

**ТЕОРИЯ НА УСТОЙЧИВОТО РАЗВИТИЕ / SUSTAINABLE
DEVELOPMENT THEORY / ТЕОРИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ**

**ПРИРОДООХРАННЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БИОТЕХНОЛОГИИ
УТИЛИЗАЦИИ ЦИАНОБАКТЕРИЙ КАК ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ
ИМПЕРАТИВ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ**

**ENVIRONMENTAL AND ENERGY ASPECTS OF CYANOBACTERIA
UTILIZATION BIOTECHNOLOGY AS SUSTAINABLE DEVELOPMENT IMPERATIVE**



МАЛЬОВАНЬИЙ Мирослав

MALOVANYU Myroslav

mmal@lp.edu.ua

*Национальный университет "Львовская политехника", кафедра экологии и сбалансированного природопользования
ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина*



НИКИФОРОВ Владимир

NYKYFOROV Volodymyr

v-nik@kdu.edu.ua

*Кременчугский национальный университет имени Михаила
Остроградского
ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина*



ХАРЛАМОВА Елена

HARLAMOVA Olena

sefira@mail.ru

*Кременчугский национальный университет имени Михаила
Остроградского, кафедра экологической безопасности и организации
природопользования
ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина*



СИНЕЛЬНИКОВ Александр

SYNELNIKOV Oleksandr

sineinikov.svs@gmail.com

*Высшее профессиональное училище Львовского государственного
университета безопасности жизнедеятельности (г.Винница)
ул. Генерала Арабея, 7, Винница, 21020, Украина*

*Работа посвящена исследованиям перспектив использования сине-зеленых водорослей для производства энергоносителей. С решением этой задачи одновременно уменьшается степень экологической опасности от не контролируемого развития цианобактерий в акватории водохранилищ Днепровского каскада. Показаны эффективность и перспективы применения предварительной обработки цианобактерий в поле гидродинамической кавитации для увеличения степени извлечения из биомассы липидов, а также количества биогаза, образованного в результате метаногенеза. Для использования отработанного субстрата в сельском и лесном хозяйстве в качестве биоудобрения определялись уровни токсичности различных его концентраций методом биотестирования с использованием *Daphnia magna* Straus.*

Ключевые слова: *цианобактерии, экологическая опасность, биомасса, липиды, биогаз, биотестирование, биоудобрение.*

The work is devoted to research prospects for blue-green algae for the production of energy. On the solution of this problem at the same time decreasing level of ecological danger from not control development of cyanobacteria in the

waters of the Dnipro reservoirs. Showing effectiveness and prospects of pretreatment of cyanobacteria in the field of hydrodynamic cavitation to increase the degree of extraction of lipids from biomass, as well as the quantity of biogas formed as a result of methanogenesis. To use the spent substrate in agriculture and forestry as a bio-fertilizer determined by the level of toxicity of its different concentrations by bioassay using Daphnia magna Straus.

Key words: cyanobacteria, ecological danger, biomass, lipids, biogas, biological testing, bio-fertilizer.

Введение. Экологическая безопасность – неотъемлемая компонента устойчивого развития. Важным условием достижения устойчивого развития является также энергетическая независимость. Поэтому обеспечение экологической и энергетической безопасности государства – приоритетное задание, решение которого является важным для нормального функционирования государственных институций и обеспечения устойчивого развития государства в целом. И в этом ракурсе перспективным представляется организация сбора сине-зеленых водорослей (СЗВ или цианобактерии), чем обеспечивается минимизация экологической опасности Днепровского каскада водохранилищ от не контролируемого их развития. А использованием СЗВ как сырья для производства энергоносителей достигается повышение степени энергетической независимости страны.

Последствиями неконтролируемого развития цианобактерий в искусственных водоемах Днепра является превращение воды реки в период бурного развития СЗВ (со второй половины июля до конца сентября) в грязную жидкость с сильным неприятным запахом. Это делает невозможным очистку речной воды до уровня требований стандартов на питьевую воду на станциях первичной очистки водозаборов прибрежных городов. Воздух атмосферы наполняется приторным запахом гниения, что вызывает многочисленные заболевания дыхательных путей. Обеднение в процессе гниения цианобактерий воды Днепра кислородом вызывает удушье ценных пород рыб (судак, лещ, жерех, чехонь и др.), нанося значительный ущерб рыбному хозяйству страны. Свидетельством удушья является массовое всплытие погибшей рыбы на поверхность, а ее разложение создает дополнительную экологическую угрозу экосистеме. Во время разложения сине-зеленых водорослей

концентрации кислорода в речной воде уменьшение столь значительно, что в поверхностном слое создаются условия для их бескислородной ферментации.

На сегодняшний день человечеством используется значительная часть энергетического потенциала наземной биомассы растительного происхождения (шестую часть используемой энергии получают из сельскохозяйственной или другой биомассы, что эквивалентно каждодневному использованию более 4 млн. т нефти), вместе с тем биомасса гидробионтов вообще и фитопланктона в частности для производства энергии практически не используется. Несмотря на большое количество исследований по использованию цианобактерий для производства энергии (которые однако не носят систематического и законченного характера), технологии сбора и переработки сине-зеленых водорослей не нашли массового применения. Это во многом связано с отсутствием информации о перспективах предварительной обработки биомассы цианобактерий с целью увеличения полноты биодеструкции и интенсификации биоконверсии, недостаток информации по оптимальным режимам производства биогаза, отсутствием рациональной стратегии и комплексной технологии сбора и переработки цианобактерий.

Поэтому проведение комплекса обобщающих исследований, обеспечивающих возможность использовать фитомассу цианобактерий, собранных на акватории водохранилищ Днепровского каскада в период их вегетации, как сырья для производства энергии не только позволит осуществлять управление экологической безопасностью региона, но и получить дополнительное количество необходимой государству энергии.

Анализ последних исследований и публикаций. Чрезмерное «цветение» воды,

доминирующими агентами которого в условиях Днепровских водохранилищ являются представители родов *Microcystis*, *Phormidium*, *Merismopedia*, *Aphanizomenon*, *Anabaena* и *Oscillatoria*, следует рассматривать как биологический сигнал экологических проблем в биогеоценозах. Главным источником-субстратом для метаногенеза биомассы цианобактерий являются мукополисахариды [1-2], образующие их клеточную стенку, что в свою очередь способствует образованию слизистого чехла, благодаря которому клетки цианобактерий объединены в общую колонию.

С целью выяснения механизма анаэробной биоконверсии влажной фитомассы СЗВ в [1-5] проанализирована ее водная составляющая. С применением метода газожидкостной хроматографии установлено наличие различных представителей ароматического и алифатического ряда спиртов, аминов и карбоновых кислот.

В основу способа получения биогаза положен метод очистки поверхностных вод от СЗВ путем сбора и использования их концентрированной биомассы в качестве субстрата для получения биогаза. Выход биогазовой смеси при температуре + 28° С за сутки составил 200-250 см³ из 1 дм³ субстрата. Анализ спектра пламени биогаза позволил сделать вывод о значительном преобладании процентной доли метана в исследуемой смеси газов [6]. Полученный в лабораторных условиях продукт имел следующий состав: СН₄ (≈ 80 %), СО₂ (≈ 15 %) и другие газы (до 5 %).

Для получения биогаза из СЗВ [6] рекомендуется использовать водонепроницаемые цистерны (дайджестеры) с боковым отверстием для подачи субстрата (концентрированной биомассы цианобактерий), над которым размещают контейнер для сбора биогаза (газгольдер), что препятствует проникновению внутрь цистерны воздуха и обеспечивает анаэробность процесса. Отработанную биомассу [6] рекомендуется использовать в качестве биоудобрений.

Следует отметить, что использование биомассы цианобактерий для получения

биогаза является одним из эффективных технических решений обеспечения экологической безопасности акваторий водохранилищ и прилегающих территорий: уменьшаются затраты на очистку природных вод до нормативов [7], возрастает биопродуктивность ихтиофауны, а также утилизируются отходы биотехнологического процесса в качестве биоудобрения. Важным аспектом является также экономия традиционных энергоресурсов.

Согласно с некоторыми данными [7] наиболее весомыми результатами внедрения предлагаемого процесса являются: обеспечение устойчивого эколого-экономического развития региона; улучшение качества вод и, как результат – оздоровление окружающей среды; значительная экономическая эффективность за счет использования отработанного субстрата как органического удобрения в сельском и лесном хозяйстве.

Эколого-экономическая эффективность использования цианобактерий для получения биогаза (на примере Кременчугского водохранилища с площадью водного зеркала 2250 км²) оценивается в [4] следующим образом: при сборе сестона в количестве до 50 кг/м³ из объема 828 млн. м³ воды мелководья его биомасса составит 4,14 · 10⁷ т на протяжении вегетационного периода. Подвергнув эту биомассу ферментации в процессе метанового «брожения», можно получить до 30 млн. м³ биогаза (18,8 млн. м³ метана), что эквивалентно 20 тыс. т нефти или 17 тыс. т дизельного топлива.

Целью статьи является анализ существующей информации относительно минимизации экологической опасности каскада Днепровских водохранилищ от неконтролируемого развития цианобактерий, рекомендованных схем их сбора и утилизации с целью разработки комплексной экологической биотехнологии эффективной переработки СЗВ с максимальной степенью использования энергоресурсов биомассы.

Изложение основного материала. По нашему мнению основным недостатком описанных выше технологий переработки СЗВ является незначительная поверхность массообмена, что обуславливает неполноту использования биомассы для синтеза

биогаза, отсутствие стадии экстрагирования из биомассы липидов, которые могут быть использованы для производства биодизеля, а также недостаточно проработанный вопрос использования отработанной биомассы в качестве биоудобрения. В связи с этим изучено влияния предварительной обработки СЗВ с целью увеличения поверхности массообмена на полноту использования биомассы для экстракции липидов и синтеза биогаза.

Поскольку цианобактерии имеют достаточно плотную клеточную стенку, процессы экстракции и биоконверсии проходят с недостаточной интенсивностью, органика в этих процессах используется не в полной мере. Для разрушения клеточной оболочки был выбран метод кавитации, в процессе которой образуются зоны высокого и низкого давлений, разрушающие клеточные стенки. Исследовалась эффективность акустической и гидродинамической кавитации. Последнюю проводили на установке, где в качестве кавитирующего органа использовали трехлопастную крыльчатку клиновидного профиля с острой передней и тупой задней кромками. Частота вращения рабочего колеса составляла 4000 об./мин. В рабочую емкость кавитатора заливали 1 дм³ суспензии цианобактерий, время обработки составляло 10 мин.

Для проведения акустической кавитации суспензия цианобактерий вводилась в ультразвуковой реактор. Ультразвуковые колебания (частота – 22 кГц, мощность – 35 Вт, интенсивность – 1,65 Вт/см³ на единицу объема) от генератора УЗДН-2Т передавались с помощью магнестрикционного излучателя, погруженного в исследуемую среду ($V = 150 \text{ см}^3$). В течение всего процесса через исследуемую суспензию барботировали CO₂. Реактор непрерывно охлаждался проточной водой. Условия проведения ультразвуковой обработки: $T = 298 \text{ К}$, $P = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, время обработки 15 мин.

Для определения максимального количества липидов, которые могут быть экстрагированы из исследуемой биомассы цианобактерий, проводили экстракцию гексаном, из суспензии и высушенных при

80°С и перемолотых в ступке водорослей (общее содержание). Количество липидов в каждой пробе определяли гравиметрически. Результаты исследований приведены на рис. 1.

Результат подтверждает, что клеточные стенки необработанных водорослей являются плохо проницаемыми, и использование их без предварительной обработки для получения энергии затруднено. Обработка ультразвуковой кавитацией не дала положительных результатов. Обработка гидродинамической кавитацией разрывает клеточные стенки, и приводит к более полной экстракции, после обработки пробы удается экстрагировать 80 % от всех липидов.

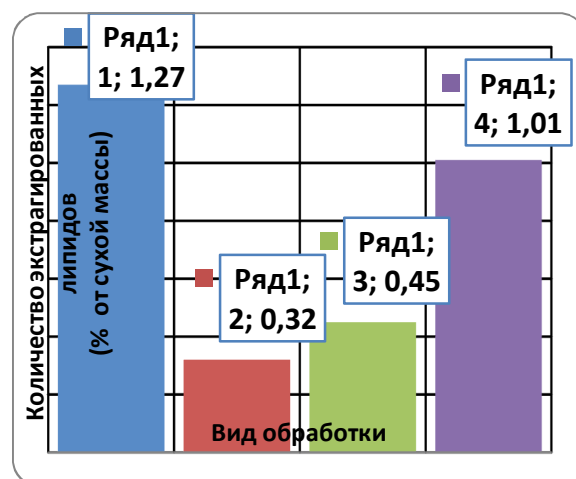


Рис. 1. Зависимость количества экстрагированных липидов из СЗВ от вида обработки: 1 – общее содержание; 2 – без обработки; 3 – ультразвуковая кавитация; 4 – гидродинамическая кавитация

В экспериментах по производству биогаза с целью имитации состава верхнего слоя водохранилища, в котором находится небольшое количество анаэробных бактерий, пробы смешивались с первичным илом очистных сооружений и помещали в реакторы, конструкция которых позволяла фиксировать количество выделенного биогаза.

pH в реакторах корректировали до 7,5 путем добавления небольшого количества раствора NaOH. Реакторы обматывали черным полиэтиленом для предупреждения попадания света и помещали в водяную

баню, в которой поддерживалась температура 34° С (мезофильные условия). Содержание реакторов перемешивали в течение 1 мин. каждые два дня. Длительность исследований составила 52 дня. Результаты исследований представлены на рис. 2.

На рис. 2 условно за 100 % выделения принят объем биогаза, добытый из суспензии цианобактерий без какой-либо предварительной обработки. Как видно на рис. 2 и в случае добычи биогаза предварительная гидродинамическая кавитация оказалась эффективной (увеличение объема добытого биогаза в 1,42 раза), ультразвуковая практически не улучшила процесса.

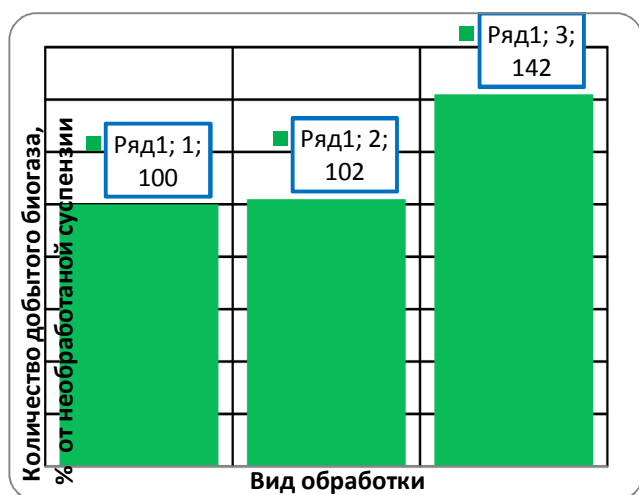


Рис. 2. Зависимость количества биогаза, полученного из СЗВ от вида предварительной обработки: 1 – без обработки; 2 – ультразвуковая кавитация; 3 – гидродинамическая кавитация.

Биотестирование проводилось в пробирках с использованием отработанного и токсичного субстратов в различных разведениях (1:10, 1:50, 1:100, 1:200, 1:500, 1:1000) при комнатной температуре. Количество пробирок и использованных дафний при биотестировании каждого из разведений составляло 30 шт. В течение биотестирования температура растворов составляла 19° С, а рН = 6,0. Результаты исследований приведены на рис. 3.

Для определения наиболее благоприятной концентрации отработанного субстрата для использования в сельском и лесном хозяйстве определялись уровни токсичности различных концентраций субстрата методом биотестирования [8]. В качестве тест-объекта для определения степени токсичности субстрата, как одного из критериев оценки возможности использования СЗВ до и после метаногенеза, использованы низшие ракообразные *Daphnia magna* Straus. Показателем выживаемости является среднее количество особей, выживших в тестируемом растворе субстрата на протяжении суток.

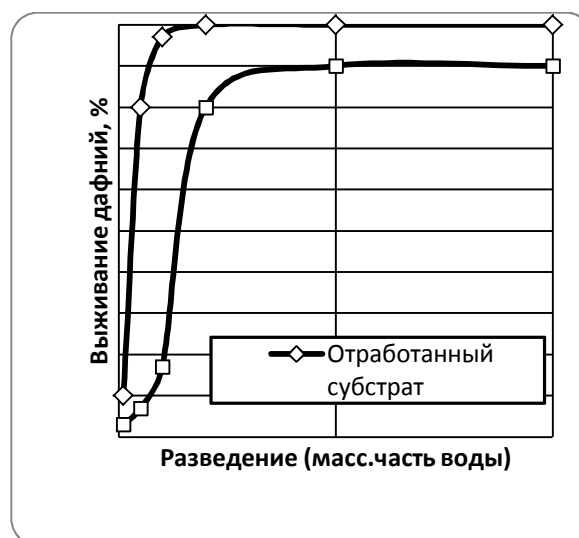


Рис. 3. Результаты биотестирования субстратов до и после переработки с использованием дафний.

Анализ результатов исследований выживания дафний в водных растворах субстрата различной концентрации позволил выявить уровни токсичности:

- выживаемость тест-объектов в контроле составляет 100 %;
- выживаемость дафний при разведении отработанного субстрата 1:10 и 1:50 снизилась до 90 % и 20 % соответственно;
- выживаемость дафний при разведении токсичного субстрата 1:10, 1:50 и 1:100 уменьшилась до 93 %, 97 % и 83 % соответственно;
- при разведениях 1:200, 1:500, 1:1000 для отработанного и токсического

субстратов выживаемость тест-объекта оставалась очень высокой.

Данные тестирования дают основание рекомендовать отработанную биомассу как органическое или минералорганическое (в случае его комбинирования с другими добавками) удобрение. По нашему мнению, следует провести дальнейшие исследования оптимальных условий использования нового типа удобрений для различных сельскохозяйственных культур в специализированных научно-исследовательских учреждениях аграрного профиля. Кроме этого серьезные наработки необходимы для определения оптимального и привлекательного товарного вида удобрения с целью получения несележиваемого продукта с нейтральным запахом в форме, удобной для транспортирования и внесения в почву. На наш взгляд, это возможно в случае комбинирования отработанной биомассы с природными дисперсными сорбентами (природными цеолитами, глауконитами, палыгорскитами).

Выводы.

Исследования показали, что перспективным является производство биодизеля и биогаза из собранных водорослей. Содержание липидов в собранной фитомассе цианобактерий является незначительным (1,27 %), поскольку методом экстракции можно выделить лишь незначительное количество макроэргических соединений, содержащихся в биомассе.

Влияние гидродинамического кавитационного поля позволяет значительно

повысить эффективность извлечения липидов. Эксперименты по производству биогаза подтвердили, что предварительная обработка использованием гидродинамического кавитационного поля разрушает клеточные стенки цианобактерий, увеличивая полноту их био конверсии.

Оптимальным для использования отработанного биомассы субстрата в качестве биоудобрения является его разведение, начиная с 1:200. Для разработки рекомендаций относительно окончательной формы органического или минералорганического удобрения необходимы дополнительные исследования.

Conclusions.

The studies have shown that the production of biodiesel and bio-gas from the harvested algae is perspective. The lipids content in the biomass of cyanobacteria is low (1,27 %), because the method of extraction allows to select very small amounts of macro-energetic compounds contained in biomass.

The influence of the hydrodynamic cavitation field can significantly increase the efficiency of lipids extraction. Experimental biogas production has confirmed that preliminary processing by hydrodynamic cavitation field destroys the cyanobacteria cell walls, and increases the completeness of their bioconversion.

An optimal dilution level of waste biomass substrate for its usage as bio-fertilizers starts from 1:200. The development of recommendations about the final form of organic or mineral-organic fertilizers requires an additional research.

Литература: 1. Никифоров В.В. О методах подавления массового развития сине-зелёных водорослей / В.В. Никифоров // Вісник проблем біології і медицини. – 2002. – Вип.4. – С. 27-31. 2. Никифоров В.В. Химко-биологические причины ухудшения качества природной воды / В.В. Никифоров, Т.Ф. Козловская // Вісник КДПУ. – 2002. – Вип.6 (17). – С. 82-85. 3. Дігтяр С.В. Проблема «цвітіння» верхів'я Дніпродзержинського водосховища та шляхи її вирішення / С.В. Дігтяр // Вісник проблем біології і медицини. – 2006. – Вип. 4. – С. 28–30. 4. Никифоров В.В. Особенности хозяйственного значения сине-зелёных водорослей в условиях Кременчугского и Днепродзержинского водохранилищ / В.В. Никифоров, Т.Ф. Козловская // Вісник КДПУ. – 2002. – Вип. 5(16). – С.109-108. 5. Шмандий В.М., Харламова Е.В., Безденежных Л.А. Использование адсорбентов, полученных из отходов, для улучшения состояния среды обитания человека // Гигиена и санитария. – 2012. – (№6). – С. 44-45. 6. Єлізаров О.І. Про можливість використання гідробіонтів для отримання біогазу / О.І. Єлізаров, А.В. Луговой, В.В. Никифоров // Вісник КДПУ. – Кременчук, 2006. – Вип. 6(41). – С.43-44. 7. Єлізаров А.І. Природоохоронний і енергосберегаючий аспекти утилізації сине-зелених водорослей / А.І. Єлізаров, В.В. Никифоров // Матеріали VII НТК «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» – Кременчук-Хургада, 2008. – С. 87-90. 8. Методическое руководство по биотестированию воды под редакцией Крайнюковой Н.А. – ВНИИВО, 1991. – 48 с.