



УДК 620.92, 628.3

ПОЛУЧЕНИЕ БИОГАЗА ПРИ ОЧИСТКЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД СПИРТЗАВОДА*

Н.Б. Голуб¹, М.В. Потанова¹, М.В. Шинкарчук¹, А.А. Козловец²

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»

д. 37, проспект Победы, Киев, 03056, Украина
тел./факс: (044) 406-81-84; e-mail: golubnb@ukr.net

²ЧП «КИЕВБУДПРОЕКТ»

д. 25/12, ул. Хорыва, Киев, 04071, Украина
тел.: (097) 714-05-75; e-mail: aakozlovec@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.051-059

Заключение совета рецензентов: 06.06.18 Заключение совета экспертов: 15.06.18 Принято к публикации: 21.06.18



Рассматривалась проблема утилизации отходов спиртовой промышленности, обусловленная широким использованием спирта как биотоплива. В технологии производства спирта из зерновых культур образуется послеспиртовая барда (ПСБ) (на 1 дм³ спирта 10–20 дм³ ПСБ), которая относится к высококонцентрированным сточным водам (значение ХПК достигает 40 г О₂/дм³). Поскольку существующие физико-химические методы переработки послеспиртовой барды не рентабельны, разрабатываются новые технологии ее утилизации, например анаэробное сбраживание. Кроме очистки высококонцентрированной сточной воды, преимущество данной технологии заключается в получении биогаза и высококачественного удобрения. Однако к проблемам биотехнологии получения биогаза из барды относятся ее высокая кислотность – рН 3,7–5,0 (оптимальное значение рН для процесса метаногенеза 6,8–7,4) и низкое содержание азота, недостаток которого ингибирует развитие ассоциации микроорганизмов. Для решения этих проблем используют дополнительное сырье различного происхождения (химические соединения, отработанный анаэробный ил, отходы животноводческих ферм и др.).

В данной работе определено рациональное соотношение компонентов сбраживаемой смеси: косубстрата, послеспиртовой барды и сточной воды предприятия – при коферментации для получения энергоносителя (биогаза) и эффективной очистки сточной воды спиртзавода. Для обеспечения оптимального для метаногенеза значения рН в качестве косубстрата использовали помет. Процесс коферментации ПСБ с пометом проводили при соотношениях по сухому веществу 1:1; 1:3; 1:5; 1:7 соответственно. Установлено, что при недостаточной концентрации помета в смеси (соотношение ПСБ/помет – 1:1; 1:3) в процессе ферментации значение рН снижается, что отрицательно влияет на образование метана. При повышении концентрации помета в среде (соотношение ПСБ/помет – 1:5; 1:7) процесс характеризуется высоким выходом биогаза и содержанием в нем метана. Максимальный выход биогаза наблюдался при соотношении компонентов по сухому веществу «сточная вода : барда : помет» – 0,2:1:7 соответственно с концентрацией метана 70±2 %. После очистки сточной воды показатель ХПК снизился на 70 % при коферментации с комбинацией компонентов «сточная вода : барда : помет» – 0,3:1:5 соответственно.

Ключевые слова: коферментация; косубстрат; послеспиртовая барда; помет; сточная вода; биогаз.

БИОГАЗ ПРОДУКЦИЯ В THE CONCENTRATED DISTILLERY WASTEWATER TREATMENT

N. Golub¹, M. Potapova¹, M. Shinkarchuk¹, O. Kozlovets²

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37 Pobeda Av., Kyiv, 03056, Ukraine
tel./fax: (044) 406 81 84; e-mail: golubnb@ukr.net

*Голуб Н.Б., Потанова М.В., Шинкарчук М.В., Козловец А.А. Получение биогаза при очистке концентрированных сточных вод спиртзавода // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;25-30:51-59.



²PE “KYIVBUDPROEKT”
25/12 Horyv Str., Kyiv, 04071, Ukraine
tel.: (097) 714 05 75; e-mail: aakozlovec@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.051-059

Referred 6 June 2018 Received in revised form 15 June 2018 Accepted 21 June 2018

The paper deals with the waste disposal problem of the alcohol industry caused by the widespread use of alcohol as biofuels. In the technology for the production of alcohol from cereal crops, a distillery spent wash (DSW) is formed (per 1 dm³ of alcohol – 10–20 dm³ DSW), which refers to highly concentrated wastewater, the COD value reaches 40 g O₂/dm³. Since the existing physical and chemical methods of its processing are not cost-effective, the researchers develop the processing technologies for its utilization, for example, an anaerobic digestion. Apart from the purification of highly concentrated wastewater, the advantage of this method is the production of biogas and high-quality fertilizer. The problems of biotechnology for biogas production from the distillery spent wash are its high acidity–pH 3.7–5.0 (the optimum pH value for the methanogenesis process is 6.8–7.4) and low nitrogen content, the lack of which inhibits the development of the association of microorganisms. In order to solve these problems, additional raw materials of various origins (chemical compounds, spent anaerobic sludge, waste from livestock farms, etc.) are used.

The purpose of this work is to determine the appropriate ratio of the fermentable mixture components: co-substrate, distillery spent wash and wastewater of the plant for co-fermentation to produce an energy carrier (biogas) and effective wastewater treatment of the distillery. In order to ensure the optimal pH for methanogenesis, poultry manure has been used as a co-substrate. The co-fermentation process of DSW with manure has been carried out at dry matter ratios of 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 respectively. It is found that when the concentration of manure in the mixture is insufficient (DSW/manure – 1:1, 1:3), the pH value decreases during fermentation which negatively affects methane formation; when the concentration of manure in the mixture is increased (DSW/manure – 1:5, 1:7), the process is characterized by a high yield of biogas and methane content. The maximum output of biogas with a methane concentration of 70 ± 2% is observed at the ratio of components on a dry matter “wastewater: DSW: manure” – 0,2:1:7 respectively. The COD reduction reaches a 70% when using co-fermentation with the combination of components “wastewater: DSW: manure” (0,3:1:5) respectively.

Key words: co-fermentation; co-substratum; distillery spent wash; poultry manure; wastewater; biogas.



Наталья Борисовна Голуб
Natalia Golub

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры экобиотехнологии и биоэнергетики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского».

Образование: Киевский государственный университет им. Т. Шевченко.

Область научных интересов: очистка промышленных сточных вод; переработка отходов; получение биогаза, биоводорода; микрководородли.

Публикации: 78.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1448-1872>

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Ecological Biotechnology and Bioenergetics Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Education: Taras Shevchenko National University of Kyiv.

Research interests: industrial wastewater treatment; waste conversion; biomethanation, biohydrogen production; microalgae.

Publications: 78.



Марьяна Владимировна
Потанова
Mariana Potapova

Сведения об авторе: аспирант кафедры экобиотехнологии и биоэнергетики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского».

Образование: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского».

Область научных интересов: очистка промышленных сточных вод; переработка отходов; получение биогаза.

Публикации: 15.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9689-3912>

Information about the author: Postgraduate Student of Ecological biotechnology and bioenergetics Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Education: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Research interests: industrial wastewater treatment; waste conversion; biomethanation.

Publications: 15.





Мальвина Владимировна
Шинкарчук
Malvina Shinkarchuk

Сведения об авторе: аспирант кафедры экобиотехнологии и биоэнергетики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского».

Образование: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского».

Область научных интересов: очистка промышленных сточных вод; переработка отходов; получение биогаза.

Публикации: 16.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4583-8416>

Information about the author: Postgraduate Student of Ecological biotechnology and bioenergetics Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Education: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Research interests: industrial wastewater treatment; waste conversion; biomethanation.

Publications: 16.



Александр Анатольевич
Козловец
Olexandr Kozlovets

Сведения об авторе: канд. техн. наук, главный технолог ЧП «КИЕВБУДПРОЕКТ».

Образование: Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского».

Область научных интересов: очистка промышленных сточных вод; переработка отходов; получение биогаза.

Публикации: 25.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9032-7044>

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Chief Technologist of Private Establishment “KYIVBUDPROEKT”.

Education: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Research interests: industrial wastewater treatment; waste conversion; biomethanation.

Publications: 25.



1. Введение

В процессе производства спирта в большом объеме образуются высококонцентрированные сточные воды – послеспиртовая барда (ПСБ), в которой на 1 дм³ спирта приходится 10 ÷ 20 дм³ ПСБ [1, 2]. В настоящее время остро стоит вопрос ее утилизации, поскольку размещение ПСБ на полях фильтрации в полном объеме ввиду высокого содержания органических веществ и запаха приводит к загрязнению окружающей среды. В связи с этим удаление загрязняющих веществ из сточных вод спиртзаводов становится все более актуальным [3–5]. Исходя из энергетической политики Украины, в которой поставлена задача замены традиционных источников энергии альтернативными, переработка барды с получением биогаза принесёт не только экологическую, но и экономическую пользу [6–8].

В этих целях предлагается применять анаэробное сбраживание, которое, однако, сопряжено с некоторыми трудностями: высокая кислотность барды и низкое содержание азота. Введение дополнительного сырья в сточные воды спиртзавода (барды)

интенсифицирует процесс переработки барды, но требует неорганических веществ для поддержания pH среды и рационального соотношения концентраций углерода, азота и фосфора. Следовательно, необходимо определить условия проведения анаэробного процесса, при которых достигается высокая степень очистки сточных вод спиртзавода с одновременным получением энергоносителя.

В данной работе было установлено рациональное соотношение компонентов сбраживаемой смеси: ко-субстрата, послеспиртовой барды и сточной воды предприятия при коферментации. В задачи исследования входило определение рационального соотношения по сухому веществу ко-субстрата и сточных вод, при котором достигался максимальный выход биогаза, и анализ условий очистки сточной воды при анаэробном процессе.

В представленной работе впервые в качестве ко-субстрата использовался помет птиц, который позволил обеспечить рациональное значение pH и соотношение элементов питания микроорганизмов для получения биогаза в процессе очистки высококонцентрированной сточной воды.

Список обозначений

Аббревиатуры

БПК	Биохимическое потребление кислорода
ПСБ	Послеспиртовая барда
СВ	Сточная вода
ТЭН	Трубчатый электронагреватель
ХПК	Химическое потребление кислорода



2. Теоретическая часть

Сегодня технологии переработки ПСБ базируются на принципиально различных методах:

- биотехнологические (аэробная микробиологическая переработка жидкой фазы с получением кормовых дрожжей, анаэробная технология с получением биогаза в метантенках и органических удобрений);

- физические (осаждение под действием сил притяжения и центробежной силы, сепарация и фильтрация вещества, получение сухой барды при испарении);

- комбинированные технологии (разделение жидкой и твердой фазы на центрифугах, выращивание кормовых дрожжей на субстрате, сушка ПСБ) [9–11].

Поскольку в рамках данной работы рассматривается анаэробное сбраживание, следует более подробно проанализировать проблемы, связанные с этим процессом применительно к очистке сточных вод спиртзавода. Во-первых, высокая кислотность барды (рН 3,7 ÷ 5,0) не соответствует оптимальному значению рН для процесса метаногенеза (6,8 ÷ 7,4). Во-вторых, низкое содержание азота в барде не отвечает соотношению С:N = 30:1, которое является оптимальным для метаногенеза (микроорганизмы потребляют в 20 ÷ 35 больше углерода, чем азота, в зависимости от показателя рН среды), и тормозит развитие ассоциации микроорганизмов [8, 12].

Для повышения значения рН среды до оптимального используют дополнительное сырье различного происхождения. Так, в работе [13] к сырой барде добавляли часть сброженной барды и суперфосфат для обеспечения микроорганизмов фосфором, количество которого в барде недостаточно для развития микроорганизмов. При таких условиях получили следующие показатели очистки стоков: снижение химического потребления кислорода (ХПК) на 52,13 ÷ 53,95 %, биохимического потребления кислорода (БПК) на 69,36 ÷ 71,37 %, летучих жирных кислот на 3,5 ÷ 5,0 %. Полученный биогаз состоял из 47,0 ÷ 48,1 % CO₂, 1,9 ÷ 2,0 H₂S и 50,0 ÷ 51,0 % CH₄.

Для повышения выхода биогаза при очистке сточной воды к барде добавляли отработанный анаэробный ил биологической станции очистки стоков спиртзавода или очистных сооружений города [14–16]. Нейтральное значение рН поддерживали путем добавления NaHCO₃, рациональное соотношение было следующим: «барда : анаэробный ил» – 15:85. Выход биогаза составил 10,84 м³/м³ барды с содержанием метана до 60 %. При таком технологическом решении стабилизации рН остается проблема использования химических реагентов.

Одним из перспективных косубстратов для анаэробного сбраживания барды являются отходы животноводческих ферм [17–19]. Так, в работе [18] в качестве посевного материала использовали коровий навоз. Процесс проводили в мезофильном режиме при температуре 35 °С, рН поддерживали при периодическом добавлении CaCO₃, соотношение С:N:P поддерживали на уровне 100:2,5:0,5 путем добавления аммоний гидрофосфата и мочевины. Максимальное удаление БПК при таких условиях составило 93 %. В работе [17] также проводили совместное сбраживание барды и коровьего навоза при соотношении 1:7 соответственно. При этом максимальное удаление ХПК составило 79,72 %.

3. Методика эксперимента

В настоящем исследовании использовали высококонцентрированную сточную воду – послеспиртовую барду и производственную сточную воду Краснослободского спиртового завода (Киевская область). На данном предприятии сырьем для производства спирта служит пшеница и кукуруза. Косубстратом служил индюшиный помет, который был предоставлен ООО «Авангард» Жашковского района Черкасской области. Характеристика субстратов приведена в табл. 1. Кроме того, использовался инокулят, полученный на лабораторной установке при анаэробном сбраживании птичьего помёта с различными видами растительного сырья.

Характеристика субстратов

Таблица 1

Characteristics of substrates

Table 1

Показатели	ПСБ	Помет	Производственная сточная вода (СВ)
ХПК, гО ₂ /дм ³	40	302	0,9
БПК, гО ₂ / дм ³	20,7	80	0,5
Азот общий, г/дм ³	2,5	20,8	0,04
Влажность, %	95,7	65,62	99,53
Сухое вещество, %	4,3	34,38	0,47
Сухое органическое вещество, %	4,1	30,97	0,33
Зольность, %	0,2	3,44	0,14
рН	4,03	8,7	6,81

Определение БПК и ХПК проводили по стандартной методике [20], а влажности, сухого вещества, сухого органического вещества и зольности – по методике [21]; pH измеряли с помощью ионметра И-160 (производство РФ).

Сбраживание проводили в анаэробных условиях на установке (рис. 1) объемом 1,5 дм³ и степенью заполнения 70 %.

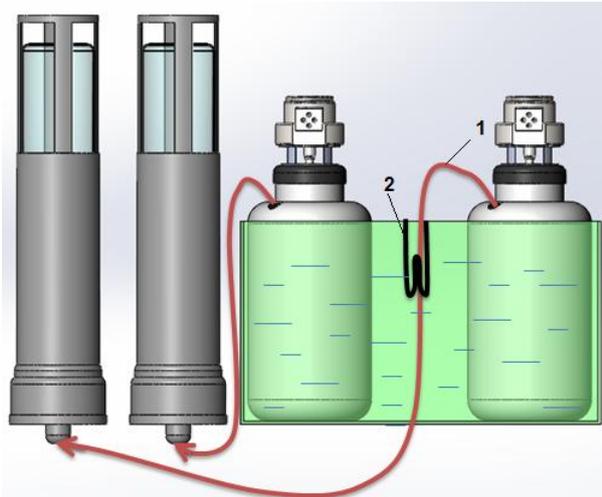


Рис. 1 – Лабораторная установка для анаэробной очистки сточных вод спиртзавода: 1 – путь биогаза из реактора в газгольдер; 2 – нагревательный элемент

Fig. 1 – Laboratory unit for anaerobic treatment of distillery spent wash: 1 – biogas path from the reactor to the gasholder; 2 – heating spiral

Реакторы размещали в емкости с теплоносителем (вода), температура поддерживалась за счет нагревания теплоносителя трубчатым электронагревателем (ТЭН), соединенным с терморегулятором. Перемешивание субстрата осуществляли с помощью миксе-

ра-насадки с мотор-редуктором частотой 60 об/мин. Каждый реактор был соединен с газгольдером мокрого типа для сбора биогаза. Процесс проходил при температуре 42 ± 1 °С. Время гидравлического удержания в реакторе составило 7 суток.

Соотношение компонентов субстрата рассчитывали по сухому веществу. Концентрация сухого органического вещества в реакторе в начале анаэробного процесса составляла 10 %. Субстрат разводили производственной сточной водой спиртзавода.

Состав биогаза определяли по стандартной методике с помощью газового хроматографа ЛХМ-8-МД («Хроматограф», РФ) [22].

4. Результаты и их обсуждение

Преимуществами помета птиц в качестве косубстрата являются:

- значительные объёмы в Украине и проблема его переработки [23, 24];
- источник азота, содержащий ионы аммония, нитраты, мочевины и белок (1,86 % общего азота на сырое вещество [25]), что необходимо для достижения соотношения C:N = 30:1;
- за счет преобладания щелочных компонентов среды в помете, можно нейтрализовать кислоты, содержащиеся в барде, и достичь рационального значения pH для процесса метаногенеза и деструкции компонентов барды;
- наличие большого количества метанобактерий, что повышает удельную концентрацию микроорганизмов и, соответственно, увеличивает скорость преобразования субстрата.

В табл. 2 приведено изменение значения pH среды в зависимости от соотношения компонентов.

Зависимость pH среды от соотношения косубстратов
Relation of pH to the substrates ratio

Таблица 2

Table 2

№ образца	Соотношение компонентов смеси по сухому веществу	pH среды
1	сточная вода: барда: помет (0,2:1:7)	6,9
2	сточная вода: барда: помет (0,3:1:5)	6,2
3	сточная вода: барда: помет (0,4:1:3)	5,8
4	сточная вода: барда: помет (0,5:1:1)	5,1

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что снижение содержания помета приводит к уменьшению значения pH среды, повышает скорость гидролиза высокомолекулярных веществ, но отрицательно влияет на образование

метана, так как для ацидогенных и гидролитических бактерий характерен оптимум pH в пределах $4,5 \div 6,3$, для метаногенных – $6,8 \div 7,4$ [26, 27]. Это подтверждается данными, которые приведены на рис. 2.

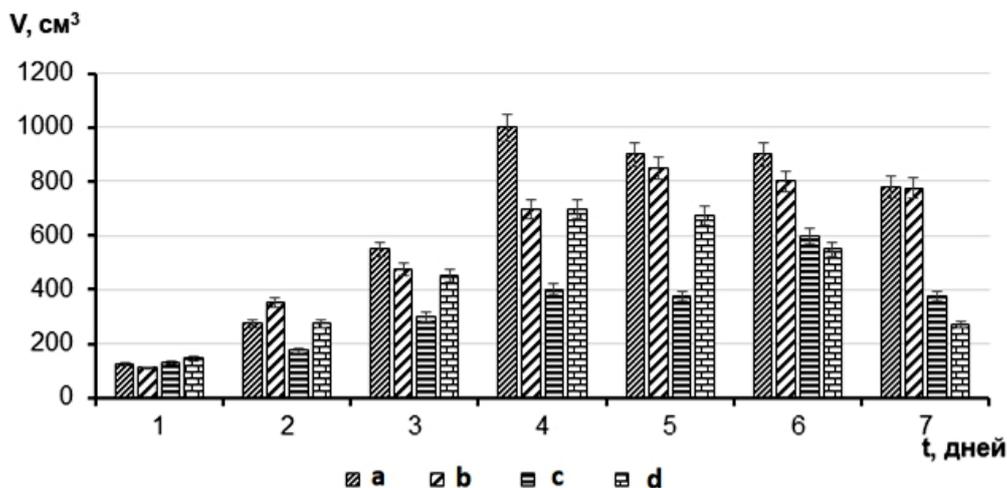


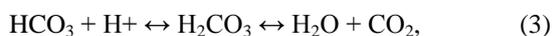
Рис. 2 – Выход биогаза (V) в процессе коферментации сточной воды спиртзавода и помета при различном соотношении компонентов «сточная вода : барда : помет»: a – (0,2:1:7); b – (0,3:1:5); c – (0,4:1:3); d – (0,5:1:1)

Fig. 2 – The biogas output (V) in the process of co-fermentation of distillery wastewater and poultry manure with a different ratio of substrate components is “wastewater : distillery spent wash : manure”: a – (0.2:1:7); b – (0.3:1:5); c – (0.4:1:3); d – (0.5:1:1)

В кислой среде происходит образование водорода по реакциям:



Благодаря бикарбонатной буферной системе, которая начинает работать при образовании CO₂ в процессе утилизации сырья:



– и изменении метаболизма микроорганизмов в сторону образования нейтральных продуктов, рН системы повышается, что способствует жизнедеятельности метаногенных бактерий и протеканию реакций образования метана [28, 29].

При этом изменение рН среды влияет как на состав биогаза, так и на степень очистки сточной воды [29]. В табл. 3 показано изменение концентрации метана в биогазе и снижение ХПК в зависимости от соотношения компонентов субстратов.

Таблица 3

Состав биогаза и степень очистки сточной воды в зависимости от соотношения компонентов субстрата

Table 3

The biogas composition and the degree of wastewater treatment depending on the ratio of substrate components

Компонентный состав смеси (сточная вода: барда: помет)	Выход биогаза*, дм ³ /дм ³	Содержание CH ₄ , %	Содержание CO ₂ , %	Содержание H ₂ , %	Снижение ХПК*, %
1 (0,2:1:7)	4,53±0,21	72±2	22±1	0,9±0,1	66±2
2 (0,3:1:5)	4,06±0,2	65±2	23±1	3,2±0,2	70±2
3 (0,4:1:3)	2,36±0,1	54±2	34±2	9,4±0,3	63±2
4 (0,5:1:1)	3,07±0,15	0	61±2	34,5±1,2	58±2

*за 7 суток

Повышение концентрации помета в среде приводит к увеличению выхода биогаза и содержания метана в биогазе (см. табл. 3). Это можно объяснить как более высоким значением рН среды, которое способствует развитию метаногенных микроорганизмов, так и рациональным соотношением С:N:P, что достигается благодаря компонентному составу помета. В то же время степень очистки сточной воды выше при использовании комбинации «сточная вода :

барда : помет» (0,3:1:5) соответственно. Это может быть обусловлено повышением скорости гидролиза высокомолекулярных соединений при более низких значениях рН среды и, следовательно, интенсивным развитием гидролитических бактерий в ассоциации и изменением метаболических путей микроорганизмов.

В кислой среде прекращается жизнедеятельность метаногенных микроорганизмов, и метан не производится, но при таких условиях образуется водород

(соотношение компонентов субстрата 0,5:1:1). Поскольку в кислой среде снижается разнообразие микроорганизмов в ассоциации, уменьшается степень очистки сточной воды.

Таким образом, для очистки высококонцентрированной сточной воды спиртзаводов, которая характеризуется низким значением рН, с одновременным получением энергоносителей, необходимо проводить ферментацию в присутствии ко субстратов, которые повышают значение рН и вносят в среду необходимые компоненты питания. Таким сырьем может выступать помет птиц, содержание которого в среде необходимо корректировать в зависимости от цели проведения процесса – очистка сточной воды или получение энергоносителя.

5. Заключение

Для биологической очистки высококонцентрированной сточной воды спиртзаводов, характеризующейся низким значением рН, процесс ферментации следует проводить с помощью ко субстрата, который позволяет повысить значение рН и обеспечить ассоциацию микроорганизмов необходимыми элементами питания. Таким сырьем является помет птиц. Данное технологическое решение позволяет использовать сброженный осадок в качестве удобрения с высоким содержанием питательных веществ без негативного влияния на окружающую среду.

В процессе очистки сточной воды максимальный выход биогаза с содержанием метана составил 70 %, что характерно для соотношения компонентов по сухому веществу «сточная вода : барда : помет» – 0,2:1:7 соответственно. Получение биогаза в процессе анаэробной очистки сточной воды повышает энергоэффективность процесса.

При использовании помета как ко субстрата степень очистки сточной воды в анаэробном процессе составила 70 % ХПК при соотношении компонентов «сточная вода : барда : помет» – 0,3:1:5 соответственно.

Список литературы

[1] Kaparaju, P. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor / P. Kaparaju, M. Serrano, I. Angelidaki // *Applied Energy*. – 2010. – No. 87. – P. 3779–3783.

[2] Moraes, S.B. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives [E-resource] / S.B. Moraes, M. Zaiat, A. Bonomi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – No. 44. – P. 888–903. Available on: DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.023

[3] Gupta, S.K. Biodegradation of distillery spent wash in anaerobic hybrid reactor / S.K. Gupta, G. Singh // *Water research*. – 2007. – No. 41. – P. 721–730.

[4] Pant, D. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review / D. Pant, A. Adholeya // *Bioresource Technology*. – 2007. – No. 98. – P. 2321–2334.

[5] Kumar, V. Bioremediation and decolorization of anaerobically digested distillery spent wash / V. Kumar [et al.] // *Biotech. Lett.* – 1997. – No. 19. – P. 311–313.

[6] Маляренко, В.А. Перспективы использования биоэнергетических технологий в Украине / В.А. Маляренко, И.И. Капцов, И.Г. Жиганов // *Интегрированные технологии и энергосбережение*. – 2005. – № 2. – С. 22–28.

[7] Железна, Т.А. Біоенергетика в Україні / Т.А. Железна, Г.Г. Гелетуха // *Зелена енергетика*. – 2004. – № 4. – С. 11–13.

[8] Mao, Ch. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion / Ch. Mao [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – No. 45. – P. 540–555.

[9] Дыганова, Р.Я. Разработка методики выбора технологий переработки отходов спиртовой промышленности как инструмента экологического менеджмента / Р.Я. Дыганова, Ю.С. Беляева // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2014. – Т. 16. – № 4 (2). – С. 1728–1736.

[10] Кузнецов, И.Н. Анализ мирового опыта в технологии переработки послеспиртовой барды / И.Н. Кузнецов, Н.С. Ручай // *Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология*. – 2010. – Т. 1. – № 4. – С. 294–301.

[11] Krzywonos, M. Utilization and biodegradation of starch stillage (distillery wastewater) [Электронный ресурс] / M. Krzywonos, E. Cibis, T. Miśkiewicz, A. Ryznar-Luty // *Electronic Journal of Biotechnology*. – 2009. – No. 12. – P. 1–9. – Режим доступа: <http://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/view/v12n1-5/685>.

[12] Гладченко, М.А. Обзор современного состояния анаэробной очистки сточных вод бродительных производств / М.А. Гладченко [и др.] // *Производство спирта и ликероводочных изделий*. – 2002. – № 1. – С. 22–23.

[13] Pathe, P.P. Performance evaluation of a full scale effluent treatment plant for distillery spent wash / P.P. Pathe [et al.] // *Intern. J. Environ. Studies*. – 2002. – Vol. 59. – No. 4. – P. 415–437.

[14] Дыганова, Р.Я. Экспериментальное определение оптимального состава комплексного субстрата для анаэробного сбраживания в спиртовой промышленности / Р.Я. Дыганова, Ю.С. Беляева // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2014. – Т. 16. – № 1(6). – С. 1737–1740.

[15] Hutnan, M. Anaerobic Treatment of Wheat Stillage / M. Hutnan [et al.] // *Chem. Biochem. Eng. Q.* – 2003. – Vol. 17. – No. 3. – P. 233–241.

[16] Wilkie, A.C. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional



and cellulosic feedstocks / A.C. Wilkie [et al.] // *Biomass and Bioenergy*. – 2000. – No. 19. – P. 63–102.

[17] Mise, Sh.R. Treatment of distillery spent wash by anaerobic digestion process / Sh.R. Mise, R. Saranadgoudar, R. Lamkhade // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. – 2013. – No. 11. – P. 310–313.

[18] Prakash, N.B. Anaerobic Digestion of Distillery Spent Wash / N.B. Prakash, V. Sockan, V.S. Raju // *Journal of Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4. – No. 3. – P. 134–140.

[19] Venkatasamy, G. Treatment of Distillery Spentwash in Upflow Anaerobic Contact Filter / G. Venkatasamy, S. Aruna // *Indian journal of applied research*. – 2013. – Vol. 3. – No. 7. – P. 199–200.

[20] Лурье, Ю.Ю. Аналитическая химия производственных сточных вод / Ю.Ю. Лурье – М.: Химия, 1984. – 448 с.

[21] Агеев, Л.М. Химико-технический контроль и учет гидролизного и сульфитно-спиртового производства / Л. М. Агеев, С. А. Корольков. – М., Л.: Гослесбумиздат, 1953. – 404 с.

[22] Хроматограф лабораторный ЛХМ–8МД: техническое описание, инструкция по эксплуатации. Опытный завод «Хроматограф». Москва. 1992. – 50 с.

[23] Степанов, Д. В. Оцінка можливостей отримання енергоносіїв з органічних відходів з урахуванням техногенного навантаження на навколишнє середовище / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, А. П. Ранський // *Наукові праці ВНТУ*. – 2012. – № 1. – С. 1–7.

[24] Куріс, Ю. В. Способи утилізації біогазу / Ю. В. Куріс, С. І. Ткаченко, Н. В. Семененко // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2010. – № 7(77). – С. 20–30.

[25] Салюк, А.І. Виробництво біогазу з курячого посліду та його оптимізація / А.І. Салюк, С.О.Жадан, Є.Б. Шаповалов // *Харчова промисловість*. – 2012. – № 13. – С. 33.

[26] Эдер, Б. Биогазовые установки. Практическое пособие / Б. Эдер, Х. Шульц. – Пер. с нем.: Zorg Biogas. – 2008. – С. 268.

[27] Гюнтер, Л.И. Метантенки. / Л.И. Гюнтер – М.: Строй-издат, 1991. – 128 с.

[28] Хенце, М. Очистка сточных вод. / М. Хенце – М.: Мир, 2009. – 480 с.

[29] Rongzhong, Ye. pH controls over anaerobic carbon mineralization, the efficiency of methane production, and methanogenic pathways in peatlands across an ombrotrophic-minerotrophic gradient / Ye. Rongzhong [et al.] // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2012. – No. 54. – P. 36–47.

[30] Zhang, Qu. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates / Qu. Zhang, J. Hu, Duu-J. Lee // *Renewable Energy*. – 2016. – No. 98. – P. 1–12

References

[1] Kaparaju P., Serrano M., Angelidaki I. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor. *Applied Energy*, 2010;87:3779–3783 (in Eng.).

[2] Moraes S. B., Zaiat M., Bonomi A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [E-resource]. 2015 [cited 2017 Dec 19]; 44:888–903. Available on: DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.023 (in Eng.).

[3] Gupta S.K., Singh G. Biodegradation of distillery spent wash in anaerobic hybrid reactor. *Water research*, 2007;41:721–730 (in Eng.).

[4] Pant D., Adholeya A. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 2007;98:2321–2334 (in Eng.).

[5] Kumar V., Wati L., Fitz Gibbon F., Nigan P. Bioremediation and decolorization of anaerobically digested distillery spentwash. *Biotech. Lett.*, 1997;19:311– 313 (in Eng.).

[6] Malyarenko V.A., Kaptsov I.I., Zhiganov I.G. Prospects for using bioenergy technologies in Ukraine. *Integrated Technologies and Energy Conservation*, 2005;2:22–28 (in Russ.).

[7] Zheleznyaya T.A., Geletukha G.G. Bioenergy in Ukraine. *Zelena energetika*. 2004;4:11–13 (in Ukr.).

[8] Mao C., Feng Y., Wang X., Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;45:540–555 (in Eng.).

[9] Dyganova R.Ya., Belyaeva Yu.S. Development of a methodology for selecting technologies for recycling alcohol industry waste as an instrument of environmental management. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014;16(4):1728–1736 (in Russ.).

[10] Kuznetsov I.N., Ruchaj N.S. Analysis of world experience in the technology of processing distillery spent wash. *Proceedings of the BSTU. Series 4: Chemistry and technology of organic substances and biotechnology*, 2010;1(4):294–301 (in Russ.).

[11] Krzywonos M., Cibis E., Miśkiewicz T., Ryznar-Luty A. Utilization and biodegradation of starch stillage (distillery wastewater). *Electronic Journal of Biotechnology* [E-resource]. 2009 Jan 15 [cited 2018 Jan 15];12(1):1–9. Available on:



<http://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/view/v12n1-5/685> (in Eng.).

[12] Gladchenko M.A., Sklyar V.I., Kalyuzhnyi S.V. Review of the current state of anaerobic wastewater treatment of fermentation plants. *Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdelii*, 2002;1:22–23 (in Russ.).

[13] Pathe P.P., Rao N. N., Kharwade M. R., Lakhe S. B., Kaul S. N. Performance evaluation of a full scale effluent treatment plant for distillery spent wash. *Intern. J. Environ. Studies*, 2002;59(4):415–437 (in Eng.).

[14] Dyganova R.Ya., Belyaeva R. Ya. Experimental determination of the optimal composition of a complex substrate for anaerobic digestion in the alcohol industry. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014;16(6):1737–1740 (in Russ.).

[15] Hutnan M. Hornak M., Bodik I., Hlavacka V. Anaerobic. *Treatment of Wheat. Chem. Biochem. Eng. Q.*, 2003;17(3):233–241 (in Eng.).

[16] Wilkie Ann C., Riedesel Kelly J., Owens John M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 2000;19:63–102 (in Eng.).

[17] Mise Sh. R., Saranadgoudar R., Lamkhade R. Treatment of distillery spent wash by anaerobic digestion process. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2013;11:310–313 (in Eng.).

[18] Prakash N. B., Sockan V., Raju V. S. Anaerobic Digestion of Distillery Spent Wash. *Journal of Science and Technology*, 2014;4(3):134–140 (in Eng.).

[19] Venkatasamy G., Aruna S. Treatment of Distillery Spentwash in Upflow Anaerobic Contact Filter. *Indian journal of applied research*, 2013;3(7):199–200 (in Eng.).

[20] Lur'e Yu.Yu. Analytical chemistry of industrial wastewater. Moscow: Himiya Publ., 1984; 448 p. (in Russ.).

[21] Ageev L.M., Korol'kov S.A. Chemical and technical control and accounting of hydrolysis and sulphite-alcohol production. Moscow, Leningrad: Goslesbumizdat Publ., 1953; 404 p. (in Russ.).

[22] Laboratory chromatograph LChM–8MD: technical description, user manual. Experimental plant “Chromatograph”. Moscow, 1992; 50 p. (in Russ.).

[23] Stepanov D.V., Tkachenko S.I., Rans'kii A.P. Assessment of the possibilities of obtaining energy carriers from organic wastes taking into account the technogenic load on the environment. *Scholarly works of VNTU*, 2012;1:1–7 (in Ukr.).

[24] Kuris Yu. V., Tkachenko S. I., Semenenko N. V. Ways of biogas utilizing. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit*, 2010;7(77):20–30 (in Russ.).

[25] Salyuk A.I., Zhadan S.A., Shapovalov E.B. Production of biogas from chicken manure and its optimization. *Food Industry*, 2012;13:33–45 (in Ukr.).

[26] Eder B., Shul'ts Kh. Biogas Plants Practice. Transl. from German. Zorg Biogas, 2008; 268 p. (in Russ.).

[27] Gyunter L.I., Gol'dfarb L.L. Methane tanks. M. Stroi-izdat, 1991; 128 p (in Russ.).

[28] Khentse M., Armoes P., Lya-Kur-Yansen I., Arvan E. Wastewater treatment. Moscow: Mir Publ., 2009; 480 p. (in Russ.).

[29] Rongzhong Ye., Jin Qu., Bohannan B., Keller J. K., McAllister S. A., Bridgham S. D. pH controls over anaerobic carbon mineralization, the efficiency of methane production, and methanogenic pathways in peatlands across an ombrotrophic-minerotrophic gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012;54:36–47 (in Eng.).

[30] Zhang Qu., Hu J., Lee Duu-J. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*, 2016;98:1–12 (in Eng.).

Транслитерация по BSI

