

Lubrication [Electronic resource]. – 2008. – Mode of access: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1390/wear-debris-analysis-industrial>. – Date of access: 17.03.2021.

6. Маркова, Л.В. Трибодиагностика машин / Л.В. Маркова, Н.К. Мышкин. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 251 с.

7. Liu, Y. Motion analysis on the particles in a magnetic field detector / Y. Liu [et al.]. // Tribology International. – 2000. – № 33 – P. 837-843.

8. Самофалов, В.Н. Сильные поля рассеяния в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией / В.Н. Самофалов, Д.П. Белозоров, А.Г. Равлик // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – № 3. – С. 287-306.

9. Coey, J.M.D. Permanent magnet applications / J.M.D. Coey // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – № 248. – P. 441-456.

10. Берд, Р. Явления переноса. / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. – Москва: Химия, 1974. – 688 с.

11. Magnet apparatus for generating high gradient magnetic field: pat. US 10328436 / Henrik Hoyer. – Pub. date 06. 25. 2019. – United States Patent Office.

12. Roth, I.B. Characterization and use of permanent magnets with extremely strong field gradients: master's thesis / I.B. Roth. – Department of Physics University of Oslo, 2009. – 95 p.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.10.2022

УДК 639.3.06+628.16.087

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АНАЭРОБНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ АКВАКУЛЬТУРЫ

В.Н. Штепа,

декан инженерного факультета Полесского гос. университета, докт. техн. наук, доцент

А.Б. Шикунец,

магистрант Полесского гос. университета

Проведены экспериментальные исследования анаэробного сбраживания отходов промышленной аквакультуры (помета клариевого сома), а также оценены различные способы интенсификации анаэробных процессов в биогазовом реакторе. Повышение эффективности процессов с помощью периодического воздействия постоянного электрического тока позволило повысить выход биогаза на 1 литр субстрата в 4,43 раза по сравнению с контрольным реактором. Установлено, что использование электротехнологической интенсификации позволяет сократить время окупаемости метаногенерирующего оборудования, а также увеличить прибыль от его использования. Полученные результаты могут быть эффективно использованы при функционировании промышленных систем аквакультуры, коммунальных и локальных очистных сооружений, а также мобильных биогазовых анаэробных реакторов.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, аквакультура, электролизные процессы.

The experimental study of industrial aquaculture waste anaerobic fermentation (clariid catfish droppings) was carried out, and various methods for intensifying anaerobic processes in the biogas reactor were evaluated. Improving the efficiency of processes with the help of periodic exposure to direct electric current made it possible to increase the yield of biogas per 1 liter of substrate by 4.43 times compared to the control reactor. It has been established that the use of electro-technological intensification makes it possible to reduce the payback time of the methane generating equipment, as well as increase profits from its use. The results obtained can be effectively used in the operation of industrial aquaculture systems, communal and local treatment facilities, as well as mobile biogas anaerobic reactors.

Key words: Anaerobic fermentation, aquaculture, electrolysis processes.

Введение

Анаэробные процессы часто используют для удаления загрязнений из промышленных отходов, например, в качестве первой ступени очистки сточных вод с высокой концентрацией органических загрязнений (биологическое потребление кислорода (БПК₅) более 4-5 гО₂/л, химическое потребление кислорода (ХПК) – от 3 гО₂/л), для переработки активного ила, других

осадков и твердых отходов. При этом в ходе метаногенерации (метаногенеза), процесса с образованием метана, органические загрязнения конвертируются в биогаз, содержащий в основном СН₄ и СО₂ [1].

В то же время при аэробной утилизации отходов образуется избыточный активный ил, в который переходит до 50 % всей энергии исходного органического вещества, тогда как в анаэробных процессах до 90-95 % всей энергии субстрата аккумулируется в

виде биогаза с энергетической ценностью $(2,2-2,7) \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$, что делает его энергоносителем, пригодным для использования при получении электроэнергии и тепла [2]. Примерный состав основных компонентов таких горючих газов в % масс: метан (CH_4) – 40-75 (обычно 50-60), диоксид углерода (CO_2) – 30-40, азот (N) – 0,8-1, сероводород (H_2S) – 1-2, кислород (O_2) – 1-2, другие токсичные соединения – в небольших количествах [3].

Биотехнология переработки органических отходов обладает рядом положительных эффектов [3]:

- возможность получения обеззараженных, лишённых жизнеспособных семян растений, высококачественных удобрений с полной минерализацией азота и фосфора;

- высокий коэффициент полезного действия (КПД) (до 90%) превращения энергии органических веществ в биогаз, теплотворная способность которого составляет 20-25 МДж/м³ (56-70% CH_4), что соответствует 0,7-0,8 кг условного топлива;

- возможность получения ценных биологически активных соединений, например, витамина B_{12} ;

- удаление из сточных вод опасных микроорганизмов и яиц гельминтов.

Актуальность использования таких биотехнологических комплексов в индустриальной аквакультуре вызвана тем, что отводимая производственная сточная вода (промышленные отходы) включает значительные концентрации органических загрязнителей, которые превышают требования нормативных документов касательно их предельно-допустимых концентраций (ПДК) не только перед отведением в природные водоемы, но даже перед подачей их на типовые биологические локальные очистные сооружения (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика сточных вод

Показатель загрязнений	Показатели загрязнений сточных вод	ПДК загрязняющих веществ в составе сточных вод (рыбоводство)
Водородный показатель, pH	6-8,5	-
БПК ₅ , мг O_2 /л	4,5	20
Взвешенные вещества, мг/л	50	33
Аммоний-ион, г N/л	0,75	1,0
Нитриты, мг/л	1,5	0,2
Нитраты, мг/л	150	3,0
Фосфаты, мг/л	1	0,6

Вместе с тем, при относительной налаженности процессов анаэробной утилизации отходов, необходимо исследовать и апробировать технологические способы, которые улучшат их технико-экономические показатели с получением вторичных ликвидных товаров – горючего газа и удобрения.

Основная часть

Исследованию проблемы анаэробной переработки отходов посвящены работы ряда ученых – Кузнецова И.Н. (исследование процесса анаэробной переработки послеспиртовой барды), Марцуль В.Н. (испытания режимов анаэробного сбраживания осадков

сточных вод Минской очистной станции), Сеница С.И. (анаэробная обработка отходов агропромышленного комплекса), Астрейко А.А. (способы интенсификации процесса метанового брожения), Нагорного Р.К. (получение биогаза из смесей биоотходов), Сунцова Ю.А. (энергетические аспекты анаэробной переработки органических отходов сельскохозяйственного производства).

В целом анаэробную конверсию биомассы осуществляют гидролитические, ацидогенные и ацетогенные бактерии, а также ацетокластические, гидрогено-трофные и метилотрофные метаногенные археи [3].

Одним из эффективных решений проблемы накопления азотистых соединений в ходе процесса биологической очистки может стать добавление в анаэробные системы доступных соединений, способных к удалению ионов аммония и аммиака. Так, одними из наиболее известных и широко распространенных веществ, способных к такому процессу, являются цеолиты. Ионы аммония и аммиак эффективно удаляются цеолитами из водных растворов, когда те обмениваются катионами или адсорбируются в порах алюмосиликатных систем [4].

Также в последние годы в нашей стране и за рубежом ведутся активные поиски способов интенсификации классических методов биологической очистки с помощью добавления биологически активных веществ (БАВ) [3]. Изучение действия биологически активных веществ, используемых в сверхнизких концентрациях, которые по своим свойствам близки к природным регуляторам роста, представляет интерес при решении задач в области защиты окружающей среды, прежде всего водных объектов.

К примеру, в работе [5] указаны данные, которые свидетельствуют о способности гуминового препарата и мелафена оказывать различное воздействие на рост микроорганизмов активного ила в зависимости от концентрации и стадии роста, что может быть использовано для интенсификации очистки сточных вод. Кроме того, показано, что снижение концентрации гуминового препарата приводит к подавлению роста микроорганизмов, что также может найти практическое применение. Также в работе Ковалева В.В., Унгурияну Д.В. и Ковалевой О.В. отмечено, что при использовании определенных БАВ, скорость выхода биогаза относительно контроля можно увеличить в 3,7 раза [6].

Вместе с тем перспективным направлением является интенсификация анаэробных процессов воздействием постоянного электрического тока. В водных растворах постоянное электрическое поле может оказывать как стимулирующее, так и угнетающее воздействие на живые организмы в зависимости от многих технологических параметров, например, плотности тока и продолжительности обработки. Данное направление в своей работе изучала Наумова О.В. [7], где вела работы по совершенствованию электроимпульсной технологии при получении биогаза из органических отходов. Также в исследовании Ковалева В.В. изучалось влияние элек-

тролитически выделенного водорода на сообщество микроорганизмов активного ила [6].

Так, в ряде зарубежных публикаций указано положительное воздействие низких сил токов на рост и размножение микроорганизмов. Говорится, что воздействие электрического тока силой 0,1 мА на воду, отобранную из водоема и содержащую сообщество микроорганизмов, оказало стимулирующее воздействие на их рост и размножение. В контрольной емкости в течение трех дней количество микробов находилось в пределах 3500, в то время как после воздействия электрического тока, на второй день оно составляло 43000, а на третий – 108000. Также проводились исследования над культурами *Pseudomonas radiciola* и *Vacillus megateriu*. В результате культивирования на жидких питательных средах под воздействием постоянного электрического тока силой 0,3 мА показатели роста микроорганизмов в первые 2-3 дня в обрабатываемых пробах отличались от контрольных практически в 100 раз [8].

Кроме воды и питательных сред, большой рост микроорганизмов под действием электрического тока отмечался на почве и молоке, а также показано положительное воздействие малых сил токов на рост дрожжей. В то же время в работе [9] различные микробные культуры обрабатывались в течение 30 минут постоянным электрическим током силой от 5 до 20 мА, в результате чего также во всех культурах наблюдался рост биомассы.

Эти данные позволяют судить о положительном воздействии электролиза на рост и развитие различных сообществ микроорганизмов, что обосновывает целесообразность применения электролиза в качестве стимулятора клеточного роста и деления в ходе анаэробного сбраживания.

Можно предположить, что эффект усиленного роста микроорганизмов под действием постоянного электрического тока проявляется за счет изменения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) раствора в сторону, благоприятную для протекания жизненных процессов в клетках, что согласовывается с исследованиями Резникова К.М., Колесниченко П.Д. и Коваленко И.В., которые в своей работе описывали влияние различных значений ОВП, как на конструктивный, так и на энергетический метаболизм в клетке [10].

Также в работе [11] отмечается, что электролизные процессы способствуют стабилизации структуры хлопьев активного ила в ходе анаэробных процессов, что также ведет к улучшению показателей очистки органосодержащих сточных вод и качества выделяемого биогаза, а именно – соотношения метана и других сопутствующих ему газов, выделяемых в ходе жизнедеятельности микроорганизмов. Кроме того, указано, что под действием электрического тока, в растворах разлагаются различные сложные органические вещества, имеющие токсический эффект в отношении полезных микроорганизмов активного ила, что способствует более полному и быстрому разложению субстрата.

Необходимо отметить, что другими авторами изучался также метаболизм бактерий. В результате данных

исследований было выявлено положительное влияние постоянного тока на метаболическую активность микроорганизмов, что подтверждается увеличением количества АТФ (аденозинтрифосфорной кислоты) в электротехнологически обработанных культурах по сравнению с контрольной культурой [12].

Дополнительно, в результате электролитического разложения воды, выделяется водород, поглощаемый анаэробными микроорганизмами. Это позволяет повышать качество выделяемого биогаза посредством увеличения содержания в нем метана, сверхсинтез которого достигается избытком водорода в субстрате [11].

Исследования способов интенсификации процессов анаэробной переработки отходов индустриальной аквакультуры

В рамках эксперимента были созданы четыре опытных реактора с целью дальнейшего проведения в них процесса анаэробного сбраживания органического субстрата, представленного пометом клариевого сома.

О степени разложения органического вещества в растворе судили по удалению органических загрязнителей из водного раствора и газовой выделению. В аккредитованной лаборатории КПУП «ПинскВодоканал» выполнялся анализ химического потребления кислорода (ХПК);

Опытные реакторы делились:

- на классический реактор с механическим перемешиванием [2] (контрольный);
- классический реактор с механическим перемешиванием, содержащий цеолит и гуминовое удобрение в отходы аквакультуры;
- классический анаэробный реактор с механическим перемешиванием, который заполнялся субстратом, прошедшим предварительную электролизную обработку (время единоразового электролизного воздействия – 15 минут);
- анаэробный реактор с периодической электролизной обработкой раствора (выполнялась ежедневно, продолжительностью две минуты) (рис. 1).

Контрольный реактор представлял собой емкость

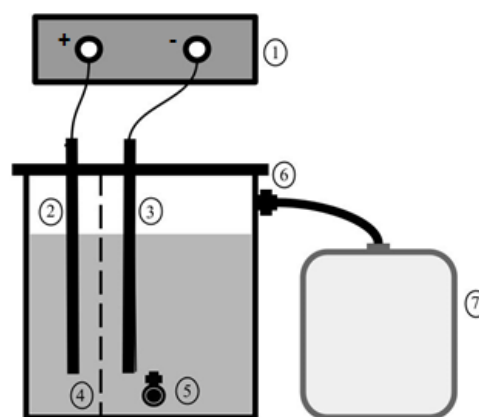


Рисунок 1. Биореактор-электролизер: 1 – источник питания; 2 – анод; 3 – катод; 4 – мембрана; 5 – кран для отбора проб; 6 – кран для выхода биогаза; 7 – газгольдер

объемом 20 литров, содержащую в своем составе два крана, один из которых находится в закрытом положении и предназначен для отбора проб с целью проведения анализов, а второй всегда находится в открытом положении и соединяет емкость с газгольдером.

Классический реактор с механическим перемешиванием, содержащий цеолит и гуминовое удобрение, конструктивно не отличался от контрольного, но в отличие от него в субстрат добавлялись цеолиты в концентрации 3 г/л, а также гуминовые удобрения в концентрации 0,1 мл/л. Цеолиты вносились в качестве средства иммобилизации микроорганизмов с целью повышения их эффективности.

Объем анаэробного реактора с субстратом, прошедшим единоразовую электролизную обработку раствора (15 минут), составил 8 литров.

Вместимость анаэробного реактора с ежедневной электролизной обработкой раствора (2 минуты) – 4,3 литра.

Субстратом для проведения эксперимента был помет клариевого сома, разбавленный водопроводной водой до достижения показателя влажности 93 % – реальный отход систем индустриальной аквакультуры без предварительной стабилизации его консистенции. Реакторы были заполнены раствором на 70 % каждый, его влажность составляла 93 %, соответственно, количество сухого остатка находилось в пределах 7 % от массы загрузки (табл. 2).

Результаты газовыделения продемонстрировали лучшую относительную эффективность использования электротехнологических способов интенсификации анаэробных процессов. Так, к концу эксперимента средний выход биогаза на единицу субстрата при ежедневной обработке превысил таковой в контрольном реакторе на 340 % (рис. 2):

Экологическую составляющую переработки отходов индустриальной аквакультуры оценивали на основе снижения химического потребления кислорода-

Таблица 2. Параметры разбавленного субстрата

Масса раствора после разведения, кг	Масса сухого остатка, кг	Сухой остаток, %	Влажность, %
36,80	2,56	6,96	93,04

да (ХПК) во всех реакторах, также был сделан анализ ХПК раствора перед экспериментом. По результатам исследования определили, что уровень химического потребления кислорода снизился во всех субстратах. Такой тренд свидетельствует о снижении количества общего органического вещества в растворе, но при этом значения в контрольном реакторе и реакторе с цеолитом и гуматами были ниже на 19 %, чем в реакторах с электротехнологическим воздействием.

Это позволяет предположить, что обработка электролизом помогает разрушать сложноокисляемые соединения, которые не учитываются при анализе ХПК, и переводить их в легкодоступную для разложения форму (табл. 3).

Технико-экономическая оценка результатов электротехнологической интенсификации анаэробной переработки отходов индустриальной аквакультуры

При расчете экономической эффективности интенсификации использовался такой технологический критерий, как выход биогаза на 1 литр субстрата (табл. 4).

Для каждого этапа исследования относительный выход биогаза рассчитывали по формуле:

$$V_{г.} = V_{газа} / V_{субст.} \quad (1)$$

где $V_{г.}$ – выход газа на единицу объема субстрата, л;
 $V_{газа}$ – объем выделившегося газа на данном этапе исследования, л;
 $V_{субстр.}$ – объем оставшегося субстрата на данном этапе исследования, л.

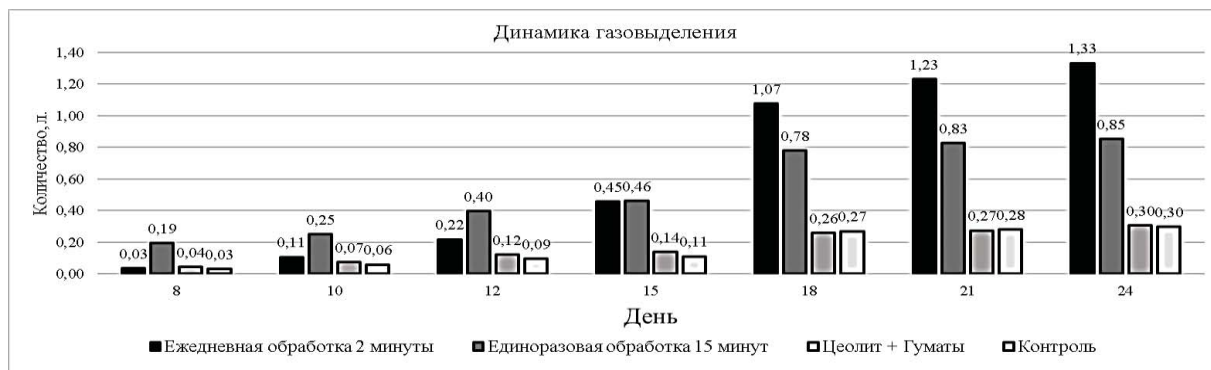


Рисунок 2. Динамика газовой выделения в ходе эксперимента анаэробной переработки отходов индустриальной аквакультуры

Таблица 3. Уровень химического потребления кислорода в растворах

Наименование пробы	ХПК, мг/л					
	Исходный раствор	Контроль	Гуматы + Цеолит	2 минуты электролиза	15 минут электролиза	Контроль после 5 минут электролиза
Значение	123	58	58	72	62	53

Таблица 4. Относительная динамика выхода биогаза на литр субстрата

День эксперимента	Ежедневная обработка 2 мин., л	Единоразовая обработка 15 мин., л	Цеолит + Гуматы, л	Контроль, л
8	0,03	0,19	0,04	0,03
10	0,11	0,25	0,07	0,06
12	0,22	0,40	0,12	0,09
15	0,45	0,46	0,14	0,11
18	1,07	0,78	0,26	0,27
21	1,23	0,83	0,27	0,28
24	1,33	0,85	0,30	0,30

Исходя из информации таблицы 4, можно сделать вывод о том, что именно ежедневная двухминутная обработка субстрата имеет наибольший эффект в долгосрочной перспективе. Так, к 24-му дню эксперимента выход биогаза на 1 литр субстрата в таком реакторе превысил аналогичный контрольный показатель в 4,43 раза. В то же время значения выхода биогаза в реакторе, содержащем субстрат, обработанный единожды, к 24-му дню превысил контрольный в 2,83 раза. В реакторе, содержащем цеолиты и гуматы, разницы с контрольным показателем к 24-му дню исследований не наблюдалось.

Энергопотребление при ежедневном двухминутном электролизе на 1 м³ субстрата:

$$P_0 = \left(\frac{I \times U \times t}{3} \right) \times 1000 = 8 \frac{\text{кВтч}}{\text{м}^3}, \quad (2)$$

где P_0 – энергопотребление, кВт·ч;

I – сила тока, А;

U – напряжение, В;

t – время работы источника питания, ч;

1000 – коэффициент перевода Вт·ч в кВт·ч, а также л в м³;

3 – количество использованного субстрата, л.

Расчетные затраты и прибыль при переработке субстрата представлены в таблице 5.

Таблица 5. Затраты и прибыль при конверсии субстрата в ходе эксперимента

Показатель	Значение
Материальные затраты на электроэнергию	0,34 руб.
Выручка от биогаза с 1 м ³ субстрата при ежедневной электролизной обработке	0,23 руб.
Выручка от биогаза с 1 м ³ субстрата при одноразовой электролизной обработке	0,15 руб.
Выручка от биогаза с одного м ³ субстрата без электролизной обработки	0,05 руб.

Установлено, что выручка от выхода газа при использовании электролиза превышает таковую без его использования в 4,5 раза. Несмотря на это, для такого вида субстрата (отходов аквакультуры с влажностью – 93%, количеством сухого остатка – в пределах 7% от массы загрузки) рассчитанной экономической эффективности не хватает для покрытия финансовых расходов на электроэнергию. Так, для 1 м³ газа при ежедневной обработке электролизом по 2 ми-

нуты убытки составят 0,11 рублей за весь период генерации.

Такая проблема объясняется несколькими факторами:

– высокой влажностью субстрата, составившей в ходе эксперимента 93%;

– выбранный субстрат в виде помета клариевого сома не является энергоемким, так как содержит большое количество белков и азотистых соединений, которые по энергоемкости уступают углеводам и жирам.

По аналогии, используя теоретически установленную эффективность анаэробного сбраживания с электротехнологической интенсификацией, по сравнению с классическими конструкциями реакторов, проведен расчет генерации более энергоемкого субстрата, такого как навоз крупного рогатого скота, где среднее количество выделяемого газа с 1 м³ такого субстрата составляет 25 м³ [13-15] (табл. 6).

Стоимость постройки такого метантенка при цене 500 у.е. за 1 м³ составит 169500 у.е. [16], энергозатраты на один цикл сбраживания составят 1896 кВт·ч, что эквивалентно 81,5 руб.

Теоретически, для такого реактора при таком же количестве выделяемого газа, время окупаемости составит 6 лет:

$$T_2 = (169500 / (4507 / 2,4) \times \times 24) / 365 = 6 \text{ лет.} \quad (3)$$

Полученные результаты (уменьшение срока окупаемости при электролизной интенсификации составляет порядка 20 лет) позволяют обосновать целесообразность более детального исследования использования электротехнологических (электрохимических, ультразвуковых [17], электромагнитных и других) способов интенсификации анаэробных процессов в промышленных биореакторах с целью повы-

Таблица 6. Теоритические показатели для энергоемкого субстрата

Показатель	Значение
Выручка с 1 м ³ навоза КРС	4,3 руб.
Объем метана для метантенка объемом 1500 м ³	1050 м ³
Выручка от реализации 1050 м ³ метана	4507 руб.
Время окупаемости реактора объемом 1500 м ³	26,2 года
Объем метантенка, способного производить 1050 м ³ газа с помощью электролизной обработки	338,6 м ³

шения их технико-экономических показателей и дальнейшей комплексной автоматизации процессов [18], в том числе с использованием подходов машинного обучения и казуального моделирования.

Заключение

Результаты исследований интенсификации анаэробной утилизации отходов индустриальной аквакультуры путем обработки субстрата постоянным электрическим током показали перспективность такого подхода. К 24-му дню эксперимента выход биогаза на 1 литр субстрата при периодической обработке (2 минуты в день) был больше контрольного в 4,43 раза. В то же время значения выхода биогаза в реакторе, содержащем субстрат, обработанный единообразно (15 минут перед загрузкой в реактор), к 24-му дню превысил контрольный образец в 2,83 раза.

Определено, что выручка от выхода газа при использовании электролиза в 4,5 раза выше контрольной, но, несмотря на это, для такого субстрата полученной выручки не хватает для покрытия финансовых расходов на электроэнергию. Для 1 м³ газа при ежедневной обработке электролизом по 2 минуты убытки составят 0,11 рубля.

Теоретические расчеты показали, что при стоимости постройки метантенка с электролизной системой 169500 у.е. (капитальные финансовые затраты – 500 у.е. на переработку 1 м³), его срок окупаемости составит 6 лет при условии утилизации отходов животноводческих комплексов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прикладная экобиотехнология: учеб. пособие / А.Е. Кузнецов [и др.]. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 629 с.
2. Хабибуллин, Р.Э. Исследование процесса анаэробного сбраживания куриного помета и инженерная методика технологического расчета биореактора / Р.Э. Хабибуллин, В.Н. Шарифуллин // Вестник Казанского технологического университета – 2010. – № 9. – С. 639-646.
3. Максимов, А.С. Современное состояние и перспективы развития биогазовых технологий / А.С. Максимов, С.А. Иларионов, М.И. Дёгтев // Вестник Пермского университета. – 2012. – № 1 (1). – С. 76-85.
4. Эффект внесения цеолитов на конверсию субстрата с высоким содержанием азота / С.И. Мизриев, [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – № 6. – С. 146-149.
5. Анализ влияния биологически активных веществ на рост анаэробных микроорганизмов активного ила / А.И. Хисамова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №10. – С. 201-203.
6. Ковалёв, В.В. Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии / В.В. Ковалёв, Д.В. Унгуриян, О.В. Кова-

лёва // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – №1 (18). – С. 102-114.

7. Наумова, О.В. Совершенствование электроимпульсной технологии при получении биогаза из органических отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / О.В. Наумова. – Саратов, 2005. – 126 с.

8. George, E. Stone. Influence of Electricity on Micro-Organisms / E. Stone George // Botanical Gazette. – 1909. – Vol. 48. – № 5. – P. 359-379.

9. Effect of Electrical Stimulation on Bacterial Growth / Park, Young-Han [et al.] // The Korean Society of Physical Therapy. – 1994. – Vol. 6. – P. 109-119.

10. Резников, К.М. Биологические и фармакологические эффекты ионизированных жидкостей с различным окислительно-восстановительным потенциалом / К.М. Резников, П.Д. Колесниченко, И.В. Коваленко // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – № 30. – С. 62-68.

11. The case study of active sludge under anaerobic conversion of poultry manure in combination with electrolysis at the hydrolysis stage / Yelizaveta Chernysh, Vladimir Shtepa [et al.] // Applied science, MDPI. – 2022.

12. Stimulation impact of electric currents on heterotrophic denitrifying microbial viability and denitrification performance in high concentration nitrate-contaminated wastewater / Shuang Tong [et al.] // Journal of Environmental Sciences. – Vol. – 77. – P. 363-371.

13. Бабаев, В.Н. Энергетический потенциал метанообразования при мезофильном анаэробном разложении органической составляющей отходов / В.Н. Бабаев, Н.П. Горох, И.В. Коринько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/6 (52). – С. 59-65.

14. Кокиева, Г.Е. Получение биогаза методом анаэробного сбраживания отходов животноводческих ферм / Г.Е. Кокиева, Ю.А. Шапошников, М.Ю. Дондоков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 9 (191). – С. 140-144.

15. Флюид. Биогазовые технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fluid-biogas.com/?page_id=185. – Дата доступа: 18.06.2022.

16. Гончаров, Ф.І. Обґрунтування, розроблення та техніко-економічні характеристики універсального багатоканального біогенератора / Ф.І. Гончаров, В.М. Штепа // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки»: науковий журнал. – 2010. – № 3, т. 1. – С. 172-175.

17. Анаэробное сбраживание птичьего помета с инокулятом активного ила в комбинации с электролизной обработкой / Е.Ю. Черныш, В.Н. Штепа, Л.Д. Пляцук [и др.] // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 2 (54). – С. 101-113.

18. The use of electrotechnical equipment for food production wastewater treatment / N. Zaiets [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2021. – Vol. 9. – P. 106-109.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.06.2022