

УДК 574.6:477.63/64

## ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ МЕТАНОГЕНЕЗА СИНЕЗЕЛЕННЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ И ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ ИХ УТИЛИЗАЦИИ

**Никифоров В.В., к.б.н., доц., Козловская Т.Ф., к.х.н., доц., Дегтярь С.В., асс.**  
**Кременчугский государственный политехнический университет**  
**имени Михаила Остроградского**  
 39600 г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20  
 E-mail: [v-nik@polytech.poltava.ua](mailto:v-nik@polytech.poltava.ua)

Визначено хімічну кінетику закономірності метаногенезу та органічний склад вологої біомаси синьозелених водоростей. Обговорюються природоохоронні й енергозберігаючі ефекти утилізації синьозелених водоростей. Використання їх фітомаси задля виробництва біогазу призведе до оздоровлення Дніпра та прилеглих територій і дозволить отримувати до 19 млн. м<sup>3</sup> метану за вегетаційний період (70 днів) з акваторії лише Кременчуцького водосховища.

**Ключові слова:** хімічна біологія, хімічна кінетика, метаногенез, синьозелені водорості, біогаз, охорона природи, енергозбереження, дніпровські водосховища.

Chemical-kinetic conformities to the law of methanogenesis and organic composition of moist biomass of green-blue algae is determined. Nature protection and energy saving effects of green-blue algae utilization are discussed. Their phytomass application for biogas production will lead to sanitation of the Dnieper region and obtain about 19 million m<sup>3</sup> methane during the vegetation period (70 days) on the Kremenchuk reservoir aquatories alone.

**Key words:** chemical biology, chemical kinetic, methanogenesis, green-blue algae, biogas, nature protection, energy saving, Dnieper reservoirs.

**Введение.** Река Днепр – одна из крупнейших водных артерий Европы. Сооружение в середине XX века каскада водохранилищ не только существенно повысило хозяйственный потенциал Днепра в его среднем и нижнем течении, но и столкнуло общество с рядом новых проблем, а также обострило некоторые традиционные, среди них, в первую очередь, экологические. Естественный процесс так называемого «цветения» водоёма в условиях зарегулированного стока приобрёл совершенно иные масштабы.

Уменьшение скоростей течения воды и интенсификация процессов седиментации способствовали значительному увеличению прозрачности воды и глубины распространения солнечной энергии. Так, в Днепровских водохранилищах прозрачность воды в среднем увеличилась в 2 раза, что обусловило увеличение глубины проникновения лучистой энергии от 1,0–1,5 м на реке до 2,5–6,0 м – в водохранилище. Это привело к увеличению мощности слоя образования первичной биологической продукции (фотического слоя) в среднем в 2,2 раза, его объёма – в среднем в 29 раз. В результате увеличилась биологическая продуктивность, интенсифицировались процессы деструкции, эвтрофикации и накопления илов органического происхождения [1]. Этому немало способствовало увеличение общей площади водного зеркала, а также образование обширных, хорошо прогреваемых, мелководных участков с гидрологическим режимом, благоприятным для интенсивного развития водорослевой фитомассы и других гидробионтов [2].

**Анализ предыдущих исследований.** Среди гидробионтов особое место занимают синезелёные водоросли (*Cyanophyta*) или точнее цианобактерии (*Oxyphotobacteriobionta*), являющиеся древнейшей группой автотрофных организмов, остатки которых обнаружены в докембрийских строматолитах возрастом 2,7–3,2 млрд. лет [3]. Будучи космополитами, цианобактерии, несмотря на незначительное видовое разнообразие (около 2 тыс. видов), встречаются везде и повсюду, поскольку их адаптационным возможностям (экологической пластичности и резистентности), обусловленным их древностью, почти нет предела [4,5]. Способность усваивать четыре газа – углекислый газ для фотосинтеза, кислород для дыхания, сероводород для хемосинтеза и азот для его фиксации – позволяет одной исходной клетке за веге-

тационный период (70 дней) произвести  $10^{20}$  дочерних и приводит к их массовому развитию – «цветению» воды [3,7].

Запредельное «цветение» воды, доминирующими агентами которого в условиях Днепровских водохранилищ являются представители родов *Microcystis*, *Phormidium*, *Aphanizomenon*, *Anabeana* и *Oscillatoria*, следует рассматривать как биологический сигнал неблагоприятия в гидроэкосистемах. Среди многочисленных механических, физико-химических, биологических и экологических методов подавления массового развития цианобактерий наиболее эффективными представляются последние два, поскольку они позволяют избавиться от причин, а не от последствий «цветения» воды [6,8].

Если значительная часть энергетического потенциала наземной биомассы растительного происхождения утилизируется человечеством (на сегодня шестую часть потребляемой энергии получают из сельскохозяйственной и другой фитомассы, что эквивалентно ежедневному использованию более 4 млн. т нефти), то биомасса гидробионтов вообще и фитопланктона в частности практически не востребована.

Растения утилизируют около 0,1% солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, что в 10 раз превышает мировое потребление энергии. Поэтому возникла идея использования биогаза – топлива, получаемого из органической массы путём её биоконверсии. Биометаногенез был открыт в 1776 г. Вольтой, который установил наличие метана в болотном газе. При этом, наиболее перспективными утилизаторами солнечной энергии оказались микроводоросли: максимальное значение КПД фотосинтеза у цианей достигает 20%, что более чем в 200 раз превышает среднее значение КПД фотосинтеза на Земном шаре. Энергия, заключенная в 1 м<sup>3</sup> биогаза, эквивалентна энергии 0,6 м<sup>3</sup> природного газа, 0,7 л нефти или 0,6 л дизельного топлива [9-12].

Классическая технология получения клар-газа из органических отходов агрогенного происхождения основана на симбиотическом взаимодействии трёх групп микроорганизмов, на одном их этапов которого происходит процесс биосинтеза метанобактериями смеси газов с преобладанием метана (более половины по объёму) и примеси других газов, в присутствии которых метаногены развиваются (H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>) или подавляются (O<sub>2</sub>). Доминирующими в процессе метаногенеза являются виды *Methanobacterium formicicum* и *Methanospirillum hungati* [13].

Поэтому, интенсивность биосинтеза метана во многом зависит от концентрации в субстрате кислорода и других ингибиторов этого процесса. Соотношение различных условий протекания метаногенеза (суммарное уравнение реакции  $4C_6H_5COOH + 18H_2O \rightarrow 15CH_4 + 13CO_2$ ): pH 6,0-8,0, t - не менее 30°C отношение углерода к азоту в субстрате по массе (30:1 и твёрдых компонентов к воде 1:1, – обуславливает его продолжительность от 8 до 20 суток [13].

**Цель работы.** Разработка комплексной технологии рентабельного производства биогаза (клар-газа) из биомассы цианобактерий, собранной в период «цветения» акватории водохранилищ Днепровского каскада.

**Материал и результаты исследований.** Моделирование указанной технологии планируется провести на крупнейшем в Европе водохранилище – Кременчугском. Апробация процесса получения биогаза проведена на базе биоэкологической лаборатории кафедры экологии факультета естественных наук Кременчугского государственного политехнического университета им. М. Остроградского [14,15].

В основу предлагаемого способа положен метод очистки поверхностных вод от синезелёных водорослей путём сбора и использования их концентрированной биомассы как субстрата для получения клар-газа посредством биотехнологии метанового «брожения» и обеспечения тем самым надлежащего уровня качества воды в каскаде водохранилищ при экономии энергоресурсов. Применение цианобактерий в качестве сырья для производства биогаза является инновационной разработкой, не имеющей мировых аналогов.

Кроме природоохранного и энергосберегающего эффекта данного способа следует также отметить его относительную дешевизну и возможность регулировать размеры капиталовло-

жений на начальных этапах внедрения в зависимости от выбранных масштабов производства. Одним из преимуществ предлагаемой технологии является простота устройства конструкций для сбора водорослей, ферментеров и газосборного оборудования, используемых для получения и накопления биогаза, что даст возможность внедрения этой биотехнологии в небольших частных хозяйствах.

Метановое «брожение» происходит в водонепроницаемых цистернах (дайджестерах) с боковым отверстием для подачи субстрата (концентрированной биомассы цианобактерий). Над ним находится контейнер для сбора биогаза. Нависая над ферментируемой смесью в виде купола, контейнер препятствует проникновению внутрь цистерны воздуха, что обеспечивает анаэробность процесса. В газовом куполе находится труба для отведения клар-газа. Дайджестеры изготавливают из кирпича, бетона, стали или металлопластика. Купол для сбора газа может быть изготовлен из нейлона или других газонепроницаемых материалов. Биогаз наполняет мешок, соединённый с компрессором для повышения его давления.

Выход биогазовой смеси при температуре +28°C за 1 сутки составил 200 мл из 1 дм<sup>3</sup> субстрата. Анализ спектра пламени биогаза позволяет сделать вывод о значительном преобладании процентной части метана в исследуемой смеси газов [16,17].

К числу наиболее весомых среди ожидаемых результатов относятся:

- использование бесплатного сырья в качестве ферментируемого субстрата;
- применение экологически безопасных и не требующих особых энергозатрат способов сбора фитопланктона, производства биогаза и трансформации его в электроэнергию;
- утилизация отходов производства как минералоорганических удобрений в сельском и лесном хозяйстве;
- улучшение качества природных вод и, как результат, оздоровление окружающей среды и населения;
- использование социального и финансового эффекта для обеспечения устойчивого эколого-экономического развития приднепровских регионов.

Критический анализ литературных данных позволил прийти к следующим выводам:

1. Способностью образовывать метан обладают около 50 видов из 17 родов, все из которых относятся к *Archaeobacteriobiontae*. Традиционно их рассматривают как группу метанобразующих бактерий, однако, филогенетически она весьма неоднородна. В IX определителе бактерий Берджи выделено три порядка метаногенов: *Methanobacteriales*, *Methanococcales* и *Methanomicrobiales*.

2. Все метаногены – строгие анаэробы, рост некоторых из них полностью подавляется при появлении в газовой фазе 0,004% O<sub>2</sub>. Первые из выделенных в чистые культуры виды росли при окислительно-восстановительном потенциале среды – 300 мВ. Большинство из них мезофилы и имеют оптимум роста в области 30-40°C, все имеют оптимум pH при 6,5-7,5 и являются галофилами.

3. Около половины видов автотрофны и фиксируют углекислый газ по ацетил-CoA-пути, ряд из них способен к азотфиксации (*Methanosarcina barkeri*, *Methanobacterium formicium*). Сера усваивается, чаще всего, в восстановленной форме, возможно вовлечение в метаболизм молекулярной серы, сульфит-аниона (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Лишь несколько видов (*Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanococcus thermolithrophicum*) могут использовать сульфат-анион (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

4. Окислять водород углекислым газом способны практически все метаногены, однако лишь два рода (*Methanosarcina*, *Methanotherix*) могут декарбоксилировать ацетат. При этом именно они дают наибольший вклад в глобальную эмиссию метана. Метаногены завершают анаэробную деструкцию вещества, используя молекулярный H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и CO, а также низшие органические кислоты, выделяющиеся в процессах брожения. Более 20% мировых запасов метана имеют биогенное происхождение [18-20].

Основой производства биогаза является метаногенез – процесс ферментации биомассы синезеленых водорослей с помощью природной метаногенной флоры. Процесс осуществлялся в течение 26-30 дней (иногда дольше). Из 1 кг влажной биомассы удается получить приби-

лизительно 0,2-0,5 л биогаза при температуре 20-25°C. Однако, если температуру поднять до 32-35°C, то выход увеличивается до 0,75-0,8 л. Методом газо-жидкостной хроматографии удалось установить приблизительный химический состав газовой смеси: CH<sub>4</sub> – 65%; CO<sub>2</sub> – 30%; H<sub>2</sub>S – 1%; O<sub>2</sub> – 1%; H<sub>2</sub> – 1%; CO – 1%; другие газы – 1%. Так как содержание метана в смеси составляет приблизительно 65-70%, то показатель энергоёмкости составляет в среднем 2,1\*10<sup>4</sup> кДж.

В соответствии с литературными [13] данными известно также, что переносчиком электронов в процессе метаногенеза является фактор F420 (модифицированный флаavin) – рибофлавинаденинодифосфат (РАДФ), который способствует окислению биогенных аминов, спиртов, альдегидов, α-кетоглутаровой кислоты, пирувата, является переносчиком электронов и водорода: X-COON ... X-CHO ... X-CH<sub>2</sub>OH ... X-CH<sub>3</sub> ... CH<sub>3</sub>-S-CoM ... CH<sub>4</sub>.

Установлено, что:

а) наличие алифатических органических веществ в биомассе СЗВ типа уксусной, пропионовой, фенилуксусной и других кислот увеличивает выход клар-газа [18-21];

б) гетероциклические соединения неароматического характера, в состав которых входят азот и сера, являются источником образования в составе клар-газа сероводорода и небольших количеств аммиака;

в) ароматические соединения типа фенола, производных толуола, ксилола являются лимитирующими факторами в процессе образования клар-газа;

г) суммарный метаногенез протекает по экспоненциальному типу с оптимальным выходом клар-газа при t=35-37°C. Повышение температуры увеличивает содержание побочных примесей (CO, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>) и ненасыщенных углеводородов типа этилена, пропилена (рис. 1), что снижает выход клар-газа.

В процессе метаногенеза принимают участие и специфические коферменты: метанофуран, тетрагидрометанофтерин (Н4МП), коферменты F420, F430, CoM и CoB. Н4МП и метанофуран найдены у метилотрофных бактерий, Н4МП, F420 и CoB имеют сходство с коферментами, обнаруженными у бактерий и эукариот. F430 и CoM не имеют аналогов у других организмов.

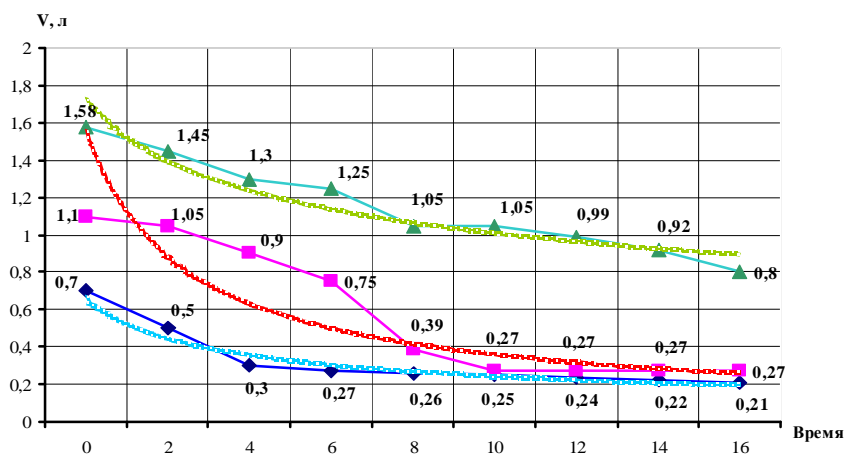


Рисунок 1 – Зависимость выхода метана из биомассы СЗВ от времени метаногенеза

Химико-кинетические закономерности процесса подчиняются уравнению Михаэлиса-Ментена:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{V_{\max} C}{K_M + C} \quad (1)$$

Тогда,

$$C = \lambda C_0 (1 - e^{-kt}), \quad (2)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация органических соединений в биомассе СЗВ;  
 $\lambda$  – скорость метаногенеза биомассы СЗВ;  
 $k$  – постоянная накопления клар-газа;  
 $t$  – продолжительность метаногенеза.

Накопление клар-газа в биологической системе имеет место, но его количество изначально незначительно, и тем меньше, чем ниже  $k$  по сравнению с  $k_m$  (3). С увеличением разницы между постоянной накопления клар-газа и постоянной метаногенеза растет его количество. Для ускорения процесса метаболизма СЗВ необходимо накопление клар-газа хотя бы в незначительном количестве. При этом скорость метаболизма, которая измеряется количеством молекул, метаболизирующихся в единицу времени, будет тем больше, чем больше общее содержание вещества. При некоторой концентрации скорость метаболизма уравнивается со скоростью поступления, что и определяет максимальный выход клар-газа:

$$C = \frac{k_l C_o}{k_m} (1 - e^{-k_m t}), \quad (3)$$

где  $k_m$  – постоянная метаногенеза;  
 $C$  – концентрация клар-газа в момент времени  $t$ .

Следует отметить, что процесс образования клар-газа носит сложный характер и является трехфазным (рис. 2-4). При этом важнейшей является последняя стадия, во время которого интенсифицируется образование клар-газа.

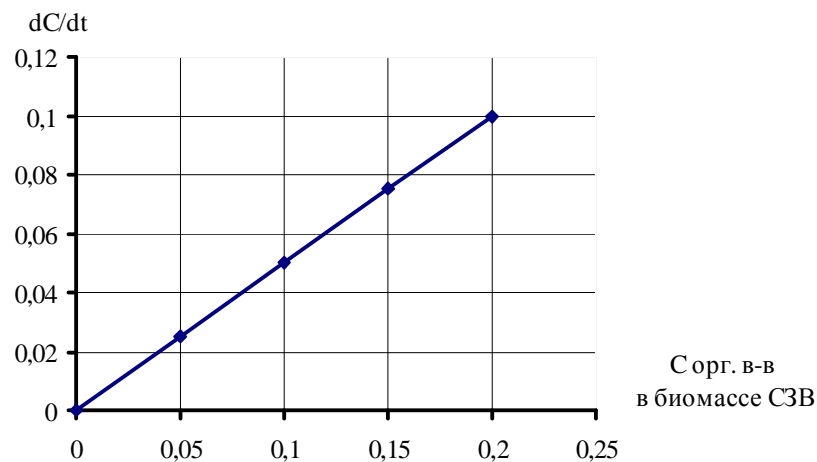


Рисунок 2 - Начало накопления клар-газа - зона реакции первого порядка

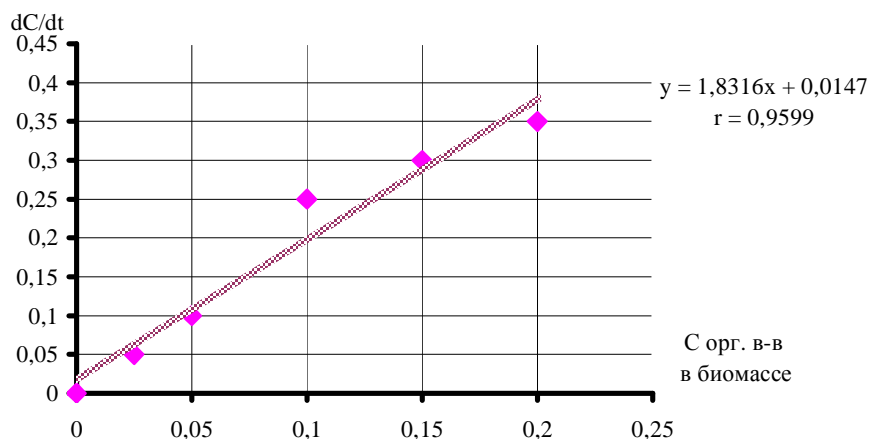


Рисунок 3 - Реакция в зоне смешанного характера образования клар-газа

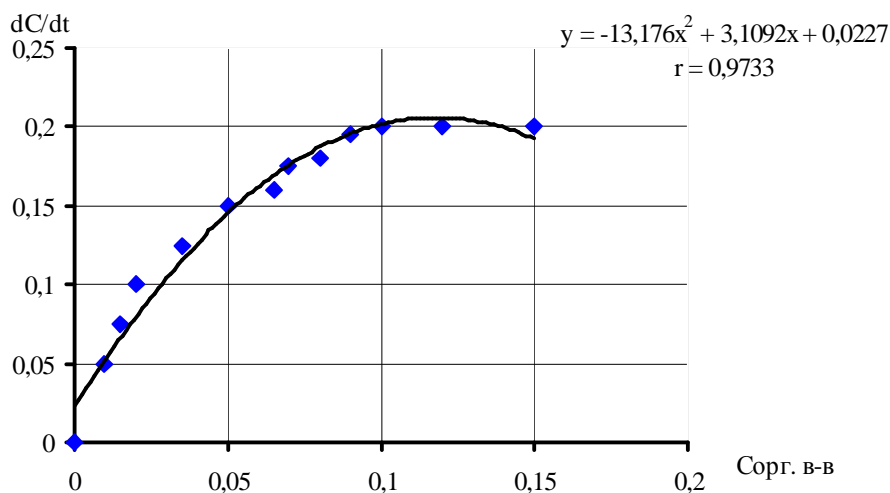


Рисунок 4 - Конечный этап метаногенеза

Наиболее хорошо изучен процесс восстановления углекислого газа до метана:



На первой стадии одноуглеродный остаток присоединяется к тетрагидрометаноптерину, после чего дегидратируется и восстанавливается до уровня формальдегида либо молекулярным водородом, либо при участии F420 [13]. После этого происходит ещё одно восстановление и полученная метильная группа переносится на CoM. Метил-S-CoM восстанавливается коферментом В до метана при участии метил-CoM-редуктазы и с образованием метана, а также гетеросульфида коферментов В и М. Все перечисленные реакции необратимы. Энергия запасается при восстановлении гетеросульфида мембранным ферментативным комплексом гидрогеназы и гидродисульфид-редуктазы.

С целью дальнейшего выяснения механизма анаэробного превращения влажной биомассы СЗВ была проанализирована ее водная составляющая. С использованием метода газожидкостной хроматографии (хроматограф „Цвет-200”) установлено наличие разнообразных представителей ароматического и алифатического ряда спиртов, аминов и карбоновых кислот (табл. 1).

**Таблица 1 – Содержание органических веществ в водной составляющей биомассы синезеленых водорослей**

№ п/п	Ингредиент	Номер пробы и концентрация, мкг/дм <sup>3</sup>				
		1	2	3	4	5
Аминофенолы (гидроксианилины)						
1	о-Аминофенол	0,25	0,18	0,28	0,12	0,008
2	м-Аминофенол	0,23	0,16	0,16	0,14	0,12
3	п-Аминофенол	0,18	0,25	0,12	0,22	0,07
Алифатические амины						
4	Амиламин	0,32	0,26	0,19	0,25	0,28
5	фтор-Бутиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
6	н-Бутиламин	0,24	0,22	0,25	0,31	н/в
7	Диамиламин	0,38	0,36	0,29	0,31	0,25
8	Дибутиламин	н/о	0,12	н/о	0,14	н/о
9	втор-Дибутиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
10	Ди-изо-пропиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
11	Диэтилнитрозамин	0,27	0,27	0,09	0,19	0,14
12	Диэтилэтанолламин	0,25	0,32	0,07	0,25	0,16
13	изо-Бутиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
14	изо-Пропиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
15	Метиламин	0,45	0,42	0,48	0,34	0,42
16	н-Пропиламин	0,32	0,26	0,35	0,38	0,31
17	Этиламин	0,19	0,24	0,21	0,14	0,12
18	Этилэтанолламин	0,12	0,05	0,05	0,15	0,15
19	Трибутиламин	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
20	Трипропиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
21	Триэтиламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
22	Этилдиэтанолламин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
23	Этилендиамин	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Ароматические амины						
24	м-Толуилендиамин	0,12	0,14	0,16	0,12	0,12
25	о-Толуидин	0,05	0,12	0,21	0,18	0,14
26	Анилин	0,9	0,8	0,5	0,25	0,14
27	Гексагидро-о-толуидин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
28	β - Нафтиламин	0,25	н/о	0,14	0,22	н/о
29	Бензидин	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Аминоспирты						
30	Этанолламин	0,25	0,28	0,26	0,35	0,36
31	Диэтанолламин	0,22	0,26	0,26	0,42	0,24
32	Триэтанолламин	0,25	0,25	0,18	0,28	0,26
33	Холин	0,35	0,42	0,52	0,58	0,25
Аминокислоты						
34	Аминоксунная к-та	0,25	0,26	0,26	0,21	0,22
35	2-Аминопропановая к-та	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
36	2-Амино-3-петилпентановая к-та	0,03	0,018	0,022	0,014	0,12
37	2-Амино-3-оксибутановая к-та	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о

Аминокислотный анализ белков позволил установить, что аспарагиновая и глутаминовая кислоты, аланин, пролин, лейцин содержатся в биомассе водорослей в большом количестве. В белке водорослей *Microcystis aeruginosa* содержится в значительном количестве аргинин и еще 12 аминокислот: цистин, лизин, гистидин, серин, глицин, треонин, α-аланин, тирозин, метионин, валин, фенилаланин, изолейцин. Набор аминокислот в составе белков водорослей не изменяется на протяжении всего периода вегетации [22]. Старение культуры водорослей

сопровождается изменениями в количественном соотношении аминокислот. Со временем резко уменьшается содержание лейцина, фенилаланина, тирозина и аланина.

Стехиометрия процесса может быть описана следующим упрощенным уравнением реакции:



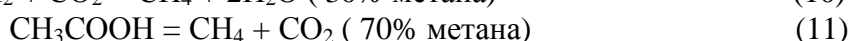
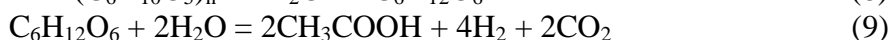
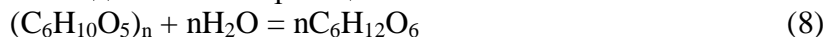
Было выяснено, что производные пропилового спирта и пропионовой кислоты замедляют выделение метана, реакция ингибируется на стадии образования уксусной кислоты:



Азотсодержащие соединения дают дополнительно оксид азота, хотя и в небольших количествах:



Реально же образование метана идет по таким реакциям:



Таким образом, использование биомассы цианобактерий, собранной во время «цветения» воды на акваториях водохранилищ Днепровского каскада для получения биогаза (применение альтернативных источников энергии), является одним из эффективных способов улучшения экологического состояния р. Днепр и прилегающих территорий, уменьшения затрат на очистку природных вод до ДСТУ «Вода питна» (2003), увеличения продуктивности рыбы, а также утилизации отходов биотехнологического процесса в отраслях сельского и лесного хозяйства.

**Выводы.** 1. Предлагаемый способ получения биогаза (клар-газа) из синезелёных водорослей (цианобактерий) отличается от аналогов типом используемого субстрата и количественным составом биогаза (повышенное содержание метана за счет уменьшения сероводорода и диоксида углерода).

2. Техническим результатом является получение смеси газов – более 700 мл из 1 дм<sup>3</sup> субстрата на протяжении недели при оптимальной температуре 20-30°С – с качественно-количественным составом полученного в камеральных условиях продукта: CH<sub>4</sub> (≈65%), CO<sub>2</sub> (≈30%), H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> (≈ по 1%) [14,15,17].

3. К несомненным достоинствам данного инновационного проекта переработки водорослевой биомассы можно отнести то обстоятельство, что, являясь интерпретацией классической технологии получения биогаза из продуктов сельскохозяйственного производства, он может быть легко переориентирован на любой другой органический субстрат, обеспечивающий лучший энергетический эффект либо более доступный в той или иной конкретной ситуации.

4. Перспективы использования цианобактерий для получения биогаза в условиях Кременчугского водохранилища с площадью водного зеркала 2250 км<sup>2</sup> можно оценить с следующим образом:

- при сборе сестона в пятнах «цветения» в количестве до 50 кг/м<sup>3</sup> (Приймаченко, 1981) из объема 828 млн. м<sup>3</sup> воды мелководий (глубина до 2 м; 18.4% площади водоема) его биомасса составит 4,14×10<sup>7</sup> т за вегетационный период.

- подвергнув эту биомассу ферментации в процессе метанового «брожения», можно получить до 28,98 млн. м<sup>3</sup> биогаза (≈18,837 млн. м<sup>3</sup> метана), что эквивалентно 20 тыс. т нефти или 17 тыс. т дизельного топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Яцык А.В., Шмаков В.М. Гидроэкология. – К.: Урожай, 1992. – 192 с.
2. Бобровський А.Л. Екологія поверхневих вод: Кн. 2: Основи інженерного управління гідроекологічними процесами: Підручник. – Рівне, 2005. – 331 с.



3. Водоросли и лишайники. В кн.: Жизнь растений / Под ред. А.А. Федорова. – М.: Просвещение, 1977. – Т. 3. – С. 78-93.
4. Никифоров В.В. О методах подавления массового развития синезелёных водорослей // Вісник проблем біології і медицини. - 2002. – Вип. 4. – С. 27-31.
5. Никифоров В.В., Козловская Т.Ф. Особенности хозяйственного значения синезелёных водорослей в условиях Кременчугского и Днепродзержинского водохранилищ // Вісник КДПУ. - 2002. – Вип. 5 (16). – С. 109-108.
6. Никифоров В.В., Козловська Т.Ф. Хіміко-токсикологічні проблеми підготовки питної води при дії екстремальних природних чинників // Вісник КДПУ. - 2002. – Вип. 5 (16). – С. 106-108.
7. Никифоров В.В., Козловская Т.Ф. Химко-биологические причины ухудшения качества природной воды // Вісник КДПУ. - 2002. – Вип. 6 (17). – С. 82-85.
8. Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я. «Цветение» воды и евтрофирование. – К.: Наукова думка, 1978. – 232 с.
9. Чань Динь Тоай, Хлудова М.С., Панцхава Е.С. Биогенез метана // Итоги науки и техники. Биотехнология. – М.: ВИНТИ, 1983. - С. 151-194.
10. Водоросли. Справочник / Под ред. С.П. Вассера. – К.: Наукова думка, 1989.–С. 142-166.
11. Кульский Л.А., Сиренко Л.А., Шкавро З.И. Фитопланктон и вода. – К.: Наукова думка, 1986. – 134 с.
12. Сассон А. Биотехнология: свершения и надежды / Под ред. В.Г. Дебабова. – М.: Мир, 1987. – 411 с.
13. Гусев М.В., Минеева Л.А. Микробиология. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – С. 352-360.
14. Єлизаров О.І., Луговой А. В., Никифоров В.В. Про можливість використання гідробіонтів для отримання біогазу// Вісник КДПУ. – Кременчук, 2006. – Вип. 6 (41). – С. 43-44.
15. Никифоров В.В. Отримання біогазу із синьозелених водоростей // Матеріали другої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 27-29 березня 2007 року. – К., 2007. – С. 1-2.
16. Дігтяр С.В. Проблема “цвітіння” верхів’я Дніпродзержинського водосховища та шляхи її вирішення. // Вісник проблем біології і медицини. - 2006. – Вип. 4. – С. 28–30.
17. Елизаров А.И., Никифоров В.В. Природоохраннй и энергосберегающий аспекты утилизации синезеленых водорослей // Матер. VII наук.-техн. конф. „Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”. – Кременчук-Хургада, 2008. – С. 87-90.
18. Литовченко И.В., Макаренко К.В., Стручалина Т.И. Проблемы и перспективы анаэробной микробиологической конверсии аминокислот в биогаз. – Фрунзе: Илим, 1990. – 20 с.
19. МакКинерни М., Брайант М. Основные принципы анаэробной ферментации с образованием метана // Биомасса как источник энергии. – М.: Мир, 1985. – С. 246-265.
20. Панцхава Е. С. Биохимия метаногенеза // Успехи биол. химии. – 1985. – Т. 26. – С. 169.
21. Приймаченко А.Д. Фитопланктон и первичная продукция Днепра и днепровских водохранилищ. – К.: Наукова думка, 1981. – 278 с.
22. Таштаналиев А.С., Стручалина Т.И. Биодegradация отходов микробиологического синтеза аминокислот в анаэробных условиях // Проблемы и перспективы развития химии и химических технологий в Кыргызстане. - Бишкек: Илим, 2001. - С. 260-265.