



Григорій КОВТУН,  
член-кореспондент НАН України,  
заступник директора Інституту  
біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України

## ЕНЕРГЕТИКА: АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА

*Різкі коливання світових цін на нафту, газ та нафтопродукти, хронічна залежність України від однієї країни — постачальника енергоносіїв і, як наслідок, критичні ситуації з постачанням російського газу — усе це не тільки створило складні проблеми для вітчизняної економіки, а й становить серйозну загрозу національній безпеці нашої держави. Тому сьогодні так актуалізувався пошук альтернативних джерел енергії.*

### **Водень — паливо для автомобіля**

«Водень — паливо майбутнього», — так нині стверджують фахівці. У багатьох країнах світу дослідження з водневої енергетики є пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки. Так, США здійснюють дві грандіозні програми — «Автомобіль без нафти» та «Свобода від палива». Мета Сполучених Штатів — стати незалежними від імпорту нафти. Адже всім зрозуміло, що запаси нафти і газу скінченні. Тож фахівці роблять прогнози: через скільки років це станеться — через 25–30 чи 50? Але ж рано чи пізно так буде!

Першим паливом для автомобіля майбутнього став водень. Для розробки транспортних засобів на водневих елементах уряд США виділив 1,7 млрд. і на виробництво водню з вугілля — 1,2 млрд. доларів. До цього треба дода-

ти близько мільярда доларів, які щорічно надходять від комерційних структур. До 2020 р. будь-який житель США повинен мати можливість купити автомобіль на водневому паливі за тією ж ціною, що й на бензині. Країни Євро-союзу запланували витратити на дослідження і розробки в галузі водневої енергетики 5 млрд. дол., Японія — 4 млрд. Аналогічними дослідженнями з водневої енергетики за вищої державної підтримки займаються фахівці Австралії, Індії, Канади, Китаю. В Росії здійснюється спільна програма Російської академії наук і гірничо-металургійного комбінату «Норильський нікель». Для її виконання задіяно приватний капітал, який щороку інвестує до 40 млн. дол. Гарантовано й державну підтримку — близько 80 млн. рублів.

Чим спричинено такий, можна сказати, планетарний бум? А тим, що воднева енергетика — альтернатива вуглеводневій; до того ж, вона екологічно чиста, адже, згораючи, водень дає тільки воду. Однак нинішні технології (як виробництво власне водню, так і одержання з нього електроенергії) ще надто далекі від досконалості. Щоправда, гіганти хімічної індустрії і сьогодні вже отримують до 500 млрд м<sup>3</sup> водню на рік. Половина йде на аміачні добрива, решта — на виробництво сталі, скла, маргарину тощо. Здебільшого водень одержують паровою конверсією природного газу: метан за високих температур (900°C) реагує з водяною парою за наявності каталізаторів. Поки що такий водень найдешевший (його ціна приблизно втричі нижча, ніж в електролізного). Дослідження останніх років показують, що ціну водню можна зменшити ще вдвічі.

Здавалося б, найпростіший спосіб одержання водню — це знайомий ще зі шкільної лави електроліз води. На його виході маємо тільки водень і кисень. Але ефективність цього процесу також не надто висока: потрібно витратити близько 4 кВт/год електроенергії, щоб отримати 1 м<sup>3</sup> водню, а це дасть 1,8 кВт/год. у паливному елементі автомобіля. І все ж електроліз води залишається перспективним шляхом одержання водню. Для цього можна, приміром, використовувати енергію атомних електростанцій у нічні години (тобто в пору малих навантажень) і поновлювані джерела енергії (сонячні батареї, енергію вітру та річок, морських припливів тощо). Нині біологи активно

розробляють ще один напрям — одержання водню в процесі фотосинтезу за допомогою окремих штамів бактерій, водоростей та ін.

Паралельно з технологічними проблемами добування водню потрібно розв'язувати й інші, передусім створювати спеціальну інфраструктуру, що забезпечить його зберігання та перевезення. Це також непросте завдання, оскільки водень легко займається і вибухає за умови контакту з киснем повітря.

Автомобілі на водневому паливі умовно поділяють на три групи: зі звичайним двигуном внутрішнього згорання (він працює на водні або суміші водню з вуглеводневим паливом); з електродвигуном, що живиться від двигуна внутрішнього згорання (працює на водні); з електричним двигуном, де енергію дає паливний елемент.

Перший тип автомобіля використовує двигун, що працює на чистому водні або ж на звичному вуглеводневому паливі з домішками водню (5–10%). В обох випадках коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна зростає. Вихлопні гази стають набагато чистішими (СО і СН<sub>x</sub> зменшується в 1,5, а NO<sub>x</sub> — до 5 разів). Такі автомобілі пройшли випробування в Україні і за кордоном у 70-х роках. Однак вони — лише перехідний етап на шляху до створення другого типу машини. Цей автомобіль — із двома енергоносіями, або гібридний. Енергію йому постачає буферний накопичувач (це можуть бути акумуляторні батареї) та двигун внутрішнього згорання, що працює на водні або бензиновій суміші з воднем. Загальний ККД такого автомобіля збільшується

до 30%. Кількість шкідливих викидів легко вкладається у сучасні норми вимог «Євро-5».

Справжній водневий автомобіль працює від електродвигуна, що живиться від розташованого на його борту паливного елемента. Теоретично ККД паливного елемента може досягати 85%, сьогодні це близько 75%. Проте і ця цифра більш як утричі вища, ніж у кращих двигунів внутрішнього згорання. Але й тут є одна важлива проблема: водень до паливного бака не наллеш. Розглядається низка варіантів для її розв'язання. Наприклад, можна зберігати водень у своєрідних акумуляторах на основі гібридів різноманітних інтерметалевих сплавів. З них, у міру потреби, водень поступово вивільнюється. Для цього варіанта маса водню в загальному об'ємі речовини (так зване аспектне число) становить усього лише 5%. Але виникає проблема зі швидкістю вивільнення водню.

Можна зберігати водень і в рідкому стані. Однак, по-перше, це потребує його охолодження до температур, близьких до абсолютного нуля, а по-друге — заправлений у такий спосіб автомобіль мусить якомога скоріше витратити своє паливо. Є й такий перспективний напрям — зберігати водень у так званих наноструктурах (вуглецеві нанотрубки), але ці дослідження поки що на початковій стадії. Найперспективніший напрям — зберігання водню у балонах високого тиску (понад 350 атм., аспектне число до 18%) або одержання його прямо на борту автомобіля з іншого палива (метанолу чи рідких вуглеводнів: бензину, солярки) у

спеціальних каталітичних реакторах (аспектне число до 10%). Такі системи вже розроблено в деяких країнах, за прийнятних габаритів вони забезпечують запас водню на кілька сотень кілометрів. Аналогічні дослідження ведуться і в нас, зокрема в Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України. Є й інші технічні рішення. Наприклад, кілька російських інститутів розробили малогабаритні каталітичні конвертори для плазмо-каталітичного одержання водню з вуглеводнів на борту автомобіля. У зберіганні водню є ще один позитивний досвід: забезпечення ним аерокосмічної галузі. Нині його також можна використати для розвитку водневого автотранспорту.

Ключова деталь у новому автомобілі — паливний елемент. Він перетворює хімічну енергію окиснення водню на електричну. Батарея такого елемента складається з кількох десятків електрохімічних комірок. Кожна — приблизно до сантиметра завтовшки. Тільки так можна отримати необхідні силу струму та напругу. Комірка складається з двох електродів, розділених електролітом. До одного електрода (анода) підводиться паливо (водень), до другого (катода) — окиснювач (кисень повітря). Розроблено також систему видалення продукту реакції — води. Для прискорення хімічної реакції поверхню електродів неодмінно покривають каталізатором. Катод і анод розділено електролітом. Ним може бути полімер або розчин, що пропускає іони та не пропускає електрони. На аноді водень розпадається на електрони і протони. Останні проходять через

електроліт і досягають катода, де сполучаються з киснем, — утворюється вода. Електрони рухаються до зовнішньої частини комірки, там потрапляють в електричний контур, куди вже можна приєднувати навантаження.

Нині існує багато різних типів паливних елементів. В основному вони різняться за природою електроліту та робочою температурою. Найперспективніший електроліт — із твердої протонопровідної мембрани. Він має безліч переваг: його не розчиняє вода, що утворюється під час роботи паливного елемента, такий електроліт відносно просто виготовляти у промислових масштабах. До того ж, паливний елемент на твердому електроліті працює за низьких температур ( $80^{\circ}\text{C}$ ). Основна проблема — його вартість. Десятиліття тому вона була високою — через платину (каталізатор), що покриває електроди. За останні роки її необхідну масу вдалося зменшити вдвічі. Крім того, виявлено каталізатори на основі інших металів, серед них і дешевші. Тепер найдорожчою частиною став електроліт — мембрана «Нафіон», яку виробляє американська фірма «Дюпон». Нині її вартість близько 600 євро за  $\text{м}^2$ . Так, для батареї потужністю 100 кВт потрібні десятки квадратних метрів такого полімеру. Зараз Санкт-Петербурзьке НВО «Пластполімер» випускає перевірену мембрану марки МФ-4СК, що у кілька разів дешевша американського аналога.

Попри всі перелічені труднощі, незабаром у повсякденне життя більшості громадян увійдуть автомобілі з паливними елементами на

водні. Занадто великі політичні ставки та вкладені кошти в їхню розробку. Пріоритетні напрями досліджень західних фірм — паливні елементи малої потужності (від 500 Вт до 5 кВт) для автомобілів, автобусів, портативних комп'ютерів і житлових будинків. Поки що, як ми переконалися, паливні елементи далекі від досконалості та й коштують недешево. Так, для автомобіля вони на порядок дорожчі від стандартного двигуна внутрішнього згорання.

Світовий бум у галузі водневої енергетики не міг не привернути увагу фахівців НАН України. Адже чимало академічних і галузевих інститутів у 60–80-х роках минулого століття успішно працювали в цій галузі науки і техніки. Нещодавно президентом НАН України започатковано цільову комплексну програму наукових досліджень «Фундаментальні проблеми водневої енергетики». Наукову раду програми очолив віце-президент НАН України, академік Походенко Віталій Дмитрович. В центрі уваги досліджень фахівців різних наукових напрямів (хіміків, фізиків, матеріалознавців, мікробіологів, економістів) стали пріоритетні процеси та технології отримання водню, нові матеріали для його збереження, накопичення, транспортування та енергетичного використання. Та все ж, ключова умова переходу до водневої енергетики — це пошук та створення надійних і економічно доцільних паливних комірок. З їх використанням можуть працювати не тільки автомобілі, а й мобільні телефони, комп'ютери, електростанції, що забезпечують електрикою міста й селища.

Вкотре людина повторює створений природою пристрій для одержання енергії! Пригадаймо: біохіміки встановили, що біологічну воднево-кисневу паливну комірку «вмонтовано» в кожен живу клітину. Джерелом водню в організмі служить їжа — жири, білки й вуглеводи. У шлунку, кишечнику, клітинах вона в остаточному підсумку розкладається до мономерів, які після ряду хімічних перетворень дають водень, приєднаний до молекули-носія, наприклад, входить до складу молекули глюкози. Кисень із повітря попадає в кров через легені, з'єднується з гемоглобіном і розноситься по всіх тканинах. Процес сполучення водню з киснем становить основу біоенергетики організму. Тут, у м'яких умовах (по-

мірна 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). Всі процеси в природі дуже раціональні, тому інтерес до реального використання паливних комірок вселяє надію щодо енергетичного майбутнього.

На виконання програми спрямовано поки що скромні державні кошти. В подальших планах НАН України й фінансова участь комерційних структур. Адже якщо не поквапитися у цій глобальній справі, то можна потрапити в залежність від тих країн, які виграють у технологічній гонці за володіння водневим двигуном.

### ***Диметиловий ефір — паливо XXI століття***

Найгостріша екологічна проблема великих міст — дедалі більше забруднення повітряного басейну шкідливими викидами двигунів внутрішнього згорання. Саме автомобільний транспорт найтяжче впливає на навколишнє середовище: забруднення атмосферного повітря — до 80%, дія на кліматичні умови — до 65%. З несприятливими факторами довкілля центральних районів Києва пов'язано 30–35% випадків різних захворювань. Токсичні викиди в повітря скорочують тривалість життя мешканців великих міст на 8–10 років. У 2005 році автомобільний парк України налічував понад 7 млн. автомобілів. І тут пригадаймо, що на одну тонну витраченого палива викиди токсичних компонентів у відпрацьованих га-

зах автомобілів перевищують: 40 кг оксидів вуглецю, 30 — рідких вуглеводнів, 30 — оксидів азоту, до 20 кг твердих часток сажі та канцерогенних поліциклічних сполук.

Такі відомі способи зниження токсичності двигунів, як застосування каталітичної обробки вихлопних газів, уже відомих альтернативних палив (біоетанол, ефіри ріпакової олії, природний газ) не сприяють радикальному вирішенню зазначеної проблеми. Одним із виходів може стати пристосування двигунів до роботи на новому альтернативному паливі — диметиловому ефірі (ДМЕ).

ДМЕ почали сприймати як перспективний енергоносіє порівняно недавно. В 1995 р. група відомих фірм (Amoco Corp., Haldor Topsoe

A/S й ін.) на Всесвітньому конгресі-виставці в Детройті (США) представила серію доповідей. Вони переконували, що ДМЕ екологічно чисте дизельне паливо. У наступних публікаціях цей ефір уже фігурує як «Дизельне паливо XXI ст.». Хоча за енергоємністю ДМЕ у півтора рази (на одиницю маси) поступається традиційній солярці, але за іншими показниками його перевага беззаперечна: октанове число становить 55–60 проти 40–45, температура запалювання — 235 °С, а не 250 °С, як у дизельного палива. До того ж, властивості ДМЕ забезпечують бездимне горіння палива, хороший холодний пуск двигуна, зниження рівня шуму. Та головна перевага ДМЕ як дизельного палива — екологічно чистий вихлоп. Вміст токсичних компонентів у ньому (без застосування каталітичної обробки вихлопних газів) задовольняє екологічні вимоги європейських норм «Євро-3» та «Євро-4». Не має принципових утруднень і адаптація автотранспорту до нового палива, оскільки за фізичними властивостями ДМЕ близький до пропан-бутанових газових сумішей. Отож, його можна так само зберігати і транспортувати.

Окрім переліченого вище, розрахунки японських дослідників показали, що застосування ДМЕ як палива для газотурбінних установок є більш економічним, аніж зрідженого нафтового або стисненого природного газу. Відзначимо також, що ДМЕ легко деградує в атмосфері. Тож може служити заміником фреонів — основних «шкідників» озонових шарів атмосфери. Можна також застосовувати ДМЕ з метою одержання чисто-

го водню для використання у паливних елементах — електрохімічних генераторах автомобілів близького майбутнього. Іншими словами, сфера використання ДМЕ як енергоносія дає потужний стимул для розгортання його виробництва у великих масштабах. А це, у свою чергу, створює передумови для концентрації зусиль дослідників на методах його синтезу.

Учені Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України (лабораторія кандидата хімічних наук В.А.Бортишевського) розробили ефективні лабораторні процеси одержання ДМЕ та високооктанового бензину (через вихідний ДМЕ). Виробництво диметилового ефіру передбачає дві стадії: одержання синтез-газу із вугілля чи природного газу (суміш оксидів вуглецю та водню) і далі — каталітичний синтез ДМЕ із синтез-газу. Обидві стадії реалізуються за підвищеного тиску (50–60 атм.). Технологія отримання ДМЕ близька до відомої технології виробництва метанолу. Попередні оцінки показують, що з 1 тис. м<sup>3</sup> природного газу можна одержати близько 0,8–0,9 т ДМЕ або 0,3–0,4 т бензину. Такий бензин (октанове число 92) має високі екологічні характеристики, наприклад, вміст ненасичених вуглеводнів в ньому — близько 0,1%. Ця прогресивна технологія промисловістю поки що не освоєна.

Способи прямого одержання ДМЕ із синтез-газу пропонують також фірми МКК (Японія) і Haldor Topsoe (Данія), їх уже реалізовано на рівні пілотних установок. У Росії за аналогічною технологією побудовано пілотну установку потужністю 200 кг за добу з подаль-

шим перетворенням ДМЕ на бензин. Існують також установки з одержання бензину з метанолу.

Чи дійдемо ми до виробництва з передовими розробками наших учених, чи тупцюватимемо на місці, поки нас переженуть інші?

Зрозуміло, що Україна має поспішати з розв'язанням проблеми альтернативних палив (бензин з вугілля та газу, біоетанол, ріпакова олія, скраплений і стиснений газ, воднева енергетика тощо). До її розв'я-

### **Альтернатива газу? Газ!**

В Україні природного газу багато! Таке твердження звучить парадоксально, викликає подив, але це справді так. Блакитне паливо є не тільки у складі нафтових та вугільних родовищ, а й у альтернативному джерелі — у метаногідратних покладах шельфу Чорного та Азовського морів. Тож щорічну потребу країни в газі — 70–75 млрд. м<sup>3</sup> — є можливість забезпечити на кілька десятиліть.

Метаногідрати зосереджені на глибинах від 300 до 2000 м поблизу берегів більшості континентів, як правило, на крутих підводних схилах. Це доводять сейсмічні виміри та результати буріння. Метаногідрати, що складаються з води та метану, мають вигляд звичайного сірого крихкого льоду. Цей «метановий лід» належить до так званих клатратних сполук (від лат. clathratus — замкнутий, оточений зусібіч) — перспективний напрям досліджень супрамолекулярної хімії. До речі, її засновником є нобелівський лауреат Жан-Марі Лен — французький хімік, іноземний член НАН України.

зання повинні активно долучитися не тільки вчені, а й керівники держави.

З чергового повідомлення урядового порталу приємно було дізнатися, що в Україні все-таки створено Агентство з питань енергозбереження. Йдеться про структуру, яка сконцентрує всі проекти, пов'язані з раціональним використанням енергоресурсів, альтернативними джерелами енергії, розвитком системи вітчизняного видобутку нафти та газу.

У незвичних сполуках такого типу не виникає хімічних зв'язків (у даному разі — між молекулами метану та води). Метан вигідно розміщується у порожнинах кристалічної ґратки льоду. В одиничному конгломераті води та метану міститься 32 молекули води і близько 6-8 молекул метану. А в одному кубічному метрі цієї речовини втримується значно більше енергії, ніж у кубометрі природного газу (за однакового тиску). Отже, у льодових порожнинах одного кубометра метаногідратів «замкнута» 164 м<sup>3</sup> газу!

Метаногідрати утворюються під тиском у порах донних осадов, куди згори постійно надходить органічний матеріал і де панують низькі температури та досить високий тиск. Сировиною для них слугують рештки відмерлих рослин, тварин та інших живих істот, що їх постачають ріки, вода морів та океанів. Мул, який містить вуглець, швидко вкривається іншими нашаруваннями. Доступ до нього аеробних бактерій, які могли б

перетворити біологічний осад на вуглекислий газ, припиняється. Однак, захищений від цих мікроорганізмів, мул стає поживою для інших видів бактерій. В результаті їхньої діяльності й утворюється метан.

Скупчення метаногідратів виникає й там, де океанічна кора межує з континентальною та йде вглиб, у магму. Така обставина спонукала до інших поглядів на походження метаногідратів. Ця найбільш відома гіпотеза розглядає космічне походження метану. Родовища метаногідратів трапляються й у тих місцях океану, де його дно занурюється під континент. Там між двома гігантськими плитами є щілини. Через них метан може вивільнятися з магми до глибин океану.

Цей газ був ще у протопланетній хмарі. З неї народилося сімейство планет, які обертаються нині навколо Сонця. У протопланетній хмарі, коли формувалося центральне світило, відбулася диференціація речовини: легкі молекули газів під тиском сонячного світла відходили на периферію (не випадково далекі планети-гіганти — Юпітер і Сатурн — містять у своїх атмосферах величезні маси метану). Земля, як близька до Сонця планета, утворилася з важчих елементів, але неабияка кількість метану їй теж перепала. Тепер він виділяється з магми, коли тиск у щілині між материковими та океанічними плитами падає. Ці дві гіпотези походження метану — органічна, тобто вторинна, та космічна — мирно співіснують.

За найоптимістичнішими оцінками світові запаси метану в складі гідратів становлять від 2 832 до 7 645 563 трлн. м<sup>3</sup>. Донині в світі виявлено понад

220 метаногідратних покладів на шельфі океанів і морів. Щоправда, в Росії, у вічній мерзлоті Сибіру, є Мессояхське родовище — єдине місце в світі, де звичайний природний газ одержують з метаногідратів. Від нього прокладено газопровід до Норильська.

Проблема виявлення та використання метаногідратних покладів сьогодні досить актуальна. Деякі країни (США, Японія, Індія, Канада) мають національні програми вивчення та промислового освоєння природних метаногідратів. Розробка цих ресурсів сприятиме не тільки економічному розвитку окремих країн, а й політичній стабільності в світі: зникне боротьба за джерела енергії, непотрібними стануть величезні витрати на транспортування імпортованої енергії. Відкриття природних метаногідратів й освоєння енергії, акумульованої у них, працюватиме на розвиток цивілізації.

У Чорному морі також є багаті поклади метану. У деяких його районах пошуково-розвідувальними організаціями впродовж 1988–1989 років виявлено на глибинах 300–1000 м під дном метаногідратні родовища. У центральній глибоководній частині моря запаси метану в гідратах оцінюють у 20–30 трлн. м<sup>3</sup>, а загалом у Чорному морі за прогнозами геологів України та Росії міститься 60–80 трлн. м<sup>3</sup> цього газу. Ще в 1968 р. ці потенційно газonosні райони, за пропозицією України, уряд колишнього СРСР розглядав як перспективні для розробки та газовидобутку. Однак тоді пріоритет віддали Західному Сибіру. Нині ж Україна змушена купувати в Росії і Туркменії



газ, сплачуючи величезні кошти. Такий стан справ з ускладненими умовами постачання газу ставить перед фахівцями першочергове завдання: добути метан і забезпечити Україну хоча б на кілька десятиліть паливом і сировиною.

Які кроки робляться у цьому напрямі? Незначні, на жаль. Вже в незалежній державі 1993 року уряд затвердив постанову про виконання програми радянських часів — «Газогідрати Чорного моря», якою передбачено великий обсяг геологорозвідувальних робіт і створення технологій та конструкцій газодобувного комплексу. Однак бюджетних коштів для освоєння метаногідратів Чорного моря і досі не знайшлося. До цієї проблеми вчені залучалися фактично на добровільних засадах. Так, фахівці Відділення наук про Землю НАН України у 2002 р. розробили «Загальнодержавну програму розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2010 року», в якій важливе місце відвели вивченню запасів природного газу на шельфі Чорного моря. Цю програму Верховна Рада нарешті затвердила як закон України (діє з 1 січня 2007 р.).

В Одеській академії холоду та науково-дослідній фірмі «Лід-Газогідрат» опрацьовано оригінальний бізнес-план прибуткового інноваційного проекту «Метан — з га-

зогідратів Чорного моря». Його реалізація лише в одному невеликому газодобувному комплексі за рік може дати 0,97 млрд. м<sup>3</sup> метану. Вартість проекту — 150 млн. доларів. Пуск першого газодобувного комплексу — через 4 роки від початку фінансування. Розробляються й інші, не менш привабливі, проекти за участю закордонних та вітчизняних інвесторів. Не припиняються наукові дослідження в різних наукових установах різних форм власності, зокрема у Міжнародному науково-технічному університеті (м. Київ). Але, як і раніше, залишаються нерозв'язаними першочергові завдання для освоєння метаногідратних покладів у басейні Чорного моря. Наприклад, важливо уточнити в реальних цифрах запаси метану, створити спеціалізовану державну структуру для його пошуку та видобутку, залучити до вивчення цієї проблеми інститути НАН України, галузеві наукові установи та вищі навчальні заклади. Для цього потрібні ґрунтовні дослідження природи утворення метаногідратів і можливості видобутку їх із застосуванням екологічно чистих технологій, без порушення біосфери моря. Рано чи пізно Україна змушена буде повернутися до цієї злободенної проблеми. Однак на той час має бути створений надійний фундамент, закладати який слід уже сьогодні.

### **Нафтохімія... з поля**

Багато хто в Україні вважає, що єдиною серйозною альтернативою нафти і газу є вугілля, адже його запасів вистачить на сотні років. Тут хіміки намагаються реалізувати два напря-

ми. Перший — перетворювати вугілля на штучну нафту шляхом гідрування, іншими словами, насичення молекул вугілля воднем за допомогою каталізаторів. А далі — за звичайною

схемою. Другий шлях — газифікувати вугілля, знову ж таки використовуючи каталізатори. При цьому утворюється той самий синтез-газ ( $\text{CO}$  та  $\text{H}_2$ ), з якого можна зробити метанол (метиловий спирт). А з нього — безліч продуктів великої хімії. Метанол — справді чудова хімічна сировина. В 70-х роках минулого століття навіть вибухнув метаноловий бум. Тоді гадали, що його виробництво зросте до кінця ХХ ст. у десятки разів. Саме так промислово розвинені країни намагалися за допомогою найпростішого зі спиртів послабити свою залежність від країн, які постачають нафту. Однак до початку ХХІ ст. метанол так і не став для хіміків панацеєю. Головною перепорою тут є економічна недоцільність. До того ж, інтенсивне використання вугілля не розв'язує глобальної екологічної проблеми.

Але вихід усе-таки знайшовся. І досить несподіваний. Хімічна індустрія звернула свій погляд на рослинну сировину. Ідея залучити поновлювані ресурси, а саме — біомасу, не нова, адже щороку рослини на Землі за допомогою фотосинтезу фіксують близько 30 млрд. т вуглецю. З нафти і газу ми знищуємо вуглецю в десять разів менше. Так чому б не запозичити органічні сполуки в рослин? Взагалі людство використовує рослини як паливо з прадавніх часів. Наприклад, наші предки обігрівали помешкання дровами, поки не знищили більшу частину лісів. А в 30-ті роки ХХ ст. деяким фермерам у США доводилося навіть опалювати свої будинки зерном. Тепер рослини полів, схоже,

зможуть прислужитися і великій хімії.

Перший поштовх цій ідеї дала нафтова криза 70-х років ХХ ст. Саме тоді американці розробили біотехнологію одержання так званого паливного спирту з кукурудзяного крохмалю за допомогою мікробів за схемою «крохмаль-глюкоза-спирт». І не тільки розробили, а й у 80-х роках побудували кілька заводів. Такий спирт додають до бензину (від 10 до 85%, в Україні — до 6%) й отримують сумішевий бензин. Це збільшує октанове число бензину і позбавляє необхідності додавати небезпечний антидетонатор — тетраетилсвинець, унаслідок чого у вихлопах автотранспорту помітно зменшується вміст токсичних газів. Ну і, звичайно, бензину витрачається на 6–85% менше. А це вже щось.

Біотехнологія виявилася такою раціональною, що сьогодні ціна паливного спирту вдвічі нижча ціни спирту, одержаного за класичною схемою з нафтохімічного етилену. Тому в 90-х роках усі виробництва з гідратації етилену у США закрили як нерентабельні. Справді, навіщо використовувати дорогу нафту і витрачати недешеву енергію на хімічних заводах, якщо можна одержувати спирт з рослинної сировини. Але це був лише перший крок, тобто проба ідеї. Далі технологи запропонували використовувати дешевшу рослинну сировину, щоб добути той самий етилен. А якщо ціна за тону етилового спирту знизиться до 200 доларів і менше, тоді можна буде одержувати з рослинного етанолу й етилен — першу цеглину величній нафтохімічній будівлі. А відтак спряму-

вати етилен на потреби хімічної та нафтохімічної промисловості. Тоді чому б і не відмовитися від нафти? Та й взагалі, чому тільки етанол? Може, рослинна сировина згодиться для одержання й інших найважливіших продуктів великої хімії?

У 2000 р. президент США Білл Клінтон виступив із пропозицією спрямувати зусилля вчених, промисловців та економістів на підготовку державної програми переведення хімічної промисловості США на рослинну сировину і звернувся з нею до конгресу. У травні того року, вже за президентства Джорджа Буша-молодшого, конгрес прийняв акт «Про використання біомаси». Таким чином була розроблена державна програма та виділено фінансування на перший рік — 500 млн. доларів. Мета була поставлена конкретно: через 5–7 років створити дешеву технологію, а через 25 — перевести чверть хімічної промисловості США на рослинну сировину, приміром, на ту саму кукурудзу. В такому разі на переробку вже піде не зерно, а стебла кукурудзи, тобто відходи, які фермери колись спалювали.

Деревина, стебла, листя, солома — все це складається з лігніну, целюлози та целобіозу. Лігнін — продукт полімеризації ароматичних спиртів, який відкладається у клітинних оболонках рослин і робить їх міцними, здерев'янілими. Хоч як старайся, лігнін на глюкозу не перетвориш. Тому вчені повинні придумати таку рентабельну технологію, за допомогою якої можна було б виділяти з рослинної маси лігнін, близько 30%. А целюлозу, що залишилася, і це-

лобіозу за допомогою ферментів перетворювати на глюкозо-фруктозний сироп — це вже вміють робити. Головне, що такий сироп може стати універсальною сировиною для ферментаційної, а згодом — і хімічної промисловості. Вже сьогодні 60% американських солодошів виготовляють на основі глюкозо-фруктозного сиропу, одержаного під час переробки кукурудзяного крохмалю. До речі, сировиною для приготування такого сиропу можуть бути і побутові відходи! На кожного американця на рік припадає 2,5 т побутових відходів, з яких майже 70% — це папір, картон, целюлоза.

Яким же чином солодкий сироп може допомогти великій хімії? Із цукрів за допомогою біологічних каталізаторів — ферментів — можна одержувати до 20 різних кислот: молочну, щавлеву, лимонну та ін. А з цих кислот — величезну кількість напівпродуктів для хімічної індустрії. Скажімо, якщо від молочної кислоти відщепити воду, одержимо знайому кожному хімікові акрилову кислоту. А з неї вже можна виробити цілу низку корисних хімічних продуктів: тетрагідрофуран, ацетальдегід, етиленгліколь... Кількість публікацій у зарубіжній науковій літературі на цю тему зростає з кожним днем. «Складається враження, що з органічних кислот можна одержати ледь чи не всі продукти великої хімії, — часто переконує академік НАН України В.П. Кухар. — Звичайно, від лабораторної схеми до рентабельної промислової технології шлях неблизький, та ще й складний. Але мету поставлено, зусилля сконцентровано, і можна не сум-

ніватися, що результати не забаряться», — стверджує Валерій Павлович.

У США запущено у виробництво біотехнологію одержання молочної кислоти з конверсією, близькою до теоретичної: з кілограма глюкози виходить кілограм молочної кислоти. Така кислота дешевша традиційної. Тому з неї почали отримувати полімер, полілактат. Він привабливий тим, що розкладається у природних умовах, причому досить швидко, десь тижнів за три. Раніше нікому навіть на думку не спадало виробляти з молочної кислоти полімер, оскільки технологічний процес був занадто дорогим. Нині ж біологічно деградує полілактат поступово замінює поліетилен і поліпропілен у виробництві пакувального матеріалу. Уявіть собі, упаковка з-під смачного йогурту, недбало кинута на газон чи узбіччя дороги, за лічені дні зникне, розклавшись до вуглекислого газу та води.

Важливо й те, що ця програма екологічно вигідна: промисловість використовуватиме поновлювану сировину. Та й викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу не збільшаться: скільки рослини забрали вуглекислого газу з повітря, стільки туди і повернулося. І не тільки це. Фермери зможуть одержати потужну підтримку, оскільки продаватимуть солону чи бадилля кукурудзи, які колись спалювали, на суму близько 25 млрд. доларів на рік.

Звичайно, це велика комплексна програма. У ній треба скоординувати зусилля біологів, хіміків, біохіміків, промисловців, працівників сільського господарства, створювати структури для збиран-

ня та переробки рослинної сировини.

Чому Америка зробила ставку на цю галузь хімії (її ми ще називаємо білою хімією — за кольором цукру)? Напевно, тому що США споживають третину світових ресурсів нафти, газу та пластмас. І ці ресурси можуть вичерпатися. За такого потужного споживання залежність економіки країни від ситуації з нафтою та газом надзвичайно небезпечна. Позбутися її допоможе біла хімія, орієнтована на поновлювану рослинну сировину з полів. Звернімо увагу на те, що є також зелена хімія. Але тут фахівці спрямовують свою увагу на вдосконалення технологій хімічних процесів з метою захисту навколишнього середовища: землі, повітря, води.

А найважливіше те, що на державному рівні зрозуміли: економічний успіх та добробут суспільства зможуть забезпечити дешеві, ресурсозберігальні технології, не завдаючи при цьому шкоди навколишньому середовищу. І тут білій хімії, вочевидь, немає рівних!

З метою подальшого розвитку таких робіт в Україні, а також для координації досліджень, які здійснюються фахівцями різних наукових напрямів (хіміками, мікробіологами, біохіміками, фізіологами, генетиками, ботаніками), доцільно створити міждисциплінарну загальноакадемічну програму щодо фундаментальних проблем біомаси — потенціалу для хімічної, нафтохімічної та біотехнологічної індустрії. Її виконання дасть змогу нашим науковцям зробити свій внесок у розв'язання цієї глобальної проблеми.