

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВА В УКРАЇНІ

С. Й. Шаманський

Національний авіаційний університет

просп. Космонавта Комарова, 1, 03680, Київ, Україна. E-mail: shamanskiy_s_i@ukr.net

У статті проаналізовано економічну ефективність виробництва біопалива третього покоління з біомаси мікробіодоростей в Україні. У зв'язку з відсутністю технологій масового культивування мікробіодоростей для масового виробництва біопалива ефективність процесів оцінено на основі складання енергетичного балансу. Баланс складено на основі інформації про енергозатрати при використанні існуючих технологій культивування мікробіодоростей та виробництва біодизелю і біогазу з органічної біомаси. Оцінено витрати енергії на безпосереднє культивування у відкритих та закритих фотобіореакторах, на збирання урожаю, екстрагування олій, виробництва з них біодизелю, а також виробництва біогазу з залишкової біомаси при використанні сучасного обладнання. Оцінено також потенційну кількість виробленого біодизелю та біогазу, а також потенційну кількість енергії, що можна використати при їх утилізації. Виконано їх порівняння і показано ефективність усього процесу. Запропоновано шляхи підвищення цієї ефективності у сучасних умовах.

Ключові слова: біопаливо третього покоління, біогенні елементи, енергетичний баланс, культивування мікробіодоростей, фотобіореактор.

ОЦЕНКА ЭНЕРГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРΟΣЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА В УКРАИНЕ

С. И. Шаманский

Национальный авиационный университет

просп. Космонавта Комарова, 1, 03680, Киев, Украина. E-mail: shamanskiy_s_i@ukr.net

В статье проанализирована экономическая эффективность производства биотоплива третьего поколения из биомассы микробіодорослей в Украине. В связи с отсутствием технологий массового культивирования микробіодорослей для массового производства биотоплива, эффективность процессов оценена на основании составления энергетического баланса. Баланс составлен на основе информации об энергозатратах при использовании существующих технологий культивирования микробіодорослей и производства биодизеля и биогаза из органической биомассы. Оценены затраты энергии на непосредственное культивирование в открытых и закрытых фотобіореакторах, на сбор урожая, экстрагирование масел, производство из них биодизеля, а также производство биогаза из остаточной биомассы при использовании современного оборудования. Оценены также потенциальное количество произведенного биодизеля и биогаза, а также потенциальное количество энергии, которую можно использовать при их утилизации. Выполнено их сравнение и показано эффективность всего процесса. Предложены пути повышения этой эффективности в современных условиях.

Ключевые слова: биотопливо третьего поколения, биогенные элементы, энергетический баланс, культивирование микробіодорослей, фотобіореактор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Мікробіодоростям приділяють усе більше уваги як сировині для виробництва біопалива третього та четвертого поколінь [1-6]. Вони також містять протеїни, що можуть використовуватися для виробництва корму для худоби та інших цілей. Для культивування можна використовувати відкриті та закриті фотобіореактори. Відкриті виконують у вигляді водойм чи басейнів з безпосереднім впливом навколишнього середовища на культуральну рідину, закриті – ізолюють культуральну рідину від навколишнього середовища, пропускаючи при цьому сонячне світло для забезпечення процесів фотосинтезу.

Закриті конструкції мають багато переваг над відкритими, оскільки дозволяють запобігти негативним впливам погодних умов та можливим потраплянням у культуральну рідину небажаних речовин, що можуть погіршити процес культивування [7-9]. Вони також дозволяють краще контролювати умови культивування і тому досягати значних результатів у прирості біомаси та накопиченню

необхідних елементів у ній. Проте вони є дорогими і вимагають більших затрат енергії для забезпечення їх роботи.

Можна стверджувати, що процес культивування для виробництва біопалива може бути економічно доцільним тільки у тому випадку, коли кількість енергії, яка може бути отримана в результаті використання палива, виробленого з одиниці маси мікробіодоростей ніж кількість енергії, що потрібно затратити на культивування цих мікробіодоростей і виробництво з них палива. Це можна було б зробити на основі аналізу життєвого циклу біопалива. Проте проведення такого аналізу стикається з проблемами, оскільки на сьогодні не існує впроваджених технологій масового культивування мікробіодоростей саме як сировини для біопалива. Тому неможливо точно оцінити витрати на його виробництво. Проте можна провести попередній оцінювальний аналіз, використовуючи інформацію про традиційну технологію виробництва біодизелю, а також існуючі технології культивування.

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

Традиційна технологія виробництва біодизелю з мікроводоростей включає культивування, збирання врожаю, зневоднення та сушіння біомаси, вилучення олій з біомаси, як правило, за допомогою гексану, процес трансестерифікації та подальша переробка з отриманням метилестерів та гліцеролу. Залишкова біомаса (після відбирання олій) містить значну частину органічних сполук і може бути використана для виробництва біогазу. Це значно підвищує енергетичну цінність мікроводоростей [10].

Метою роботи є оцінювання затрат на культивування мікроводоростей та виробництво з них біопалива в енергетичних одиницях у порівнянні з можливістю отримання енергії від використання виробленого біопалива за традиційними технологіями.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Оцінювання енергетичної ефективності проведено відповідно до схеми, наведеної на рисунку 1.

Для забезпечення процесів культивування необхідними є затрати енергії, перш за все електроенергії. За існуючими технологіями питома витрата електроенергії при культивуванні відкритих фотобіореакторів складає біля 1 Вт/м² площі культиватора. При культивуванні у закритих фотобіореакторів витрата електроенергії складає 100

Вт/м³ корисної ємності фотобіореактора [11]. Для співставлення енергетичних витрат для відкритого і закритого фотобіореакторів потрібно питоми витрати привести до однакових одиниць. Враховуючи той факт, що товщина шару культуральної рідини у сучасних фотобіореакторів складає не більше 20 ... 30 см (для забезпечення достатньої освітленості мікроводоростей), приймаємо, що одному метру кубічному культуральної рідини відповідає 5 метрів квадратних площі культиватора (товщина шару рідини 20 см). Тобто співвідношення між площинною та об'ємною питомаю витратою електроенергії на культивування складає:

$$W_{культ}^{плоч} = 0,05 \cdot W_{культ}^{об'ємн}, \quad (1)$$

де $W_{культ}^{плоч}$ – питоми площинні витрати електроенергії на культивування, Вт/м²;

$W_{культ}^{об'ємн}$ – питоми об'ємні витрати електроенергії на культивування, Вт/м³.

Відповідно питоми площинні витрати електроенергії для закритих фотобіореакторів складуть $W_{закриті\ ФБР}^{плоч} = 0,05 \cdot 100 = 5$, Вт/м².



Рисунок 1 – Схема виробництва біопалива з мікроводоростей

Після закінчення культивування клітини мікроводоростей мають бути зібрані і піддані зневодненню. У процесі зневоднення видаляється переважно міжклітинна рідина (біля 90%). При цьому переважна більшість внутрішньоклітинної рідини (більше 80%) залишається. Для збирання мікроводоростей можна використовувати фільтрування або центрифугування. Оскільки необхідність зневоднення мікроорганізмів часто виникає в різних сферах господарської діяльності, на ринку є достатня кількість обладнання для виконання цього процесу. Фільтр-преси є одним з найбільш розповсюджених типів обладнання для порівняно невеликих об'ємів зневоднення, наприклад для зневоднення осадів стічних вод [12]. Головна складність при експлуатації такого обладнання це те, що на фільтруючій тканині утворюється кеку високої щільності, який важко з неї видалити. Можна виділити два шляхи вирішення цієї проблеми. Перший – створення конструкцій фільтрів, у яких створюються сили, направлені тангенційно до площини фільтрування, і які запобігають налипанню кеку на фільтрувальній тканині [13]. Другий – фільтрування через фільтрувальні тканини у вигляді

неперервних стрічок з неперервним видаленням кеку, що наліпає [14].

Для середніх та великих об'ємів одним з найбільш ефективних методів зневоднення можна вважати центрифугування. Але ефективність цього методу суттєво залежить від розміру клітин мікроорганізмів та особливо від їх питомої ваги. Центрифугування є ефективним для збирання врожаю при вирощуванні дріжджів, питома вага яких складає біля 1,1 кг/м³. Питома вага мікроводоростей залежить від вмісту олій у їх клітинах і може бути близькою, і навіть меншою ніж питома вага води. Це суттєво ускладнює центрифугування. Останнім часом для збирання мікроводоростей застосовують центрифуги зі стековими дисками [11]. Їх виробники декларують досить низькі питоми витрати електроенергії при експлуатації (менше 1 кВт·год/м³).

Для полегшення процесу зневоднення, можна здійснювати попереднє ущільнення культурального середовища з мікроводоростями, використовуючи флокуляцію. Як флокулянти можуть використовуватися різні мінеральні солі (сульфат алюмінію, хлорид заліза тощо). Але додавання таких речовин може у подальшому ускладнювати

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

зневоднення, є дорогим, та може негативно впливати на навколишнє середовище [15].

Замість додавання флокулянтів можна використовувати автоматичну флокуляцію шляхом припинення аерації та швидкої зміни рН середовища. Такий метод не має згаданих попередньо недоліків [16].

Споживання електроенергії декларується всіма виробниками обладнання з прив'язкою до 1 м³ переробленого культурального середовища. Проте це не можна вважати задовільним показником при вирощуванні мікробіодоростей. Набагато кориснішим показником є витрати енергії на 1 кг сухої біомаси. З огляду на це та на задекларовані енергозатрати виробниками, затрати енергії на одиницю сухої біомаси можуть відрізнятися залежно від способу і технології культивування. Відповідно до даних [15] середні значення енергетичних затрат приведені до 1 м³ культурального середовища складають:

- фільтр-преси – 1,8 МДж/м³ (ступінь зневоднення 80%);
- центрифугування – 3,6-14,4 МДж/м³ (ступінь зневоднення 90%).

Полегшення зневоднення може досягатися також біологічними методами, наприклад культивуванням на біоплівці або з використанням спеціальних гелів [17], з яких клітини мікробіодоростей видаляються легше.

Мікробіодорості містять переважно два види ліпідів: полярні та нейтральні. Полярні включають переважно фосфоліпіди та гліколіпіди. Нейтральні включають моногліцериди, дигліцериди, тригліцериди, ізопреноїди, парафіни тощо. Вміст останніх у біомасі збільшується при стресових умовах (недостатня кількість азоту у культуральному середовищі) і є бажаними компонентами при виробництві біопалива [18]. Загалом світовий досвід свідчить, що при створенні умов культивування, при яких вміст ліпідів у біомасі росте, сам приріст біомаси зменшується [19]. Для усунення такого протиріччя необхідним є розроблення специфічних технологій культивування з розділенням усього процесу у просторі на фази: початкові – з оптимальними умовами для приросту біомаси; кінцеві – з оптимальними умовами для збільшення у біомасі вмісту ліпідів. Ефективність видалення олій із зневодненої біомаси мікробіодоростей складає 90%.

Енергія, необхідна на добування олій із зневодненої біомаси за великих об'ємів виробництва, може бути прийнята за аналогом добування ріпакової олії з початкової біомаси. За даними [20] середні питомі витрати на один кілограм отриманої олії складають: 0,35 МДж/кг електричної енергії і 1,75 МДж/кг теплової енергії.

Енергетична ефективність перероблення отриманих з мікробіодоростей олій у біодизель складає 90%. При цьому за великих об'ємів виробництва середні питомі енергетичні витрати на виробництво одного кілограму біодизеля можна оцінити також за існуючими традиційними технологіями [20]: 0,043 МДж/кг електричної енергії і 0,75 МДж/кг теплової енергії.

Енергетична ефективність перероблення залишкової біомаси мікробіодоростей (після видалення олій) у біогаз складає 90%. При цьому за великих об'ємів виробництва середні питомі енергетичні витрати на виробництво одного нормального кубічного метра біогазу, оцінені за існуючими традиційними технологіями складають [20]: 0,48 МДж/м³ електричної енергії і 1,5 МДж/м³ теплової енергії.

Розрахуємо можливу річну кількість отриманої енергії біопалива з одного квадратного метра культиватора для середніх погодних умов України при використанні фотобіореакторів відкритого і закритого типів.

Відповідно до попереднього розрахунку кількість біомаси мікробіодоростей, що може бути отримана з одного квадратного метра культиватора у середньому по Україні складає 11,26 кг/м² у рік при культивуванні у закритому фотобіореакторі і 3,22 кг/м² у рік при культивуванні у відкритому фотобіореакторі.

При використанні центрифугування з ефективністю 90% для збирання урожаю річна кількість зібраної біомаси складе:

$$P_{\text{центрифуг}}^{\text{біом}} = 0,9 \cdot P_{\text{отрим}}^{\text{біом}}, \text{ кг/м}^2. \quad (2)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $P_{\text{центрифуг}}^{\text{біом. закр. ФБР}} = 0,9 \cdot 11,26 = 10,13 \text{ кг/м}^2$;
- $P_{\text{центрифуг}}^{\text{біом. відкр. ФБР}} = 0,9 \cdot 3,22 = 2,90 \text{ кг/м}^2$.

При вмісті олій у біомасі мікробіодоростей на рівні 50% їх кількість у зібраній центрифугуванням біомасі складе:

$$P_{\text{центрифуг}}^{\text{олій}} = 0,5 \cdot P_{\text{центрифуг}}^{\text{біомас}}, \text{ кг/м}^2. \quad (3)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $P_{\text{центрифуг}}^{\text{олій. закр. ФБР}} = 0,5 \cdot 10,13 = 5,06 \text{ , кг/м}^2$;
- $P_{\text{центрифуг}}^{\text{олій. відкр. ФБР}} = 0,5 \cdot 2,90 = 1,45 \text{ , кг/м}^2$.

При ефективності відокремлення олій з біомаси мікробіодоростей на рівні 90% кількість отриманої олії як сировини для виробництва біодизелю складе:

$$P_{\text{сировин}}^{\text{олій}} = 0,9 \cdot P_{\text{центрифуг}}^{\text{олій}}, \text{ кг/м}^2. \quad (4)$$

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

- $P_{\text{сировин}}^{\text{олій. закр. ФБР}} = 0,9 \cdot 5,06 = 4,56 \text{ , кг/м}^2$;
- $P_{\text{сировин}}^{\text{олій. відкр. ФБР}} = 0,9 \cdot 1,45 = 1,30 \text{ , кг/м}^2$.

При ефективності перероблення сировинної олії у біодизель на рівні 90% кількість отриманого біодизелю складе:

$$P_{\text{біодиз}} = 0,9 \cdot P_{\text{сировин}}^{\text{олій}}, \text{ кг/м}^2. \quad (5)$$

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

- $P_{\text{біодиз}}^{\text{закр. ФБР}} = 0,9 \cdot 4,56 = 4,10 \text{ , кг/м}^2$;
- $P_{\text{біодиз}}^{\text{відкр. ФБР}} = 0,9 \cdot 1,30 = 1,17 \text{ , кг/м}^2$.

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

Враховуючи, що теплота згорання біодизеля складає 37 МДж/кг, кількість потенційно отриманої енергії, запасеної у біодизелі складе:

$$E_{\text{біодиз}} = 37 \cdot \Pi_{\text{біодиз}}, \text{ кг/м}^2. \quad (6)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $E_{\text{біодиз}}^{\text{закр. ФБР}} = 37 \cdot 4,10 = 151,80, \text{ МДж/м}^2;$
- $E_{\text{біодиз}}^{\text{відкр. ФБР}} = 37 \cdot 1,17 = 43,29, \text{ МДж/м}^2.$

Після відокремлення олій кількість залишкової біомаси, що може використовуватися як сировина для виробництва біогазу складе:

$$\Pi_{\text{біом. залишк.}} = \Pi_{\text{центрифуг}}^{\text{біом}} - \Pi_{\text{сировин}}^{\text{олій}}, \text{ кг/м}^2. \quad (7)$$

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

- $\Pi_{\text{біом. залишк.}}^{\text{закр. ФБР}} = 10,13 - 4,56 = 5,57, \text{ кг/м}^2;$
- $\Pi_{\text{біом. залишк.}}^{\text{відкр. ФБР}} = 2,90 - 1,30 = 1,60, \text{ кг/м}^2.$

Враховуючи, що теплота згорання залишкової біомаси складає 23 МДж/кг [20], кількість потенційно отриманої енергії, запасеної у біомасі складе:

$$E_{\text{біом. залишк.}} = 23 \cdot \Pi_{\text{біом. залишк.}}, \text{ кг/м}^2. \quad (8)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $E_{\text{біом. залишк.}}^{\text{закр. ФБР}} = 23 \cdot 5,57 = 128,11, \text{ МДж/м}^2;$
- $E_{\text{біом. залишк.}}^{\text{відкр. ФБР}} = 23 \cdot 1,60 = 36,80, \text{ МДж/м}^2.$

При ефективності перероблення залишкової біомаси у біогаз на рівні 90% кількість потенційно отриманої енергії, запасеної у біогазі складе:

$$E_{\text{біогаз}} = 0,9 \cdot E_{\text{біом. залишк.}}, \text{ МДж/м}^2. \quad (9)$$

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

- $E_{\text{біогаз}}^{\text{закр. ФБР}} = 0,9 \cdot 128,11 = 115,30, \text{ МДж/м}^2;$
- $E_{\text{біогаз}}^{\text{відкр. ФБР}} = 0,9 \cdot 36,80 = 33,12, \text{ МДж/м}^2.$

Враховуючи, що середня теплота згорання біогазу складає 20 МДж/м³, кількість потенційно отриманого біогазу з залишкової біомаси складе:

$$\Pi_{\text{біогаз}} = \frac{E_{\text{біом. залишк.}}}{20}, \text{ м}^3/\text{м}^2. \quad (10)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $\Pi_{\text{біогаз}}^{\text{закр. ФБР}} = \frac{115,30}{20} = 5,77, \text{ м}^3/\text{м}^2;$
- $\Pi_{\text{біогаз}}^{\text{відкр. ФБР}} = \frac{33,12}{20} = 1,66, \text{ м}^3/\text{м}^2.$

Загальна кількість потенційно отриманої енергії запасеної в енергоносіях, виготовлених з культивованих мікроводоростей складе:

$$E_{\text{запас. МКВ}} = E_{\text{біодиз}} + E_{\text{біогаз}}, \text{ МДж/м}^2. \quad (11)$$

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

- $E_{\text{запас. МКВ}}^{\text{закр. ФБР}} = 151,80 + 115,30 = 267,10, \text{ МДж/м}^2;$
- $E_{\text{запас. МКВ}}^{\text{відкр. ФБР}} = 43,29 + 33,12 = 76,41, \text{ МДж/м}^2.$

Розрахуємо необхідну річну кількість енергії приведеної до одного квадратного метра культиватора, яку необхідно затратити для культивування мікроводоростей та виробництва з них біопалива при використанні фотобіореакторів відкритого і закритого типів для середніх погодних умов України.

Середні затрати електричної енергії для культивування приймаємо $e_{\text{ел. культив. сер}}^{\text{закр. ФБР}} = 5 \text{ Вт/м}^2$ (5 Дж/с·м²) для закритих ФБР і $e_{\text{ел. культив. сер}}^{\text{відкр. ФБР}} = 1 \text{ Вт/м}^2$ (1 Дж/с·м²) для відкритих ФБР. Таким чином річні витрати електроенергії на культивування визначаться за формулою:

$$e_{\text{ел. культив.}} = \frac{e_{\text{ел. культив. сер}} \times 3600 \times 24 \times 365}{1000000}, \text{ (МДж/м}^2). \quad (12)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $e_{\text{ел. культив.}}^{\text{закр. ФБР}} = \frac{5 \times 3600 \times 24 \times 365}{1000000} = 157,68, \text{ МДж/м}^2;$
- $e_{\text{ел. культив.}}^{\text{відкр. ФБР}} = \frac{1 \times 3600 \times 24 \times 365}{1000000} = 31,54, \text{ МДж/м}^2.$

Враховуючи, що витрати електроенергії на центрифугування складають 3,6 МДж/м³ культурального середовища, для визначення питомих витрат для кожного типу реактора необхідно спочатку визначити кількість культурального середовища, що має подаватися на центрифугу з одного квадратного метра культиватора. За даними [20] концентрація сухої біомаси мікроводоростей на виході складає: для закритих ФБР - $K_{\text{біомас.}}^{\text{закр. ФБР}} = 4 \text{ кг/м}^3$; для відкритих ФБР - $K_{\text{біомас.}}^{\text{відкр. ФБР}} = 1 \text{ кг/м}^3$. Об'єм культурального середовища для центрифугування з одного квадратного метра культиватора визначимо за формулою:

$$W_{\text{культурал. серед.}} = \frac{\Pi_{\text{біомас.}}^{\text{отрим.}}}{K_{\text{біомас.}}}, \text{ (м}^3), \quad (13)$$

де $\Pi_{\text{біомас.}}^{\text{отрим.}}$ - кількість отриманої біомаси у кг з одного квадратного метра культиватора.

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

- $W_{\text{культурал. серед.}}^{\text{закр. ФБР}} = \frac{11,26}{4} = 2,82, \text{ м}^3;$
- $W_{\text{культурал. серед.}}^{\text{відкр. ФБР}} = \frac{3,22}{1} = 3,22, \text{ м}^3.$

Питомі витрати електроенергії на центрифугування визначимо за формулою

$$e_{\text{ел. центрифуг.}} = 3,6 \cdot W_{\text{культурал. серед.}}, \text{ (МДж/м}^2). \quad (14)$$

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

- $e_{ел.центрифуг.}^{закр.ФБР} = 3,6 \cdot 2,82 = 10,15$, МДж/м²;
- $e_{ел.центрифуг.}^{відкр.ФБР} = 3,6 \cdot 3,22 = 11,59$, МДж/м²;

За умови, що середні питомі витрати електроенергії на один кілограм отриманої олії складають: $e_{ел.відокр.олій}^{сер.питом} = 0,35$ МДж/кг і $e_{тепл.відокр.олій}^{сер.питом} = 1,75$ МДж/кг теплової енергії, їх затрати на відокремлення олій визначимо за формулами

$$e_{ел.відокр.олій} = 0,35 \cdot P_{сировин.}^{олій}, \text{ МДж/м}^2, \quad (15)$$

$$e_{тепл.відокр.олій} = 1,75 \cdot P_{сировин.}^{олій}, \text{ МДж/м}^2, \quad (16)$$

Для закритого ФБР маємо:

- $e_{ел.відокр.олій}^{закр.ФБР} = 0,35 \cdot 4,56 = 1,60$, МДж/м²;
- $e_{тепл.відокр.олій}^{закр.ФБР} = 1,75 \cdot 4,56 = 7,98$, МДж/м²;

Для відкритого ФБР маємо:

- $e_{ел.відокр.олій}^{відкр.ФБР} = 0,35 \cdot 1,30 = 0,46$, МДж/м²;
- $e_{тепл.відокр.олій}^{відкр.ФБР} = 1,75 \cdot 1,30 = 2,28$, МДж/м².

За умови, що середні питомі витрати на один кілограм отриманого з рослинних олій біодизеля складають: 0,043 МДж/кг електричної енергії і 0,75 МДж/кг теплової енергії, її затрати на виробництво біодизеля з отриманих олій визначимо за формулами

$$e_{ел.виробн.біодиз.} = 0,043 \cdot P_{біодиз.}, \text{ МДж/м}^2, \quad (17)$$

$$e_{тепл.виробн.біодиз.} = 1,75 \cdot P_{біодиз.}, \text{ МДж/м}^2, \quad (18)$$

Для закритого ФБР маємо:

- $e_{ел.виробн.біодиз.}^{закр.ФБР} = 0,043 \cdot 4,10 = 0,18$, МДж/м²;
- $e_{тепл.виробн.біодиз.}^{закр.ФБР} = 0,75 \cdot 4,10 = 3,08$, МДж/м²;

Для відкритого ФБР маємо:

- $e_{ел.виробн.біодиз.}^{відкр.ФБР} = 0,043 \cdot 1,17 = 0,05$, МДж/м²;
- $e_{тепл.виробн.біодиз.}^{відкр.ФБР} = 0,75 \cdot 1,17 = 0,88$, МДж/м².

За умови, що середні питомі витрати на виробництво одного нормального кубічного метра біогазу складають: 0,48 МДж/кг електричної енергії і 1,5 МДж/кг теплової енергії, її затрати на отримання біогазу з залишкової біомаси мікроводоростей визначимо за формулами

$$e_{ел.виробн.біогаз.} = 0,48 \cdot P_{біогаз.}, \text{ МДж/м}^2, \quad (19)$$

$$e_{тепл.виробн.біогаз.} = 1,50 \cdot P_{біогаз.}, \text{ МДж/м}^2. \quad (20)$$

Для закритого ФБР маємо:

- $e_{ел.виробн.біогаз.}^{закр.ФБР} = 0,48 \cdot 5,77 = 2,77$, МДж/м²;
- $e_{тепл.виробн.біогаз.}^{закр.ФБР} = 1,50 \cdot 5,77 = 8,66$, МДж/м².

Для відкритого ФБР маємо:

- $e_{ел.виробн.біогаз.}^{відкр.ФБР} = 0,48 \cdot 1,66 = 0,79$, МДж/м²;

$$e_{тепл.виробн.біогаз.}^{відкр.ФБР} = 1,50 \cdot 1,66 = 2,49, \text{ МДж/м}^2.$$

Загальна кількість потенційно використаної електричної та теплової енергії відповідно, затраченої на культивування мікроводоростей і виробництво з них біопалива третього покоління визначиться за формулами:

$$e_{ел.затрач.біопал.} = e_{ел.культив.} + e_{ел.центрифуг.} + e_{ел.відокр.олій} + e_{ел.виробн.біодиз.} + e_{ел.виробн.біогаз.}, \text{ МДж/м}^2; \quad (21)$$

$$e_{тепл.затрач.біопал.} = e_{тепл.відокр.олій} + e_{тепл.виробн.біодиз.} + e_{тепл.виробн.біогаз.}, \text{ МДж/м}^2. \quad (22)$$

Для закритого ФБР маємо:

- $e_{ел.затрач.біопал.}^{закр.ФБР} = 172,38$, МДж/м²;
- $e_{тепл.затрач.біопал.}^{закр.ФБР} = 19,72$, МДж/м².

Для відкритого ФБР маємо:

- $e_{ел.затрач.біопал.}^{відкр.ФБР} = 44,43$, МДж/м²;
- $e_{тепл.затрач.біопал.}^{відкр.ФБР} = 5,65$, МДж/м².

Графічно енергетичний баланс при культивуванні МКВ у закритих ФБР і умовах України наведено на рисунку 2, у відкритих ФБР на рисунку 3.

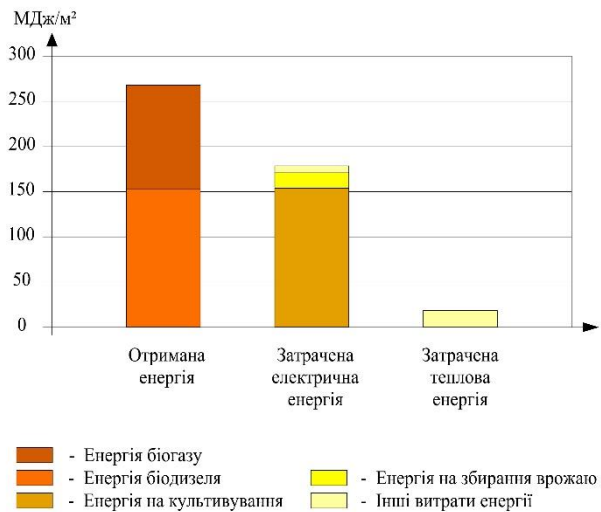


Рисунок 2 – Енергетичний баланс при культивуванні МКВ у закритих ФБР в умовах України

Як видно з рисунків 2 і 3 енергетичний баланс при культивуванні в реакторах обох видів є позитивним. Відсоток енергії, що має бути затрачена на перебіг процесу у відношенні до отриманої енергії визначимо за формулою

$$\delta = \frac{e_{ел.затрач.біопал.} + e_{тепл.затрач.біопал.}}{E_{біодиз.} + E_{біогаз.}} \cdot 100\%, \% \quad (23)$$

Таким чином для закритого та відкритого ФБР маємо:

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

$$\delta_{закр.ФБР} = \frac{172,38 + 19,72}{151,80 + 115,30} \cdot 100\% = 72\%;$$

$$\delta_{відкр.ФБР} = \frac{44,43 + 5,65}{43,29 + 33,12} \cdot 100\% = 66\%.$$

Потрібно суттєве зменшення енергетичних витрат при культивуванні для здешевлення цього процесу і отримання позитивного енергетичного балансу. Для підвищення економічної ефективності культивування в сьогоденних умовах можна запропонувати використання попередньо освітлених комунальних стічних вод як культурального середовища з одночасним очищенням останніх від біогенних елементів (сполук азоту та фосфору) [21-24]. Мікрободорості поглинають ці сполуки у процесі росту. Для потрібна розробка конструкцій фотобіореакторів, для забезпечення реалізації цих процесів.

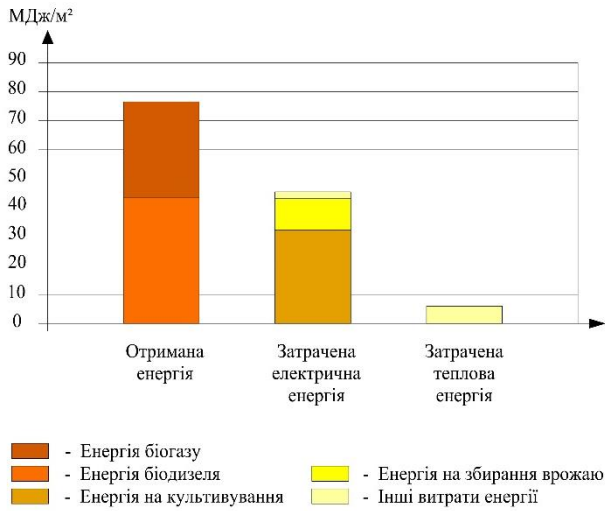


Рисунок 3 – Енергетичний баланс при культивуванні МКВ у відкритих ФБР в умовах України

Позитивний енергетичний баланс змінюється на негативний, якщо приймати, що споживана електрична енергія виробляється на теплових електростанціях, враховуючи їх низький ККД. Вважатимемо, що електроенергія вироблена на теплової електростанції з когенерацією. ККД такого виробництва складає 60% [20]. Кількість енергії, що реально міститься у спожитій електричній енергії визначимо за формулою:

$$e_{реал.ел.затрач.біопал} = e_{ел.затрач.біопал} \cdot \frac{100}{60}, \text{ (МДж/м}^2\text{)}. \quad (24)$$

Для закритого та відкритого ФБР відповідно маємо:

$$e_{реал.ел.затрач.біопал}^{закр.ФБР} = 172,38 \cdot \frac{100}{60} = 287,30, \text{ МДж/м}^2;$$

$$e_{реал.ел.затрач.біопал}^{відкр.ФБР} = 44,43 \cdot \frac{100}{60} = 74,05, \text{ МДж/м}^2.$$

Відсоток енергії, що витрачається на перебіг процесу у відношенні до отриманої енергії для закритого та відкритого ФБР відповідно, визначений за формулою (23), складе:

$$\delta_{закр.ФБР} = \frac{287,30 + 19,72}{151,80 + 115,30} \cdot 100\% = 115\%;$$

$$\delta_{відкр.ФБР} = \frac{74,05 + 5,65}{43,29 + 33,12} \cdot 100\% = 104\%.$$

Графічно енергетичний баланс з врахуванням ККД виробництва електроенергії на теплоелектростанціях при культивуванні МКВ у закритих ФБР і умовах України наведено на рисунку 4, у відкритих ФБР на рисунку 5.

З рисунків 4 і 5 видно, що культивування мікрободоростей тільки для виробництва біопалива за сучасних технологій є економічно не виправданим.

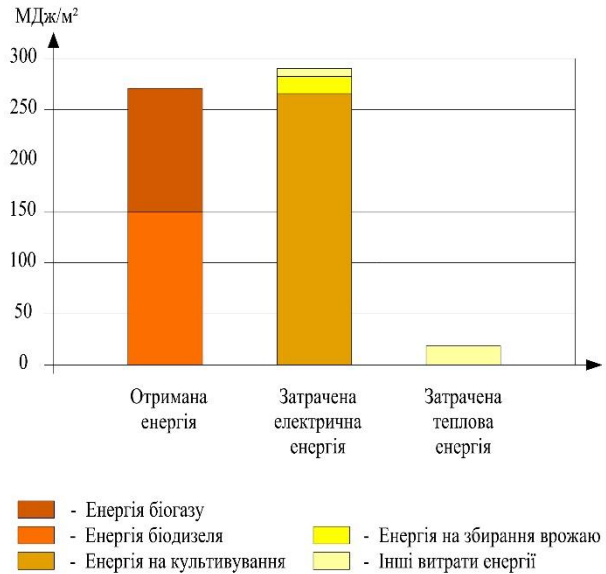


Рисунок 4 – Енергетичний баланс з врахуванням ККД виробництва електроенергії на теплоелектростанції при культивуванні МКВ у закритих ФБР в умовах України

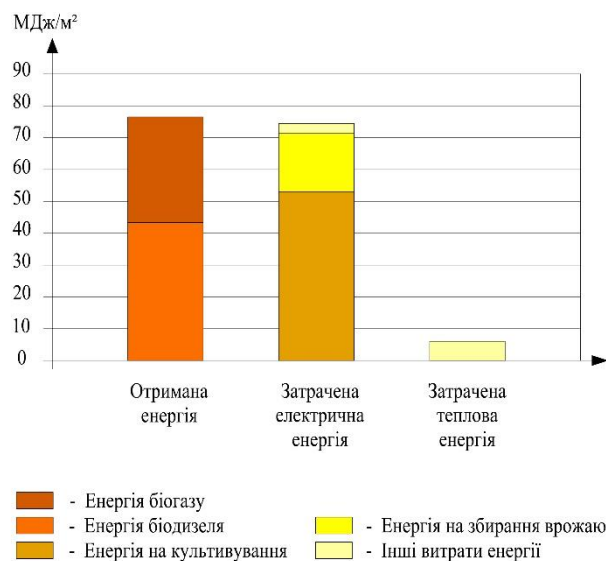


Рисунок 5 – Енергетичний баланс при культивуванні МКВ у відкритих ФБР в умовах України

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

ВИСНОВКИ. Культивування мікроводоростей як у відкритих, так і у закритих фотобіореакторах потребує значних витрат енергії, перш за все електричної. За сучасних технологій культивування та виробництва біопалива з органічної біомаси при врахуванні затрат електроенергії на культивування в енергетичних одиницях є позитивним. Необхідні затрати енергії на виробництво у порівнянні з отриманою енергією виробленого біопалива складають: для відкритих фотобіореакторів 66%, для закритих – 72%. Проте така картина не відповідає дійсності, через те, що не враховує необхідності витрат енергії у вигляді палива на генерацію споживаної електроенергії. З врахуванням виробництва електроенергії на теплоелектростанціях з когенерацією, енергетичний баланс є негативним. Необхідні затрати енергії перевищують отримані від біопалива: для відкритих фотобіореакторів на 4%, для закритих – на 15%. Для підвищення економічної ефективності культивування і перетворення негативного енергетичного балансу на позитивний в умовах сучасного розвитку технологій культивування перспективним є їх поєднання з процесами очищення комунальних стічних вод від біогенних елементів. Це досягається використанням освітлених комунальних стічних вод як культурального середовища у фотобіореакторах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойченко С. Хіммотологія як прикладна наука – інтегрований теоретико-методологічний інструмент сталого забезпечення раціонального використання паливно-мастильних матеріалів / О. Аксьонов, С. Бойченко, К. Лейда // Проблеми хіммотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: Монографія / за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К.: Центр навчальної літератури, 2017. – Розд. I. – С. 8–13.
2. Яковлева А.В., Бойченко С.В. Потенциал использования биотоплив на основе растительных масел в авиации // Охрана окружающей среды и природопользование. – ОАО «НИИ Атмосфера». – Санкт-Петербург. – № 2. – 2013. – С. 18–27.
3. S. Boichenko, O. Vovk, I. Shkilniuk, K. Lejda. Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization // Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. 2013. – Vol. 4. – Iss. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7463.1000146>.
4. Sergii Boichenko. Phenomenological concept of chemotology / Sergii Boichenko // Proceedings of National Aviation University. – 2017. – № 1. – pp. 113–119. DOI: 10.18372/2306-1472.70.11431.
5. Aksenov A. F., Seregin E. P., Yanovskii L. S., and Boichenko S. V. Modern Paradigm and Prospects of Chemotology Development // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – № 4 (578). – 2013. – pp. 13–20.
6. Iakovlieva A.V. Overview of innovative technologies for aviation fuels production A.V. Iakovlieva, S.V. Boichenko, O. O. Vovk // Journal of Chemistry and chemical technology. – 2013. – Vol. 7. – № 3. – pp. 305–312.

7. Shamanskyi Sergii. Construction Arrangement for Cultivating Microalgae for Motor Fuel Production / Sergii Shamanskyi, Sergii Boichenko // Systemy i Środki Transportu Samochodnego. Wybrane Zagadnienia. Monografia nr. 7. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska., 2016., pp. 181-188.
8. Shamanskyi S. Green Integrated Sewage Treatment Technology of Airport / Sergii I. Shamanskyi, Sergii V. Boichenko // International Symposium on Sustainable Aviation, May 29 – June 1, 2016, Istanbul, Turkey. – p. 69.
9. Шаманський С. Й. Установка для біоконверсії сонячної енергії безперервної дії / С. Й. Шаманський // Наукоємні технології – 2015. – №2 (26). – С. 115–119.
10. Шаманський С. Й., Бойченко С. В., Павлюх Л. І., Бойченко М. С. Оцінка масової та ліпідної продуктивності культивування мікроводоростей в умовах Київської області для виробництва біопалива Шаманський С. Й., Бойченко С. В., Павлюх Л. І., Бойченко М. С. «Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences». International research and practice conference, December 27–28, 2017: Radom, Republic of Poland: 2017 – pp. 87-90.
11. Evodos Dynamic Settlers. Scalable Algae Harvesting , 2017. – Електронний ресурс [Режим доступу] <http://www.evodos.eu/>
12. Posten C. Principles of Mechanical Bioseparation. Shaker Verlag, Kaiserstraße, Germany. – 2007.
13. Cross Flow Filtration Method Handbook, 2014. – Електронний ресурс [Режим доступу] <https://www.bioprocessonline.com/doc/cross-flow-filtration-method-handbook-0001>
14. Algaeventure systems, Marysville, Ohio, USA, 2017. – Електронний ресурс [Режим доступу] <https://us.kompass.com/c/algaeventure-systems-inc/us046459/>
15. Uduman N., Danquah Qi. M. K., Forde G. M., Hoadley A. Dewatering of Macroalgal Cultures: a Major Bottleneck to Algae-based fuels. // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2010. Vol. 2. no. 1, pp 91–99.
16. González-Fernández C., Ballesteros M. Microalgae autoflocculation: an alternative to high-energy consuming harvesting methods // Journal of Applied Phycology. – 2013. Vol. 25. Is. 4, pp 991–999.
17. Abdel Hameed M. S. Effect of algal density in bead, bead size and bead concentration on wastewater nutrient removal // African Journal of Botany. – 2013. Vol. 1(3), pp. 029–034.
18. Soh I., Zimmerman J. Biodiesel production: the Potential of Algal Lipids Extracted with Supercritical carbon Dioxide. // Green Chemistry. – 2011. Vol. 13, no. 6, pp. 1422–1429.
19. Pruvost J., Van Vooren G., Le Gouic B., Couzinet-Mossion A., Legrand G. Systematic Investigation of Biomass and Lipid Productivity by Microalgae in Photobioreactors for Biodiesel Application. // Bioresource Technology. – 2011. Vol. 102, no. 1, pp. 150–158.
20. Schlagermann P. Composition of Algal Oil and Its Potential as Biofuel / P. Schlagermann, G. Göttlicher, R. Dillschneider, R. Rosello-Sastre, C. Posten // Journal of

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

Combustion. Hindawi Publishing Corporation. Volume 2012, Article ID 285185, 14 pages.

21. Shamanskyi S., Boichenko S. Development of Environmentally Safe Technological Water Disposal Scheme of Aviation Enterprise / С. Й. Шаманський, С. В. Бойченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №6/10(84). – С. 49–57.

22. Singh R., Birru R., Sibi G. Nitrogen Removal Efficiencies of *Chlorella Vulgaris* from Urban Wastewater for Reduced Eutrophication // Journal of Environmental Protection. – 2017. – №8. – pp. 1–11.

23. Delgadillo-Mirquez L., Lopes F., Taidi B., Pareau D. Nitrogen and Phosphate Removal from Wastewater with a Mixed Microalgae and Bacteria Culture // Biotechnology Reports. – 2016. – №11. – pp. 18–26.

24. Manea R. G., Ardelean I. I. Nitrogen and Phosphorus Removal from Municipal Wastewater Using Consortia of Photosynthetic Microorganisms // Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies. – 2016. – Vol. XX. – pp. 286–292.

EVALUATION OF ENERGY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF MICROALGAE CULTIVATION FOR BIOFUEL PRODUCTION IN UKRAINE

S. Shamanskyi

National aviation university

prosp. Kosmonavta Komarova, 1, 03680, Kyiv, Ukraine. E-mail: shamanskiy_s_i@ukr.net

Purpose. To evaluate the amount of energy spent on cultivating microalgae and producing third generation biofuels out of them to compare it with the amount of energy, which potentially can be obtained while utilizing produced biofuels. As a result, to show energy and economic effectiveness of using biofuel produced out of cultivated microalgae in photobioreactors. **Methodology.** The comparison is made by making up the energy balance. The balance consists of the energy in different forms, spent on the cultivation of algae and the production of biofuels and the energy derived from the combustion of produced biofuels. **Results.** Energy balance was made up for 1 m² of cultivated area. The article took into account electric and thermal energy, spent on: microalgae cultivating in open and closed photobioreactors, using the information about existing reactors and operational energy costs; harvesting microalgae, using information about existing equipment, which can be used for this purpose; oil extraction from microalgae biomass, by analogy with energy expenditure oil extraction from rape; oil processing into biodiesel and residual biomass processing into biogas, using information about energy characteristics of modern biodiesel producing equipment and methanetanks. It also calculates amount of energy, which is obtained while burning produced biodiesel and biogas. As a result of calculation spent energy with relation to obtained is: for closed photobioreactors – 115%; for opened ones – 104%. It means that the process is energy ineffective. **Originality.** For the first time the article shows that for Ukraine conditions it is energy and economic ineffective to cultivate microalgae for biofuel production. The effectiveness raises when using previously treated wastewater as cultural medium and combine the process of cultivation and the process of wastewater treatment from biogenic elements. **Practical value.** Application of that approach allows increasing economic efficiency of biofuel production and wastewater treatment. *References 24, no tables, figures 5.*

Key words: third generation biofuels, biogenic elements, energy balance, microalgae cultivation, photobioreactor.

REFERENCIES

1. Aksenov, O., Boichenko, S. and Leida, K. (2017), “Chemmotology as applied science – Integrated theoretical and methodological tool for the sustainable provision of rational use of fuel and lubricants”. *Problemy himnologii. Teorija ta praktyca racionalnogo vykorystannja tradycijnyh i alternatyvnyh palyvno-mastylnyh materialiv: Monografija* [Problems of chemotology. Theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels and lubricants: Monograph], Centr navchalnoi literatury, Kyiv, Ukraine. - Part. I. – pp. 8-13.

2. Iakovlieva, A. and Boichenko S. (2013), “Potential for the use of biofuels on the basis of vegetable oils in aviation”, *Ochrana okruzhajushchej srody i prirodopolzovanije*, no. 2, pp. 18–27.

3. Boichenko, S., Vovk, O., Shkilniuk, I. and Lejda K. (2013), “Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization”, *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, vol. 4, iss. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7463.1000146>.

4. Boichenko, S. (2017), “Phenomenological concept of chemmotology”, *Proceedings of National Aviation University*, no. 1, pp. 113–119.

5. Aksenov, A., Seregin, E., Yanovskii, L. and Boichenko, S. (2013), “Modern Paradigm and Prospects of Chemmotology Development”, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, no. 4 (578), pp. 13–20.

6. Iakovlieva, A., Boichenko, S. and Vovk, O. (2013), “Overview of innovative technologies for aviation fuels production”, *Journal of Chemistry and chemical technology*, vol. 7, no. 3, pp. 305–312.

7. Shamanskyi, S. and Boichenko, S. (2016), “Construction Arrangement for Cultivating Microalgae for Motor Fuel Production”, *Systemy i Środki Transportu Samochodnego. Wybrane Zagadnienia. Monografia* [Systems and means of motor transport. Monograph] no. 7. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, Poland, pp. 181-188.

8. Shamanskyi, S. and Boichenko, S. (2016), “Green Integrated Sewage Treatment Technology of Airport”,

Розробка екологічно безпечних технологій, процесів і устаткування

- International Symposium on Sustainable Aviation*, May 29 – June 1, Istanbul, Turkey, p. 69.
9. Shamanskyi, S. (2015), “Continuously working installation for solar energy bioconversion”, *Science based technology*, no. 2 (26), pp. 115–119.
10. Shamanskyi, S., Boichenko, S., Pavluch, L. and Boichenko, M (2017), “Estimation of mass and lipid productivity of microalgae cultivation in conditions of the Kiev region for biofuel production”, *Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences*. International research and practice conference, December 27–28, 2017, Radom, Republic of Poland, pp. 87-90.
11. Evodos Dynamic Settlers. Scalable Algae Harvesting (2018), available at: www.evodos.eu/ (accessed June 20, 2018).
12. Posten, C. (2017), *Principles of Mechanical Bioseparation*, Shaker Verlag, Kaiserstraße, Germany.
13. Cross Flow Filtration Method Handbook (2017), available at: www.bioprocessonline.com/doc/cross-flow-filtration-method-handbook-0001 (accessed June 20, 2018).
14. Algaeventure systems, Marysville, Ohio, USA, (2017), available at: <https://us.kompass.com/c/algaeventure-systems-inc/us046459/> (accessed June 20, 2018).
15. Uduman, N., Danquah, Q., Forde, G. and Hoadley, A. (2010), “Dewatering of Macroalgal Cultures: a Major Bottleneck to Algae-based fuels”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 91–99.
16. González-Fernández, C. and Ballesteros, M. (2013), “Microalgae autoflocculation: an alternative to high-energy consuming harvesting methods”, *Journal of Applied Phycology*, vol. 25, iss. 4, pp. 991–999.
17. Abdel Hameed, M. (2013), “Effect of algal density in bead, bead size and bead concentration on wastewater nutrient removal”, *African Journal of Botany*, vol. 1(3), pp. 029–034.
18. Soh, I. and Zimmerman, J. (2011), “Biodiesel production: the Potential of Algal Lipids Extracted with Supercritical carbon Dioxide”, *Green Chemistry*, vol. 13, no. 6, pp. 1422–1429.
19. Pruvost, J., Van Vooren, G. and Le Gouic, B. (2011), “Couzinet-Mossion A., Legrand G. Systematic Investigation of Biomass and Lipid Productivity by Microalgae in Photobioreactors for Biodiesel Application”, *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 1, pp. 150–158.
20. Schlagermann, P., Göttlicher, G., Dillschneider, R., Rosello-Sastre, R. and Posten, C. (2012), “Composition of Algal Oil and Its Potential as Biofuel”, *Journal of Combustion. Hindawi Publishing Corporation*, article ID 285185, 14 p.
21. Shamanskyi S. and Boichenko S. (2016), “Development of Environmentally Safe Technological Water Disposal Scheme of Aviation Enterprise”, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, no. 6/10(84), pp. 49–57.
22. Singh, R., Birru, R. and Sibi, G. (2017), “Nitrogen Removal Efficiencies of Chlorella Vulgaris from Urban Wastewater for Reduced Eutrophication”, *Journal of Environmental Protection*, no. 8, pp. 1–11.
23. Delgadillo-Mirquez, L., Lopes, F., Taidi, B. and Pareau, D. (2016), “Nitrogen and Phosphate Removal from Wastewater with a Mixed Microalgae and Bacteria Culture”, *Biotechnology Reports*, no. 11, pp. 18–26.
24. Manea, R. and Ardelean, I. (2016), “Nitrogen and Phosphorus Removal from Municipal Wastewater Using Consortia of Photosynthetic Microorganisms”, *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, vol. XX, pp. 286–292.