

*М. М. ЗІПУННІКОВ, С. І. БУХКАЛО*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВОДНЮ ЗА ОПТИМАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЯК СКЛАДОВА КОМПЛЕКСНОГО РОЗВИТКУ АСОЦІАЦІЙ EFCE та CFE-UA

Проведено аналіз перспектив розвитку водневої енергетики на території ЄС та України. Розглянуто можливості реалізації проектів та технології виробництва зеленого водню для промислового використання. Наведено умови реалізації проекту зі створення науково-дослідницького комплексного центру технології водню та водневих паливних елементів. Виконано огляд публікацій присвячених процесу отримання водню з води. Розглянуті основні чинники, які впливають на перебіг реакцій при отриманні водню з води із використанням сплавів. Рекомендовані сплави для отримання водню на автономних об'єктах. Наведено складові алгоритму дослідження з урахуванням системи факторів процесу виходячи з аналізу літературних даних з технології виробництва водню методом електролізу води. Встановлено загальні принципи розрахунку газогенераторів, які повинні базуватися на основних положеннях термодинаміки гетерогенних процесів: класична термодинаміка багатофазних та гетерогенних систем.

**Ключові слова:** водень, воднева енергетика, автономні об'єкти, електроліз води, газогенератор, паливні елементи, хімічний потенціал.

### Вступ.

У зв'язку із цим, в більшості країн Європи інтенсивно розробляються технології отримання водню з води. Висока калорійність і відсутність шкідливих речовин, у продуктах згорання, визначають значні переваги водню у порівнянні з іншими видами палива з урахуванням, перш за все кліматичних змін та пандемії.

Відповідно до закріплених в EGD та нової промислової стратегії ЄС цілі Європейська комісія ЄС (ЕК) розробила «Водневу стратегію для кліматично нейтральної Європи», представлену на розгляд до Європейського парламенту та інших структур ЄС 8 липня 2020 р. [Воднева стратегія, 2020]. Її вміст опубліковано у документі «Забезпечення кліматично нейтральної економіки: стратегія ЄС з інтеграції енергетичних систем» – один із перших успішних кроків у реалізації програми Германії, Португалії та Словенії у період їхнього головування в ЄС у другій половині 2020 р. і в 2021 р. [1].

Зазвичай більшість експертів використовує позначення класифікації-ідентифікації технології водню, що будується на наступних підходах:

- 1) «сірий» водень – виробляють з викопних вуглеводнів шляхом парового риформінгу природного газу або газифікації вугілля, при цих процесах виділяється максимальна кількість вуглецю;
- 2) виробництво «блакитного» водню – поєднання риформінгу та газифікації з процесом уловлювання та зберігання CO<sub>2</sub>;
- 3) «бірюзовий» водень – утворюється в результаті термічного розкладання метану (піроліз);
- 4) «зелений» водень отримують шляхом електролізу води, використовуючи електрику тільки з відновлюваних джерел енергії;
- 5) електроліз за рахунок атомної енергії;
- 6) бурий водень – газифікація вугілля.

Найбільш чистий в екологічному відношенні – «зелений» водень, який виробляється електролізним

обладнанням з використанням електрики, що отримується від відновлюваних джерел енергії за рахунок сили вітру та енергії сонця, морських припливів та відливів.

Системи ЄК відмовляються від колірної підходу, та пропонують використовувати нову класифікацію-ідентифікацію, в основі якої аналогічний підхід – особливості технології виробничого процесу та вихідного матеріалу [1, 2].

### Характеристика об'єктів, їх актуальність та мета дослідження.

Розширення сфер застосування водню [2–4] пов'язують з якісними сучасними змінами, що відбуваються у даний час в хімічній, машинобудівній, металургійній промисловості та різновидах розвитку енергетичної сфери: водень широко використовується для синтезу аміаку, хлористого водню, метанолу і для виробництва малих об'ємів спеціальних хімічних компонентів, а саме, наприклад, перекису водню при виробництві миючих засобів та пральних порошоків.

На даний момент основною сировиною для отримання водню є вуглеводні. В перспективі, у зв'язку із безперервним збільшенням вартості нафти і газу, вода буде головним джерелом отримання водню.

**Об'єкт дослідження** – сучасна технологія виробництва водню з метою зниження вартості виробництва, що дозволить вирішити кліматичні та екологічні проблеми населення, пов'язані із виснаженням природних ресурсів, а також надасть можливість розширити області його застосування в енергетичних галузях.

**Мета дослідження** – провести аналіз перспектив розвитку водневої енергетики на території ЄС та України. Розглянути можливості реалізації проектів та технології виробництва зеленого водню для промислового використання.

© Зіпунніков М.М., Бухкало С.І., 2021

**Методи дослідження** – при вирішенні поставленого завдання застосовувався метод аналізу літературних джерел у галузі водневої енергетики та метод узагальнення отриманої інформації.

#### **Аналіз літературних даних та відомості про технологію виробництва.**

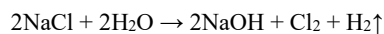
Вибір наявних можливостей загальної технології виробництва водню залежить повністю від виду, у якому перебуває сировина та цільове призначення його одержання.

Враховуючи поширення водню у вигляді різних сполук, його виділення має здійснюватися в ході реакцій розкладання із застосуванням, наприклад, відповідних хімічних методів [5]:

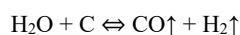
- а) реакція розкладання метану під час дії високої температури;
- б) розкладання води також за підтримки високих температур;
- в) технологія розкладання сірководню у високотемпературних умовах;
- г) технологія взаємодії металу з кислотою, наприклад, соляна кислота та цинк;
- д) технологія виробництва із гідриду натрію;
- е) вилучення з природного газу та ін.

Отримання або виділення водню в промисловості можна охарактеризувати за допомогою наведених нижче реакцій, у вигляді яких може бути представлено виробництво водню:

1. Процес електролізу, якому піддаються водні розчини солей:

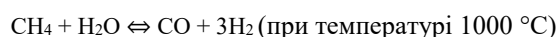


2. Пропускання водяної пари при температурі 1000 °С над розпеченим коксом:

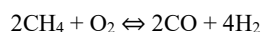


3. Спосіб отримання з природного газу:

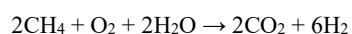
а) конверсія з парою води:



б) окислення киснем у присутності каталізатора:



4. Риформінг і крекінг вуглеводнів при переробках нафти: у процесі крекінгу нафти виходить багато водню як побічного продукту. Але, на жаль, на нафтопереробних заводах нині спалюється водень марно, разом із іншими відходами крекінгу. Отримання водню за умов промисловості пов'язані з процесом виділення його з газу – з його основного компонента метану, його змішують із киснем та парою води. Виділення водню відбувається за високих температур: при нагріванні суміші зазначених газів до температури 800–900 °С відбувається реакція у присутності каталізатора – схематично представлена у вигляді рівняння:



Далі отриману газову суміш поділяють. Виділений водень очищується і використовується або на місці отримання, або транспортується в потрібне місце під підвищеним тиском в сталевих балонах.

Способом отримання водню в промисловості на даний момент залишається його виділення з переробки газів нафти або з коксового газу. Завдяки глибокому охолодженню, властивому даному методу, всі гази зріджуються, окрім водню.

#### **Приклади визначення складових науково-обґрунтованих технологій водню.**

На автономних об'єктах, можливо застосовувати силіколевий спосіб отримання водню з води [6, 7]. Простота обслуговування і порівняно висока продуктивність – головні переваги установок, які використовують силіколевий спосіб. Силіколем називають сплав кремнію і заліза. Кремній є основним елементом, що витісняє водень з води у присутності луґу.

Впровадження більш економічних методів та устаткування стримується тим, що загальна теорія взаємодії сплавів з водою знаходиться майже на початковій стадії свого розвитку. Відсутні також дослідні технологічні дані, які підтверджують можливість використання ряду промислових сплавів та визначають ієрархію їх використання, наприклад, сплави феросиліцію з добавками лужноземельних металів і сплавів на основі магнію.

У зв'язку з цим, удосконалення технології і норм розрахунку водневих газогенераторів на основі експериментального і теоретичного вивчення механізму гетерогенних реакцій, гідродинаміки і тепло-масообміну у трифазних потоках, є актуальною і практично значущою проблемою.

За потреби в промисловості можна здійснювати концентрування водню за допомогою різних процесів: криогенного; коротко-циклового; мембранного та ін. Матеріальні витрати можна визначити як більш рентабельні та ефективні для технологічного процесу виробництва водню при його концентруванні мембранним способом.

У промисловості є й інші способи виробництва водню, що реалізуються в процесах наступними складовими, наприклад:

- 1) електроліз водних розчинів солей;
- 2) взаємодія води з металами;
- 3) окислення киснем метану (при присутності каталізаторів) та деякі інші.

Вихідними сировинними продуктами може бути для виробництва водню різновиди сміття і навіть біологічні відходи [8, 9].

Поряд з електролізом, який потребує значних енергетичних витрат, у промисловості існують й інші напрямки для одержання водню, наприклад, плазмохімія: в основі цього методу лежить хімічна активність плазми (іонізованого газу). Надмірно високі температурні характеристики процесу та великі швидкості проходження хімічних реакцій у фазі газового стану забезпечують високу продуктивність плазмотрона.

Пряме розкладання водяної пари на водень і кисень плазмохімічним способом, на жаль, поки що малоефективне. Але такий водень придатний для застосування в галузях промисловості та енергетиці, бо він дешевший за електролізний майже в 15 разів.

За даними виробництв-виробників обладнання розроблені компактні, надійні системи, які безперервно та успішно використовуються понад 10 років. Ці системи розроблені для легкої установки та безпечної, надійної, повністю автоматизованої роботи. Вироблення газу відбувається при тиску, придатному для експлуатації, і газ може бути стиснутий практично до будь-якого тиску при виході з генератора (рис. 1).



Рис. 1 – Приклад сучасного обладнання виробництва водню – виробництво надчистого газу

Установки з промислового виробництва водню повинні бути надійними, з наявністю екологічно безпечних водневих генераторів, заснованих, наприклад, на технології неорганічного мембранного електролізу водних розчинів лугів.

У лужному електролізі реакція протікає в розчині, що складається з води і рідкого електроліту між двома електродами. При достатній напрузі між двома електродами, на катоді збираються молекули водню –  $H_2$ , а на аноді після проходження іонів  $OH^-$  через 30% розчин електроліту – розчину  $KOH$ , збирається кисень –  $O_2$ .

Отриманий водень піддається додатковому очищенню від води і кисню, а в атмосферу виділяється чистий кисень 997%. Домішками у ньому є лише водень та пари води. За потреби він може використовуватись для споживання.

Генератори, за даними виробників, мають наступні переваги: низька питома витрата електроенергії –  $4,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{нм}^3$ ; відсутність обслуговуючого персоналу та вузла підготовки електроліту; відсутність застосування токсичних матеріалів; застосування тільки нержавіючої сталі для трубопроводів та обладнання; компактне розміщення, швидкий пуск та регулювання продуктивності від 25 до 100% протягом 5–10 с.

Устаткування з виробництва водню зазвичай розміщується у шафах чи спеціальному контейнері.

Шафи в приміщенні встановлюються прямо на підлогу та приєднуються до енергоносіїв. Водневі генератори, за бажанням замовника, можуть бути поміщені у вибухозахисний корпус. Контейнер обладнаний вентиляцією, опаленням, теплоізоляцією та поставляється готовим до експлуатації. Усі параметри, що стосуються безпеки виробництва, постійно вимірюються та контролюються мікропроцесором. Більше того, всі контрольовані параметри фіксуються пристроєм, який у разі збою автоматично зупиняє виробництво газу. Комплексна компактна система одержання водню методом електролізу продуктивністю за воднем  $500 \text{ нм}^3/\text{год}$ . з високими показниками ефективності та експлуатаційною стабільністю (рис. 2).



Рис. 2 – Приклад сучасного обладнання виробництва водню – комплексна система

За технологічними описами виробників, обладнання розміщено в одному контейнері, установка складається з двох блоків основних компонентів, у блоці установки для отримання водню розташовані: панель управління генератора водню, випрямляч, трансформатор, розподільна коробка та розподільний пристрій, система демінералізованої води та блок поповнення води.

В електролізері демінералізована вода розщеплюється на водень і кисень усередині електролітичного осередку за допомогою постійного струму. Водень збирається на катодній стороні, потім піднімається через отвори в катодній стороні електродної пластини, а потім виходить із пластини. Кисень збирається на анодній стороні і виходить із пластини комірки.

Водень і кисень надходять до окремих сепараторів, де ці гази охолоджуються водою і відокремлюються від суміші під дією гравітаційних сил. Після цього водень надходить у промивач для видалення крапель луку, що містяться в газі, за допомогою демінералізованої води. Одночасно газ охолоджується змійовиком, вбудованим у промивач. В кінці процесу водень проходить через фільтр, розташований на вершні сепаратора, для видалення крапель води, і потрапляє в сушильну камеру.

Отриманий у процесі кисень надходить в атмосферу. Демінералізована вода надходить до промивача за допомогою насоса подачі води.

Функція лугу – покращення електропровідності під час водного електролізу. За нормальних експлуатаційних умов витрата лугу знаходиться близько нуля. Поповнення лугу відбувається лише за потребою, у невеликих кількостях.

Для підготовки лугу їдкий калій в твердому вигляді вносять у резервуар для лугу, наповнений на дві третини демінералізованою водою, а потім за допомогою насоса для лугу проходить процес перемішування і розчинення їдкого калію в демінералізованій воді.

Охолоджувальну воду використовують для наступних цілей:

1) Охолодження лугу всередині сепаратора і таким чином підтримка робочої температури електролізера в діапазоні 80–90 °С.

2) Охолодження водню та кисню за допомогою охолоджувача та температура газів на виході з охолоджувача не більше 40 °С.

Ієрархію процесів систем аналізу газу можна визначити за наступним описовим алгоритмом:

1) проба водню надходить у систему аналізу водню через пробовідбірну трубу, в якому дрібні краплі лугу відокремлюються в сепараторі для процесів газ-рідина;

2) газ надходить до аналізатора, де після зниження тиску газу перевіряється вміст кисню у водні;

3) перед тим, як водень надходить у відповідний резервуар для зберігання він відбирається в окремий вологомір для вимірювання точки роси;

4) відповідний сигнал надсилається в ПК для відображення та моніторингу;

5) відповідна програма управління вирішує, чи можна надсилати водень у резервуар для зберігання з урахуванням певних заданих умов.

Система автоматичного контролю управління – основна частина системи автоматичного контролю, що відповідає за забезпечення безпечного і стабільного функціонування всього обладнання.

Регулювання робочого тиску установки отримання водню забезпечує функціонування генератора при необхідному робочому тиску. Датчик тиску вимірює тиск у системі, дані про який передаються до ПК для порівняння із заданим робочим тиском. Результат, отриманий на ПК, конвертується у стандартний сигнал 4~20 мА постійного струму, а потім перетворюється. Робочий тиск зберігається на заданому значенні.

Ключовим компонентом електролізного скиду є пакет біполярних осередків для електролізу води під тиском. Пакет осередків складається з кільцевих електролізних осередків, у кожному з яких містяться два електроди та одна лужна неорганічна іонообмінна мембрана.

Генерація водню та кисню відбувається при подачі струму на пакет осередків. Гази потім направляються до газового сепаратора, який є подвійною ємністю під тиском з нержавіючої сталі, після якого вони промиваються в спеціально спроектованому напірному апараті, розташованому над газовим сепаратором.

Технологічна частина поставляється як повністю зібраний об'єкт, до якого включено обладнання, наприклад:

- газові сепаратори, установки промивання газоподібного водню та спеціальні фільтри;
- теплообмінники для електролізу та системи газового охолодження;
- лоток детектора витоку;
- детектор водню, панель аналізатора для водню в кисні;
- прилади стоків і розподільні коробки: датчики, трансмітери, реле і т.д.;
- клапани та вентиляційні колектори (H<sub>2</sub> та O<sub>2</sub>);
- блок керування;
- шафа панелі управління включає все відповідне обладнання для забезпечення автоматичної і надійної експлуатації установки. Панель керування за допомогою кабелів далі за представленими розробками буде приєднана як до технологічної частини, так і силових стійок [8, 9].

#### **Опис наукового обґрунтування алгоритму експериментального дослідження.**

Аналіз літературних даних з технології виробництва водню електролізом води виявив наступні складові алгоритму дослідження з урахуванням системи факторів процесу [10–12]:

- при отриманні водню із використанням феросиліцію ФС 75 і ФСА не досягається необхідна повнота перетворення початкових компонентів і витрачається значна кількість їдкого натру;
- передбачається, що за допомогою сплавів ФС з добавками лужноземельних металів вдасться знизити витрату їдкого натру на процес отримання водню і поліпшити вивантаження продуктів реакції;
- із зменшенням витрат концентрованого лугу, значно знизяться викиди шкідливих речовин в атмосферу;
- інформація про активність сплавів ФС з домішками кальцію і барію відсутня;
- промисловість випускає ряд сплавів перспективних для отримання водню, кінетичні дані яких невідомі;
- досліджено теплообмін між частинкою активованого алюмінію і потоком рідини, дані по теплообміну і температурі реакційної поверхні сплавів ФС відсутні;
- при вивченні циркуляції киплячого потоку у розрахунках враховувався тільки подовжній перепад ентальпій, вплив поперечного перепаду ентальпій в основному потоці розкрито недостатньо;

– відома модель процесу газогенерування аналогічна процесу випаровування. Дана модель справедлива для початкових режимів експлуатації, де відбувається кипіння води. З розвитком процесу гідродинамічну обстановку в реакторі визначає потік водню.

Недоліками силіколевого способу є низька повнота реагування, необхідність використовувати суміші ФС і луѓу, наявність лужних розчинів високої концентрації, що ускладнює конструкцію реакторів. Тому питання про активацію кремнію введенням різних добавок в сплави цілком актуальні.

#### **Приклад постановки завдання дослідження – реактори автономного застосування.**

У якості реагенту для реакторів автономного застосування виробництва водню методом електролізу використовують феросиліції із розмірами частинок від 0,2 до 2,5 мм. Порошок сплаву подають шнеками, що не дозволяє розвинути тиск в реакторі вище 0,13 МПа. Не дивлячись на значну кількість виділеного тепла температура середовища в апараті не перевищує 105 – 118 °С, що досягається випаровуванням частини води, що надходить на реакцію. Установки розраховані на продуктивність 0,02 – 0,28 м<sup>3</sup>/с водню. Розширити вибір сплавів для застосування у виробництві водню, додавши до їх числа сплави ФС з добавками барію і кальцію, сплави ФСА з добавками марганцю, ФСА 4, ФСА 15, ФСА 30 і ФСА 32. Окрім дослідження активності кремнієвих сплавів, у завдання роботи входить вивчення реакційної здатності сплавів на основі алюмінію і магнію.

Рівноважні характеристики реакцій кальцію, барію, стронцію і магнію з водою передбачається уточнити на базі табульованих значень термодинамічних величин.

Завдання кінетичних досліджень зводиться до визначення чинників, що впливають на швидкість реакції. Необхідно отримати більш повну картину процесу за рахунок узагальнення дослідних даних трьома різними методами: у вигляді рівнянь формальної кінетики, термодинаміки незворотних процесів та тепло- і масообміну.

Встановлені технологічні режими отримання водню слід відпрацювати на дослідно-промисловому апараті [7, 8]. З метою удосконалення технології і норм розрахунку водневих газогенераторів на основі експериментального і теоретичного вивчення механізму гетерогенних реакцій, гідродинаміки і тепло-масообміну у трифазних потоках представлена наукова робота є актуальною і практично значущою проблемою.

Зниження вартості виробництва водню дозволить вирішити проблеми пов'язані із виснаженням природних ресурсів, а також надасть можливість розширити області його застосування.

Широко досліджено та науково визначено термодинаміку, кінетику і процеси тепломасообміну

при взаємодії із розчином їдкою натру ряду стандартних алюмінієвих порошків, а також алюмінію, активованого індієм, галієм та оловом. З кремнієвих сплавів проводили досліди із феросиліцієм ФС 75 і сплавами феросилікоалюмінію (ФСА), отримані сплавленням чистих компонентів [4]. Окрім цього випробувані сплави ФСА, отримані із неорганічної частини низькокалорійного вугілля, та аморфно-кристалічні сплави ФСА [5].

Рівноважні характеристики реакцій алюмінію, кремнію і заліза з водою уточнені на базі табульованих значень термодинамічних величин [13].

Аналіз нормативних матеріалів показує, що реакторне обладнання інтенсивно удосконалюється. Цьому сприяє розширення областей застосування водню. У зв'язку із розширенням галузей застосування водню проводяться роботи по збільшенню типорозмірів наявного обладнання та удосконаленню конструкцій реакторів. Зокрема, розроблено ряд дослідних транспортних і стаціонарних установок періодичної, напівперіодичної і безперервної дії.

Відомі реакторні установки високого і низького тиску. До складу установок низького тиску, працюючих по силіколевому методу, входять: реактор, шнековий живильник, ємкість для приготування розчину луѓу, конденсатор змішування, трубопроводи, арматура, насоси. Реактор представляє собою тонкостінну ємкість, забезпечену ребрами жорсткості. Корпус апарату може бути овальної, циліндрової та прямокутної форми, днище і кришки виконуються еліптичними, конічними або плоскими. Об'єм газогенераторів коливається у межах 1,6 – 14,5 м<sup>3</sup>. Реагуючі компоненти займають третю частину апарату, останнє приходиться на простір сепарації. Виникаюча при газоутворенні циркуляція розчину забезпечує змив продуктів реакції з поверхні твердих частинок і прогрівання нових потоків речовин, що надходять у реактор. З підвищенням рівня розчину застосовують примусову циркуляцію потоків, для чого на кришці апарату встановлюють одну або дві мішалки.

Останніми роками намітилася тенденція до збільшення продуктивності реакторів, для чого застосовують двохгорлові балони ємкістю 80 л [14, 15] і 200 л [16] у складі установок напівперіодичної і безперервної дії (рис. 3). Установки безпечніші в експлуатації, проте, до цих пір відсутні рекомендації по вибору об'ємів реакторів. Удосконалення процесу обмежилось пошуком лише оптимальних режимів отримання водню за допомогою стандартного ФС 75, що випускається промисловістю і добавками порошку алюмінію для розігрівання реактора. Разом з тим, у вказаній літературі відсутні пропозиції по скороченню витрат реагентів на одиницю маси виробляемого водню за рахунок зміни структури і складу сплавів з добавками лужноземельних металів.

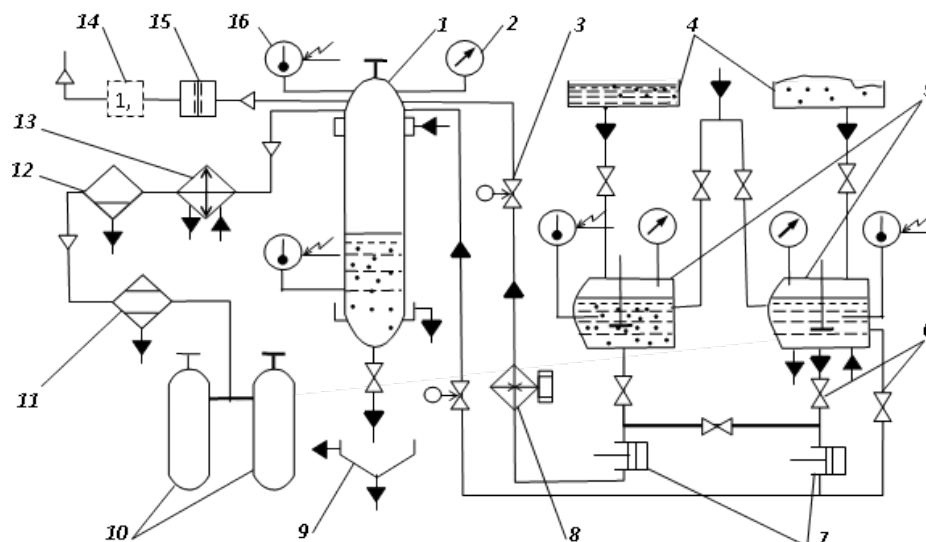


Рис. 3 – Схема автоматизованої реакторної установки (УВР):

1 – реактор, 2 – манометр, 3 – клапан пневмокерований, 4 – ємкості для реагентів, 5 – мішалки для приготування реагентів, 6 – клапани, 7 – насоси поршневі, 8 – теплообмінник з електронагрівом, 9 – ємкість для продуктів реакції, 10 – балони для водню, 11 – осушувач силікогелевий, 12 – сепаратор, 13 – конденсатор, 14 – вогнегасник, 15 – мембрана запобіжна, 16 – термометр електронний (термопара).

Дослідниками встановлені загальні принципи розрахунку газогенераторів, які повинні базуватися на основних положеннях термодинаміки гетерогенних процесів: класична термодинаміка багатофазних і гетерогенних систем викладена у роботах Гіббса [17, 18]; фундаментальні рівняння термодинаміки виражають функції тіл в межах незалежних змінних, які визначають стан. Як відомо, Гіббс ввів в ці рівняння хімічні потенціали, що дозволило розповсюдити методи загальної термодинаміки на системи змінного складу: спад запропонованих функцій виражає роботу, вироблену в оборотному процесі. Визначення термодинамічних потенціалів Гіббса можна представити як відомі три альтернативні форми стійкості

$$(\delta H)_{S,P} \geq 0, \quad (\delta F)_{T,V} \geq 0, \quad (\delta G)_{T,P} \geq 0, \quad (1)$$

де  $F$  – вільна енергія Гельмгольца.

Таким чином, стійкість термодинамічного стану розглядається по відношенню до безперервних і стрибкоподібних змін: 1) мова йде про стійкість по відношенню до нескінченно малих змін у вже існуючій фазі, тоді як 2) враховується виникнення абсолютно нової фази. Ці властивості Гіббс назвав «пасивними опорами». Механічним аналогом пасивних опорів може бути в'язкість або тертя ковзання. Рівновага, обумовлена пасивними опорами, відрізняється від рівноваги, забезпеченої «балансом активних тенденцій, що діють в системі». «Активні тенденції» спостерігаються тоді, коли прагнення, наприклад, алюмінію і води з'єднатися врівноважуються тенденцією продуктів реакції до дисоціації.

Термодинамічний метод дозволяє визначити: енергетичну можливість і напрям хімічних взаємодій; супроводжуючі реакцію теплові зміни; стійкість

утворюючих з'єднань; максимальні рівноважні концентрації продуктів реакції і граничний їх вихід; оптимальний режим процесу (температура, тиск і концентрація реагентів). Для реакцій, що здійснюються в ізобарно-ізотермічних умовах, можливість хімічних і фазових перетворень у закритій системі визначається рівнянням [19]

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ. \quad (2)$$

Від'ємні значення  $\Delta G^\circ$  свідчать про високу вірогідність реакцій. Для гетерогенних реакцій при зміні тиску в апараті значення енергії Гіббса знаходять по рівнянню [34]

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln(P_2/P_1), \quad (3)$$

де  $P_2$ ,  $P_1$  – кінцевий і початковий тиск в апараті, МПа.

Рівноважна термодинаміка не враховує чинник часу та характер перехідних процесів, хоча і накладає певні обмеження на кінетику процесу. Так, виконання стехіометричних співвідношень між реагентами і продуктами реакції означає, що для кожної реакції є одне і лише одне незалежне кінетичне рівняння. Між константами рівноваги і константами швидкості прямої і зворотної реакції, як відомо, існує взаємозв'язок, який дозволяє по двом величинам знайти третю [19]: згідно Вант-Гоффу, рівняння ізотерми реакції, що зв'язує величину константи рівноваги із зміною термодинамічного потенціалу, має вигляд

$$K = e^{-(\Delta G^\circ/RT)}, \quad (4)$$

де  $R$  – газова постійна, Дж/(кг·К).

З іншого боку, згідно закону діючих мас, константа рівноваги реакцій у даному випадку визначається із виразу

$$K = P_{H_2}^{v_{i1}} / P_{H_2O}^{v_j}, \quad (5)$$

де  $P$  – тиск газу, МПа;  $v_i, v_j$  – стехіометричні співвідношення компонентів.

Розраховавши константу рівноваги по виразу (4) і знаючи тиск водню в реакторі, можна визначити пружність водяної пари, і, тим самим, провести оцінку чистоти отриманого водню.

Повноту реакції знаходять за допомогою константи рівноваги по відомим методикам. Деякі дослідники припускають тісніший зв'язок між кінетикою і термодинамікою. Відомо, що високі температури прагнуть порушити хімічну інертність або «опори» до перетворення, що, як правило, приводить до збільшення швидкості реакції. У складніших ситуаціях швидкість може бути осцилюючою функцією температури. Для вузького інтервалу температур умов експлуатації водневих реакторів, співвідношення між «пасивними опорами» у системі і опорами, що мають «активні тенденції», змінюється очевидно слабо. Остання обставина дозволяє представити кінетичні дані через хімічні потенціали

$$dG/dt = A da/dt, \quad (6)$$

де  $A$  – спорідненість хімічної реакції або термодинамічний потенціал, Дж/моль;  
 $da/dt$  – швидкість хімічної реакції;

$$A = \sum_{i,j} v_i \mu_i, \quad (i = 1, \dots, i), (j = 1, \dots, j), \quad (7)$$

де  $j, i$  – фаза і компоненти у даній фазі, що беруть участь в реакції;

$v_i$  – стехіометричне число  $i$ -ї речовини;

$\mu_i$  – хімічний потенціал  $i$ -го компоненти;

$\sum$  – підсумовування по всім фазам і речовинам, що беруть участь в реакції.

$$\mu_i = \left( \frac{\delta G}{\delta n_i} \right)_{P,T,n_i(\neq n_j)}; \quad (8)$$

де  $n_i$  – число молей.

Хімічний потенціал  $i$ -го компоненти у багатокомпонентній суміші є збільшенням вільної енергії Гіббса суміші при введенні одиничної кількості  $i$ -го компоненти в суміш при постійних температурі, тиску, концентрації (масі) інших компонентів (число зарядів компонентів тут не розглядається).

Якщо відомий стандартний хімічний потенціал  $\mu(p_0, T_0)$ , молярний об'єм  $V_m(p, T)$  (або щільність) і молярна ентальпія  $H_m(p, T)$  чистої речовини, то можна розрахувати хімічний потенціал при будь-якому іншому тиску  $p$  і температурі  $T$ . Альтернативний спосіб визначення хімічного потенціалу був запропонований Г. Н. Л'юїсом, який ввів поняття активності  $a_k$  речовини  $k$ .

Поняття активності особливо корисно при встановленні зв'язку між хімічними потенціалами і такими експериментально вимірюваними величинами, як концентрація і тиск, при цьому необхідно враховувати характерні особливості процесів, що протікають у них (табл. 1). Активність визначається із співвідношення [19]

$$\mu_k(p, T) = \mu(p_0, T) + RT \ln a_k. \quad (9)$$

Таблиця 1 – Приклад загальної класифікації-ідентифікації різновидів вимог для процесів виробництва водню

Вид характеристики прикладу	Складові впливу на процес
Забезпечення водостійкості сталей	Використання добавок хрому, молібдену, ванадію та вольфраму, що дозволить підвищити температуру їх використання до температури близько 700 °С.
Властивості сталей та продуктів реакції	Температуру процесу в реакторі слід підтримувати не вище 500–700 °С.
Тиск середовища у реакторі має бути у певних межах.	По-перше, згідно з принципом Ле-Шательє високий тиск перешкоджає утворенню водню та водяної пари, а по-друге, зі зростанням тиску підвищується металоємність обладнання та витрата електроенергії на подачу реагентів.
Максимальний діаметр часток енергоакуюлюючих речовин	При великих розмірах часток ущільнювальні поверхні запірних елементів арматури та насосів реакторної установки не можуть забезпечити достатню герметизацію обладнання (діаметр не повинен перевищувати 1–25 мм).
Вирішальний вплив на перебіг реакції – властивості сплавів	На поверхні легких металів утворюється оксидна плівка яка міцно зчеплена з поверхнею та у звичайних умовах не розчинна у воді. Досягти її руйнування можна, підвищуючи температуру або застосовуючи розчин лугу.
Швидкість циркуляції в реакторі як один з основних параметрів процесу	Досить висока швидкість потоку щодо твердих часток забезпечує змив гідроксиду, з їх поверхні. Постійне оновлення реакційної поверхні необхідне для підтримки високої швидкості реакції.

Великий попит у сфері водневої енергетики на феросилікоалюмінії за результатами дослідження та аналізу пояснюється тим, що він повністю перевершує за ефективністю традиційні сплави – феросиліцій і алюмокремнієві сплави.

Наприклад, як універсальний розкислювач в процесі виплавки легованої сталі замінює всі інші інгредієнти. При виплавці комплексного сплаву ФСА випробувані різні види шихтових матеріалів. В останні роки частіше використовуються вугільні



породи, так як вони містять всі компоненти, необхідні для виплавки ФСА (оксиди кремнію, алюмінію, заліза і вуглець), що дозволяє вирішити вартісні та екологічні проблеми. Головна перевага ФСА полягає в тому, що при електротермічному отриманні цього сплаву одиниця маси алюмінію обходиться дешевше, ніж при виробництві електролітичного алюмінію. Найбільш придатними для виплавки ФСА є вуглевідходи чотирьох вуглезбагачувальних фабрик Красноармійського району Донецької області, які характеризуються наявністю в зольному залишку 24 – 28 %  $Al_2O_3$  і 50 – 60 %  $SiO_2$ . В ході відновлюваного процесу в

електропечі залізо відновлюється практично повністю і збільшення його частки в шихті понад 6% супроводжується значним зниженням вмісту кремнію та алюмінію в сплаві.

Наприклад, для виробництва 1 м<sup>3</sup> водню використовують 1 кг сплаву феросиліцію (ФС75) та 0,5 кг NaOH. Замість ФС75 доцільно використовувати сплав ФСА, який виплавляють з неорганічних компонентів вугілля. Орієнтація на вугільні родовища при отриманні хімічних реагентів для виробництва водню є економічно найбільш обґрунтованим [7].

Таблиця 2 – Загальна класифікація-ідентифікація сучасних різновидів технологій водню

№ з/п	Зміст навчання	Очікувані результати навчання
1.	Аналіз та визначення ієрархії головних напрямків розвитку водневої енергетики.	Визначення та наукове обґрунтування складових дослідження
2.	Аналіз технології ресурсо- та енергозбереження: енергетичний мікс з урахуванням можливостей водневої енергетики.	Збір інформації щодо сучасних інноваційних технологій та методів інтенсифікації процесів видобутку водню
4	Визначення технологічного екологічно-безпечного комплексу для дослідження сучасних процесів та складових енергетичного міксу	Розвиток лабораторного практикуму з методів дослідження різновидів складових екологічно-безпечного енергетичного міксу
5	Особливості сучасних процесів отримання водню з води – алгоритми загальної технології, енергетичні та матеріальні розрахунки.	Розвиток практичних занять з курсу ЗТХВ «Загальна технологія харчових виробництв» – кінетичні закономірності.
6	Можливості розвитку та аналізу загальних компетентностей сучасних комплексних екологічно-безпечних проєктів.	Оновлення експериментальних та розрахункових матеріалів курсових проєктів з курсу «ЗТХВ» – інноваційні методи.
7	Ознайомлення з сучасними технологіями отримання водню з води із використанням енергоакуюлюючих речовин – загальна технологія виробництва.	Оновлення лекційного матеріалу з курсів «ЗТХВ» та ЗХТ «Загальна хімічна технологія» з урахуванням проведених досліджень
8	Дослідження та аналіз сучасного процесу утворення водню з води за допомогою сплавів на основі кремнію – загальна технологія виробництва.	Оновлення методів наукових досліджень для різновидів складових сучасних технологій водню курсів «ЗТХВ» та «ЗХТ»
9	Висновки та перспективи подальшого розвитку означених сучасних напрямків загальної технології харчових та хімічних виробництв.	Подальші наукові публікації з інноваційного застосування отриманих сучасних наукових матеріалів.

З метою розробки загальної технології виробництва водню, що застосовується для створення паливних елементів необхідно відзначити деякі недоліки складових процесів. Одержання водню проводять у кілька етапів, починаючи з каталітичних хімічних реакцій і закінчуючи різними рівнями очищення водню. Наприклад, водень може бути отриманий паровим риформінгом природного газу або на установках для виробництва водню – його вилучають з багатоводневим газовим потоком. При виробництві водню одержують продуктивний водневий газ, який включає побічні продукти: вуглекислий газ, чадний газ, метан, вода, аргон, азот і кисень. У залишкових газових потоках від хімічних або нафтохімічних процесів присутні різні домішки: вуглеводні, метанол, сірководень та аміак. Всі ці домішки повинні бути видалені, перш ніж він буде використаний в інших технологіях: очищення водню від різних домішок – головний етап на шляху отримання високоякісного продукту (рис. 4).

Промислове одержання водню та його подальше використання має на увазі наявність залишкових газових потоків та потоків побічних продуктивних газів, що містять значну кількість цінного водню.

Мембранні модулі GENERON® (рис. 5), а також професійне обладнання для водню дозволяють виділяти з таких газових потоків водень з мінімальними втратами 1–10 %, що економічно ефективно.

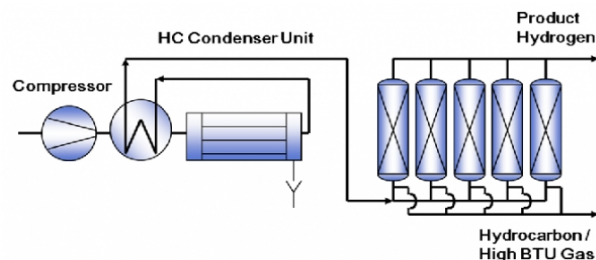


Рис. 4. Приклад технологічної схеми очищення водню



Чистота кінцевого продукту, отриманого із застосуванням мембранних установок для отримання водню, досягає 90–99.9%, що, безперечно, є дуже високим показником порівняно з будь-яким обладнанням, що конкурує. Промислове одержання водню потребує альтернативних та в достатній мірі ефективних технологій газового розділу.

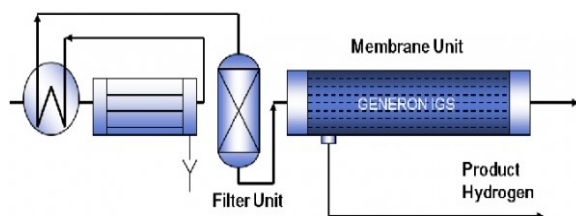


Рис. 5. Приклад технологічної схеми виробництва водню за мембранною технологією

Альтернативною технологією отримання водню з насичених воднем газових потоків є короткоциклова адсорбція (КЦА), що дозволяє отримувати водень понад високої чистоти (до 99.999%). Однак подібна установка для отримання водню має досить високу вартість, тому якщо вимоги до чистоти кінцевого продукту не такі високі, більш економічним буде використання, наприклад, мембранної технології GENERON®, перевагами якої за матеріалами дослідження є:

- 1) Висока ефективність – установка виробництва водню дозволяє одержати від 90% до 99% із газового потоку;
- 2) Економічність – мембранна установка для виробництва водню доступніша за вартістю в силу особливостей виробництва та монтажу;
- 3) Оперативність – подібне обладнання значно швидше виготовляється та вводиться в експлуатацію;
- 4) Мінімальні витрати на обслуговування, заміну обладнання та ін.
- 5) Тиск на вході до 138 бар.

Промислове одержання водню за допомогою мембранних модулів умовно поділяється на кілька етапів, що дозволяють отримувати високоякісний продукт без додаткових витрат часу. Для запобігання утворенню конденсату всередині поволоконних мембран, що надходить газ спочатку охолоджується для очищення від легких вуглеводнів.

Установка для виробництва водню за мембранною технологією автоматично проводить багатоступінчасте очищення газового потоку від сторонніх частинок та конденсату, газ попередньо підігрівається до необхідних температур перед входом у мембранні модулі.

Газоподібний водень проходить через стінки мембран – цей очищений потік (проникаючий газ) є продуктивним воднем. У цей час частина газу, що залишилася, продовжує свій рух по мембранному волокну на скидання (непроникний газ) [20, 21].

## Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

У статті представлена актуальність теми, вивчена світова тенденція щодо переходу до «зеленої» енергетики.

Розглянуто види водню за способами його одержання з урахуванням найбільш екологічного та ефективного способу виробництва промислового водню, розглянуто можливі джерела його одержання.

Внаслідок аналізу перспектив розвитку водневої енергетики в ЄС та Україні виявлено передумови для отримання «зеленого» водню у промислових масштабах. Визначені можливі великотоннажні джерела щодо його виробництва.

У статті наведено можливі умови реалізації проекту зі створення науково-дослідницького комплексного центру технології водню та водневих паливних елементів.

Розглянуто деякі необхідні елементи наукового обґрунтування можливого впливу технологічних параметрів та їх особливостей на промислові характеристики виробництва.

Визначено порядок дослідження системи вибору раціональних параметрів різновидів технології виробництва з метою навчання студентів ВНЗ [1–22].

## Список літератури

1. Белов В.Б. (2020) Новые стратегии ЕС по обеспечению климатически нейтральной экономики. Европейский союз: факты и комментарии. Выпуск 101: июнь 2020 г. – август 2020 г. С. 5–9.
2. Zipunnikov, Mykola; Bukhhalo, Svetlana; Kotenko, Anatolii. Researching The Process Of Hydrogen Generating From Water With The Use Of The Silicon Basis Alloys. French-Ukrainian Journal of Chemistry, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 138–144, dec. 2019. ISSN 2312-3222. doi:<http://dx.doi.org/10.17721/fujcV7I2P138-144>
3. Бухало С.І. Визначення загальної технології комплексних курсових проєктів. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII Міжн. н-практ. конференції (MicroCAD-2019), 15–17 мая 2019 р.: у 4 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПИ». С. 217.
4. Bukhhalo S.I., Ageicheva A.O., Iglin S.P., Hlavcheva Yu. N., Miroshnichenko N.N., Olkhovska O.I., Zipunnikov M.M., Olkhovska V.O. Innovative complex projects'2018/2019 realization in the examples and tasks/ Вісник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2019. – № 15(1340). – С. 80–88. doi: 10.20998/2220-4784.2019.15.14
5. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: [Справ. изд.] / Д. Ю. Гамбург, В. П. Семенов, Н. Ф. Дубовкин, Л. Н. Смирнова. – М.: Химия, 1989. – 672 с.
6. Зипунников Н. Н. Зависимость полноты реакции получения водорода от основных параметров процесса. / Н. Н. Зипунников, Б. А. Трошенькин // Вестник НТУ «ХПИ». 2010. – № 4. – С. 28–32. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/18686>
7. Трошенькин В. Б. Состояние разработок по исследованию процесса и конструирования оборудования получения водорода из воды с использованием сплавов / В. Б. Трошенькин, Н. Н. Зипунников //

- Вестник НТУ «ХПИ». 2008. – № 12. – С. 51–55.  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32789>
8. Ефективні рішення для виробництва екологічно-безпечних хімічних продуктів. Mahler\_Website\_RUS\_PDF; tkis-electrolysis-hydrogen-ru
  9. Козин Л. Ф., Волков С. В. Современная энергетика и экология: проблемы и перспективы. Киев: Наук. думка, 2006. 775 с.
  10. Зипунников Н. Н. Закономерности тепломассообмена при взаимодействии сплава на основе кремния с водой в водородных реакторах / Н. Н. Зипунников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/7(38). – С. 52 - 55.
  11. Зипунников Н. Н. Тепломассообмен при взаимодействии сплава на основе кремния с водой. / Н. Н. Зипунников // Интегровані технології та енергозбереження. 2008. – № 4. – С. 11–16.  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2427>
  12. Zipunnikov M.M. Researching the process of hydrogen generating from water with the use of the silicon basis alloys / M. Zipunnikov, S. Bukhhalo, A. Kotenko // French-Ukrainian Journal of Chemistry. - Toulouse: University Paul Sabatier, 2019. – Vol. 7, № 2. – P. 138-144.  
<https://doi.org/10.17721/fujcV7I2P138-144>
  13. Зипунников Н. Н. Термодинамика и кинетика вытеснения водорода из воды многокомпонентными сплавами / Н. Н. Зипунников, Б. А. Трошенькин // Интегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 4. – С. 35 - 42.  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1893>
  14. Варшавский И. Л. Опыт эксплуатации реактора периодического действия для получения водорода из воды с помощью ферросилиция / И. Л. Варшавский, Б. А. Трошенькин, В. В. Редько // Проблемы машиностроения. – 1981. – № 11. – С. 106–111.
  15. Зайчиков П. Ф. Использование энергии экзотермической реакции при добычании водорода газогенератором АВГ-45 / П. Ф. Зайчиков // Труды Центральной аэрологической обсерватории. – 1962. – № 43. – С. 42 - 46.
  16. Сокольский Д. В. Новое в методике добычания водорода в генераторах баллонного типа / Д. В. Сокольский, В. Н. Суворов // Вестник АН Каз. ССР. – 1953. – № 7. – С. 68 - 75.
  17. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика / Гиббс Дж. В. – М.: Наука, 1982. – 584 с.
  18. История учения о химическом процессе. Всеобщая история химии / [редактор Н. Г. Явкина]. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
  19. Прикладная химическая термодинамика: Модели и расчеты / [Пер. с англ. под ред. Т. Барри]. – М.: Мир, 1988. – 282 с.
  20. Бухало С.І. Деякі концепції сталого розвитку України Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020, 28-30 жовтня 2020 р.: Ч. II./за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ», с. 172.
  21. Бухало С.І. Основні властивості плівкового полімерного покриття геліоколекторів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020, 28-30 жовтня 2020 р.: Ч. II./за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ», с. 173.
  22. Бухало С.І. Синергетичні моделі утилізації-модифікації полімерної частки ТПВ. Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 41 (1263), С. 17–27.
- ### Bibliography (transliterated)
1. Belov V.B. (2020) Novye strategii ES po obespecheniju klimaticheski nejtral'noj jekonomiki. Evropejskij sojuz: fakty i kommentarii. Vypusk 101: ijun' 2020 g. – avgust 2020 g. С. 5–9.
  2. Zipunnikov, Mykola; Bukhhalo, Svetlana; Kotenko, Anatolii. Researching The Process Of Hydrogen Generating From Water With The Use Of The Silicon Basis Alloys. French-Ukrainian Journal of Chemistry, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 138–144, dec. 2019. ISSN 2312-3222. doi:<http://dx.doi.org/10.17721/fujcV7I2P138-144>
  3. Bukhhalo S.I. Vznachennja zagal'noi tehnologii kompleksnih kursovih proektiv. Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologii, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej HHVII Mizhn. n-prakt. konferencii (MicroCAD-2019), 15–17 maja 2019 r.: u 4 ch. Ch. II. / za red. prof. Sokola Є.І. – Kharkiv: NTU «KhPI». p. 217.
  4. Bukhhalo S.I., Ageicheva A.O., Iglin S.P., Hlavcheva Yu. N., Miroshnichenko N.N., Olkhovska O.I., Zipunnikov M.M., Olkhovska V.O. Innovative complex projects'2018/2019 realization in the examples and tasks/ Вісник НТУ «ХПІ». – Kh.: 2019. – № 15(1340). – С. 80–88. doi: 10.20998/2220-4784.2019.15.14
  5. Vodorod. Svoystva, polucheniye, khraneniye, transportirovaniye, primeneniye: [Sprav. izd.] / D. YU. Gamburg, V. P. Semenov, N. F. Dubovkin, L. N. Smirnova. – M.: Khimiya, 1989. – 672 s.
  6. Zipunnikov N. N. Zavisimost' polnoty reaktsii polucheniya vodoroda ot osnovnykh parametrov protsessa. / N. N. Zipunnikov, B. A. Troshen'kin // Vestnik NTU „KHPI“. – 2010. – № 4. – S. 28 - 32.  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/18686>
  7. Troshen'kin V. B. Sostoyaniye razrabotok po issledovaniyu protsessa i konstruirovaniya oborudovaniya polucheniya vodoroda iz vody s ispol'zovaniem splavov / V. B. Troshen'kin, N. N. Zipunnikov // Vestnik NTU „KHPI“. – 2008. – № 12. – pp. 51–55. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/32789>
  8. Efektivni rishennja dlja virobництва ekologichno-bezpechnih himichnih produktiv. Mahler\_Website\_RUS\_PDF; tkis-electrolysis-hydrogen-ru
  9. Kozin L.F., Volkov S.V. Sovremennaja jenergetika i jekologija: problemy i perspektivy. Kiev: Nauk. dumka, 2006. 775 p.
  10. Zipunnikov N. N. Zakonomernosti teplomassoobmena pri vzaimodeystvii splava na osnove kremniya s vodoy v vodorodnykh reaktorakh / N. N. Zipunnikov // Vostochno-Yevropejskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2009. – № 2/7(38). – pp. 52–55.
  11. Zipunnikov N. N. Teplomassoobmen pri vzaimodeystvii splava na osnove kremniya s vodoy. / N. N. Zipunnikov // Интегровані технології та yenergozberzhennya. 2008. № 4. pp. 11–16.  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2427>
  12. Zipunnikov M.M. Researching the process of hydrogen generating from water with the use of the silicon basis alloys / M. Zipunnikov, S. Bukhhalo, A. Kotenko // French-Ukrainian Journal of Chemistry. Toulouse: University Paul Sabatier, 2019. – Vol. 7, № 2. – pp. 138-144.  
<https://doi.org/10.17721/fujcV7I2P138-144>
  13. Zipunnikov N. N. Termodinamika i kinetika vytesneniya vodoroda iz vody mnogokomponentnymi splavami / N. N. Zipunnikov, B. A. Troshen'kin // Интегровані технології та yenergozberzhennya. 2009. – № 4. – pp. 35–42.  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1893>

14. Varshavskiy I. L. Opyt ekspluatatsii reaktora periodicheskogo deystviya dlya polucheniya vodoroda iz vody s pomoshch'yu ferrosilitiya / I. L. Varshavskiy, B. A. Troshen'kin, V. V. Red'ko // Problemy mashinostroyeniya. – 1981. – № 11. – pp. 106–111.
15. Zaychikov P. F. Ispol'zovaniye energii ekzotermicheskoy reaktsii pri dobyvanii vodoroda gazogeneratorom AVG-45 / P. F. Zaychikov // Trudy Tsentral'noy aerologicheskoy observatorii. – 1962. – № 43. – pp. 42 - 46.
16. Sokol'skiy D.V. Novoye v metodike dobyvaniya vodoroda v generatorakh ballonnogo tipa/D.V. Sokol'skiy, V.N. Suvorov//Vestnik AN Kaz. SSR. 1953. – № 7. – pp. 68–75.
17. Gibbs Dzh. V. Termodinamika. Statisticheskaya mekhanika / Gibbs Dzh. V. – M.: Nauka, 1982. – 584 p.
18. Istoriya ucheniya o khimicheskoy protsesse. Vseobshchaya istoriya khimii / [redaktor N. G. Yavkina]. – M.: Nauka, 1981. – 448 p.
19. Prikladnaya khimicheskaya termodinamika: Modeli i raschety / [Per. s angl. pod red. T. Barri]. – M.: Mir, 1988. – 282 p.
20. Bukhhalo S.I. Deyaki konceptiyi stalogo rozvy'tku ukraiyiny` Informacijni tehnologiyi: nauka, texnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezy` dopovidej XXVIII mizhnarodnoyi naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi MicroCAD-2020, 28-30 zhovtnya 2020 r.: Ch. II./za red. prof. Sokola Ye.I. – Kharkiv: NTU KhPI», p. 172.
21. Bukhhalo S.I. Osnovni vlasty`vosti plivkovogo polimernogo pokry`t'ya geliokolektoriv. Informacijni tehnologiyi: nauka, texnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezy` dopovidej XXVIII mizhnarodnoyi naukovo-prakty`chnoyi konferenciyi MicroCAD-2020, 28-30 zhovtnya 2020 r.: Ch. II./za red. prof. Sokola Ye.I. – Kharkiv: NTU «KhPI», p. 173.
22. Bukhhalo S.I. Synergetic processes of utilization-modification for polymer part of municipal solid waste. Bulletin of NTU KhPI, Kharkiv, 2017, 41 (1263), 17 – 27.

*Надійшла (received) 19.11.2021*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

***Зіпунніков Микола Миколайович (Zipunnikov Nikolay Nikolaevich, Zipunnikov Mykola Mykolayovych)***

– кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу водневої енергетики, ППМаш НАН України ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0579-2962>; e-mail: zipunnikov\_n@ukr.net

***Бухкало Світлана Іванівна (Bukhhalo Svetlana Ivanovna, Bukhhalo Svetlana Ivanovna)***

– кандидат технічних наук, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1389-6921>; e-mail: bis.khr@gmail.com

***M. M. ZIPUNNIKOV, S. I. BUKHALO***

## **RESEARCH OF GENERAL HYDROGEN TECHNOLOGY ACCORDING TO OPTIMAL PARAMETERS AS A COMPONENT OF COMPLEX DEVELOPMENT OF EFCE AND CFE-UA ASSOCIATIONS**

The analysis of the prospects for the development of hydrogen energy in the EU and Ukraine is carried out. The possibilities of implementing projects and technologies for the production of green hydrogen for industrial use are considered. The conditions for the implementation of the project for the creation of a research and development center for hydrogen and hydrogen fuel cell technology are presented. A review of publications devoted to the process of obtaining hydrogen from water has been completed. The main factors influencing the course of reactions in the production of hydrogen from water using alloys are considered. Recommended alloys for producing hydrogen at autonomous facilities. The components of the research algorithm are given taking into account the system of process factors based on the analysis of literature data on the technology of hydrogen production by the electrolysis of water. The general principles of calculating gas generators have been established, which should be based on the basic principles of the thermodynamics of heterogeneous processes: classical thermodynamics of multiphase and heterogeneous systems.

**Keywords:** hydrogen, hydrogen energy, autonomous objects, water electrolysis, gas generator, fuel cells, chemical potential.

***Н.Н. ЗИПУННИКОВ, С. И. БУХКАЛО***

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОРОДА ПО ОПТИМАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ АСОЦИАЦИЙ EFCE и CFE-UA**

Проведен анализ перспектив развития водородной энергетики на территории ЕС и Украины. Рассмотрены возможности реализации проектов и технологий производства зеленого водорода для промышленного использования. Представлены условия реализации проекта по созданию научно-исследовательского комплексного центра технологии водорода и водородных топливных элементов. Выполнен обзор публикаций, посвященных процессу получения водорода из воды. Рассмотрены основные факторы, влияющие на течение реакций при получении водорода из воды с использованием сплавов. Рекомендуемые сплавы для получения водорода на автономных объектах. Приведены составляющие алгоритма исследования с учетом системы факторов процесса на основании анализа литературных данных по технологии производства водорода методом электролиза воды. Установлены общие принципы расчета газогенераторов, которые должны основываться на основных положениях термодинамики гетерогенных процессов: классическая термодинамика многофазных и гетерогенных систем.

**Ключевые слова:** водород, водородная энергетика, автономные объекты, электролиз воды, газогенератор, топливные элементы, химический потенциал.