

УДК 537.528:577.23

С. В. ПЕТРИЧЕНКО, П. Л. ЦОЛІН, А. В. СІНЧУК

ОБЛАДНАННЯ ТА РЕЖИМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ ОБРОБКИ БІОМАСИ

Обґрунтовано можливість інтенсифікації отримання біогазу шляхом обробки біомаси імпульсним коронним розрядом. Реалізовано різні види електричного розряду в модельному розчині. Розроблені і випробувані варіанти електродних систем для роботи в промислових ферментаторах. Формалізовано критерій і визначені умови здійснення різних режимів імпульсної корони в біомасі. Показано існування екстремуму залежності максимальної потужності розряду від запропонованого критерію і багаторазову відмінність значень інтеграла дії розрядного струму.

Ключові слова: електророзрядна обробка; імпульсний коронний розряд; електродна система; біомаса; біогаз.

Обоснована возможность интенсификации получения биогаза путем обработки биомассы импульсным коронным разрядом. Реализованы разные виды электрического разряда в модельном растворе. Разработаны и испытаны варианты электродных систем для работы в промышленных ферментаторах. Формализован критерий и определены условия осуществления различных режимов импульсной короны в биомассе. Показано существование экстремума зависимости максимальной мощности разряда от предложенного критерия и многократное отличие значений интеграла действия разрядного тока.

Ключевые слова: электроразрядная обработка; импульсный коронный разряд; электродная система; биомасса; биогаз.

The possibility of using a pulsed corona discharge for biomass treatment in order to intensify biogas production was justified. The criterion for differentiation of different pulse corona regimes was proposed, and the electrode system suitable for processing of industrial volumes was developed and tested on a model solution of NaCl. The combinations of initial conditions for the implementation of pulse corona in biomass which provide a wide range of values of the fraction of electric energy ($\eta = 0.2 - 0.95$) accumulated in capacitors and released during the first half-period of the current discharge for this circuit was determined. The possibility of the existence of an dependence extremum of the maximum discharge power on the criterion η was experimentally shown, with the difference between the values of the electric current integral for the tried regimes of treatment equals almost to 4 times.

Keywords: electric discharge treatment; pulse corona discharge; electrode system; biomass; biogas.

Вступ. Поряд з іншими поновлюваними джерелами енергії перспективним і економічно доцільним енергетичним рішенням для України, яка має розвинений агропромисловий комплекс, є використання процесу утилізації відходів сільського господарства і харчового виробництва на основі анаеробного бродіння. Анаеробне метанове бродіння біомаси комплексно вирішує три важливі завдання: виробництво енергоносія – біогазу, який навіть без очищення від домішок має енергоємність від 20 до 25 МДж/м³; знешкодження насіння бур'янів і, в значній мірі, ліквідація хвороботворних мікроорганізмів; утворення органічного добрива, в якому зберігаються всі основні поживні речовини і цінність якого може перевищувати цінність виробленого біогазу. Але більш широке впровадження біогазових технологій у порівнянні з традиційними джерелами енергії в контексті дилеми «ціна – якість – продуктивність» потребує вирішення двох проблем:

– підвищення частки метану в біогазі до рівня місткості природного газу;

– збільшення ступеня розкладання органіки в реакторах біогазових установок понад 40-60 % і скорочення циклу повного розкладання біомаси.

Відповідні рішення в значній мірі криються в застосуванні однорідної, штучно створеної сировини за умови її глибокої гомогенізації на рівні молекулярних зв'язків, бажано, з видаленням лігніну і руйнуванням кристалічної структури целюлози, що збільшує її біодоступність і ступінь розкладання. Публікація достатньо змістовних оглядів, які детально характеризують переваги, недоліки і області застосування таких способів попередньої обробки біомаси, як теплова, біоло-

гічна, хімічна і фізична обробка, свідчить про активний пошук в цьому напрямі [1–4].

Оскільки процес бродіння має електрохімічну природу, тобто на нього можна впливати шляхом електростимуляції, останнім часом також з'являються спроби дослідників обробляти біологічний субстрат електричним полем і електричним струмом [5–13]. Наприклад, в роботі [5] показано, що вплив електричних імпульсів напругою 0,25 кВ і тривалістю 10 мс в присутності ферменту целобіози дозволило збільшити вихід етанолу з рослинного субстрату майже на 40 % в порівнянні з контрольною партією. Автори [6] застосували імпульсне електричне поле з робочими параметрами в межах 1,1–19,8 кВт·год/м³, спостерігаючи суттєве збільшення виходу метану з гною свиней, частка якого після 30 днів зброджування досягала 100 %. В [7] згадується про використання німецькими компаніями Südchemie і Vogelsang проточного електродинамічного пристрою, до якого прикладається напруга в діапазоні від 10 до 100 кВ. З іншого боку, автори дослідження [8], показали, що обробка в проточному режимі слабо впливає на збільшення виходу біогазу, і прийшли до висновку, що електричне поле краще використовувати на стадії попередньої обробки біомаси. Результати роботи [9, 10, 11] показали, що гідроліз шлама стічних вод і процес окислення може прискорити незначна постійна напруга в 0,3–0,9 В. Огляд [12] надав широкий спектр потенційно корисних біоефектів, які відкриваються внаслідок електро- і електромагнітної стимуляції різних мікроорганізмів, бактерій, мікроводоростей, і інформації – як ці ефекти можна використовувати для вирощування, збору і пе-

реробки біомаси, для виробництва біопалива, біоенергії і біопродуктів. Автори з Росії [13], які виявили збільшення виходу біогазу від 2 до 5 разів на одиницю об'єму метантенка, а також збільшення процентного вмісту метану на 10 %, застосовували обробку біомаси імпульсами напругою 7 кВ.

Основною причиною розбіжностей в результатах зазначених досліджень, більшість яких проведена в лабораторних умовах, є відсутність чітко виявлених режимів електрообробки, ефективних щодо впливу на метаногенез та придатних з точки зору технічної реалізації для використання в промислових масштабах.

Метою цієї роботи є розробка електрообладнання та визначення енергетичних режимів його роботи, які реалізують імпульсну електророзрядну обробку біомаси з урахуванням балансу «ефективність – вартість».

Вибір режимів роботи електрообладнання

Оскільки питання полягає у визначенні точного дозування електричної енергії, необхідної для активації метаногенезу в значних об'ємах ферментатора, то застосування експозиції напруги величиною в декілька Вольт для ефективної обробки біомаси в промислових умовах є маловірогідним. Більш придатним рішенням у цьому випадку є високовольтна електророзрядна обробка, що може здійснюватись безпосередньо в метантенках. Шляхом значної концентрації електричної енергії високовольтних імпульсів можна впливати на біологічну сировину навіть на молекулярному рівні, розриваючи складні зв'язки волокон органічних речовин. В результаті цього процесу, дисперсність і однорідність біологічної маси збільшуватимуться, а головне – може прискорюватися перетравлення її стійких компонентів (лігніну). З іншого боку, щоб стимулювати життєдіяльність бактерій, потрібні помірні електроколивання.

З фізичної точки зору призначена для анаеробного бродіння біомаса є гетерогенним середовищем, яке містить воду і 10–20 % сухого органічного субстрату. Потенційно можна розглядати чотири основних види розряду в такому середовищі.

1. Лінійний високовольтний пробій міжелектродного проміжку. Його реалізація потребує низької і однорідної питомої електропровідності по всьому об'єму ферментатора, тобто гомогенного щодо агрегатного стану середовища, що не відповідає реальному стану біосировини.

2. Лінійний пробій, ініційований мікропровідником, який потребує високошвидкісної і надійної системи подачі провідника в проміжок, супроводжується насиченням біомаси дисперсною фазою металу, що також робить недоцільним застосування лінійного пробію, ініційованого мікропровідником як різновиду розряду в даній роботі.

3. Електричний вибух провідника, що також має зазначені вище недоліки.

4. Імпульсний коронний розряд, який є найбільш прийнятним для обробки біомаси. З підвищенням питомої електропровідності середовища він стабілізу-

ється, переходить у форму з суцільним плазмовим утворенням. Реалізується у широкому діапазоні електропровідності рідкого середовища σ_0 , слабо чутливий до коливань σ_0 , міжелектродної відстані, наявності твердофазних дисперсних включень у рідині. Характеризується струмами розтікання, що охоплюють значний об'єм середовища і створюють помірний розподілений градієнт електромагнітного поля, значною гідродинамічною дією, порівняною з лінійним пробієм.

Для формування імпульсного коронного розряду було розроблено високовольтну експериментальну установку, з системою реєстрації високовольтних імпульсів струму, що включає в себе осцилограф, низькоомний малоіндуктивний шунт та подільник напруги, а також дві оригінальні електродні системи (рис. 1). Електродна система «С» складалася з протиелектрода із розвиненою відкритою металевою поверхнею, виготовленого з латунного прутка, і електрода-вістря, виготовленого з високовольтного багатожильного мідного кабелю із оголеною частиною довжиною 10 мм, скріплених між собою поліетиленовим ізолятором-кришкою. Електродна система «Г» складалася з протиелектрода із розвиненою відкритою металевою поверхнею, виготовленого з сталювого кутику, і електрода-вістря такої ж конструкції, скріплених на діелектричній арматурі. Мінімальна відстань між оголеними металевими частинами електрода-вістря і протиелектрода становила для системи «С» – близько 50 мм, а для системи «Г» – близько 20 мм. Застосування таких двох електродних систем з однаковою сумарною площею відкритої металевої поверхні і різним розподіленням поверхонь (анод-катод) зумовлене забезпеченням близьких значень струмів розтікання при відмінних рівнях гідродинамічної дії, а також оцінкою можливості формування наскрізного пробію між електродами в умовах наявності у рідині високої концентрації твердофазних провідних включень.

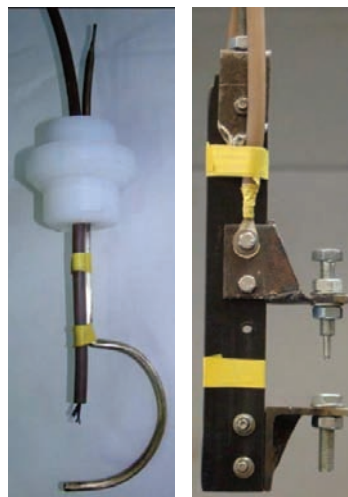


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд електродної системи «С» (а) і «Г» (б)

Застосовувана в роботі номенклатура електрообладнання дозволяла проводити експерименти з дозуванням енергії W_0 в імпульсі від одиниць Дж до одиниць кДж, в діапазоні зарядних напруг U_0 до 25 кВ.

Дозування електричної енергії в імпульсі забезпечувалося варіюванням зарядної напруги і ємності накопичувача енергії C , індуктивність розрядного контуру була помірною ($L_K = 2,5$ мкГн) і в ході проведення експериментів не варіювалася. Обмеження діапазону варіювання C і U_0 здійснювалось за наступним техніко-економічним обґрунтуванням.

Якщо очікувати 1 %-вий приріст виходу біогазу протягом обороту ферментатора, то за умови середнього вмісту сухої речовини в біомасі 10 % в абсолютних одиницях на 1 м^3 він становитиме близько $0,4 \text{ м}^3$. Враховуючи ціни на природний газ і електроенергію, а також прийнявши мінімальну концентрацію метану у біогазі на рівні 55 %, ефект такого приросту для 1 м^3 відповідатиме вартості щонайменш $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії. Тобто, величина питомої електроенергії на електророзрядну обробку порції не повинна перевищувати $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$. Враховуючи високий рівень капітальних і експлуатаційних видатків за умови заданого гіпотетично очікуваного низького приросту, доцільно встановити максимальне значення питомої енергії обробки біомаси $W_{\text{П.макс}}$ на рівні $0,25 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, тобто 30 % від $0,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$.

Відомо [14], що при експлуатації біогазових установок проводять так зване «підкормлювання» бактерій сировиною в еквівалентному об'ємі до 5 % від об'єму біомаси в ферментаторі на добу. Таким чином, для ферментатора з резервуаром на 1000 м^3 щодобовий об'єм біомаси, який необхідно перед додаванням (або після додавання сировини в певну область ферментатора) обробити електричним розрядом становитиме близько 50 м^3 . За умови потужності електрообладнання P_B до 5 кВА, ККД простого зарядного пристрою $\eta_{\text{ЗП}} \approx 0,5$ і коефіцієнта включення $k_B \approx 0,5$ (для здійснення операцій по переміщенню електродної системи тощо) для означеної вище максимальної питомої енергії обробки біомаси $W_{\text{П.макс}}$ продуктивність $\Pi_{\text{макс}}$, яку можна визначити на підставі виразу (1), становитиме $5 \text{ м}^3/\text{год}$, що є цілком достатнім показником для обробки 50 м^3 біомаси при роботі високовольтного обладнання протягом 10 годин на добу.

$$\Pi_{\text{макс}} = \frac{P_B \cdot \eta_{\text{ЗП}} \cdot k_B \cdot \Delta t}{W_{\text{П.макс}}}, \quad (1)$$

де Δt – період визначення продуктивності (в даному випадку дорівнює 3600 с).

З іншого боку, мінімальна робоча напруга для стабільної роботи повітряного розрядника становить 10 кВ, а максимальна частота – 10 Гц, отже можна розрахувати максимальну ємність накопичувача енергії C , виходячи з міркувань забезпечення максимальної енергії в імпульсі при мінімальній зарядній напрузі і максимальній частоті слідування імпульсів (f_i).

$$P_B \cdot \eta_{\text{ЗП}} \cdot k_B > \frac{C \cdot U_0^2}{2} \cdot f_i \rightarrow C < 2 \cdot \frac{P_B \cdot \eta_{\text{ЗП}} \cdot k_B}{U_0^2 \cdot f_i}. \quad (2)$$

Результатом такого обчислення є умова $C < 2,5$ мкФ. Якщо врахувати, що час заряджання ємності має бути меншим ніж період слідування імпульсів, та доступні номінали високовольтних конденсаторів, можна встановити верхній ліміт діапазону $C = 1$ мкФ, а сам діапазон розширити від цього зна-

чення в бік менших ємностей на порядок.

З урахуванням вищенаведених міркувань, діапазон експериментальних значень C становив від 0,1 до 1 мкФ при варіюванні U_0 від 10 до 25 кВ і однакових чи близьких значеннях сумарної енергії однієї обробки W_{Σ} , що забезпечувалося цілим числом імпульсів n . Відповідні режими електророзрядної обробки зазначено в табл. 1. При цьому поняття «різні режими розряду» детермінували величиною η , яка характеризується відношенням енергії W_{τ^*} , що виділилася в міжелектродному проміжку впродовж часу, який відповідає півперіоду струму в даному короткозамкненому контурі (τ^*), до енергії, накопиченої у конденсаторі W_0 :

$$\eta = \frac{W_{\tau^*}}{W_0}; \quad (3)$$

$$W_{\tau^*} = \int_0^{\tau^*} i_P(t) \cdot u_{\text{МЕП}}(t) dt; \quad (4)$$

$$\tau^* = \pi \cdot \sqrt{L_K C}, \quad (5)$$

де i_P – розрядний струм, А; $u_{\text{МЕП}}$ – напруга на міжелектродному проміжку, В. Інтегрування виконували чисельними методами на підставі відцифрованих осцилограм електророзрядного процесу.

Таблиця 1 – Режимы обробки біомаси.

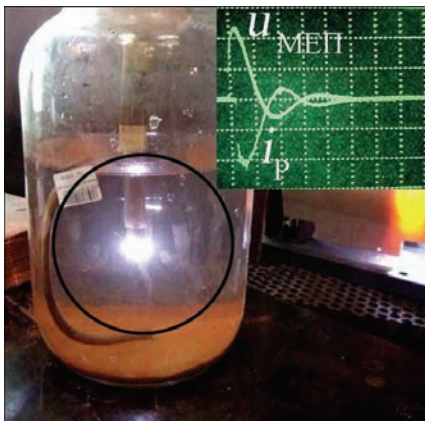
№ режиму	U_0 , кВ	C , мкФ	W_0 , Дж	n , імпульсів	W_{Σ} , кДж
0	контрольний				
1	15	1	112,50	11	1,238
2	15	0,25	28,13	44	1,238
3	15	0,1	11,25	110	1,238
4	11	1	60,5	20	1,210
5	20	0,1	20,00	62	1,240

Дослідження можливості формування імпульсного коронного розряду на обох видах електродних систем здійснено з застосуванням модельного водного розчину NaCl, що відображав питому електропровідність σ_0 біомаси в діапазоні від 0,25 до 2,5 См/м. В якості натуральної біомаси, що мала подібні значення σ_0 і піддавалась електророзрядній обробці, використовувався розчин свинячого гною з вмістом сухої речовини в діапазоні від 10 до 13 %. Обробка здійснювалась в скляній посудині із завантаженням $1,5$ та 3 дм^3 .

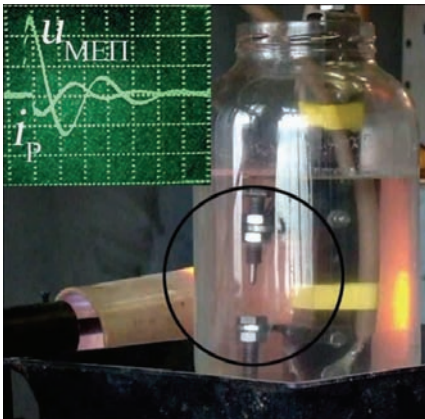
Результати тестування режимів роботи електрообладнання

Прискоренню процесів розкладання біомаси і підвищенню виходу біогазу внаслідок попередньої електророзрядної обробки біомаси можуть сприяти і гідродинамічні, і електрокінетичні, і електростимуляційні частотно-хвильові процеси у гетерогенному середовищі. Тому першим завданням було дослідження можливості формування імпульсного коронного розряду, який реалізує таку комплексну дію на обох видах електродних систем. Перед початком роботи з біомасою необхідно було встановити такі можливості взагалі, для чого і застосовувався модельний соляний розчин, який відображає питому електропровідність σ_0 натуральної біомаси.

На рис. 2 наведено фотографії розрядів і осцилограм, отриманих з застосуванням різних електродних систем з однаковими розгортками і підсиленням за каналом напруги (підсилення за струмом – 2 В/діл (а); 5 В/діл(б)). Як видно, на відміну від електродної системи «С», розряд на електродній системі «G» не супроводжувався формуванням імпульсної корони, хоча амплітуди розрядних струмів близькі за значеннями. Більш коливальний характер розряду електродної системи "G" можна пояснити вищою добротністю контуру з такою електродною системою, зануреною у соляний розчин (активний низьковольтний баластний опір для неї менший). Тому надалі всі дослідження з обробки біомаси проводилися з використанням електродної системи конструкції «С» для позитивного електрода-вістря.



а



б

Рисунок 2 – Імпульсний розряд в модельному розчині на електродній системі «С» (а) і «G» (б)

Експерименти, проведені на натуральній біомасі показали, що стабілізація розряду в біомасі спостерігається при зарядних напругах $U_0 > 11$ кВ для максимальної ємності діапазону 1 мкФ і суттєво залежить від ємності накопичувача. Зі зменшенням ємності повне відтворення електричних динамічних характеристик розряду від імпульсу до імпульсу відбувається при більших значеннях U_0 і, для меншої з ємностей 0,1 мкФ, має місце при $U_0 = 15$ кВ. Недотримання таких вимог призводить навіть до наявності «холостих» розрядів, осцилограми електричних характеристики стабільних розрядів лишаються незмінними до завершення введення всієї сумарної енергії обробки даного

зразка біомаси.

На рис.3 наведено електричні і енергетичні характеристики, а в табл. 2 зведені розрахункові дані для вибраних режимів розряду (τ_p – тривалість активної фази розряду до моменту часу, коли розрядний струм на завершени процесу не перевищує 5 % від амплітудного значення; W_{tr} – енергія, що виділилася в розрядному проміжку впродовж τ_p з загальної енергії W ; N_{max} – максимальне значення миттєвої потужності N електричного розряду).

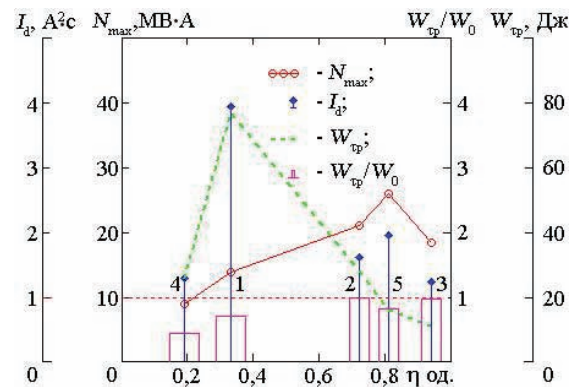


Рисунок 3 – Зведені інтегральні і амплітудні електричні характеристики різних режимів розряду

Таблиця 2 – Зведені розрахункові дані для режимів розряду

№ режиму	τ^* , мкс	η	τ_p , мкс	W_{tr}/W_0	$N_{max} \cdot 10^{-6}$, В·А
0	контрольний				
1	4,96	0,33	35	0,70	13,9
2	2,48	0,72	15	0,99	21,1
3	1,57	0,94	10	0,97	18,4
4	4,96	0,19	35	0,43	8,9
5	1,57	0,81	10	0,81	25,9

Аналіз часових залежностей розрядних струмів і напруг на міжелектродному проміжку показує, що для меншої з напруг U_0 , яка відповідає умовам забезпечення стабільних розрядів, зі зменшенням ємності накопичувача збільшується величина амплітуди струму i_p і величина η від 0,33 до 0,94 (режими №№ 1-3). Розширити діапазон режимів в бік нижньої границі і поповнити його, щодо значень η виявилось можливим шляхом змінення зарядної напруги: для максимальної ємності діапазону – в бік зменшення, для мінімальної – в бік збільшення (№ 4 і № 5). При цьому максимальна швидкість енерговведення має місце для $\eta = 0,81$.

Аналіз зведених амплітудних і інтегральних характеристик основних режимів імпульсного коронного розряду в біомасі (рис. 3) свідчить, що залежність амплітуди потужності розряду від величини η може бути екстремальною. Екстремум залежності $N_{max}(\eta)$ може не відповідати умовам максимального відносного енерговиділення (W_{tr}/W_0) протягом активної фази розряду. Інтеграл дії електричного струму одиничного розряду, розрахований на підставі експериментальних даних з виразу (6)

$$I_d = \int_0^{\tau_p} i_p(t)^2 dt, \tag{6}$$

набуває максимального значення за умови $\eta = 0,33$ (режим № 1), що відповідає максимальній енергії в абсолютних одиницях, яка виділилася впродовж активної фази розряду.

Висновки

Високовольтний імпульсний коронний розряд, який можна реалізувати у широкому діапазоні електропровідності гетерогенного біологічного середовища з високим вмістом твердофазних дисперсних включень у рідині, який характеризується значною гідродинамічною дією і струмами розтікання, що охоплюють значний об'єм і створюють помірний розподілений градієнт електромагнітного поля, є цілком прийнятним для обробки біомаси в промислових масштабах з метою її підготовки до метаногенезу. Доцільність застосування високовольтної електророзрядної обробки біомаси підтверджується техніко-економічними розрахунками, за якими прибуток від приросту утвореного біогазу може значно перевищувати витрати на обробку біомаси. В підготовленій відповідно до умов виробництва біогазу біомасі можуть бути реалізовані стабільні режими імпульсного коронного розряду зі значеннями η , яке визначає коливальний характер струму, від 0,2 до 0,95. Якщо розглядати електророзрядну інтенсифікацію бродіння, як наслідок електрокінетичних процесів і стохастичного резонансу – збігу власних частот імпульсів біологічного об'єкта з діапазоном частот імпульсів, індукованих від зовнішнього джерела, то показник η і інтеграл дії електричного струму одиничного розряду можуть бути ключовими з точки зору ефективного впливу на біомасу, що є предметом наступних досліджень.

Список літератури:

1. Chaturvedi V. An overview of key pretreatment processes employed for bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value added products / V. Chaturvedi, P. Verma // *Biotechnology*. – 2013. – Iss. 3 (5). – P. 415-431.
2. Momtgomery Lucy F. R. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production / Lucy F. R. Momtgomery, G. Bochmann // *Technical Brochure, Copyright IEA Bioenergy*. – 2014. – 23 p.
3. Harmsen P. F. H. Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass / P. F. H. Harmsen, W. J. J. Huijgen, L. M. Bermudez Lopez, R. R. C. Bakker // *Food and bio based research*. – 2010. – Iss. 13. – P. 1-49.
4. Agbor V. B. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application / V. B. Agbor, N. Cicek, R. Sparling, A. Berlin, D. B. Levin // *Biotechnology Advances*. – 2014. – Vol. 29. – P. 675-685.
5. McCabe A. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation / A. McCabe, N. Barron, L. McHale, A. P. McHale // *Biotechnology Techniques*. – 1995. – Vol. 9, iss. 2. – P. 133-136.
6. Salerno M. B. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis / M. B. Salerno, H. S. Lee, P. Parameswaran, B. E. Rittmann // *Water Environment Research*. – 2009. – Vol. 81(8). – P. 831-839.
7. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications / Edited by A. Wellinger, J. Murphy and D. Baxter. – Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited. – 2013. – 463 p.

lishing Limited. – 2013. – 463 p.

8. Lehner A. Optimierung der Verfahrenstechnik lande wirtschaftlichere Biogasanlagen – Abschlussbericht (end-of-project report) / A. Lehner, M. Effenberger, A. Gronauer. – 2009. URL <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13727/>.

9. Chen Y. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge / Y. Chen, B. Yu, C. Yin, C. Zhang, X. Dai, H. Yuan and N. Zhu // *RSC Advances*. – 2016. – Iss. 6. – P. 1581-1588.

10. Kim Dong-Hyun Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge / Dong-Hyun Kim, Young-Chae Song, Feng Qing // *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. – 2015. – Vol. 37, iss. 9. – P. 542-549.

11. Zhao Zhiqiang Potential for direct interspecies electron transfer in an electric-anaerobic system to increase methane production from sludge digestion/ Zhiqiang Zhao, Yaobin Zhang, Liying Wang and Xie Quan // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol.5, Article number: 11094; doi:10.1038/srep11094.

12. Hunt Ryan W. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications / Ryan W. Hunt, A. Zavalin, A. Bhatnagar, S. Chinnasamy and K. C. Das // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2009. – Vol. 10 (10). – P. 4515-4558.

13. Наумова О. В. Совершенствование электроимпульсной технологии при получении биогаза из органических отходов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» / О. В. Наумова. – Саратов, 2005. – 28 с.

14. Эдер Б. Биогазовые установки : пер. с нем. Компании ZorgBiogas; под ред. И.А. Реддих / Б. Эдер, Х. Шульц, – 2011. – Режим доступа: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Bio-gas_plants_Practics.pdf/.

References (transliterated):

1. Chaturvedi V., Verma P. An overview of key pretreatment processes employed for bioconversion of lignocellulosic biomass into biofuels and value added products. *Biotechnology*. 2013, issue 3(5), pp. 415-431.
2. Momtgomery Lucy F. R., Bochmann G. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. *Technical Brochure, Copyright IEA Bioenergy*. 2014, 23 p.
3. Harmsen P. F. H., Huijgen W. J. J., Bermudez Lopez L. M., Bakker R. R. C. Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass, Food and biobased research. 2010, issue 13, pp. 1-49.
4. Agbor V. B., Cicek N., Sparling R., Berlin A., Levin D. B. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application *Biotechnology Advances*. 2014, vol. 29, pp. 675-685.
5. McCabe A., Barron N., McHale L., McHale A. P. Increased efficiency of substrate utilization by exposure of the thermotolerant yeast strain, *Kluyveromyces marxianus* IMB3 to electric-field stimulation. *Biotechnology Techniques*. 1995, vol. 9, issue 2, pp. 133-136.
6. Salerno M. B., Lee H. S., Parameswaran P., Rittmann B. E. Using a pulsed electric field as a pretreatment for improved biosolids digestion and methanogenesis. *Water Environment Research*. 2009, vol. 81(8), pp. 831-839.
7. Wellinger A., Murphy J., Baxter D. *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited. 2013, 463 p.
8. Lehner A., Effenberger M., Gronauer A., Optimierung der Verfahrenstechnik lande wirtschaftlichere Biogasanlagen - Abschlussbericht (end-of-project report), 2009. Available at: <http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13727/> (accessed

03.06.2016).

9. Chen Y., Yu B., Yin C., Zhang C., Dai X., Yuan H., Zhu N. Biostimulation by direct voltage to enhance anaerobic digestion of waste activated sludge. RSC Advances. 2016, issue 6, pp. 1581-1588.

10. Kim Dong-Hyun, Song Young-Chae, Qing Feng Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 2015, vol.37, issue 9, pp. 542-549.

11. Zhao Zhiqiang, Zhang Yaobin, Wang Liying, Quan Xie Potential for direct interspecies electron transfer in an electric-anaerobic system to increase methane production from sludge digestion. Scientific Reports. 2015, vol.5, Article number: 11094; doi:10.1038/srep11094.

12. Hunt Ryan W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S., Das K. C. Electromagnetic Biostimulation of Living

Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. International Journal of Molecular Sciences. 2009, vol.10(10), pp. 4515-4558.

13. Naumova O. V. Sovershenstvovanie jelektoimpul'snoj tehnologii pri poluchenii biogaza iz organicheskikh othodov avto-ref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.20.02 "Jelektrotehnologii i jelektooborudovanie v sel'skom-hozjajstve" [Perfection of electropulse technology in obtaining biogas from organic waste Abstract of a thesis dr. tech. sci. diss. 05.20.02 "Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture"]. Saratov, 2005. 28 p.

14. Jeder B., Shul'c H. Biogas plants: per. s nem. Kompanii ZorgBiogas; po red. I. A. Reddih, 2011. Available at: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf (accessed 12.05.2016).

Надійшла (received) 15.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обладнання та режими для електророзрядної обробки біомаси / С. В. Петриченко, П. Л. Цолін, А.В.Сінчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 69-74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Оборудование и режимы для электроразрядной обработки биомассы / С. В. Петриченко, П. Л. Цолін, А.В.Сінчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 69-74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Equipment and regimes for electrodischarge processing of biomass / S. V. Petrichenko, P.L. Tsolin, A.V.Synchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 69-74. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петриченко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com

Петриченко Сергей Викторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Petrichenko Sergey Victorovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: (067) 887-39-30; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Цолін Павло Леонідович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Цолін Павел Леонидович – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Tsolin Pavel Leonidovich – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: (067) 514-77-78; email: tsolinpasha@gmail.com.

Сінчук Алла Вадимівна – кандидат технічних наук, вчений секретар, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iipt.com.ua.

Сінчук Алла Вадимовна – кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iipt.com.ua.

Synchuk Alla Vadimovna – Candidate of Technical Sciences, scientific secretary, Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine; tel.: +38(0512) 58-71-40; email: ssts@iipt.com.ua.