

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

*Проведено порівняльний аналіз різних підходів до визначення енергоекономічної ефективності біодизельного палива з насіння ріпаку та зроблено висновок щодо економічної доцільності його виробництва. Розглянуто декілька перспективних методів обґрунтування такого висновку, у тому числі шляхом розподілення повної первинної енергії на невідновлювані і відновлювані складові та на енергію традиційного палива і енергію вихідної сировини (рапсу), які є радикально протилежними з точки зору їх доступності та економічної доцільності.*

*Ключові слова:* енергетична ефективність, енергоємність, виробництво біодизеля.

Сучасні світові тенденції в енергопостачанні і енерговикористанні значною мірою визначаються узгодженою енергетичною політикою розвинутих країн, цілеспрямованою на стримування попиту на нафту і природний газ, та зменшення викидів парникових газів (ПГ) більш ніж у два рази до 2050 року. Це стимулює до переходу від технологій, що використовують традиційні викопні види палива, на інноваційні енергетичні технології використання палива з низьким вмістом вуглецю, які мають відіграти вирішальну роль в досягненні запланованих змін шляхом широкого впровадження альтернативних джерел енергії.

Чисельні публікації з обґрунтування доцільності та ефективності використання альтернативних джерел енергії в системах тепло- і енергозабезпечення, а також у ролі палива для транспортних засобів, свідчать про те, що насіння ріпаку може стати одним з основних видів рослинної сировини для виробництва біодизеля в багатьох країнах світу [1–9]. За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства до 2050 року біопаливо буде забезпечувати до 27% від загального обсягу споживаного на транспорті палива, де сприятиме заміні дизель-

ного пального, а також допоможе уникнути близько 2,1 Гт викидів CO<sub>2</sub> на рік.

На рис. 1 наведено обсяги вирощування насіння ріпаку з 1965 по 2012 роки в деяких провідних країнах та у світі в цілому. У 2013 році обсяги вирощування насіння ріпаку у світі зросли до 71,2 млн тонн, а у 2014 році трохи зменшилися – до 70,2 млн тонн [10]. За цим показником, з обсягами 1,2–1,9 млн тонн насіння ріпаку у 2009–2012 роках, Україна входить до першої десятки провідних країн світу, хоча потенціал країни ще далеко не вичерпаний в плані розширення посівних площ, підвищення врожайності, зменшення втрат та впровадження енергозберігаючих заходів.

Замість продажу насіння ріпаку за кордон як сировини, набагато більш широкі можливості для України розкриваються у разі розгортання власного виробництва біодизеля з вирощеного насіння.

На рис. 2 наведено обсяги виробництва біодизеля в ряді провідних країн світу, на основі яких можливо оцінити потенціал ринку біодизеля у світі. Його виробництво стрімко наростає – з 3,8 млн тонн у 2005 році до 20,9 млн тонн у 2011 році.

Україна поки що не входить до переліку провідних країн світу за виробництвом біодизеля,

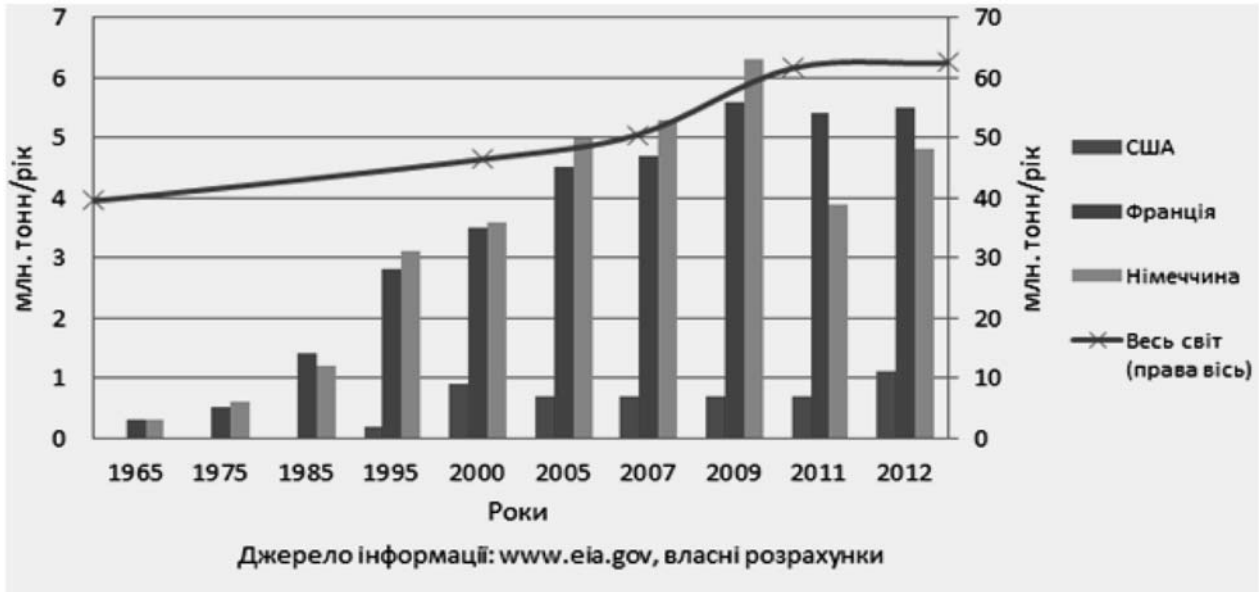


Рис. 1. Обсяги вирощування насіння ріпаку в деяких країнах світу

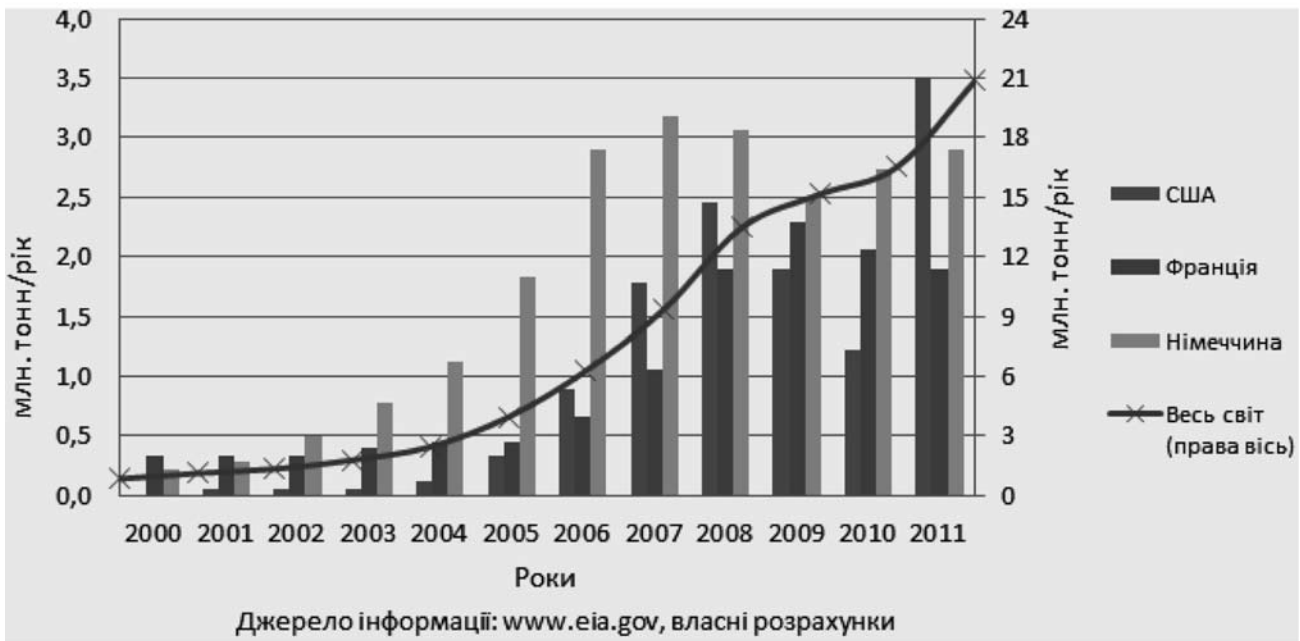


Рис.2. Виробництво біодизеля в деяких країнах світу

при цьому втрачаючи можливості заміни імпортованих нафти та природного газу на потреби, у першу чергу, транспортної галузі, сільського та житлово-комунального господарства. В Україні побудовано біодизельні установки й заводи, які за повного завантаження в змозі виробляти до 1,0 млн тонн біодизельного палива на рік. В м. Калуші побудовано завод на 170 тис. т/рік, а на фермерському господарстві

«Кільган» (Львівська область) в 2013 році запущено дві лінії з виробництва біодизеля загальною потужністю 10,5 тис. т/рік.

Однак більшість цих установок і заводів завантажені лише наполовину, оскільки європейський споживач неохоче купує готову українську продукцію, зате 90% вирощеного ріпаку експортується в ЄС. Всесвітня економічна криза призвела до зниження у 2009 році попиту

не тільки на біопаливо, а і на сировину, а в Україні – до скорочення обсягів виробництва ріпаку на 36%, до 1,8 млн тонн, та до зупинки практично всіх біодизельних заводів. Загибель частини озимих посівів ріпаку на початку 2010 року призвела до зростання цін на сировину до 2,80–2,85 тис. грн/т та зростання собівартості виробленого з цієї сировини біодизеля до 10–12 грн/л, що виявилася вищою за традиційне паливо за ціною 7–8 грн/л.

Низку додаткових стимулів та переваг для виробників біопалива запроваджено Законом України у 2009 році [11]. Зокрема, продавці біопалива і обладнання для його виробництва на 10 років звільняються від сплати податку на прибуток, для моторного біопалива запроваджується нульова ставка акцизного збору та скасовується ввізне мито на обладнання для виробництва біопалива.

За означених умов проблема визначення енергоекономічної доцільності вирощування ріпаку з метою виробництва біодизеля в Україні порівняно з можливостями експорту сировини та закупівлі біодизеля за кордоном, залишається актуальною і досі ще не вирішеною проблемою, яка потребує подальшого наукового вивчення і пошуку шляхів подолання існуючих перешкод [7–9, 12].

У загальному випадку ефективність  $E$  будь-якого процесу або діяльності (роботи, дії тощо) визначається відношенням досягнутого ефекту (результату, випуску) до витрат на його досягнення за формулою:

$$E = A_E / B_C \quad (1)$$

де результат  $A_E$  і витрати  $B_C$  можуть бути представлені у натуральному або вартісному вираженні. За цією формулою визначаються ефективність, продуктивність та результативність (поняття інтенсивності визначається оберненим виразом). На жаль, загальних правил розрахунку складових цієї формули не існує, і тому в кожному конкретному випадку доводиться узгоджувати фізичний та економічний зміст та «вагу» цих складових.

Як можна бачити з формули (1), ефективність, на відміну від ефекту, є відносною величиною, визначення якої полягає в діленні величини ефекту (результату) на величину витрат ресурсів (матеріальних, енергетичних, трудових і т. ін.), тобто це ефект на одиницю витрат.

Звідси, за інших рівних умов, чим більший ефект (або результат) і менше застосовані для цього ресурси, тим вища ефективність системи (процесу, діяльності).

Визначення енергоефективності (енергоємності тощо) виробництва рослинної продукції має свої особливості, перш за все, зумовлені:

- впливом природних відновлюваних ресурсів, показники яких у межах ґрунтово-кліматичних зон коливаються в широкому діапазоні, визначаючи продуктивність вирощування рослинної продукції;
- процесом виробництва продукції;
- післядією внесених добрив, що виявляються впродовж 3–5 років, тому їх енергетичний вплив необхідно розподіляти пропорційно досягнутому ефекту за роками;
- залежністю врожайності і якості продукту від часу та умов збирання, транспортування та зберігання врожаю;
- необхідністю урахування в енергетичному балансі виробництва традиційних і альтернативних енергетичних ресурсів;
- необхідністю проводити розрахунок енергоефективності виробництва на одиницю маси продукції та на одиницю площі поля.

У сукупності це призводить до необхідності проведення системного визначення та порівняльного аналізу взаємовпливу традиційних і альтернативних енергетичних ресурсів на енергетичні, економічні та екологічні показники виробництва продуктів рослинного походження, що розглядаються.

Серед публікацій, присвячених визначенню енергоекономічної та екологічної ефективності біодизеля, відзначимо роботи [7–9, 12–15], в яких розглядаються системні підходи до розв'язання цього питання. Якщо, сумнівів та розбіжностей щодо екологічних переваг біодизеля практично немає, то розбіжності у чисельних значеннях показників його енергетичної та економічної ефективності, зумовлених головним чином різноманіттям застосованих методичних підходів, викликають чимало наукових дискусій. Розглянемо більш детально результати та висновки, що викладені в двох публікаціях, де ці розбіжності висвітлюються найбільш повно [12, 13].

Детальний аналіз енергоємності виробництва біодизельного пального в умовах України з урахуванням витрат енергії на вирощування ріпаку, його збирання, транспортування, збері-

гання та переробку проведено у роботі [13].

Калькулювання повної енергоємності будь-якого продукту є складним процесом, що потребує проведення розрахунків обсягів енергії, витраченої на виробництво, транспортування зберігання та переробку всіх видів матеріально-технічних, енергетичних, трудових тощо ресурсів, задіяних у процесі виробництва даного продукту, у нашому випадку – комбайнів, енергетичного устаткування, палива і електроенергії, насіння тощо.

Енергетичну ефективність біодизеля  $E_e$  у роботі [13] оцінено за формулою (1) з тією деталізацією, що досягнутий ефект вимірюється кількістю енергії  $W_A$ , отриманої при використанні одиниці біодизельного палива, а сукупні витрати – кількістю енергії  $W_B$ , витраченої на отримання цієї одиниці біопалива. Обидві ці складові розраховувалися в тепловому еквіваленті у МДж/кг за нижчою теплою згорання.

Розглядався випадок виробництва біодизеля з ріпакової олії шляхом її переетерифікації метиловим спиртом, де прийнято [13]:

- Теплотворна здатність біодизельного пального за нижчою температурою згорання дорівнюватиме  $W_A = 33,0\text{--}40,0$  МДж/кг (за даними довідника).

- Процес переетерифікації 1 кг ріпакової олії потребує 0,108 кг (0,136 л) метанолу, що є еквівалентним затратам енергії в 3,086 МДж.

- Підтримання стабільності ґрунту щодо вмісту поживних речовин за умови повного повернення соломи ріпаку в ґрунт потребує внесення мінеральних добрив з відповідною кількістю діючих хімічних речовин: 0,097,5 кг N (енергетичний еквівалент 8,643 МДж), 0,045 кг  $P_2O_5$  (0,567 МДж), 0,028 кг  $K_2O$  (0,228 МДж).

- Прямі енерговитрати на виробництво 1 кг біодизельного пального в перерахунку на дизельне паливо становлять 0,235–0,365 кг (10,579–16,424 МДж), із них: у сільському господарстві (0,096–0,150 кг, або 4,338–6,736 МДж), на олійних заводах (0,064–0,099 кг, або 2,857–4,432 МДж), на стадії переетерифікації (0,075–0,117 кг, або 3,384–5,256 МДж).

- Непрямі енергетичні витрати: насіння, борне добриво, фунгіцид, інсектицид, енергетичний еквівалент яких не перевищує 0,4 МДж.

З урахуванням зазначеного вище, енергоємність виробництва біодизельного палива за середньої врожайності ріпаку 25 ц/га визначе-

но величиною  $W_B = 23,5\text{--}29,4$  МДж/кг, а енергетичну ефективність біодизеля оцінено коефіцієнтом  $E_e = (33,0\text{--}40,0)/(23,5\text{--}29,4) \approx 1,4$ . Повну енергоємність виробництва біодизельного палива з урахуванням енергетичного еквівалента факторів, спричинених фізичною працею людей, амортизацією обладнання та споруд, податками і зборами на зарплату та іншими неврахованими вище витратами, автори роботи оцінюють в розмірі 40–50 МДж/кг ( $E_e = 0,8\text{--}1,0$ ). Останнє означатиме, що виробництво біодизеля є недоцільним, якщо визначати його ефективність за суто енергетичним еквівалентом всіх складових і компонентів трудової та економічної діяльності.

Ще один достатньо повний аналіз розбіжностей в показниках енергетичної ефективності виробництва біодизеля та їх узгодження на основі оригінальної методики визначення та урахування впливу факторів дивергенції і конвергенції на результуючі показники енергетичних та екологічних балансів біопалив проведений у роботі [14].

Відповідно до цієї методики, повна первинна енергія  $W_{TE}$  (total primary energy) визначається сумою невідновлюваних  $W_{NR}$  (non-renewable, NR) і відновлюваних  $W_R$  (renewable, R) складових, або ж у вигляді суми енергії палива  $W_F$  (fuel energy) та енергії вихідної сировини  $W_{FS}$  (feed stock energy):

$$W_{TE} = (W_{NR} + W_R) = (W_F + W_{FS}), \quad (2)$$

де перелік невідновлюваних джерел енергії охоплює всі викопні і мінеральні джерела первинної енергії; відновлюваних – всі інші джерела первинної енергії, головним чином біомасу та гідроенергію; енергія палива є частиною повної первинної енергії, що надходить та споживається в системі; енергія вихідної сировини відповідає частині повної первинної енергії, що входить до системи, але ж не використовується в ролі палива, і визначається, як правило, теплотворним еквівалентом енергії на виході системи.

У результаті порівняльного аналізу науково-експериментальних досліджень, виконаних в трьох різних організаціях, шляхом нормалізації енергетичних та екологічних показників (тобто, коли “найкращому” значенню показника відповідає значення 1, а “найгіршому” – значення 0), в роботі [14] встановлено, що:



- невідповідності отриманих в дослідженнях результатів пов'язані з вибором методології та показників, а не з експериментальними даними;

- хоча результати, наведені в дослідженнях, за енергетичними показниками є радикально протилежними, нормалізовані результати приводять до однозначного висновку — біодизельне паливо має переваги перед традиційними видами палива, якщо нормалізація здійснюється за невідновлюваною (традиційною) енергією;

- проведення нормалізації за повною енергією не рекомендується, оскільки це завуальовує внесок відновлюваних джерел енергії, ресурси яких вважаються необмеженими.

Для оцінки енергетичної ефективності технологій виробництва біопалива, в дослідженнях використовується коефіцієнт корисного виходу енергії (energy yield coefficient), який визначається за формулою [12]:

$$EYC_{NR} = W_{TE}^{out} / W_{NR}^{in}, \quad (3)$$

де  $W_{TE}^{out}$  — обсяг виробництва енергії на виході системи впродовж життєвого циклу;  $W_{NR}^{in}$  — сукупні витрати первинної невідновлюваної енергії на створення енергоустановки, забезпечення її роботи протягом всього часу існування й утилізації установки після завершення терміну її експлуатації (нормалізація за невідновлюваною енергією).

Ще ціла низка досліджень ґрунтується на методі порівняння різних енергетичних систем з повним урахуванням виробленої ними енергії протягом життєвого циклу. Для цього вводиться поняття сукупної (кумулятивної) потреби в енергії (cumulative energy demand, *CED*), що визначається обсягами споживання палива за період роботи устаткування. Розрахунки виконуються як по всіх видах палива, що використовується за час роботи (позначається як *CED* і *EYC*), так і тільки по невідновлюваних видах палива (вугілля, нафта, природний газ) і позначаються як  $CE_{NR}$  і  $EYC_{NR}$ .

Особливістю показника  $EYC_{NR}$  є те, що «на вході» враховуються витрати тільки невідновлюваної енергії, а відновлюване джерело, наприклад, біомаса як енергоносіє, до загальної суми не входить. Вочевидь, для енергоустановок на відновлюваних джерелах енергії

$EYC_{NR} > 1$ , а для установок на традиційних (викопних) видах палива  $EYC_{NR} < 1$ .

Оцінка та зіставлення показників *EYC* і  $EYC_{NR}$  за висновками авторів такого підходу, дозволяє проводити об'єктивне ранжування енергетичних систем, що використовують невідновлювані та відновлювані види палива. При цьому, система виробництва біопалива вважається економічно прийнятною, якщо  $EYC_{NR} \geq 2$ , та ефективною, якщо  $EYC_{NR} \geq 5$ .

Значення коефіцієнта корисного виходу енергії біодизельного палива на досягнутому рівні розвитку технологій вирощування та переробки ріпаку знаходяться в діапазоні 1,5–4,0 залежно від умов вирощування насіння та переробки сировини, хоча зустрічаються оцінки і більше 12,0 [12].

Незважаючи на невисокі значення коефіцієнта корисного виходу енергії, за прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA) до 2050 року біопаливо буде забезпечувати до 27% від загального обсягу споживаного на транспорті палива, що сприятиме заміні дизельного пального і допоможе уникнути близько 2,1 Гт викидів  $CO_2$  на рік [15]. Аналогічний прогноз, зроблений в Адміністрації з енергетичної інформації США (U.S. Energy Information Administration, EIA), передбачає зростання у 4 рази обсягів споживання біопалива з 2008 по 2022 роки [4]. Такі плани реальні і успішно втілюються в життя у багатьох країнах світу.

Це пояснюється багатьма причинами і у першу чергу такими, як дефіцит викопних видів палива і постійне зростання їх вартості, неперервне удосконалення технологій вирощування ріпаку і виробництва біодизеля, можливість суттєвого, більш ніж в 20 разів, зменшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище та ще багатьма іншими факторами, на які не дає відповіді суто енергетичний підхід, результати аналізу за яким слід дуже обережно переносити у сферу економічного розвитку та підприємницької діяльності, де далеко не все вимірюється енергетичними еквівалентами. При цьому, принципово важливим є той факт, що підприємницька діяльність у сфері вирощування ріпаку і виробництва біодизеля не тільки створює нові робочі місця, що приводить до зростання ВВП країни за рахунок мультиплікативного ефекту, а й зменшує потреби країни у нафті та природному газі.

Принципово нові, досі далеко неповністю використані можливості підвищення енерго-економічної ефективності вирощування ріпаку і виробництва біодизеля виникають в разі комплексно узгодженої реалізації енергозберігаючих заходів на нерозривному технологічному ланцюжку від вирощування ріпаку до виробництва основного продукту – біодизеля та організації економічно доцільного використання вторинних продуктів і ресурсів, що виникають у процесах вирощування та виробництва.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз повної енергоемності біодизельного пального показує, що за енергетичним еквівалентом всіх складових і компонентів трудової та економічної діяльності з вирощування ріпаку виробництво біодизеля є недоцільним. Такий висновок відноситься суто до енергетичних співвідношень, які не визначають економічну доцільність виробництва біодизеля. Це підтверджують світові тенденції зростання обсягів виробництва.

2. Вирішення проблеми визначення енергоекономічної доцільності вирощування ріпаку з метою виробництва біодизеля в Україні, полягає у розподіленні повної первинної енергії на невідновлювані і відновлювані складові та/або на енергію традиційного палива і енергію вихідної сировини, які є радикально протилежними з точки зору їх доступності та економічної доцільності. Приходимо до висновку – біодизельне паливо має переваги перед традиційними видами палива. Ще один напрям вирішення цієї проблеми ґрунтується на методі порівняння різних енергетичних систем з повним урахуванням виробленої ними енергії протягом життєвого циклу, де розрахунки мають виконуватися як по всіх видах палива, що використовується за час роботи, так і тільки по невідновлюваних видах палива.

3. Економічна доцільність біодизельного палива підкріплюється багатьма факторами, такими як дефіцит викопних видів палива і постійне зростання їх вартості, удосконалення технологій вирощування ріпаку і виробництва біодизеля, можливість більш ніж в 20 разів зменшити викиди забруднюючих речовин у навколишнє середовище тощо. Діяльність у сфері вирощування ріпаку і виробництва біодизеля створює нові робочі місця, що приво-

дить до зростання ВВП країни за рахунок мультиплікативного ефекту та зменшує потреби держави у нафті та природному газі.

1. *Комунальна теплоенергетика України: Стан, проблеми, шляхи модернізації: У 2-х томах / За ред. А.А. Долінського, Б.І. Баска, Є.Т. Базєєва, І.А. Піроженко.* – К.: Поліграф-Сервіс, 2007. – Т.1 - Т. 2. – 1228 с.
2. *Кулик М.М., Куц Г.О., Білодід В.Д.* Аналіз стану розвитку систем теплопостачання в Україні // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №14. – С. 13–24.
3. *Лукутин Б.В.* Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
4. *Biofuels Issues and Trends. Independent Statistics & Analysis.* – Washington: U.S. Energy Information Administration, 2012. – 48 p.
5. *Technology Roadmap. Biofuels for Transport.* – Paris: International Energy Agency, 2011. – 56 p.
6. *Алексєєва Н., Бабак А., Колієнко А., Левицький Д., Нич О., Стогнушенко О.* Виробництво теплової енергії із біомаси: аналіз законодавства, регуляторних аспектів і податкової політики та рекомендації щодо необхідних змін у чинному законодавстві. – К.: Агентство США з міжнародного розвитку, 2014. – 102 с.
7. *Білодід В.Д., Куц Г.О.* Енергетичний потенціал окремих видів альтернативного палива та оцінка енерговитрат на їх підготовку для прямого спалювання в котлоагрегатах // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 1 (24). – С. 32–39.
8. *Hill J., Nelson E., Tilman D., Polasky S., Tiffan D.* Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. – Proc. of National. Academy of Science the USA, 2006. – V.103, №30. – P. 11206–11210.
9. *Laan T., Litman T. A., Steenblik R.* Biofuels – At what cost? Government support for ethanol and biodiesel in Canada. – Winnipeg: International Institute for Sustainable Development, 2011. – 121 p.
10. *Oilseeds: World Markets and Trade / United States Department of Agriculture Report, World Agricultural Outlook Board/USDA, July 2014.* – 35 p.

11. Закон України “Про внесення змін до деяких законів України щодо сприяння виробництву та використанню біологічних видів палива” №1114 від 21.05.2009 року.

12. *Oilseeds: World Markets and Trade / United States Department of Agriculture Report, World Agricultural Outlook Board/USDA, July 2014.* – 35 p.

13. Білодід В.Д., Тарасенко П.В. Деякі розрахунки щодо енергетичної ефективності біопалив // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – №18. – С. 32–39.

14. *Booth E, Booth J, Cook P, Ferguson B, and Walker K. Economic Evaluation of Biodiesel Production from Oilseed Rape grown in North and East Edinburgh: SAC Consultancy Division, 2005.* – 134 p.

15. *Mortimer N.D., Cormack P., Elsayed M.A. and Horne R.E. Evaluation of the comparative energy, global warming and socio-economic costs and benefits of biodiesel.* – Sheffield: Sheffield Hallam University, 2003. – 132 p.

Надійшла до редколегії 20.10.2014