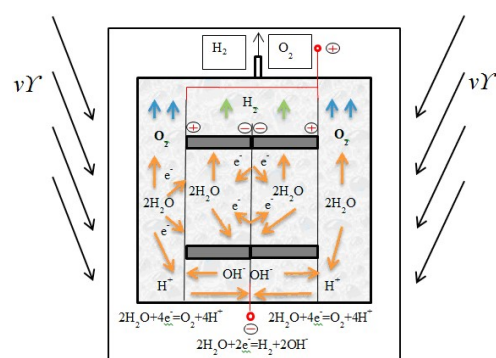


Рис. 2. Схема електролізної комірки під впливом іонізуючого випромінювання

електрода (рис. 1). Це знизить енергоємність процесу розкладання води на 24% й забезпечить економію електричної енергії в 1 кВт·год на виробництво 1 м³ водню й 0,5 м³ кисню.

У зв'язку з жорсткими нормами експлуатації ядерних реакторів категорично не допускається втручання в конструкцію елементів першого контуру. Тому як джерело іонізуючого випромінювання пропонується використовувати відпрацьовані ТВЕли витримки, що знаходяться в басейні, доступ до якого більш реальний з технічної точки зору, для розміщення електрохімічних осередків. Застосування такої комплексної технології, що поєднує радіаційні та електрохімічні процеси в рамках одного агрегату (рис. 2), дає можливість забезпечити генерацію водню з мінімальною витратою електричної складової, яка фактично визначає вартість виробленого водню.

Шляхи утилізації енергії відпрацьованих ТВЕлів в енерготехнологічних системах

Для підвищення коефіцієнта використання енергетичного потенціалу ядерного палива доцільно для здійснення запропонованої технології використовувати енергію ТВЕлів у басейнах витримки відпрацьованого ядерного палива, що забезпечить утилізацію енергії іонізуючого випромінювання, яке в існуючих технологіях безповоротно втрачається, оскільки відводиться у вигляді низькотемпературних теплових викидів в оточуюче середовище, що зумовлює забруднення атмосфери [21].

Згідно з регламентом експлуатації реактори на АЕС періодично зупиняються на перевантаженні для заміни вигорілого ядерного палива і відновлення запасу реактивності. Стандартна частота перевантажень становить від одного року до півтора року. При перевантаженні частина тепловиділяючих збірок (від однієї третини до чверті) видаляються в басейн витримки, а свіжі збірки розміщують в активній зоні реактора. Щорічно з енергетичного реактора великої потужності вивантажують 25–40 т вигорілого палива, яке все ще має високу радіоактивність і є джерелом інтенсивного радіаційного випромінювання, яке може бути використане для опромінення води з метою її активації та підвищення ефективності електролітичних процесів отримання водню.

Система зберігання відпрацьованого палива призначена для зняття активності й залишкових тепловиділень від відпрацьованих тепловиділяючих збірок до допустимих значень для його транспортування. Для забезпечення надійного знімання залишкових тепловиділень відпрацьованих тепловиділяючих збірок і захисту обслуговуючого персоналу від опромінення басейн витримки заповнений водним розчином борної кислоти. Це виключає можливість проходження мимовільної ланцюгової реакції. Крім того, цей ефект посилюється за рахунок особливої конструкції стелажу басейну витримки, в якому тепловиділяючі збірки встановлені з кроком 400. Вода в кожному відсіку витримки

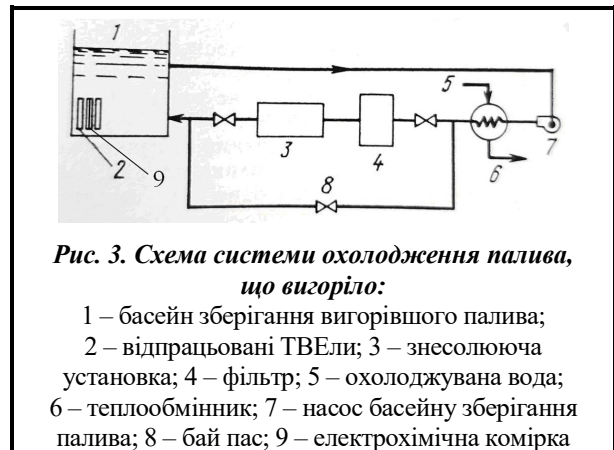


Рис. 3. Схема системи охолодження палива, що вигоріло:

- 1 – басейн зберігання вигорівшого палива;
- 2 – відпрацьовані ТВЕли; 3 – знесолююча установка; 4 – фільтр; 5 – охолоджувана вода;
- 6 – теплообмінник; 7 – насос басейну зберігання палива; 8 – бай пас; 9 – електрохімічна комірка

басейну циркулює через систему розхолодження басейну витримки, яка забезпечує допустиму температуру води не більше 70 °С. Крім того, система розхолодження передбачає наявність захисного рівня води заввишки від 3 до 4 м над розміщеними ТВЕлами (рис. 3).

Місткість басейну витримки приблизно 400 шт. збірок, забезпечує витримку відпрацьованих тепловиділяючих збірок протягом не менше трьох років. Після цього вони транспортуються на майданчик сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Економічна доцільність вкладення інвестицій у подальший розвиток і практичне освоєння запропонованого методу визначається двома факторами: кардинальним зниженням електроспоживання при отриманні водню й розширенням енергетичної бази для його промислового виробництва за рахунок утилізації залишкової енергії ядерного палива на АЕС. Обидва ці чинники є визначальними для організації великомасштабного виробництва водню в Україні й формування енерготехнологічної інфраструктури водневої енергетики.

Висновки

1. Розглянуто варіант комбінованого використання електро-радіохімічних методів одержання водню, внаслідок чого з великою ймовірністю можна припустити зниження електричної енергії на його виробництво за рахунок підвищення електропровідності електроліту, а також появи радіаційних дефектів на поверхні електродів, що забезпечують зниження поляризаційних потенціалів на поверхні поділу фаз. Показано, що при використанні електролізної системи, що працює за принципом розділених у часі процесів генерації водню й кисню у комплексній електро- та радіохімічній технології, слід очікувати істотного (до 80%) зниження витрат електричної енергії на стимулювання процесу окислення залізного електрода. Це зменшить енергоємність процесу розкладання води на 24% і забезпечить економію електричної енергії в 1 кВт·год на виробництво 1 м³ водню та 0,5 м³ кисню.

2. Наведено аналіз основних факторів, що впливають на зниження електроспоживання при електролізі, і показано спорідненість спектрів радикал-іонів, що беруть участь у радіаційних й електрохімічних процесах розкладання води. У результаті радіаційного впливу відбувається найбільш енергоємна стадія розкладання води, пов'язана з розривом молекулярних зв'язків й утворенням активних частинок, що залучаються до електрохімічного процесу, в якому електролізер виконує роль сепаратора газових продуктів.

3. Встановлено збільшення утворення водню завдяки додаванню його прямого виходу при радіолізі й опосередкованому одержанні при електролізі, ініційованому активаційними ефектами, зумовлених іонізованим випромінюванням.

4. Запропоноване рішення забезпечує підвищення рівня використання реакційного потенціалу ядерного палива за рахунок утилізації енергії відпрацьованих твелів для отримання водню і кисню.

Література

1. Горбачов А. К. Технічна електрохімія. Ч. 1. Електрохімічні виробництва хімічних продуктів: підручник / за ред. Б. І. Байрачного. Харків: ВАТ «Видавництво «Прапор», 2002. 254 с.
2. Козин Л. Ф., Волков С. В. Водородная энергетика и экология. Киев: Наукова думка, 2002. 334 с.
3. Solovey V., Zipunnikov M., Shevchenko A., Vorobjova I., Kotenko A. Energy effective membrane-less technology for high pressure hydrogen electrochemical generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 6. No. 1. P. 151–156. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I1P151-156>.
4. Шпильрайн Э. Э., Малышенко С. П., Кулешов Г. Г. Введение в водородную энергетику / под ред. В. А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
5. Гамбург Д. Ю., Семенов В. П., Дубовкин Н. Ф., Смирнова Л. Н. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. М.: Химия, 1989. 672 с.
6. Дзантиев Б. Г., Ермаков А. Н., Попов В. Н. О возможности комбинированного использования тепловой и радиационной составляющих энергии ядерного реактора для получения водорода из воды. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Атомно-водородная энергетика*. 1979. Вып. 1 (5). С. 86–96.
7. Калашников Н. А., Красноштанов В. Ф., Легасов В. А., Русанов В. Д. О возможности применения радиолитических процессов в атомно-водородной энергетике. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Атомно-водородная энергетика и технология*. 1981. Вып. 1 (8). С. 63–66.
8. Cecal A., Nauta O., Macovei A., Popovici E., Rusu I., Melniciuc-Puica N. Hydrogen yield from water radiolysis in the presence of some pillared clays. *Revue Roumaine de Chimie*. 2008. Vol. 53. No. 9. P. 875–880.
9. Пикаев А. К., Ершов Б. Г. Первичные продукты радиолитического распада воды и их реакционная способность. *Успехи химии*. 1967. Т. XXXVI. Вып. 8. С. 1427–1463.
10. Paige Abel E., Clause H. K., Severin G. W. Radiolysis and radionuclide production in a flowing-water target during fast 40Ca²⁰⁺ irradiation. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Vol. 158. Paper ID 109049. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109049>.
11. Ershov B. G., Gordeev A. V. A model for radiolysis of water and aqueous solutions of H₂, H₂O₂ and O₂. *Radiation Physics and Chemistry*. 2008. Vol. 77. Iss. 8. P. 928–935. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.12.005>.
12. Elliot A. J., Bartels D. M. The reaction set, rate constants and g-values for the simulation of the radiolysis of light water over the range 20 deg to 350 deg C based on information available in 2008. Canada, Mississauga: Atomic Energy of Canada Limited, 2009. 160 p.
13. Petrik N. G., Alexandrov A. B., Vall A. I. Interfacial energy transfer during gamma radiolysis of water on the surface of ZrO₂ and some other oxides. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2001. Vol. 105. Iss. 25. P. 5935–5944. <https://doi.org/10.1021/jp004440c>.

14. LaVerne J. A. H₂ formation from the radiolysis of liquid water with zirconium. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2005. Vol. 109. Iss. 12. P. 5395–5397. <https://doi.org/10.1021/jp044167g>.
15. LaVerne J. A., Tondon L. H₂ production in the radiolysis of water on CeO₂ and ZrO₂. *Journal of Physical Chemistry B*. 2002. Vol. 106. Iss. 2. P. 380–386. <https://doi.org/10.1021/jp013098s>.
16. Rusanov A. V., Solovey V. V., Lototsky M. V. Thermodynamic features of metal hydride thermal sorption compressors and perspectives of their application in hydrogen liquefaction systems. *Journal of Physics: Energy*. 2020. Vol. 2. No. 2. Paper ID 021007. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab7bf4>.
17. Агаев Т. Н., Иманова Г. Т. Радиационно-термокаталитические процессы получения водорода из воды в присутствии nano-ZrO₂. Сборник докладов VI Российской конференции (с приглашением специалистов стран СНГ) «Актуальные проблемы химии высоких энергий», г. Москва, 20–25 октября 2015 г. М.: Издательство «Граница», 2015. С. 110–114.
18. Solovey V., Nguyen Tien K., Zipunnikov M., Shevchenko A. Improvement of the membrane-less electrolysis technology for hydrogen and oxygen generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 6. No. 2. P. 73–79. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I2P73-79>.
19. Rusanov A. V., Solovey V. V., Zipunnikov M. M. Improvement of the membrane-free electrolysis process of hydrogen and oxygen production. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1. P. 117–122. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/117>.
20. Kleperis J., Solovey V. V., Fylenko V. V., Vanags M., Volkovs A., Grinberga L., Shevchenko A., Zipunnikov M. Self-sufficient PV-H₂ alternative energy objects. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashinobuduvannia*. 2016. Vol. 19. No. 4. P. 62–68. <https://doi.org/10.15407/pmach2016.04.062>.
21. Ран Ф., Адамантиадес А., Кентон Дж., Браун Ч. Справочник по ядерной энерготехнологии / под ред. В. А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 752 с.

Надійшла до редакції 21.07.2023