

О. Золотарьова, Є. Шнюкова

## КУДИ ПРЯМУЄ БІОПАЛИВНА ІНДУСТРІЯ?

*Спроба зменшити викиди CO<sub>2</sub>, який у величезних кількостях утворюється і потрапляє в повітря внаслідок згорання нафтопродуктів, газу і вугілля, перейшовши на біопаливо, завершилася, на думку багатьох експертів, невдачею. Численні дослідження свідчать, що під час згорання біопалива 1-го покоління викиди парникових газів не зменшуються, а, навпаки, суттєво зростають. Це зумовлено тим, що в процесі обробки ґрунту, транспортування зерна, виготовлення добрив і пестицидів, перероблення рослин на біопаливо використовують багато нафтопродуктів. Часто-густо загальні викиди CO<sub>2</sub> під час виготовлення біопалива в декілька разів перевищують кількість поглинутої рослинами вуглекислоти. Нині у світі виникла ситуація, коли шкідливість біопалива 1-го покоління вже доведено, виробництво біопалива 2-го покоління ще не налагоджено, а уряди розвинених країн беруть курс на розвиток нових наукоємних біотехнологій наступних поколінь.*

Сучасна енергетика ґрунтується на спалюванні нафтопродуктів, вугілля та природного газу, що засмічує атмосферу величезною кількістю CO<sub>2</sub>, іншими парниковими газами (ПГ) та кислотоутворювальними оксидами азоту і сірки, завдаючи безпосередньої шкоди довкіллю внаслідок посилення парникового ефекту, що призводить до зміни клімату на планеті. Оскільки частка викопного палива в забезпеченні світових потреб сягає 88–89%, а його запаси, згідно з оцінками експертів, будуть невдовзі вичерпані, енергетична проблема набуває глобального розмаху і має всі ознаки екологічної кризи. Це спонукає вчених до негайних

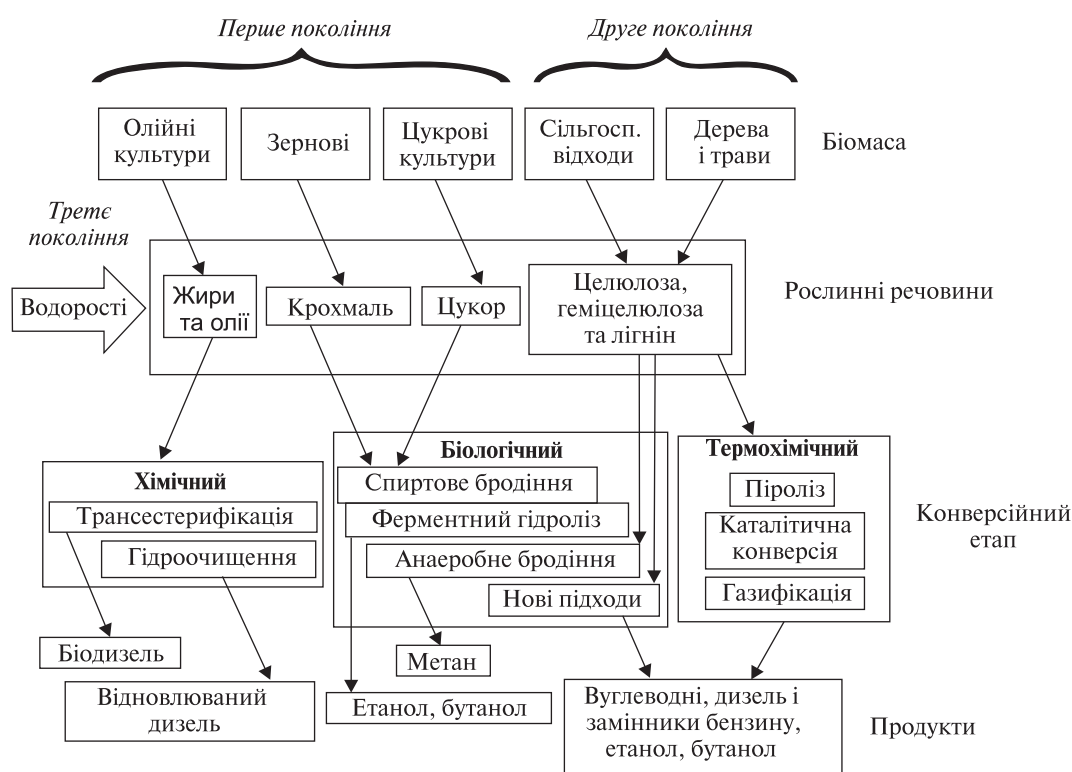
пошуків альтернативних джерел енергії, що передбачають використання поновлюваних ресурсів, зокрема енергії Сонця<sup>1</sup> [1].

Рідкі види біопалива, які виготовляють із біомаси для використання в автомобільних двигунах, поділяють на 1-е, 2-е і 3-є покоління [2]. 2-е і 3-є покоління називають також «просунутим» біопаливом.

**1-е покоління біопалива** виробляють із їстівних компонентів рослинної сировини,

<sup>1</sup> Сонячна енергія в процесі фотосинтезу перетворюється в хімічну, накопичуючись у наземних рослинах і водоростях у вигляді різноманітних речовин і може бути використана в процесі згорання їхньої біомаси.

© ЗОЛОТАРЬОВА Олена Костянтинівна. Доктор біологічних наук. Заступник директора, завідувач відділу мембранології і фітохімії Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України.  
ШНЮКОВА Єлизавета Іллієвна. Кандидат біологічних наук. Старший науковий співробітник цього ж інституту (Київ). 2010.



Шляхи конверсії біомаси біопалива першого, другого і третього покоління

зокрема із зерна кукурудзи, цукрової тростини, бульби маніюки і т.д. або пальмової, рапсової, соняшникової та соєвої олії. На жаль, сьогодні у виробництві біопалива використовують рослини, відібрані шляхом тривалої селекції для виготовлення продуктів харчування чи кормів. Найпоширенішими видами біопалива 1-го покоління є біоетанол (80% від загального виробництва рідкого біопалива), біодизель, рослинні олії та біогаз.

Для виробництва **біопалива 2-го покоління** використовують неїстівні залишки рослинної сировини (стебла пшениці, кукурудзи, деревину тощо) чи непродовольчі рослини. До них відносять так звані «енергетичні» культури: швидкоростучі багаторічні трави (наприклад, міскантус, деякі сорти проса тощо) чи дерева (верба, тополя та інші). Рідке біопаливо 2-го по-

коління виробляють способом термохімічної конверсії біомаси (біодизель) або бродіння (біоетанол із целюлозовмісної сировини).

Технології для виробництва багатьох видів біопалива 2-го покоління, як-от біоводень, біометанол, диметилфуран, біодиметилловий ефір, суміш спиртів, біодизель, ще остаточно не відпрацьовані.

**3-є покоління біопалива**, як вважають, варто виробляти з водоростей, перероблення яких дасть змогу отримати різні види палива з накопиченої біомаси (див. рис.).

#### РЕГЛАМЕНТУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА «ЗЕЛЕНОГО» ПАЛИВА

**Щ**е на поч. 70-х рр. ХХ ст. в країнах Заходу почали розробляти способи отримання енергії з біомаси рослинного і

тваринного походження. Розглядаючи біопаливо як джерело поновлюваної енергії [3], яку може продукувати будь-який регіон, переробляючи місцеві рослини або їхні рештки задля послаблення політико-економічної залежності від постачальників нафти, уряди розвинених країн вважали, що завдяки переходу на біопаливо їм пощастить скоротити викиди ПГ і поліпшити екологічну ситуацію. З поч. 2000-х рр. використання біопалива стало обов'язковим для країн ЄС і США, що зробили акцент на скороченні обсягів токсичних викидів численних автомобілів. Проте виробництво біопалива в більшості країн і досі залишається нерентабельним. Це призвело до появи негативних тенденцій, коли фермерів ЄС і США щедро субсидують, стимулюючи в такий спосіб виробництво сільгосппродуктів для їх перероблення на біопаливо. ЄС із цією метою щорічно виділяє 90 млн EUR. США витрачають ще більше — їхні субсидії виробникам зерна і олійних культур перевищують 11 млрд USD [4, 5].

Основний документ, що регламентує ринок біопалива в Європі, — директива Європарламенту та Ради ЄС 2003/30/ЄС від 8 травня 2003 «Про використання біопалива та інших видів поновлюваного пального на транспорті» [6]. Він установлює цільові нормативи споживання біопалива на 2005–2010 рр. у відсотках від сукупного обсягу споживання транспортного пального. Нормативи розраховано не за показниками фізичного обсягу, а за вмістом теплової енергії в одиниці виміру енергоносія. Наприклад, до кінця 2005 р. мінімальна частка «зеленого» пального в моторному паливі в європейських країнах мала становити 2%, а до 2010-го — 5,75%. Цікаво, що частка біопалива в деяких країнах, за даними того ж ЄС, уже в 2003-му перевищувала 10%.

Щоб довести частку біопалива, наприклад в Італії, до 1% від загальної кількості

споживаного всіма автомобілями і тракторами пального, необхідно віддати під бурякові, кукурудзяні та інші плантації 273 000 га посівної площі. Для збільшення частки біопалива до 5% доведеться засадити «енергосировинними» культурами площу, яка сягає майже 1,4 млн га, що становить понад 10% усіх сільгоспугідь цієї країни [7].

Енергетичну політику США регулює чинний із 2007 р. Акт енергетичної незалежності і безпеки, прийнятий конгресом, із терміном дії до 2022 р. Згідно з цим документом, загальна кількість біопалива, яку в США планують додавати до паливомастильних матеріалів (ПММ), у 2022 р. зросте майже у 8 разів. 15% потреб у ПММ будуть покривати за допомогою біопалива, на виробництво якого вже зараз фермерські господарства спрямовують третину вирощеної продукції. Якщо співвіднести ці параметри з прогнозами на 2022 р., то на той час під вирощування «енергетичних» культур доведеться відвести 40% орних земель [8].

#### **ЗВАЖАЮЧИ НА ВИТРАТИ**

Уже на поч. 90-х рр. ХХ ст. вчені, аналізуючи економічні питання впровадження біопалива, а також його вплив на довкілля, дійшли висновку, що поновлювані джерела енергії можуть бути надзвичайно неефективними, особливо ж біопаливо, отримане із зерна, виробники якого вимагають від урядів гіпертрофованих субсидій, оскільки змушені витратити величезну кількість води і хімічних добрив на вирощування сировини, що також, до речі, суттєво забруднює повітря і ґрунти. Один із послідовних критиків упровадження біопалива, виробленого із зерна, професор Конельського університету Девід Піменталь довів, що вирощування і перероблення на біопаливо культурних рослин (кукурудза, соя, соняшник) потребують набагато біль-

ше енергії, ніж її можна отримати від згорання виробленого з них етанолу чи біодизелю [9, 10]. Ще в 1994 р. Піменталь із співавторами писав: «Етанол, вироблений із зерна не є, безумовно, поновлюваним джерелом енергії. Його виробництво сприяє виснаженню агроресурсів і загострює етичні питання тоді, коли попит на їстівні продукти з боку щораз збільшуваного населення буде зростати».

Етанол має негативний баланс енергії. Для його виробництва із зерна, багаторічних трав або лісової біомаси необхідно на 29, 45, і 57% більше енергії, ніж її можна отримати від їх згорання. Згідно з розрахунками, для продукування біодизелю із сої треба на 27% більше, а для біодизелю із соняшнику – на 118% більше нафтопродуктів, ніж може бути отримано в енергетичному еквіваленті.

Прості термодинамічні оцінки доводять, що виробництво пального лише із зерна збиткове [11]: із 1 т пшениці можна отримати 0,276 т етанолу. Питома теплота згорання зерна – близько 17 МДж/кг. Таким чином, спаливши 1 т зерна, отримаємо тільки 17 ГДж енергії. Проте її кількість, вивільнена від згорання етанолу, становить лише 8,3 ГДж, тобто втрати – понад 50%. Питома теплота згорання пшеничної соломи – близько 10,9 ГДж, тобто вища, ніж в етанолу. Якби і зерно, і солону пшениці використати як тверде паливо, це дало б приблизно 28 ГДж енергії замість 8,3 ГДж, а її собівартість істотно скоротилася б, оскільки загальний вихід тепла був би в 4–5 разів вищий, ніж від використання лише зерна.

Загальновідомо, що культури, з яких виробляють етанол, мають низький енергетичний вихід із гектара. Отже, для одержання значної кількості етанолу потрібні великі площі орної землі. Наведемо наочний приклад: 2004 р. США використали 20% повного врожаю зернових, щоб ви-

бити таку кількість етанолу, що відповідає лише 1% нафти, яку вони споживають [12]. Крім цього, вирощування кукурудзи виснажує ґрунти, потребує багато азотних добрив, пестицидів, вологи, якої бракує в традиційно «кукурудзяних» регіонах, отже, перероблення її на біопаливо надто енерговитратне. Оскільки кукурудзяне зерно дуже поживне, його використовують для виробництва інших видів харчових продуктів, а перероблення його на біоетанол проковує зростання цін на них у США і в усьому світі.

Професор Піменталь вважає, що виробництво етанолу з целюлози менше зло, а активне просування зернового біоетанолу на паливний ринок – результат дії політиків, пов'язаних із аграрним лобі. Навряд чи виробництво етанолу для енергетичних потреб мало б таку політичну підтримку, якби його виробляли тільки з деревини чи багаторічних трав. Ось чому під прапором боротьби з ПГ і екологічним забрудненням протягом останніх десятиріч величезні кошти спрямовують фактично на збільшення шкідливих викидів, погіршення ґрунтів, посилення водного дефіциту, зростання цін на поживні культури, що призводить до дефіциту харчових продуктів і масового недоїдання в бідних країнах. Через нестачу коштів стримується і розвиток новітніх технологій виробництва біопалива 2-го покоління з альтернативної неїстівної сировини.

Головний редактор журналу «BioEssays» Андре Мур називає біопаливо 1-го покоління зозуленятком, годування якого щорічно потребує лише від США 6 млрд USD на біоетанол і 5 млрд USD на біодизель [13]. Свій внесок у підтримку цього ненажери зробила й Україна, профінансувавши низку програм із виробництва рапсової олії і крохмалю, з яких можна виготовляти біопаливо.

Для ретельного вивчення ситуації, що склалася навколо біопалива у Великобри-

танії, було створено комісію під головуванням Еда Галахера, яка 2008 р. оприлюднила звіт про непрямий вплив біопалива на довкілля [4]. Висновки комісії підтвердили накопичення численних негативних наслідків від швидкого і необґрунтованого розвитку біопаливних технологій:

- уповільнення переходу на біопаливо;
- низьке використання в його виробництві відходів і рослинних решток;
- експлуатування орних земель для вирощування «паливних культур», замість їх культивування на слабопристосованих для ведення традиційного сільського господарства площах;
- необхідність створення нових технологій отримання біопалива з більш високим ступенем перероблення сировини.

Комісія Галахера ініціювала перегляд нормативів щодо темпів використання біопалива для потреб транспорту, встановлених директивою 2003/30/ЄС, у бік їх зменшення. Так, замість запланованих 5,75% виробленого біопалива до 2010 р. комісія пропонує встановити нормативи на рівні 5% до 2013–2014 рр., а замість 20% до 2020 р. обмежити частку біопалива в ПММ від 8 до 10%.

Оцінюючи витрати на виробництво біопалива, треба враховувати чинники, від яких залежить кінцева вартість продукту: виробництво пестицидів і добрив, зрошення, робота сільгоспмашин, подрібнювачів і транспортних засобів, а також енергетичні витрати на забезпечення бродіння і отримання етанолу з браги [14]. Ці додаткові витрати покривають зазвичай завдяки федеральним і державним субсидіям, спрямованим на боротьбу з екологічним забрудненням, і, врешті-решт, перекладають на гаманці платників податків. Професор Піменталь наголошує, що значні субсидії не доходять до фермерів, осідаючи здебільшого у великих корпораціях, які виробляють етанол [15].

У січні 2008 р. Королівське товариство [16] і Парламент Великобританії оприлюднили дві доповіді, де дуже жорстко оцінено біопаливо першого покоління: «...Більшість біопалив 1-го покоління згубно впливає на навколишнє середовище... Політика урядів країн ЄС із скорочення викидів на користь біопалива є хибною» [17]. Англійський парламент вважає за доцільне взагалі оголосити мораторій на виробництво біопалива з харчових культур.

Набагато м'якшу, але теж негативну оцінку біопаливу 1-го покоління дав Європарламент [18]. У дебатах із проблем клімату Комісія з промисловості й енергетики затвердила до 2020 р. підвищення до 10% частки поновлюваних енергоресурсів у загальному обсязі палива, яке споживають транспортні засоби, тобто зменшила нормативи, порівняно з директивою 2003 р. У директиві «Про стимулювання використання поновлюваних видів енергії» 2009/28/ЄС Європарламент також пропонує обмежити роль біопалива 1-го покоління (біодизель, біоетанол) у програмі розвитку поновлюваних енергоресурсів на користь, зокрема, вітрової, сонячної та водної енергії. Цей документ регулює, до речі, такі питання, як скорочення викидів парникових газів завдяки використанню біопалива, захист земель із високою природоохоронною цінністю і високим рівнем накопичення вуглецю, встановлює додаткові вимоги для сільгоспкультур — сировини для біопалива, — які вирощують у ЄС, а також регулює питання стійкості сільгоспвиробництва.

Україна, як відомо, в останні роки стала великим експортером рапсу до країн ЄС, постачаючи їм до 90% виробленого насіння. Нещодавно ми посіли 1 місце в Європі за обсягами посівів сої, яку, ймовірно, також планують експортувати до ЄС. Однак зміна стратегії ЄС щодо біопалива і введення з 1 липня 2010 р. (згідно з директи-

вою 2009/28/ЄС) [18] обов'язкової сертифікації сировини за визначеними критеріями може боляче вдарити по українських виробниках рапсу, призвівши до втрати європейського ринку для нашої держави і зникнення цієї культури з її полів.

Парламент ЄС стурбований високими цінами біопалива 1-го покоління, яке вже не вважають безпечним для навколишнього середовища. Євродепутати висловлюють сумнів щодо його економічної життєздатності, тому вони підтримуватимуть виробництво електромобілів і біопалива так званого 2-го покоління, яке одержують із деревини, соломи (целюлози), а також із водоростей.

#### КОРИГУЮЧИ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС

Німеччина переглянула свою стратегію щодо виробництва біопалива. Підставою було передусім не вигідне внутрішнє виробництво: за 1 т «біопаливної» пшениці 2009 р. німці платили 70 EUR, а нині — 230 EUR [19]. «Ніякого біопалива з культур, заради яких вирубуються джунглі, робити не будемо», — заявила канцлер ФРН Ангела Меркель.

Але Німеччина буде повністю відмовлятися від біопалива. Вона працює над створенням його 2-го покоління, виробленого з відходів водних очисних споруд, соломи тощо. «Хоча на території сучасного ЄС немає небезпеки витіснення «біопаливними» культурами продовольчих (на біоетанол або біодизель спрямовують лише 2% вирощеного зерна), але дотацію в розмірі 90 млн EUR потрібно анулювати», — зазначила єврокомісар із сільського господарства Маріанна Фішер-Боель. Утім ЄС поки що не відмовляється від проголошеної мети — 10% біопалива до 2020 р. З одного боку, для здійснення плану знадобиться 17% сільгоспугідь ЄС, з другого — надходження продукту 2-го покоління очікують лише в 2025 р. [18].

16 жовтня 2009 р. Організація Об'єднаних Націй оприлюднила доповідь, у якій відзначила, що швидкий і незважений перехід на біопаливо матиме негативні наслідки для навколишнього середовища і добробуту жителів країн, що розвиваються. Експерти ООН вважають, що, перш ніж збільшити частку біопалива в енергетичному балансі, необхідно продумати систему вирощування і відновлення рослинних культур. На їхню думку, в країнах, що розвиваються, де ці культури переважно й вирощуватимуть на біопаливо, можуть зрости ціни на землю, а отже, на харчові продукти й інші сільгосптовари [12].

Деякі експерти вважають, що виробництво етанолу з целюлози також має негативний баланс енергії подібно до виробництва спирту із зерна, але дерева й багаторічні трави, як-от пруттоподібне просо (*Panicum virgatum* L.), набагато простіші в культивуванні. Їх вирощування не потребує значної кількості добрив і гербіцидів, не виснажує ґрунтів, зберігає вологу. Тому для виробництва етанолу доцільніше використовувати целюлозну сировину [12].

Щодо біопалива, яке будуть виробляти з непродовольчої сировини за технологіями 2-го покоління, необхідно зауважити, що ці технології ще не набули значного поширення, а багато з них перебувають на стадії проектування чи випробування. Це дало А. Муру підстави поставити в заголовок своїх аналітичних статей запитання: «Biofuels are dead: long live biofuels(?)» — «Біопалива мертві: життя біопалив триває (?)» [13]. Називаючи ситуацію з біопаливом 1-го покоління катастрофою, А. Мур пропонує посилити наукові дослідження в напрямі створення нових технологій. Серед них — перероблення сировини на біопаливо термохімічним способом: газифікація біомаси, піроліз і

каталітична конверсія за методом Фішера-Тропша<sup>2</sup>, які потребують високих температур і тиску [21].

Незважаючи на високу ефективність, термохімічні процеси не набули широкого розмаху через потребу значних початкових інвестицій і будівництва великих заводів. Такі підприємства залежатимуть від постачання сировини, величезні кількості якої треба буде систематично переробляти. Невирішеність цих питань зумовлює те, що технологію Фішера-Тропша для перероблення біомаси застосовують на лічених підприємствах. Аналогічна ситуація і з піролізом біомаси, який відбувається при температурі +450–500 °C і дає змогу отримувати біогаз або біонафту.

Основним методом, дешевим і низькотемпературним, одержання палива з біомаси є бродіння, внаслідок якого утворюється етанол. Однак воно не дає можливості перетворити весь вуглець біомаси в рідке паливо. З рослинних вуглеводнів лише цукор (із крохмалю) здатний до бродіння, а целюлоза, яка містить значну кількість лігніну, дуже погано піддається ферментативній деградації. Прикладом сучасного виробництва, яке у відносно низькотемпературних

<sup>2</sup> Процес Фішера-Тропша — це екзотермічний процес каталітичної конверсії монооксиду вуглецю (CO) і водню (H<sub>2</sub>) з утворенням різних рідких вуглеводнів. Зазвичай використовують каталізатори, що містять залізо і кобальт. Принципове значення цього процесу — виробництво синтетичних вуглеводнів (синтетичне мастило або паливо).

Газифікація сировини — перетворення органічної частини твердого або рідкого палива в горючі гази при високотемпературному (1000–2000°C) нагріванні з окисником (кисень, повітря, водяна пара, CO<sub>2</sub> або, частіше, їхня суміш) [22]. У результаті отримують генераторний газ (апарати, у яких відбувається цей процес, називають газогенераторами). У досконалій системі, де екзотермічний процес Фішера-Тропша об'єднаний із ендотермічним процесом газифікації, втрати енергії мінімізовані, а кількість вуглецю всередині дорівнює кількості вуглецю поза системою. Це дає змогу перевести весь вуглець рослинної сировини у відновлену форму рідкого палива.

умовах уможливить глибоку деградацію біомаси з утворенням етанолу, стане, напевно, завод «BioGasol» [23] на данському острові Борнхольм, розташований безпосередньо серед пшеничних полів<sup>3</sup>. Такі заводи відносно невеликі за розміром, розраховані на перероблення соломи та інших рослинних решток. Біомасу спочатку заздалегідь обробляють вибухами пари й у вогкому стані окислюють, потім піддають двом послідовним циклам бродіння, у ході яких утворюється етанол: для першого бродіння використовують лише дріжджі і гідролізувальні ферменти при +32°C; друге відбувається при +70°C із теплолюбними анаеробними бактеріями (штам BD1) [23]. Органічний твердий паливний залишок переводять у пелети, рідку глину анаеробно деградують до метану, який використовують для забезпечення енергетичних потреб виробництва. Процес дає можливість конвертувати 70% потенційної енергії біомаси у форми, придатні для використання [24].

#### ВЕЛИКИЙ БІОЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МІКРОВОДОРОСТЕЙ

На думку фахівців, 3-є покоління біопалива вироблятимуть, найімовірніше, з водоростей. Їхню біомасу можна успішно переробляти за допомогою кожного з відомих способів (див. рис.). Особливість мікроводоростей у тому, що деякі їхні види здатні екскретувати цукри, вуглеводні або етанол назовні, у культуральне середовище, тобто енергетичні речовини можна отримати без порушення рослинних культур. Нижче наводимо деякі приклади перспективного використання мікроводоростей у біоенергетиці [25, 26].

<sup>3</sup> У лютому 2010 р. акції заводу «BioGasol» було продано британській акціонерній компанії «Fjord Capital Partners» для завершення комерціалізації і побудови нових підприємств. Торік у будівництво 4 аналогічних заводів у США було інвестовано 114 млн USD.

Вуглеводні мікроводоростей — приваблива альтернативна сировина для виробництва етанолу, оскільки вони не конкурують із поживним крохмалем або цукрами на продовольчому ринку. Нещодавно довели, що біоетанол із високим виходом (~38% w/w) можна одержати з деліпидованої біомаси планктонної мікроводорості *Chlorococum sp.* способом ферментації за допомогою дріжджів *Saccharomyces bayanus* [27].

#### **Продуктування етанолу живими мікроводоростями**

Деякі мікроводорості здатні виробляти етанол, екскретуючи його назовні в культуральне середовище, звідки його можна зібрати, не пошкоджуючи тієї чи іншої рослинної культури. Таким чином, фотосинтетична акумуляція сонячної енергії, депонування CO<sub>2</sub> і продуктування етанолу відбуваються під час одного процесу. Продуктування біоетанолу набагато пришвидшується в генетично модифікованих прокаріотів [28]. Ціанобактерії — автотрофні прокаріоти, які здійснюють оксигенний фотосинтез і накопичують глікоген як основну форму вуглецю. Завдяки введенню нових генів у ціанобактерію *Synechococcus sp.* (штам PCC 7942) винайдено новий спосіб утилізації вуглецю з утворенням етанолу. Трансформовані культури синтезують етанол, який крізь клітинну стінку проникає в культуральне середовище [29] і може бути відокремлений від клітин без їх пошкодження.

#### **Біодизель із мікроводоростей**

Через високий вміст ліпідів багато видів мікроводоростей можуть стати перспективним джерелом сировини для виробництва біодизелю. Це підтверджено даними про те, що з 1 га землі можна отримати 446 л соєвої олії або 2690 л пальмової, а з такої ж площі водної поверхні — близько 90 000 л біодизелю.

Установлено, наприклад, що вміст ліпідів у *Scenedesmus dimorphus* за різних умов може коливатися в межах 16–40%, а в *Chlorella vulgaris* — 14–22% від маси сухої речовини. Крім цього, якість біодизелю залежить від жирнокислотного складу вихідної сировини. З насичених жирних кислот у складі водоростей переважає пальмітинова, з ненасичених — пальмітоолеїнова (16:1) і ліноленова (18:3). Показово те, що загальна ненасиченість жирних кислот ліпідів мікроводоростей значно вища, ніж у пальмової олії, яка, однак, поступається соєвій. Необхідно також враховувати, що жирнокислотний склад ліпідів мікроводоростей може суттєво змінюватися залежно від варіювання умов їх вирощування. Зниження температури культивування, як і підвищення рівня освітленості, призводить до зростання частки ненасичених жирних кислот у хімічному складі водоростей.

В останні роки суттєво зросла увага до культивування мікроводоростей і технологій отримання з них біодизелю [30]. З 1978 до 1996 рр. Департамент енергетики США досліджував водорості з високим вмістом олії за програмою «Aquatic Species Program» [31]. Дослідники дійшли висновку, що в штатах Каліфорнія, Гаваї і Нью-Мексико можливе промислове виробництво водоростей у відкритих ставках. Було встановлено, що 200 тис. га ставків можуть давати кількість палива, достатню для річного споживання 5% автомобілів США.

#### **Мікроводорість *Botryococcus braunii* Kütz. — продуцент вуглеводнів**

Дуже перспективним продуцентом поновлюваного джерела енергії — рідких вуглеводнів — є зелена колоніальна водорість *Botryococcus braunii*, вивченню якої протягом останніх десятиріч приділяють велику увагу. *B. braunii* поширена в прісних і солонуватих водах помірних і тропічних зон, містить близько 75% вуглеводнів від маси



сухої речовини залежно від умов росту і різновидів водорості. Вуглеводні накопичуються всередині клітин, і водорості з великим їх вмістом спливають на поверхню водойм. Після збирання водоростей ці вуглеводні легко відділити способом екстракції будь-яким органічним розчинником або методом деструктивного відгону. Таким способом можна отримати речовину, що близька за своїм складом до дизельного палива і гасу. Вихід вуглеводнів за оптимальних умов культивування може досягати 60 т/га на рік.

Ретельне вивчення хімічного складу зразків *B. braunii*, які були зібрані в різних географічних зонах, дало змогу встановити, що водорості в природі наявні в кількох різновидах і відрізняються пігментацією та структурою синтезованих вуглеводнів. За цією ознакою водорості поділяють на три хімічні раси.

З фахової літератури довідуємося про вміст вуглеводнів у близько 60 зразків *B. braunii* як у видів, культивованих у лабораторіях, так і в зібраних у всіх кліматичних зонах, за винятком Антарктики [32–34].

Унаслідок локалізації значної частини вуглеводнів у зовнішніх стінках мікроводорості їх можна ефективно вилучити під час нетривалого контакту сирової біомаси з неотруйним розчинником. Таким способом можуть бути екстраговані гексаном майже 70% вуглеводнів від їхньої загальної кількості без порушення життєздатності клітин мікроводорості.

Рідке паливо з *B. braunii* можна отримати також способом термохімічного зрідження біомаси за наявності карбонату натрію [35]. У природі представники *B. braunii*, як і багато інших видів, здатні до бурхливого росту — явища, відомого як «цвітіння вододойм», але, на відміну від багатьох мікроводоростей, які інтенсивно ростуть, їх досі не вдається культивувати для промислового перероблення.

Продуктування молекулярного водню мікроводоростями перебуває сьогодні на стадії експериментів. Це абсолютно чисте паливо, яке характеризується високою теплотворною здатністю — 143 кДж/г. Воно має високу енергоємність, яка в 3–5 разів перевищує аналогічний показник бензину й нафти, універсальні енергетичні властивості: відновник, енергоносіє і паливо. Хімічний та електрохімічний способи отримання  $H_2$  неекономічні, тому раціональніше використовувати мікроорганізми, здатні виділяти водень. Такою властивістю володіють аеробні й анаеробні хемотрофні бактерії, пурпурові й зелені фототрофні бактерії, ціанобактерії, різні водорості й деякі найпростіші [25, 26, 36–38]. Їх використання викликає особливий інтерес із огляду на більшу ефективність перетворення ними сонячної енергії, порівняно з вищими рослинами.

Наявність нелімітованого джерела енергії (сонячного світла, надлишку субстрату фотолізу — води), висока теплотворна здатність водню (29 ккал/г порівняно з 3,5 ккал/г для вуглеводнів), можливість поновлювання процесу і, нарешті, те, що фотохімічна трансформація води у водень відбувається за нормальної температури без утворення токсичних проміжних сполук, робить водневу біотехнологію за участю мікроводоростей одним із найперспективніших напрямів розв'язання ряду глобальних проблем, у тому числі й енергетичної [35].

Перспективність водневого палива як одного із заміників нафтопродуктів підтверджено інноваційними програмами, ухваленими урядами деяких держав, щораз більшим парком водневого транспорту і автозаправних станцій, які діють у ЄС і США.

\* \* \*

Майбутнє біопалива сьогодні не зовсім чітке. Ті сподівання, які десятиріччя тому поклалися на нього як на просте розв'язання енергетичної проблеми і панацею в

боротьбі з ПГ, виявилися марними — прості й дешеві рішення вкотре не стали успішними. Зараз триває копітка праця щодо створення біопаливної індустрії фактично *de novo* і розроблення нових підходів до виготовлення біопалива 2-го і 3-го покоління.

Наостанок поставимо ще одне запитання: а чи є перспектива в українського біопалива? Вважаємо за можливе відповісти: «Є!» Але яка ця перспектива: чи бути постачальником сировини для більш розвинених країн, чи знайти свій шлях до сучасної поновлюваної енергетики? Вибір за нами.

1. Escobar J. C., Lora E.S., Venturini O.J. et al. Biofuels: Environment, technology and food security // *Renew. Sust. Ener. Rev.* — 2009. — Vol. 13. — №6-7. — P. 1275–1287.
2. Ponti L., Gutierrez A. P. Overview on Biofuels From a European Perspective // *Bull. Sci. Tech. Soc.* — 2009. — Vol. 29. — №6. — P. 493–504.
3. Sheehan J.J. Biofuels and the conundrum of sustainability // *Curr. Opin. Biotech.* — 2009. — Vol. 20. — №3. — P. 318–324.
4. The Gallagher Review of the indirect effects of biofuels production // [http://www.Renewable-fuel-agency.gov.uk/\\_db/\\_documents/Report\\_of\\_the\\_Gallagher\\_review.pdf](http://www.Renewable-fuel-agency.gov.uk/_db/_documents/Report_of_the_Gallagher_review.pdf).
5. Inderwildi O. R., King D. A. Quo Vadis Biofuels // *Ener. Environ. Sci.* — 2009. — №2. — P. 343–346.
6. Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 // [http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en\\_final.pdf](http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en_final.pdf).
7. Жигарев А. Призрак этанола бродит по планете. «Огненная вода» для «железных коней» // *Аграрное обозрение.* — 2008 (<http://agroobzor.ru/bio/a-110.html>).
8. Thomas V.M., Choi D.G., Luo D. et al. Relation of biofuel to bioelectricity and agriculture: Food security, fuel security, and reducing greenhouse emissions // *Chem. Eng. Res. Des.* — 2009. — Vol. 87. — №9. — P. 1140–1146.
9. Pimentel D. Ethanol fuels: Energy security, economics, and the environment // *J. Env. Ethics.* — 1991. — №4. — P. 1–13.
10. Pimentel D., Rodrigues G., Wane T. et al. Renewable Energy: Economic and Environmental Issues // *BioSci.* — 1994. — Vol. 44. — №8. — P. 1–20.
11. Ponton J.W. Biofuels: Thermodynamic sense and non-sense // *J. Clean. Prod.* — 2009. — Vol. 17. — №10. — P. 896–899.
12. Pimentel D., Patzek T.W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower // *Nat. Resour. Res.* — 2005. — №14. — P. 65–76.
13. Moore A. Biofuels are dead: long live biofuels(?) // *New Biotech.* — 2008. — Vol. 25. — №1. — P. 6–15.
14. Hill J., Polasky S., Nelson E. et al. Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline // *Proc Natl Acad Sci USA.* — 2009. — Vol. 106. — №6. — P. 2077–2082.
15. Pimentel D., Patzek T., Cecil G. Ethanol production: energy, economic, and environmental losses // *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* — 2007. — Vol. 189. — P. 25–41.
16. UK House of Commons First Report from the Select Committee on Environmental Audit. — 2008 (<http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200708/cmselect/cmenvaud/6/7602.htm>).
17. Sustainable biofuels: prospects and challenges, Royal Society. — 2008 (<http://royalsociety.org/document.asp?tip=1&id=7366>).
18. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>).
19. Жигарев А. Хлеб наш насущный. От изобилия дешевых продуктов — к голоду и обратно? // *Аграрное обозрение.* — 2008 (<http://agroobzor.ru/zar/a-120.html>).
20. UNEP The report Towards Sustainable Production and Use of Resources: Assessing Biofuels. — 2009 ([www.unep.fr/scp/rpanel/pdf/assessing\\_biofuels\\_full\\_report.pdf](http://www.unep.fr/scp/rpanel/pdf/assessing_biofuels_full_report.pdf)).
21. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. — СПб: Химиздат, 2005. — 912 с.
22. Bridgwater A.V. Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass // *Catal. Today.* — 1996. — №29. — P. 285–295.
23. [www.biogasol.com/](http://www.biogasol.com/).
24. <http://www.investindk.com/visNyhed.asp?artikelID=23567>.
25. Перспективи використання мікрородоростей в біотехнології / О.К. Золотарьова, Є.І. Шнюкова, О.О. Сиваш, Н.Ф. Михайленко; за ред. О.К. Золотарьової. — К.: Альтерпрес, 2008. — 234 с.
26. Золотарева Е.К., Шнюкова Е.И., Подорванов В.В. Микрородорости как продуценты фотоводорода // *Альгология.* — 2010. — Вып. 20. — № 2. — С. 236–261.
27. Harun R., Danquah M.K., Forde G.M. Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* — 2009. — Vol. 85. — №2. — P. 199–203.
28. Deng M.D., Coleman J.R. Ethanol synthesis by genetic engineering in cyanobacteria // *Appl. Environ. Microbiol.* — 1999. — Vol. 65. — №2. — P. 523–528.

29. *Dexter J., Fu P.* Metabolic engineering of cyanobacteria for ethanol production // *Energy Environ. Sci.* — 2009. — №2. — P. 857–864.
30. *Francis G., Edinger R., Becker K.* A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India. Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations // *Nat. Resour. Forum.* — 2005. — Vol. 29. — №1. — P. 12–24.
31. *Van Gerpen J.* Biodiesel processing and production // *Fuel Process. Technol.* — 2005. — Vol. 86. — №10. — P. 1097–1107.
32. *Komárek J., Marvan P.* Morphological differences in natural populations of the genus *Botryococcus* (Chlorophyceae) // *Arch. Protist.* — 1992. — Vol. 141. — №1-2. — P. 65–100.
33. *Волова Т.Г., Дегерменджи А.Г., Жила Н.О., Калачева Г.С.* Структура углеводов *Botryococcus*, выделенной из озера Шира // *Arch. Protist.* — 2001. — Vol. 378. — №5. — P. 703–707.
34. *Metzger P., Largeau C.* *Botryococcus braunii*: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* — 2005. — Vol. 66. — P. 486–496.
35. *Sawayama S., Minowa T., Yokoyama S.-Y.* Possibility of renewable energy production and CO<sub>2</sub> mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae // *Biomass Bioenergy.* — 1999. — Vol. 17. — №1. — P. 33–39.
36. *Бородин В.Б., Цыганков А.А., Рао К.К., Холл Д.О.* Фотообразование водорода культурой *Anabaena variabilis* PK84 // *Физиология растений.* — 2000. — Т. 47. — №5. — С. 768–773.
37. *Волова Т.Г., Терсков И.А., Сидько Ф.Я.* Микробиологический синтез на водороде / Под ред. Б.Г. Коврова. — Новосибирск: Наука, 1985. — 115 с.
38. *Stencel C.* Green algae could someday yield green energy // *ASM News.* — 2000. — Vol. 66. — №7. — P.389–390.

*О. Золотарьова, Є. Шнюкова*

#### КУДИ ПРЯМУЄ БІОПАЛИВНА ІНДУСТРІЯ?

##### Резюме

У статті проаналізовано сучасний стан поширення біопалива в країнах ЄС і США та його перспективи. Після того, як у 2009 р. ООН і Європейський парламент закликали світову громадськість відмовитися від використання біопалива 1-го покоління, зросла увага до створення альтернативного біопалива 2-го покоління. Автори розглядають напрями сучасних досліджень щодо створення біопалива 3-го покоління, яке, на думку вчених, доцільно виробляти з водоростей.

*Ключові слова:* парникові гази, мікрководорості, біоетанол, біодизель, фотосинтез.

*O. Zolotaryova, E. Shnyukova*

#### WHERE BIOFUEL INDUSTRY GOES TO?

##### Summary

The survey provides analysis of the modern state of biofuel propagation in the EU countries and USA as well as prospects. As soon as UN and European parliament called the world community in 2009 to refuse to use 1st generation biofuel, attention was drawn to the development of alternative biofuel of the 2nd generation. Authors review the trends of modern researches aimed at development of the 3rd generation biofuel that scientists think to be made of water plants.

*Keywords:* greenhouse gases, micro water plants, bioethanol, biodiesel, photosynthesis.