

Я. Дідух

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОСИСТЕМ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ

Резюме

Вперше розраховано енергетичні показники різних типів екосистем у межах України, проведено їх порівняння. Оцінено ступінь енергетичних витрат фітомаси, підстилки, ґрунту під впливом антропогенного чинника. Водночас показано, що соціальні потреби суспільства лише у паливі у 40 разів перевищують біологічні потреби населення в харчуванні і є вищими, ніж щорічна акумуляція енергії у біомасі. А це потребує кардинальної зміни енергетичної політики держави.

Ya. Didukh

ENERGY PROBLEMS OF ECOSYSTEMS AND PROVISION OF STEADY DEVELOPMENT OF UKRAINE

Summary

The energy parameters of different ecosystem types in Ukraine are calculated for the first time, and parameters comparison is presented. The level of energy consumption of phytomas, substrate, soil under man-made influence is evaluated. At the same time it's demonstrated that society social needs for fuel exceed biological population needs for food by 40 times and are higher than annual energy accumulation by biomass. So it requires cardinal changes of the state energy policy.

Г. КОВТУН, Є. ПОЛУНКІН

ПЕРСПЕКТИВИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Що буде, коли вичерпаються запаси нафти, вугілля й газу? Сьогодні фахівці прогнозують: у недалекому майбутньому традиційні види палива може замінити екологічно чистий і невичерпний водень. Тож для багатьох країн світу дослідження з водневої енергетики стають пріоритетними напрямками розвитку науки. Вони забезпечуються фінансуванням як з боку держави, так і бізнесових структур. Зрозуміло, що основна мета розробки водневих технологій — зниження залежності від традиційних енергоносіїв, а головне — зменшення токсичних викидів в атмосферу від спалювання вуглеводнів.

Розробки в цьому напрямі ведуть і вітчизняні науковці, однак вони не відчувають необхідної фінансової підтримки держави.

Негативні екологічні наслідки використання нафтових палив уже помітні у великих промислових центрах, насамперед «завдячуючи» транспорту [1]. Так, у місті з населенням приблизно 1 млн мешканців на частку автотранспорту припадає майже 70% від сумарної кількості (кілька сотень тонн на добу) екологічно шкідли-

вих, у тому числі токсичних викидів. Поширені прогнози стверджують, що до 2030 року на планеті кількість автомобілів подвоїться і сягне 1,6 млрд (нині — 800 млн). Тож перехід на використання водню як моторного палива на транспорті — принаadne завдання. Незаперечні переваги нового палива, по-перше, у тому, що при будь-якому

© КОВТУН Григорій Олександрович. Член-кореспондент НАН України. Заступник директора Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України.

ПОЛУНКІН Євген Васильович. Кандидат хімічних наук. Старший науковий співробітник того ж інституту (Київ). 2007.

виділенні енергії з використанням водню (паливна комірка, звичайне опалення, двигун внутрішнього згоряння) маємо сприятливе співвідношення енергія / маса. Тобто водень — надзвичайно енергоємне паливо. Так, при згорянні його на одиницю маси виділяється майже в 3,5 раза більше тепла, ніж коли згорають вуглеводні нафти чи вугілля. Особливо важливо те, що у разі використання водню практично не буде викидів шкідливих речовин, передовсім вуглекислого газу. Адаже при згорянні водню утворюється тільки вода. Однак є низка об'єктивних чинників, причому фундаментального характеру, які стоять на заваді розробки і впровадження водневих технологій. Насамперед ще не винайдено недорогих й екологічно надійних способів виробництва й використання водню. Розглянемо деякі з них.

ДЖЕРЕЛА ВОДНЮ

Сьогодні є два промислових джерела одержання водню: електроліз води (на нього тривалий час покладають найбільш оптимістичні надії) і хімічна конверсія органічних речовин (горючих копалин, біомаси або продуктів переробки біомаси — спиртів) до синтез-газу (суміш CO та H₂). Для довідки наведемо дані Міненерго США щодо собівартості виробництва водню: з горючих копалин — 1,5, електролізом — 2,5, з біомаси — 2,9 дол./кг [2].

Найбільшого екологічного ефекту варто очікувати, якщо перевести на водень увесь транспорт великих міст. Адаже саме там відбувається масоване забруднення навколишнього середовища. Тож оцінимо ситуацію, коли всі моторні палива, що споживаються у світі, вдалося б замінити на водень. Завдяки його енергоємності і більшому коефіцієнту корисної дії водневих приводів, порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, водню в цьому випадку потрібно буде приблизно в 3,2 раза менше. Але щоб

одержати за допомогою найсучасніших електролізних технологій водень, необхідний для заміни всіх моторних палив, треба, як мінімум, втричі збільшити виробництво електроенергії (таблиця 1). Підвищити електропотужності втричі доведеться тому, що залишаться як мінімум існуючі споживачі. Зрозуміло, це поки що не реальне завдання. Наведемо тільки один переконливий факт: 60—65% усієї світової електроенергії виробляють теплові електростанції, де спалюють горючі копалини (газ, мазут, вугілля тощо). І ці витрати істотно зменшити неможливо доти, доки не буде винайдено альтернативне джерело електроенергії, наприклад, термоядерний синтез. Можливо, згодом вдасться суттєво збільшити частку електроенергії, одержуваної від атомних станцій та поновлюваних джерел (сонячних батарей, вітрових установок тощо). Однак, окрім дешевої та доступної електроенергії, необхідні також промислові електролізери великої потужності, над розробкою яких працюють у багатьох країнах світу, але й донині ці проекти перебувають на стадії дослідно-конструкторських робіт.

Наступне важливе питання — глобальні викиди вуглекислого газу. Сьогодні внаслідок спалювання вуглеводневих моторних палив в атмосферу Землі потрапляє майже 7 млрд тонн вуглекислого газу. Оцінимо, скільки ж його виділятиметься за найпростішим ланцюжком: мазут → електроенергія → електроліз (таблиця 2).

Таблиця 1. Оцінка світових ресурсів для переходу транспорту на водневе паливо шляхом електролізу води [2]

Всього споживається моторних палив (млн тонн)	2200
Водневий еквівалент (млн тонн)	680
Потреба в електроенергії для виробництва водню електролізом (млрд кВт•год)	29700
Досягнутий рівень виробництва електроенергії (млрд кВт•год)	15500

Із наведених даних бачимо, що «екологічно чиста» електролізна технологія призведе до катастрофічного погіршення екологічної ситуації на планеті — вуглекислого газу виділятиметься вдвічі більше! Щоправда, небажаний CO_2 можна утилізувати, наприклад, закачувати під землю до пластів геологічних формацій трьох типів: у свердловини, що залишилися від видобутих нафти й газу, у соленосні й вугільні шари, які втратили промислове значення. Такі технології за кордоном (поки що в обмежених масштабах) уже використовуються. Але для цього, знову-таки, треба спалювати вуглеводневе паливо: щоб рухати за допомогою електроенергії компресори, поруч має бути придатний підземний пласт, і ще слід забезпечити чимало інших умов. Очевидно, перспективніший шлях — використання вуглекислоти як вихідної сировини для одержання корисних кисневмісних сполук. До речі, засади такого напрямку утилізації вуглекислого газу розробляються в Інституті фізичної хімії НАН України (академік НАН України В.Г. Кошечко).

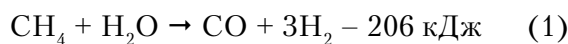
Отже, перехід на водневе паливо найближчими десятиліттями зажадає зовсім іншого шляху — водневої переорієнтації нафто-, газо- та, можливо, і вуглепереробних галузей. Інакше кажучи, промисловість, яка сьогодні з горючих копалин виробляє моторні палива, повинна буде виробляти здебільшого водень — для потреб нової енергетики. Тоді ми зможемо очистити великі міста від забруднень, адже їх локалізують у

Таблиця 2. Сумарні світові показники викидів вуглекислого газу [1, 2]

Емісія вуглекислого газу в результаті:	млн т/рік
використання моторних палив (млн тонн)	6 900
переходу на водень методом електролізу (мазут → електроенергія → електроліз)	11 200
переходу на водень паровою конверсією метану	5 600

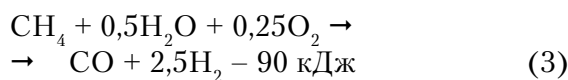
тих місцях, де акумулюватимуть водень. Як це практично здійснити? Існує кілька промислових шляхів одержання водню з нафти, вугілля, біомаси та природного газу. Для подальших ілюстрацій візьмемо природний газ, оскільки в ньому акумульовано найбільше водню порівняно з іншою воденьвмісною сировиною.

Простим способом можна отримати водень за допомогою парової конверсії метану — основної складової природного газу:



Цей процес відомий майже сто років і загалом добре вивчений. Більше того, технологічне обладнання для нього не дуже дороге порівняно з конкурентними технологіями, наприклад, на основі кам'яного вугілля. Стадії (1) і (2) реалізують у різних реакторах за різного температурного режиму: ендотермічну реакцію (1) — у трубчастих печах при 800–850 °С і за близького до атмосферного тиску. Хоча освоєно технологічні схеми, де цей процес здійснюється при тисках 50–70 атм, а екзотермічна стадія (2) — при 300–350 °С. Оскільки для обігрівання реакторів використовують частину природного газу, то теоретичний вихід водню на 1 моль витраченого метану буде не 4, а приблизно 3 молі. Об'єм природного газу, необхідного для виробництва 680 млн т водню, становитиме майже 1800 млн тонн.

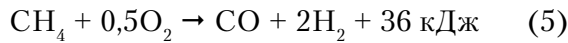
Другий спосіб — парокиснева конверсія природного газу:



Її здійснюють в одному або кількох реакторах з водою та киснем, попередньо виділеним із повітря на криогенних установках. Процес, як і викладений вище, також ендотермічний (тобто потребує підігрівання), і

після першої стадії треба знову ж проводити конверсію CO.

I, нарешті, перспективний, але ще мало вивчений технологічний процес — парціальне окиснення природного газу:



У результаті використання перелічених технологій одержання водню можна досягти істотного зменшення загальних викидів вуглекислого газу (таблиця 2). Але якщо вироблятимемо водень із нафти чи інших вуглеводневих джерел, то екологічний вигравш за CO₂ буде вже суттєво меншим (у них менший уміст водню порівняно з природним газом).

Виникає запитання: а чи не простіше одержувати водень термічним розкладанням води? На жаль, це можливо лише за дуже високих температур — приблизно 3000—4000 °С, де вміст водню у рівноважній суміші (2H₂O ⇌ 2H₂ + O₂) перевищує всього лише кілька об'ємних відсотків. Подібний процес можна буде здійснити тільки у майбутньому (за наявності потужних джерел електроенергії у пристроях на кшталт дугового плазмотрона). Слід зазначити, однак, що прямий піроліз води уявляється досить привабливим технологічним процесом, хоча б уже тому, що, крім водню, у цьому випадку в розпорядження технолога надходять значні кількості кисню.

Отже, перехід до водневої енергетики потребуватиме переорієнтації нафто- і газопереробної промисловості на технології виробництва водню. Для його отримання знадобиться майже стільки ж корисних копалин, скільки їх необхідно й нині. Але говорити про глобальну переорієнтацію на водневу енергетику в умовах реального скорочення вуглеводневих ресурсів і невпинного зростання попиту на паливо теж не реально. Ідеться лише про розв'язання

локальних проблем постачання паливом автотранспорту в окремих країнах чи регіонах.

ВОДЕНЬ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

Водень може використовуватися у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) за кількома напрямками. Найвідоміший з них — це спалювання водню, подібно до газового палива, у звичайних ДВЗ. Причому модифікація двигунів для роботи на воднево-му паливі мало відрізняється від уже відомого переходу їх на стиснений природний або зріджений нафтовий газ. Зазначимо, що в цьому разі збільшення маси автомобіля дає лише воднева паливна система, тоді як в автомобілі на паливних комірках (ПК) приріст маси (ПК, паливна система, електромотори, перетворювачі струму, потужні акумулятори) істотно перевищує «економію» від видалення ДВЗ і його механічної трансмісії. Втрата корисного простору в автомобілі з водневим ДВЗ менша, хоча водневий бак є і в тому, і в іншому варіантах. Водень також характеризується набагато ширшим порівняно з бензином діапазоном пропорцій змішування його з повітрям, коли ще можливий процес горіння суміші. Водень згоряє повніше, навіть поблизу стінок циліндра, де у бензинових двигунах зазвичай залишається незгоріла робоча суміш.

Наприклад, автомобільні фірми «BMW» і «Мазда» запропонували поступовий перехід автотранспорту (гібридна схема) на водень. Такі автомобілі можуть водночас використовувати і водень, і бензин. Ближче всіх до серійного виробництва паливні системи з баками, у яких водень зберігається у газоподібному стані під високим тиском (30—35 МПа) або в рідкому стані — за порівняно невисокого тиску, але низької температури (–253 °С). У першому випадку потрібен балон, розрахований на високий тиск, а в другому — надійна теплоізоляція.

Перший варіант менш безпечний, однак у такому баку водень може зберігатися досить довго. У другому випадку безпека вища, але у разі збільшення тиску у баку запобіжний клапан почне стравлювати водень до навколишньої атмосфери. Фірма «Мазда» вибрала варіант із баком високого тиску, а «BMW» — з рідким воднем. «BMW» обрала оригінальну систему зберігання: коли автомобіль експлуатується, то з навколишнього середовища виробляється скраплене повітря й прокачується у проміжок між стінками водневого бака та зовнішньою теплоізоляцією.

Важливе питання — спосіб надходження палива у двигун. Пропонується впорскування газоподібного водню у впускні колектори перед клапанами. Автомобілі «BMW» з восьмициліндровим двигуном розвивають потужність на водні 184 к.с. і здатні пройти 300 км на 170 л водню і ще 650 км — на бензині (в автомобілі стандартний бак). Фірма «Мазда» використовує роторний двопаливний двигун, де не може статися випадкового передчасного запалення водню від «зустрічного вогню», і форсунки для впорскування працюють у завжди сприятливій зоні мотора.

Перспективними споживачами водню на транспорті вважаються паливні комірки. Сьогодні вже створено кілька типів автомобілів, які працюють на ПК.

Так, фірма Даймлер—Крайслер провела успішні шляхові випробовування автомобіля NECAR—5, що має такі характеристики, як тривалість дії двигуна внутрішнього згоряння з низькою витратою палива, низький рівень шуму та безпечний для навколишнього середовища вихлоп. У цій моделі використано ПК, принцип дії якої ґрунтується на реакції окиснення водню на мембранному каталізаторі з утворенням води і генеруванням електричного струму. До анода ПК підводиться водень, а до катода — кисень із повітря. Роль електроду

між ними виконує мембрана, що забезпечує перенесення протонів. Мембрану виготовлено з протонопровідного полімеру, покритого тонким шаром благородного металу. Гази подають під тиском в 1,5—2,7 атм. За оцінками фірми, масовий випуск автомобілів цього класу планується через 10 років.

Фірма «Форд» та «Міцубісі» створили комбіновані моделі, які поєднують традиційний двигун із двигуном нового покоління, що працює на ПК. Для отримання водню використовують прямогінний бензин. Перспективними є також спирти (метиловий, етиловий), що безпосередньо на борту автомобіля переводяться у газ (H_2 , CO_2), збагачений воднем. При цьому як побічний продукт утворюється і СО. Цей оксид, який є не тільки токсичною сполукою, а й отрутою для каталізаторів ПК, нейтралізують у блоці газового очищення шляхом його селективного окиснення. Оскільки в газовій суміші за великого вмісту водню концентрація СО досить мала (до 0,5%), то каталізатори, які використовуються для очищення водню, в цьому процесі мають характеризуватися високою активністю та селективністю.

Отже, розробка високоефективних каталізаторів очищення водню від СО є найважливішою проблемою сучасного каталізу при створенні ПК для екологічно чистого автомобіля. Нанесені на тверді носії каталізатори — благородні метали (*Au*, *Pt*, *Rh* тощо) і їхні сполуки (наприклад, кластери і нанокластери металів *Au*, *Pt*, *Pd*) — пропонуються як найперспективніші для реакції селективного окиснення СО.

Розв'язання проблеми одержання чистого водню є важливим кроком сучасної хімії у реалізації однієї зі складних стадій технологічного ланцюжка — створення екологічно чистого автомобіля нового покоління. Нині вартість закордонного експериментального легкового автомобіля з

ПК ще досить висока — 100–200 тис. дол. США. Окрім того, сучасні ПК поки що використовують менше 1% енергетичних можливостей споживаного водню. Розглянемо каталітичну ПК, описану в [3]. Комірка генерує 30 кВт•год електроенергії при витраті 2 кг водню за годину. Оскільки 1 моль газоподібного водню за нормальних умов займає 22,4 л, то для вироблення 30 кВт•год електричної енергії треба затратити $1 \cdot 10^3$ молей водню. Якщо всі молекули водню передадуть свої електрони в електричну мережу ПК, то в результаті міг би сформуватися заряд $1,9 \cdot 10^8$ К. Отже, це потенційні можливості двох кілограмів водню. Як же використовуються ці можливості ПК? Розглянута комірка працює за напруги 100 В, тому при виробленні 30 кВт•год у її електричному колі циркулює струм 300 А•год, тобто витрачається заряд $3,6 \cdot 10^5$ К, а при 300 А•год — $10,8 \cdot 10^5$ К. Якщо потенційний заряд, який можуть дати 2 кг водню, взяти за 100%, то реальний заряд, генерований ПК, становитиме всього лише 0,6%. Тому важливими завданнями у створенні ПК є істотне підвищення ефективності перебігу анодної реакції: $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}$ (природа анода, каталізатора, електроліту, температура тощо).

Із наведеного прикладу бачимо, як людина вже вкотре неефективно повторює створений природою пристрій для одержання енергії. Пригадаймо, що біологічну воднево-кисневу ПК «вмонтовано» в кожную живу клітину. Джерелом водню в організмі слугує їжа — жири, білки та вуглеводи. У шлунку, кишечнику, тканинах, клітинах вона, в остаточному підсумку, розкладається до воденьвмісних біоорганічних сполук, наприклад, до глюкози. Кисень із повітря потрапляє у кров через легені, з'єднується з гемоглобіном і розноситься по всіх тканинах. Процес сполучення водню з киснем, що каталізують ферменти, є ефективною основою біоенергетики організму. Тут, у

м'яких умовах (помірна температура, нормальний тиск, водне середовище), хімічна енергія з високим коефіцієнтом корисної дії перетворюється на теплову, механічну (рух м'язів), електричну (електричний скат), світлову (комахи, які випромінюють світло).

У відділі гомогенного каталізу Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України розроблено лабораторні зразки ПК із використанням як палива глюкози та цукрів бактеріального бродіння крохмалю, меляси або біомаси у водних електролітах, як окисника — кисню повітря, як електроліту — морської води та кластерів металів — каталізаторів анодних процесів. Ці розробки здійснюються у рамках виконання завдань цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми водневої енергетики». Деякі розробки співробітників відділу гомогенного каталізу захищено міжнародним та вітчизняним патентами. Вже сьогодні ми маємо модель низькотемпературної паливної комірки на основі водних розчинів глюкози, мурашиної кислоти та бактерій *Aeromonas formicans*, що відкриває нові можливості у створенні біопаливних комірок для потреб водневої енергетики.

Усі процеси у природі дуже раціональні. Тому кроки з реального використання ПК на основі водню, особливо біоорганічних і неорганічних воденьвмісних сполук, дають сподівання на забезпечене енергетичне майбутнє нашої планети.

1. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетики и защита окружающей среды. — Киев: Наук. думка, 2004. — 206 с.
2. Мордков В.З. Материалы Международного форума по водородным технологиям для производства энергии (6–10 февраля 2006 г.). — М.: РУСДЕМ-Энергоэффект, 2006. — 122 с.
3. Seddon S. Fuel Cell Conference Report / Institute of International Research Conference on fuel Cell Vehicles. — February 22, 1999. — P. 35–38.

Резюме

Розглянуто можливості заміни традиційних видів палива на водень. Порівнюються в економічному і технічному аспектах різні способи отримання водню. Наведено приклади його використання провідними автомобільними фірмами світу в якості пального для двигунів внутрішнього згорання.

Summary

The possibilities of replacement of traditional fuel types by hydrogen are reviewed. Different methods of hydrogen generation are compared in economical and technical aspects. The examples of hydrogen application by world leading automobile companies as fuel for internal-combustion engines are given.

В. СЕМЕНОВ

БІОДИЗЕЛЬНЕ ПАЛИВО ДЛЯ УКРАЇНИ

Україна належить до енергодефіцитних країн, оскільки забезпечена власними паливно-енергетичними ресурсами лише на 53% (імпортує 75% необхідного обсягу природного газу та 85% – сирової нафти і нафтопродуктів) [1]. Залежність від імпорту нафти більшість розвинених країн розглядають як проблему національної й енергетичної безпеки [2]. Окрім того, широке використання нафтопродуктів як джерел енергії становить значну небезпеку для навколишнього природного середовища.

Залежність від імпорту нафти, ціна на яку невблаганно підвищується, а також значне погіршення екологічного стану довкілля стимулюють інтенсивний пошук альтернативних джерел енергії. Ситуацію з енергоносіями, що склалася сьогодні в Україні, можна порівняти з тією, в якій опинилася світова спільнота в 1973–1974 роках. Сьогодні для України настав час розвивати власні потужності для виробництва біодизельного палива з поновлюваних сировинних ресурсів [3, 4, 5]. Одним із основних

видів такого палива може бути біодизельне пальне.

Біодизельне паливо (БДП) (біодизель, МЕРО, РМЕ, RME, FAME, EMAG, біо-нафта та ін.) – це екологічно чистий вид палива, який одержують із жирів рослинного і тваринного походження та використовують для заміни нафтового дизельного палива (ДП). З погляду хімії біодизельне паливо є сумішшю метилових (етилових) ефірів насичених і ненасичених жирних кислот. У процесі реакції переетерифікації олії жири взаємодіють з метиловим (етиловим) спиртом за наявності каталізатора (лугу), внаслідок чого утворюються складні ефіри, а також гліцеролова фаза: 56% – гліцерину, 4% – метанолу, 13% – жирних кислот, 8% – води, 9% – неорганічних солей, 10% – ефірів. У роботі [6] наведено такі матеріально-енергетичні затрати для одержання 1000 кг (1136 л) біодизельного палива: 50 кВт теплової енергії і 25 кВт електроенергії, 1040 кг (1143 л) ріпакової олії, 144 кг (182 л) 99,8% метанолу, 19 кг гідрооксиду