

**ПРОИЗВОДСТВО БИОВОДОРОДА В ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ
АНАЭРОБНОЙ БИОКОНВЕРСИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
ЖИДКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ
ЭФФЛЮЕНТА МЕТАНТЕНКА*****А.А. Ковалев¹, Д.А. Ковалев¹, Ю.В. Литти², И.В. Катраева³**¹ФГБНУ ФНАЦ ВИМд. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, 109428, Россия
тел.: +7(926)347-79-55; e-mail: kovalev_ana@mail.ru²ФГУ ФИЦ Биотехнологии РАНстр. 2, д. 33, Ленинский просп., г. Москва, 119071, Россия
тел.: +7(926)369-92-43³ФГБОУ ВО ННГАСУд. 65, ул. Ильинская, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
тел.: +7(902)308-09-10

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.87-100

Заключение совета рецензентов: 09.04.20 Заключение совета экспертов: 30.04.20 Принято к публикации: 12.05.20

В настоящее время водородная энергетика приобретает все большую популярность в мире в связи с истощением невозобновляемых источников энергии (углеводородов) и экологического загрязнения, вызванного растущим потреблением этих источников. По сравнению с электро- или термохимическими процессами, биологическое получение водорода имеет ряд преимуществ – экологичность и низкую стоимость. Особенно перспективен темновой процесс получения водородсодержащего биогаза при переработке органических отходов в анаэробных условиях, поскольку позволяет решить две задачи: производство энергии и утилизация органических отходов. В работе рассмотрено получение биоводорода в двухстадийном процессе анаэробной биоконверсии органического вещества жидких органических отходов в непрерывном режиме в реакторах с увеличенным объемом. Описана экспериментальная установка для исследования данного процесса и постановка эксперимента по изучению влияния рециркуляции эффлюента метантенка в анаэробный биореактор для производства биоводорода. Установлено, что полученные экспериментальные данные по удельному выходу биоводорода согласуются с данными других авторов. Средний удельный выход биоводорода (на килограмм исходного органического вещества) при рециркуляции эффлюента метантенка повысился на 4 % (с 0,1046 м³/(сут·кг ОВ_{исх}) до 0,1087 м³/(сут·кг ОВ_{исх})). Кроме того, рециркуляция эффлюента метантенка в реактор получения биоводорода в процессе двухстадийной анаэробной биоконверсии позволяет уменьшить колебания выхода биоводорода из реактора. При этом метаногенная актив-

*Ковалев А.А., Ковалев Д.А., Литти Ю.В., Катраева И.В. Производство биоводорода в двухстадийном процессе анаэробной биоконверсии органического вещества жидких органических отходов с рециркуляцией эффлюента метантенка // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;07-18:87-100.



ность в анаэробном биореакторе для производства биоводорода отсутствовала. Самоустанавливающийся уровень pH в анаэробном биореакторе для получения биоводорода был менее 4,5 (3,94 без рециркуляции эффлюента и 3,88 с рециркуляцией), однако ингибирования процесса образования водорода не происходило. Установлено, что применение рециркуляции эффлюента метантенка в анаэробный биореактор получения биоводорода может способствовать повышению эффективности процесса двухстадийной анаэробной биоконверсии органических отходов при сохранении стабильности процесса.

Ключевые слова: двухстадийный анаэробный процесс; темновое брожение; биоводород; рециркуляция эффлюента метантенка; органические отходы; биогаз; метаногенез.

BIOHYDROGEN PRODUCTION IN THE TWO-STAGE PROCESS OF ANAEROBIC BIOCONVERSION OF ORGANIC SUBSTANCE OF LIQUID ORGANIC WASTE WITH RECYCLE OF DIGESTER EFFLUENT

A.A. Kovalev¹, D.A. Kovalev¹, Yu.V. Litt², I.V. Katraeva³

¹Federal Scientific Agroengineering Centre VIM

5 1st Irkutskiy proezd, Moscow, 109428, Russia

тел.: +7 (926) 347 79 55; e-mail: kovalev_ana@mail.ru

²Federal Research Centre "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences

Bld. 2, 33 Leninskiy Ave., Moscow, 119071, Russia

тел.: +7 (926) 369 92 43

³Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

65 Il'inskaya Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

тел.: +7 (902) 308 09 10

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.87-100

Referred 9 April 2020 Received in revised form 30 April 2020 Accepted 12 May 2020

At present, hydrogen energy is gaining immense popularity in the world due to the problem of depletion of non-renewable energy sources, hydrocarbons, and environmental pollution caused by their growing consumption. Compared with electro- or thermochemical processes, the biological production of hydrogen has a number of advantages associated with greater environmental friendliness and low cost. Of particular interest is the dark process of producing hydrogen-containing biogas in the processing of organic waste under anaerobic conditions which allows you to take advantage of both energy production and solving the problem of recycling organic waste. This paper considers the production of biohydrogen in a two-stage process of anaerobic bioconversion of organic matter of liquid organic waste. Moreover, experimental studies were carried out continuously in reactors with increased volume. The article describes an experimental setup for investigating a two-stage process of anaerobic bioconversion of organic matter of liquid organic waste and setting up an experiment to study the effect of recycling the effluent of methantank into an anaerobic bioreactor for the production of biohydrogen. The obtained experimental data on the specific yield of biohydrogen are consistent with the data obtained by other authors. The average specific yield of biohydrogen (per kilogram of initial organic matter) during recycling of the methantank effluent increased by 4 % (from 0.1046 to 0.1087 m³ / (day * kg of OM_{in})). In addition, recycling of the methantank effluent to the biohydrogen production reactor during two-stage anaerobic bioconversion allows us to reduce fluctuations in the output of biohydrogen from the reactor. At the same time, there is no methanogenic activity in the anaerobic bioreactor for the production of biohydrogen. The self-stabilizing pH level in the anaerobic bioreactor for producing biohydrogen is less than 4.5 (3.94 without effluent recirculation and 3.88 with recirculation), however, there is no inhibition of hydrogen formation. Thus, the use of recirculation of the methantank effluent into the anaerobic bioreactor for producing biohydrogen can enhance the efficiency of the two-stage anaerobic bioconversion of organic waste while maintaining the stability of the process.

Keywords: two-stage anaerobic process; dark fermentation; biohydrogen; recirculation of methantank effluent; organic waste; biogas; methanogenesis.





Андрей Александрович
Ковалев
Andrey Kovalev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Образование: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) (2009 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; анаэробная переработка отходов животноводства; производство биогаза из биомассы; теплоэнергетические установки; теплообмен.

Публикации: 54.

Индекс Хирша: РИНЦ – 5; Scopus – 2; WoS – 1

SPIN: 4267-3026; Researcher ID: F-7045-2017

ORCID iD: 0000-0002-1983-3454

Scopus Author ID: 57205285134

Information about the author:

PhD in Engineering, Senior Researcher at the Laboratory of Bioenergy and Supercritical Technologies of Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Education: Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), 2009.

Research interests: renewable energy; anaerobic digestion of animal waste; biogas production from biomass heat and power plants; heat and mass transfer.

Publications: 54.



Дмитрий Александрович
Ковалев
Dmitry Kovalev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией биоэнергетических и сверхкритических технологий ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Образование: Московский государственный индустриальный университет (МГИУ) (2003 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; анаэробная переработка отходов животноводства; технические инновации в сельском хозяйстве и защите окружающей среды; производство биогаза из биомассы.

Публикации: 62.

Индекс Хирша (РИНЦ): 6

SPIN: 6513-5547

Researcher ID: K-4810-2015

ORCID iD: 0000-0002-3603-3686

Information about the author:

PhD in Engineering, Head of the Laboratory of Bioenergy and Supercritical Technologies of Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Education: Moscow State Industrial University (MSIU), 2003.

Research interests: renewable energy; anaerobic digestion of animal waste; technical innovations in agriculture and environmental protection; the production of biogas from biomass.

Publications: 62.



Юрий Владимирович
Литти
Yuriy Litt

Сведения об авторе: канд. биолог. наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии антропогенных мест обитания ФИЦ биотехнологии РАН.

Образование: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (РХТУ) (2008 г.).

Область научных интересов: анаэробные микроорганизмы; метаногенные сообщества микроорганизмов; метаногенез; твердые органические отходы; очистка сточных вод; нитрификация; денитрификация; процесс анаммокс; анаммокс-бактерии.

Публикации: 18.

Индекс Хирша (РИНЦ): 5

SPIN: 1487-7611

Researcher ID: C-4945-2014

Information about the author: PhD in Biology, Senior Researcher at Laboratory of Microbiology of Anthropogenic Habitats, Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences.

Education: D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR) 2008.

Research interests: anaerobic microorganisms; methanogenic communities of microorganisms; methanogenesis; solid organic waste; wastewater treatment; nitrification; denitrification; anammox process; anammox bacteria.

Publications: 18.



Инна Валентиновна
Катраева
Inna Katraeva

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Образование: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ) (1989 г.).

Область научных интересов: очистка производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод с использованием биологических, физико-химических и баромембранных методов; анаэробная переработка органических отходов с получением биогаза.

Публикации: 50.

Индекс Хирша (РИНЦ): 5

SPIN: 3369-3091

Researcher ID: O-4715-2016

Information about the author: PhD in Engineering, Associate Professor of the Chair of Water Supply, Sewage, Engineering Ecology and Chemistry at Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

Education: Lobachevsky Nizhny Novgorod State University (NNGU), 1989.

Research interests: treatment of industrial and household wastewater by biological, physical-chemical and baromembrane methods; organic waste anaerobic processing with biogas production.

Publications: 50.



1. Введение

В последние годы все больше внимания уделяется решению двух неразрывно связанных проблем – предотвращению истощения природных ресурсов и охране окружающей среды от антропогенного загрязнения. Быстрое расходование запасов природного топлива, ограничение строительства гидро- и атомных электростанций стали причиной поиска новых источников энергии – возобновляемых, в том числе огромных масс органических отходов, образующихся в сельском хозяйстве, промышленности, городском коммунальном хозяйстве. В связи с этим методы биологической конверсии органических отходов с получением биогаза и высококачественных органических удобрений при одновременном решении ряда вопросов охраны окружающей среды являются весьма перспективными. В частности, возникновение и обострение экологических проблем, связанных с утилизацией навоза на животноводческих фермах, рост цен на отдельные энергоресурсы обусловили значительный интерес к технологии анаэробного сбраживания навоза, при которой обеспечивается его обезвреживание, сохранение удобрительных свойств и получение энергии в виде биогаза [1].

В настоящее время большой интерес в мире вызывает водородная энергетика [2, 3]. Водород (H_2) является одним из самых чистых энергоносителей, его энергетический выход составляет 122 кДж/г, что в 2,75 раза больше, чем у ископаемого топлива. Традиционные способы получения водорода, такие как паровой риформинг природного газа,

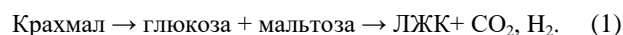
частичное окисление углеводородов или газификация угля, включают использование ископаемых видов топлива [4–6]. Однако ни один из этих процессов не является экономически эффективным или экологическим [7]. Электролиз воды позволяет получить особо чистый водород, однако его себестоимость в 3÷10 раз выше, чем при получении из природного газа [8–10].

Особый интерес представляет темновой процесс получения водородсодержащего биогаза при переработке органических отходов в анаэробных условиях. При сравнимой скорости генерации и стоимости биоводорода, темновой процесс, в отличие от светозависимого, не так требователен к составу и, главное, – к микробиологической чистоте используемого субстрата, что очень важно при переработке комплексных и далеко не стерильных органических отходов, например таких, как стоки различных производств, осадки сточных вод (ОСВ) и др. [11–13]. Впервые были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния рециркуляции эффлюента анаэробного биореактора метаногенной стадии в анаэробный биореактор для получения биоводорода, реализующий непрерывный процесс двухстадийной анаэробной переработки жидких органических отходов, на стабильность и эффективность процесса получения биоводорода. Если для простоты контроля эксперименты проводят в основном в стеклянных склянках и небольших реакторах в периодическом режиме, то в данной работе экспериментальные исследования проводились в непрерывном режиме в реакторах с увеличенным объемом.

<u>Буквы латинского алфавита</u>	
Fd _{окс}	Ферредоксин-оксидаза
Fd _{ред}	Ферредоксин-редуктаза
hrt	Гидравлическое время удержания
NAD ⁺	Никотинамид-адениндинуклеотид-ион
NADH	Никотинамид-адениндинуклеотид
pH	Водородный показатель
RH	Анаэробный реактор для получения биоводорода
RM	Анаэробный реактор метаногенной стадии
<u>Индексы нижние</u>	
исх	Исходный субстрат
<u>Аббревиатуры</u>	
КоА	Кофермент А
КРС	Крупный рогатый скот
ЛЖК	Летучие жирные кислоты
ОВ	Органическое вещество
ОСВ	Осадок сточных вод
ХПК	Химическое потребление кислорода

2. Теоретические аспекты производства биоводорода

Микробное сообщество в анаэробных условиях при пониженном pH превращает картофельный крахмал в летучие жирные кислоты (ЛЖК), CO_2 и H_2 согласно следующему общему уравнению:



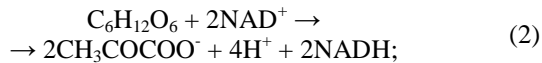
Первая реакция – гидролиз крахмала с образованием глюкозы и мальтозы, вторая реакция – это ферментация сахара с образованием ЛЖК, H_2 и CO_2 . Обычно первая реакция является лимитирующей, и



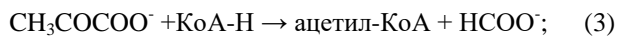
глюкоза превращается в ЛЖК, H_2 и CO_2 намного быстрее, чем при гидролизе крахмала без значительного накопления глюкозы (измеряемой как общее количество сахаров) в сбраживаемой среде [14].

Глюкоза, получаемая в результате гидролиза крахмала, согласно (1), разлагается далее в цепочке биохимических реакций [15]:

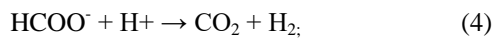
– гликолиз



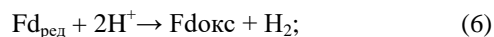
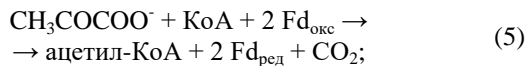
– пируват-формиат-лиаза



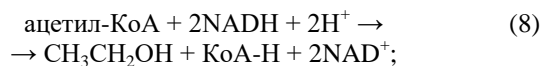
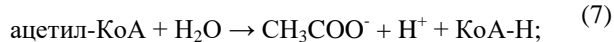
– формиат-водород-лиаза



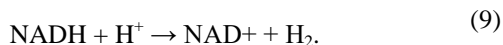
– пируват-ферредоксин-оксидоредуктаза



– реакции ацетил-КоА

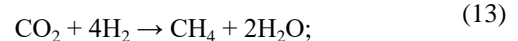


– дополнительное образование водорода



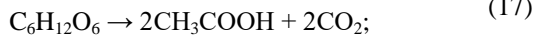
Первоначально молекулы глюкозы в реакции гликолиза разлагаются под действием никотинамид-адениндинуклеотид-иона (NAD^+) с образованием пирувата, H_2 и никотинамид-адениндинуклеотида ($NADH$), как показано в (2). Пируват, который является основным промежуточным продуктом процесса темнового сбраживания, затем анаэробно окисляется до ацетил-кофермента А (ацетил-КоА) двумя возможными путями: пируват-формиат-лиазный путь или пируват-ферредоксин-оксидоредуктазный путь в зависимости от используемой бактериальной культуры [16]. При пируват-формиат-лиазном пути деградация пирувата под действием кофермента А (КоА-Н) приводит к образованию ацетил-КоА и формиата согласно (3). В кислых условиях активируется формиат-водород-лиаза, а затем муравьиная кислота превращается в H_2 , как показано в (4). По пируват-ферредоксиноксидоредуктазному пути, пируват окисляется КоА и ферредоксин-оксидазой ($Fd_{окс}$) до ацетил-КоА, ферредоксин-редуктазы ($Fd_{ред}$) и CO_2 (5). Затем $Fd_{ред}$ восстанавливает ионы H^+ до H_2

и окисляется до $Fd_{окс}$ (6). Как в пируват-формиат-лиазном, так и пируват-ферредоксин-оксидоредуктазном пути образование ацетил-КоА сопровождается образованием конечных продуктов, а именно ацетата и этанола (7, 8). Все молекулы $NADH$, образующиеся в качестве побочного продукта превращения глюкозы в пируват, могут быть повторно окислены с образованием H_2 в соответствии с (9). Тем не менее эта реакция (9) зависит от конечного продукта: если конечный продукт представляет собой масляную кислоту или этанол, оставшиеся молекулы $NADH$ не смогут окислиться с выделением H_2 . Таким образом, из 1 моля глюкозы, согласно (10), может быть образовано максимум 4 моля H_2 , если конечным продуктом является уксусная кислота. В то же время при образовании масляной кислоты теоретически может образоваться лишь 2 моля H_2 . На практике выход водорода составляет менее 4 моль/моль глюкозы, так как в качестве конечных продуктов обычно образуется смесь ацетата, этанола, бутирата и других продуктов [15]. Кроме того, образующийся водород может потребляться гомоацетогенами (12), метаногенами (13) и пропионат-образующими бактериями (14), что также снижает водородный потенциал глюкозы:



Помимо деятельности водородопотребляющих микроорганизмов, снижение водородного потенциала при темновом сбраживании глюкозы может быть вызвано также активностью бактерий, образующих из глюкозы лактат (15), ацетат (16) [17], этанол (17) и сукцинат (18) без сопутствующего образования водорода [18]. Таким образом, исходя из (17), по преимущественному накоплению в среде ацетата в качестве конечного продукта нельзя однозначно говорить о протекании наиболее эффективного пути образования водорода. Поэтому, помимо анализа конечных продуктов разложения глюкозы, при темновом брожении важно иметь представление о микробном составе сообщества реактора, так как присутствие бактерий, осуществляющих вредные для накопления водорода реакции, например *Clostridium aceticum* (12) и (16), *Clostridium propionicum* и *Clostridium homopropionicum* (14), *Bacillus racemilacticus* и р. *Lactobacillus* (15), гидрогенотрофных метаногенов (13), гомоацетогенов (16) и др., может указывать на то, что производство водорода протекает не в оптимальном режиме:





3. Материалы и методы

3.1. Экспериментальная установка

Для проведения исследований была создана экспе-

риментальная установка, состоящая из двух реакторов: RH – анаэробный реактор для получения биоводорода; RM – анаэробный реактор метаногенной стадии.

Анаэробный реактор для получения биоводорода является одним из реакторов, включенных в единую экспериментальную установку для исследования процесса двухстадийной анаэробной переработки жидких органических отходов и очистки высококонцентрированных сточных вод с получением продуктов в виде водород- и метансодержащих биогазов.

Технологическая схема экспериментальной установки для получения биоводорода и метансодержащего биогаза приведена на рис. 1.

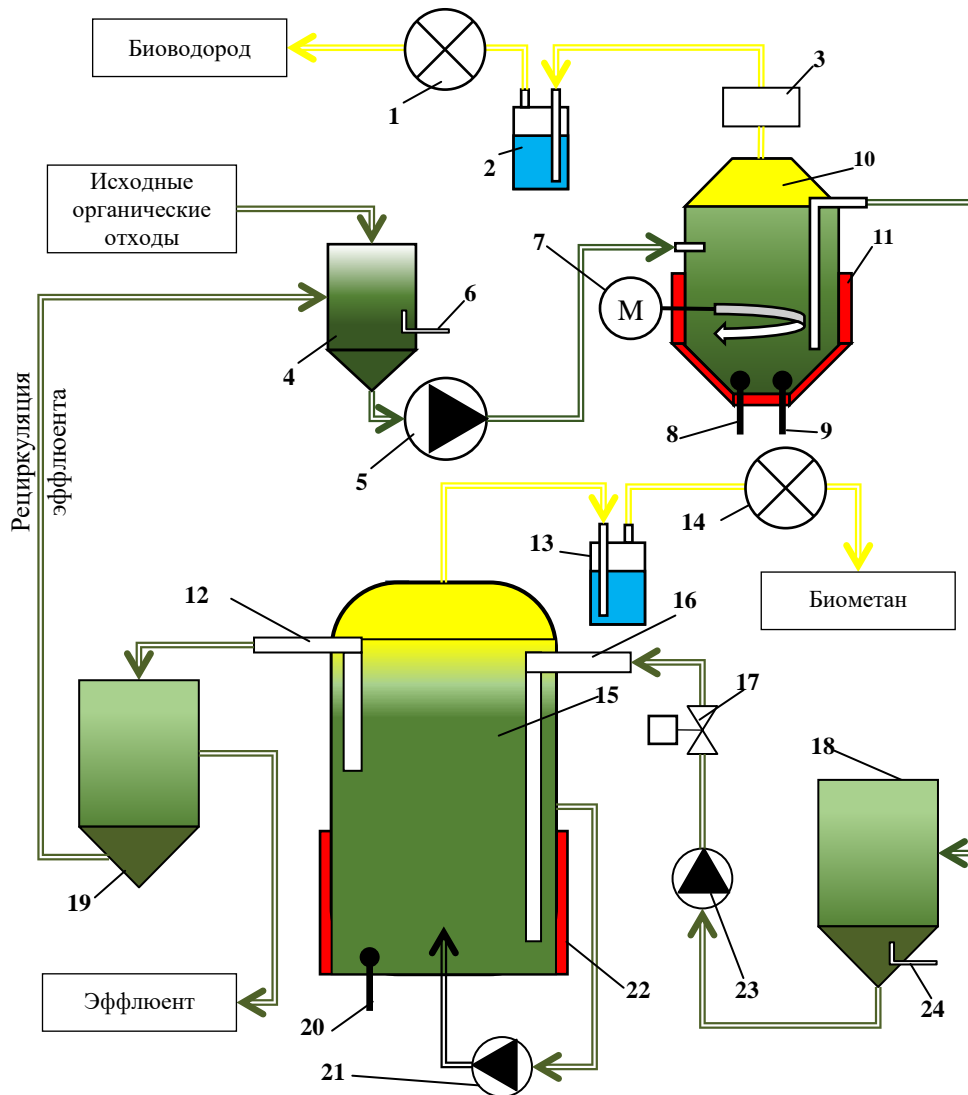


Рис. 1 – Технологическая схема экспериментальной установки для получения биоводорода:

1, 14 – барабанный счетчик газа; 2, 13 – гидрозатвор; 3 – блок газоанализаторов концентраций газа; 4 – усреднительная емкость; 5 – насос загрузки RH; 6, 24 – поплавковый датчик уровня; 7 – перемешивающее устройство в RH; 8, 20 – датчик температуры; 9 – pH-электрод; 10 – анаэробный биореактор RH; 11 – нагревательный элемент RH; 12 – устройство выгрузки RM; 15 – метантенк (RM); 16 – устройство загрузки RM; 17 – клапан загрузки; 18 – промежуточная емкость; 19 – накопитель эфлюента; 21 – насос перемешивания RM; 22 – нагревательный элемент RM; 23 – насос загрузки RM

Fig. 1 – The technological scheme of the experimental setup for producing biohydrogen:

1, 14 – drum gas meter; 2, 13 – water seal; 3 – block of gas analyzers; 4 – averaging capacity; 5 – RH loading pump; 6, 24 – float level sensor; 7 – mixing device in RH; 8, 20 – temperature sensor; 9 – pH electrode; 10 – anaerobic bioreactor RH; 11 – RH heating element; 12 – RM unloading device; 15 – digester (RM); 16 – RM loading device; 17 – loading valve; 18 – intermediate capacity; 19 – effluent accumulator; 21 – RM mixing pump; 22 – RM heating element; 23 – RM loading pump

Усреднительная емкость 4 представляет собой цилиндрическую емкость с коническим дном общим объемом 12 дм³, оборудованную поплавковым датчиком уровня 6 для контроля объема загружаемых исходных органических отходов.

Насос загрузки RH 5 – перистальтический насос НП-16, подача субстрата составляет 3,8 дм³/мин.

Анаэробный биореактор RH 10 для получения биоводорода представляет собой цилиндрическую емкость с коническим дном общим объемом 50 дм³, оборудованную патрубками подвода и выгрузки субстрата, патрубком отвода биогаза, устройством для измерения уровня pH, нагревательным элементом RH 11, датчиком температуры субстрата 8 и перемешивающим устройством в RH 7.

В качестве устройства для измерения уровня pH использовался pH-метр HM Digital PPH-1000 с комбинированным pH-электродом 9 HM Digital PPH-1000.

В качестве нагревательного элемента 11 установлен хомутовый электронагреватель с установленной мощностью 4 кВт и площадью теплообмена 0,43 м².

В качестве перемешивающего устройства 7 установлена механическая мешалка якорного типа с частотой вращения вала 40 об/мин. Диаметр лопастей составляет 200 мм, высота лопастей – 25 мм.

Гидрозатвор 2 установлен на трубопроводе отвода биогаза и поддерживает давление в анаэробном биореакторе на уровне 150 мм вод. ст.

На трубопроводе отвода биогаза установлены барабанный счетчик газа 1 Ritter TG10 и блок газоанализаторов концентрации газа 3.

Промежуточная емкость 18 представляет собой цилиндрическую емкость с коническим дном общим объемом 20 дм³.

Насос загрузки RM 23 – перистальтический насос НП-16, подача субстрата составляет 3,8 дм³/мин.

Анаэробный биореактор метаногенной стадии – метантенк RM 5 – представляет собой цилиндрическую емкость с плоским дном общим объемом 90 дм³, оборудованную устройствами загрузки 16 и выгрузки 12 субстрата, патрубком отвода биогаза, нагревательным элементом RM 22, датчиком температуры субстрата 20 и патрубками перемешивания.

В качестве нагревательного элемента RM 22 выступает хомутовый электронагреватель с установленной мощностью 4 кВт и площадью теплообмена 0,36 м².

В качестве насоса перемешивания RM 21 установлен перистальтический насос НП-16, подача субстрата составляет 3,8 дм³/мин.

Накопитель эффлюента 19 – цилиндрическая емкость с плоским дном с рабочим объемом 8 дм³, оборудованная патрубком контроля уровня эффлюента (переливная труба) и патрубком опорожнения.

3.2. Определение состава биогаза

Состав биоводорода измерялся с помощью датчиков, установленных на трубопроводе отвода биогаза:

- концентрация водорода – сенсор амперометрический ASCPH2-01 в составе анализатора водорода АВП-01;

- концентрация метана – оптический сенсор MSH-P/HR/5/V/P CH₄ в составе датчика-газоанализатора Марш-Д-021 серии ИГС-98;

- концентрация углекислого газа – оптический сенсор MSH-P/HCO₂/NC/5/V/P CO₂ в составе датчика-газоанализатора Дукал-Д-021 серии ИГС-98.

Состав метансодержащего биогаза измерялся с помощью газоанализатора MRU Biogas Optima 7 путем отбора проб газа из пробоотборника.

Датчики, установленные в газоанализаторе:

- концентрация метана – NDIR датчик;
- концентрация углекислого газа – NDIR датчик;
- концентрация сероводорода – электрохимический датчик;
- концентрация кислорода – электрохимический датчик.

3.3. Исходный субстрат

В качестве исходного субстрата использовалась имитация жидких органических отходов в виде смеси комбикорма для крупного рогатого скота марки К-65 с водопроводной водой по ГОСТ Р 51232-98. Смесь подготавливалась следующим образом: навеску комбикорма массой 300 г разводили в водопроводной воде с температурой 15 °С объемом 10 л. Подготовленную смесь хранили в холодильнике при температуре 2÷4 °С не более двух суток. Концентрация органического вещества в исходном субстрате составляла 24 г/л, влажность – 97,4 %.

3.4. Постановка эксперимента

Экспериментальная установка работала в двух режимах:

- 1) получение биоводорода без участия реактора метаногенной стадии (в работе только анаэробный реактор для получения биоводорода RH);

- 2) получение биоводорода и метансодержащего биогаза с рециркуляцией эффлюента анаэробного реактора метаногенной стадии RM в анаэробный реактор для получения биоводорода RH.

Режим № 1

Ежедневно в течение 15 суток производилась двукратная загрузка исходного субстрата объемом 10 л в усреднительную емкость 4, откуда насосом загрузки RH 5 исходный субстрат подавался в анаэробный биореактор RH 10, работающий при температуре 57,5 °С. При этом продолжительность выхода на рабочий режим «Start up» составила 3 суток. Кратность



продолжительности работы перемешивающего устройства в RH 7 составляла 5/20 мин. При подаче исходного субстрата в анаэробный биореактор RH 10 перемешивание в нем принудительно отключалось. При этом hrt анаэробного биореактора RH 10 составляло 2,5 суток.

Режим № 2

Ежедневно в течение 15 суток производилась двукратная загрузка исходного субстрата объемом 9 л с добавлением эффлюента метантенка RM 15 из накопителя эффлюента 19 объемом 1 л в усреднительную емкость 4, откуда насосом загрузки RH 5 смесь исходного субстрата и эффлюента подавалась в анаэробный биореактор RH 10, работающий при температуре 57,5 °С. При этом продолжительность выхода на рабочий режим «Start up» составила 3 суток. Кратность продолжительности работы перемешивающего устройства в RH 7 составляла 5/20 мин. При подаче исходного субстрата в анаэробный биореактор RH 10 перемешивание в нем принудительно отключалось. При этом hrt анаэробного биореактора RH 10 составляло 2,5 суток, а степень рециркуляции по исходному субстрату – 11 %.

При подаче исходного субстрата в анаэробный биореактор RH 10 субстрат, обработанный в анаэробном биореакторе RH 10 в течение 2,5 суток, самотеком поступал в промежуточную емкость 18, откуда насосом загрузки RM 23 подавался в метантенк RM 15, работающий в термофильном режиме (55,1 °С).

Перемешивание в метантенке RM 15 поддерживалось постоянно. При подаче субстрата, обработанного в анаэробном биореакторе RH 10, в метантенк RM 15 перемешивание в нем принудительно отключалось. При этом hrt в метантенке RM 15 составляло 8 суток.

Отбор проб метансодержащего биогаза из метантенка RM 15 производился каждый день из пробоотборника для определения концентрации газов, получаемых в процессе сбраживания.

4. Сопоставительный анализ концептуальной и конструктивной схемы производства биоводорода в двухстадийном процессе анаэробной биоконверсии органического вещества жидких органических отходов

Анализ научной литературы показал, что для исследования образования биоводорода в качестве субстрата используются в основном богатые углеводами синтетические сточные воды [19] (Китай) и реальные органические отходы пищевой, молочной, целлюлозно-бумажной, сельскохозяйственной промышленности, производства крахмала, сахара и др. [20–25] (США, Германия, Турция). Отмечается, что технология получения биоводорода из органических отходов будет иметь довольно ограниченное применение, если другие органические вещества не смогут эффективно применяться в качестве субстратов. В

связи с этим использование комплексных субстратов, в том числе содержащих жиры и белки, значительно повысит эффективность и практическую применимость рассматриваемой технологии.

Для получения высокопроизводительной водородогенерирующей микробной биомассы в качестве источника соответствующих микроорганизмов использовали сброженные и сырые ОСВ, навоз КРС, компосты из разных субстратов и др. Многие авторы получали чистые и смешанные микробные культуры, состоящие в основном из разлагающих углеводороды бактерий рода *Clostridium* и *Enterobacter*. Для практической применимости полученных инокулятов отмечается необходимость исследований по выделению микробных культур, способных к разложению сложных органических загрязнений с высокой производительностью по водороду [19, 26].

Увеличение удельной скорости (на единицу субстрата) образования водорода достигают также с помощью различных видов предобработки субстрата, в результате которой происходит частичное разложение ОВ и значительно снижается количество метанобразующих архей. В первую очередь применяют термические и химические методы [18, 24, 27] (Япония). В работе [28] (Индия) рассмотрена потенциальная возможность повышения выработки водорода за счет использования в процессе его производства факультативной анаэробной бактерии, биоаугментированной облигатным анаэробом. Подход, при котором смешиваются *Klebsellia pneumoniae* и *Clostridium acetobutylicum*, привел к увеличению выработки водорода на 37 % и 18 % соответственно по сравнению с отдельным организмом.

Большая часть работ касается исследования влияния скорости подачи субстрата (времени пребывания), нагрузки по органическому веществу, температуры, pH, различных добавок на процесс получения биоводорода [19]. При этом только небольшое количество исследований посвящено оптимизации непрерывного двухстадийного процесса [29, 30] (Греция, Мексика).

Для простоты контроля процессы проводят в основном в стеклянных склянках и небольших реакторах в периодическом режиме. Однако для практической применимости рассматриваемой технологии необходимы также исследования в непрерывном режиме в реакторах с увеличенным объемом. Это касается и исследований различных аспектов двухстадийной анаэробной переработки органических отходов с последовательным получением водород- и метансодержащих биогазов.

Главная отличительная черта предлагаемой работы – получение экспериментальных данных на лабораторной установке с увеличенным объемом (50 дм³). При этом принцип увеличения производства биоводорода в настоящей статье похож на принцип, приведенный в [28], однако в предлагаемой работе применяются не чистые культуры, а эффлюент, полученный в биореакторе метаногенной стадии.



5. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показан удельный выход биоводорода

(на килограмм исходного органического вещества) из анаэробного биореактора RH, полученный в ходе эксперимента в обоих режимах.

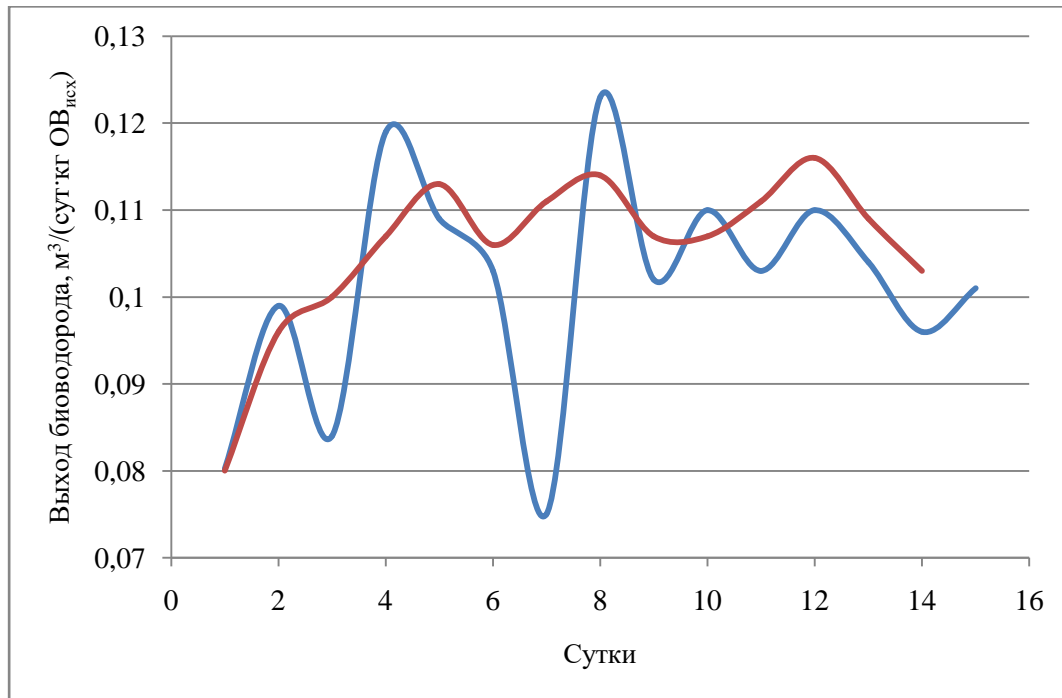


Рис. 2 – Удельный суточный выход биоводорода:

— без рецикла; — с рециклом

Fig. 2 – The specific daily yield of biohydrogen:

— without recycling; — with recycling

Средний удельный выход биоводорода (на килограмм исходного органического вещества) при рециркуляции эффлюента метантенка составил $0,1089 \text{ м}^3/(\text{сут}\cdot\text{кг ОВ}_{\text{исх}})$; без рециркуляции эффлюента метантенка – $0,1046 \text{ м}^3/(\text{сут}\cdot\text{кг ОВ}_{\text{исх}})$.

В работе [31] при анаэробной биоконверсии глюкозы при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 5,5$ удельный выход биоводорода составил $0,2613 \text{ м}^3/(\text{сут}\cdot\text{кг ОВ}_{\text{исх}})$.

В работе [32] при анаэробной биоконверсии гексозы при температуре $58 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 7,0$ в течение 1,5 суток удельный выход биоводорода составил $0,1867 \text{ м}^3/(\text{сут}\cdot\text{кг ОВ}_{\text{исх}})$ при среднем содержании водорода в водородсодержащем биогазе 55 %.

Такие высокие удельные выходы биоводорода, полученные в работах [31, 32], можно объяснить использованием сахаров, которые обладают высокой степенью разложения, в качестве субстрата. Так, в работе [33] при анаэробной биоконверсии кухонных отходов (66 % пищевых отходов, 27 % овощных отходов, 0,96 % чайных отходов, 1,09 % яичной скорлупы, 1,36 % упаковочных материалов, 3,61 % золы) при $\text{pH} = 5,5$ удельный выход биоводорода составил $0,072 \text{ м}^3/(\text{сут}\cdot\text{кг ОВ}_{\text{исх}})$ при среднем содержании водорода в водородсодержащем биогазе 46 %.

В работе [34] при анаэробной биоконверсии синтетических пищевых отходов (рис, овощи, мясо) с содержанием ОВ 30 г ХПК/л при температуре $37 \text{ }^\circ\text{C}$

и $\text{pH} = 6,0$ удельный выход биоводорода составил $0,055 \text{ м}^3/(\text{сут}\cdot\text{кг ОВ}_{\text{исх}})$ при среднем содержании водорода в водородсодержащем биогазе 49 %.

Как видно на рис. 2, колебания выхода биоводорода из анаэробного биореактора RH при рециркуляции эффлюента метантенка снижены, что предположительно является следствием внесения дополнительной биомассы микроорганизмов с эффлюентом, за счет чего повышается их концентрация и увеличивается доступность питательных веществ к анаэробным микроорганизмам.

На рис. 3 показан уровень pH в анаэробном биореакторе RH, полученный в ходе эксперимента в обоих режимах.

Средний уровень pH в анаэробном биореакторе RH составил 3,94 в режиме без рециркуляции и 3,88 в режиме с рециркуляцией эффлюента метантенка. Снижение уровня pH в анаэробном биореакторе RH можно объяснить тем, что pH эффлюента метантенка ниже, чем pH исходного субстрата (6,72 и 7,09 соответственно).

В статье [35] показано, что работы по анаэробной биоконверсии органических отходов в биоводород проводились при $\text{pH} 5,0\div 7,5$. При этом $\text{pH} 5,5\div 6,8$ считается оптимальным для жизнедеятельности водородобразующих бактерий [36], а при pH менее 4,5 возникает ингибирование [37] из-за перехода ЛЖК в



недиссоциированную форму и их проникновение в клетки микроорганизмов через клеточную мембрану

вследствие того, что внутри клеток поддерживается более высокий уровень pH [15].

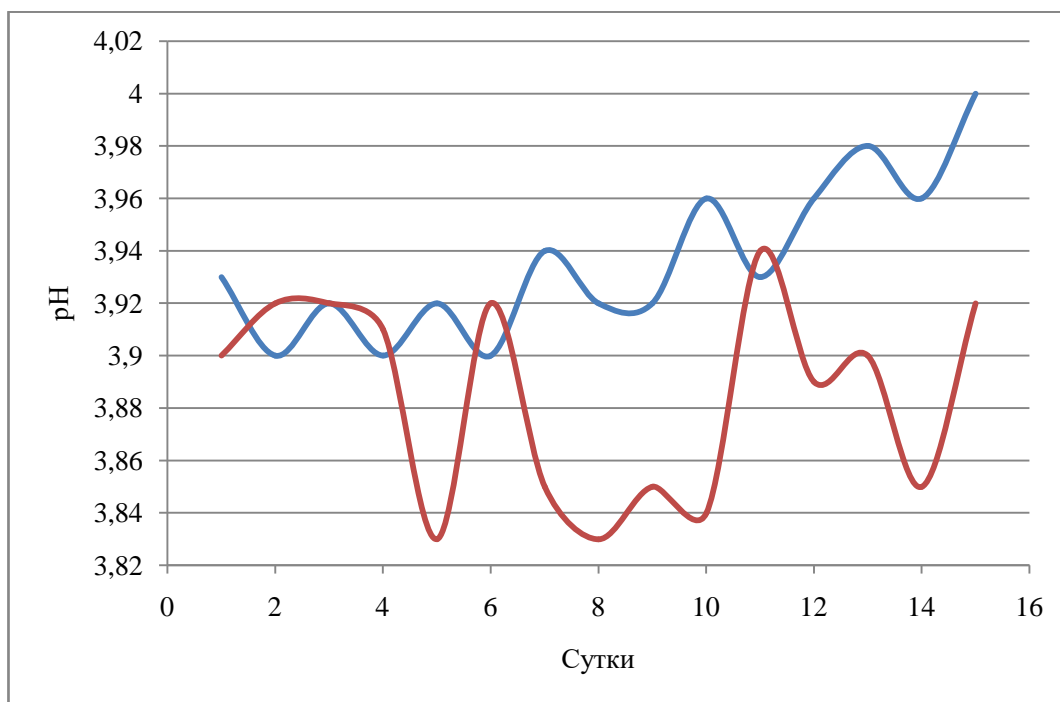


Рис. 3 – Изменение pH сбрасываемых отходов в реакторе RH:

— без рецикла; — с рециклом

Fig. 3 – Change in pH of fermentation waste in the RH reactor:

— without recycling; — with recycling

Метаногенной активности в анаэробном биореакторе RH не наблюдалось (содержание метана в водородсодержащем биогазе составило 0 %).

При этом среднее содержание водорода в водородсодержащем биогазе составило 52,3 % в режиме без рециркуляции и 52,2 % в режиме с рециркуляцией эффлюента метантенка.

Средний удельный объемный выход метана из метантенка RM составил $0,91 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ при среднем содержании метана в биогазе 60,3 %.

Среднее содержание сероводорода в метансодержащем биогазе составило 74 ppm.

6. Заключение

Экспериментальные исследования по изучению влияния рециркуляции эффлюента анаэробного биореактора метаногенной стадии в анаэробный биореактор для получения биоводорода, реализующего непрерывный процесс двухстадийной анаэробной переработки жидких органических отходов, на стабильность и эффективность процесса получения биоводорода были проведены в непрерывном режиме в реакторах с увеличенным объемом.

Исходя из данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что рециркуляция эффлюента анаэробного биореактора метаногенной стадии в анаэробный биоре-

актор для получения биоводорода в процессе двухстадийной анаэробной биоконверсии жидких органических отходов позволяет уменьшить колебания выхода биоводорода из реактора RH. При этом средний удельный выход биоводорода (на килограмм исходного органического вещества) при рециркуляции эффлюента метантенка повысился на 4 % (с $0,1046 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{кг ОВ}_{\text{исх}})$ до $0,1089 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{кг ОВ}_{\text{исх}})$), а метаногенная активность в анаэробном биореакторе отсутствовала. Кроме того, несмотря на то что самоустанавливающийся уровень pH в анаэробном биореакторе для получения биоводорода был менее 4,5, ингибирования процесса образования водорода не наблюдалось.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» в рамках научного проекта № 18-29-25042.

Acknowledgments

The study was carried out with the financial support of the Federal State Budgetary Institution "Russian Foundation for Basic Research" within the framework of the scientific project No. 18-29-25042.

Список литературы

- [1] Ножевникова, А.Н. Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов / А.Н. Ножевникова [и др.]. – М.: Университетская книга, 2016. – 320 с.
- [2] Дли, М.И. Водородная энергетика и перспективы ее развития / М.И. Дли, А.А. Балябина, Н.В. Дроздова // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 22. – С. 37–41. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.22.004>
- [3] Раменский, А.Ю. Водород в качестве топлива: предмет и цели стандартизации / А.Ю. Раменский // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 1. – С. 33–44. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.01.03>
- [4] Гринько, В.В. Низкотемпературная воднопаровая конверсия этанола на катализаторе Ni/ZnO в микроканальном реакторе / В.В.Гринько [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 15–18. – С. 112–121. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.15-18.112-121>
- [5] Kothari, R. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods / R. Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2008. – No. 12. – P. 553–563.
- [6] Дубинин, А.М. Мини-ТЭЦ на базе электрохимического генератора и конвертора метана с заторможенным псевдооживленным слоем / А.М. Дубинин [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 19–21. – С. 95–105; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.19-21.095-105>
- [7] Abbasi, T. 'Renewable' hydrogen: Prospects and challenges / T. Abbasi, S.A. Abbasi // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2011. – No. 15. – P. 3034–3040.
- [8] Контрерас, А. Моделирование процесса производства водорода с использованием гидроэлектричества в Венесуэле / А. Контрерас, Ф. Поссо, Т.Н. Везируглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – № 22–24. – С. 88–95; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.088-095>
- [9] Аминов, Р.З. Оценка эффективности получения водорода на базе внепиковой электроэнергии АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 5–6. – С. 59–70; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.05-06.006>
- [10] Khan, M.A. Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy / M.A. Khan [et al.] // Renewable Energy – 2018 – Vol. 129B. – P. 754–768.
- [11] Голуб, Н.Б. Повышение выхода водорода при совместной конверсии сырья разного происхождения / Н.Б. Голуб // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2014. – № 19. – С. 53–57.
- [12] Голуб, Н.Б. Влияние концентрации субстрата на образование водорода в процессе ферментации / Н.Б. Голуб // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2014. – № 15. – С. 107–112.
- [13] Marone, A. Coupling dark fermentation and microbial electrolysis to enhance bio-hydrogen production from agro-industrial wastewaters and by-products in a bio-refinery framework / A. Marone [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – No. 42 (3). – P. 1609–1621.
- [14] Kargi, F. Dark fermentation of ground wheat starch for bio-hydrogen production by fed-batch operation / F. Kargi, M. YunusPamukoglu // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34. – Issue 7. – P. 2940–2946
- [15] Bundhoo, M.A.Z. Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: A review / M.A.Z. Bundhoo, R. Mohee // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – No. 41. – P. 6713–6733.
- [16] Holladay, J.D. An overview of hydrogen production technologies / J.D. Holladay [et al.]. // Catalysis Today. – 2009. – No. 139. – P. 244–260
- [17] Hawkes, F. Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora: Principles and progress / F. Hawkes [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – No. 32. – P. 172–184
- [18] Kothari, R. A critical review on factors influencing fermentative hydrogen production / R. Kothari [et al.] // Frontiers In Bioscience-Landmark. – 2017. – No. 22. – P. 1195–1220.
- [19] Wang, J. Factors influencing fermentative hydrogen production: A review / J. Wang, W. Wan // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34 (2). – P. 799–811.
- [20] Van Ginkel, S.W. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewaters / S.W. VanGinkel, S.E. Oh, B.E. Logan // International Journal of Hydrogen Energy. – 2005. – No. 30 (15). – P. 1535–1542. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.017>
- [21] Ren, N. Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system / N. Ren [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2006. – No. 31. – P. 2147–2157.
- [22] Li, D. Biological hydrogen production from steam exploded straw by simultaneous saccharification and fermentation / D. Li, H. Chen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – No. 32. – P. 1742–1748.
- [23] Venkata Mohan, S. Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): Effect of organic loading rate / S. Venkata Mohan, V. Lalit Babu, P.N. Sarma // Enzyme and Microbial Technology. – 2007. – No. 41. – P. 506–515.
- [24] Salem, A.H. Effect of pre-treatment and hydraulic retention time on biohydrogen production from organic wastes / A.H. Salem [et al.] // International Journal



of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43. – Is. 10. – P. 4856–4865.

[25] Keskin, T. Determining the effect of trace elements on biohydrogen production from fruit and vegetable wastes / T. Keskin [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – Vol. 43. – Is. 23. – P. 10666–10677.

[26] Li, C.L. Fermentative hydrogen production from wastewater and solid wastes by mixed cultures / C.L. Li, H.H.P. Fang // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2007. – No. 37. – P. 1–39.

[27] Stanislaus, M.S. Improvement of Biohydrogen Production by Optimization of Pretreatment Method and Substrate to Inoculum Ratio from Microalgal Biomass and Digested Sludge / M.S. Stanislaus [et al.] // *Renewable Energy*. – 2018. – No. 127. – P. 670–677.

[28] Синха, П. Повышение выработки биогаза с помощью новой стратегии аугментации с использованием различных органических остатков / П. Синха [и др.] // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2019. – № 34–36. – С. 26–40; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2019.34-36.026-040>

[29] Koutrouli, E.C. Hydrogen and methane production through two-stage mesophilic anaerobic digestion of olive pulp / Eleni C. Koutrouli [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2009. – No. 100. – P. 3718–3723.

[30] Carrillo-Reyes, J. Influence of Added Nutrients and Substrate Concentration in Biohydrogen Production from Winery Wastewaters Coupled to Methane Production / J. Carrillo-Reyes, B. Aidé Albarrán-Contreras and G. Buitrón // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2019. – No. 187(1). – P. 140–151.

[31] Lin, C. Fermentative hydrogen production at ambient temperature / C. Lin, R.-C. Chang // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2004. – No. 29. – P. 715–720; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.002>.

[32] Collet, C. Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose / C. Collet [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2004. – No. 29. – P. 1479–1485. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.009>.

[33] Jayalakshmi, S. Bio hydrogen generation from kitchen waste in an inclined plug flow reactor / S. Jayalakshmi, K. Joseph, V. Sukumaran // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2009. – No. 34. – P. 8854–8858; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.048>.

[34] Nathao, C. Production of hydrogen and methane by one and two stage fermentation of food waste / C. Nathao, U. Sirisukpoka, N. Pisutpaisal // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – No. 38. – P. 15764–15769; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.047>

[35] Łukajtis, R. Hydrogen production from biomass using dark fermentation / Rafał Łukajtis [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 91. – P. 665–694; ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043>.

[36] Liu, I.C. The effect of pH on the production of biohydrogen by clostridia: Thermodynamic and metabolic considerations / I.C. Liu [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – No. 36. – P. 439–449.

[37] Ruggeri, B. *BioH₂ & BioCH₄ Through Anaerobic Digestion* / B. Ruggeri, T. Tommasi, S. Sanfilippo. – London: Springer-Verlag, 2015.

References

[1] Nozhevnikova A.N., Kallistova A.Yu., Litt Yu.V., Kevbrina M.V. Biotechnology and microbiology of anaerobic processing of organic municipal waste (Biotekhnologiya i mikrobiologiya anaerobnoipererabotki organicheskikh kommunal'nykh otkhodov). Moscow: Universitetskaya kniga Publ., 2016; 320 p. (in Russ.).

[2] Dli M.I., Baliabina A.A., Drozdova N.V. Hydrogen energy and development prospects (Vodorodnaya energetika i perspektivy ee razvitiya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2015;(22):37–41. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.22.004> (in Russ.).

[3] Ramenskiy A.Y. Hydrogen as a fuel: the object and the purpose of standardization (Vodorod v kachestve topliva: predmet i tselistandardizatsii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2015;(1):33–44. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.01.03> (in Russ.).

[4] Grinko V.V., Bezhok V.S., Lapin N.V., Vyatkin A.F. Low-temperature water-vapor conversion of ethanol on the ni/zno catalyst in a microchannel reactor (Nizkotemperaturnaya vodno-parovayakonversiya etanola na katalizatore Ni/ZnO v mikrokanal'nom reaktore). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2016;(15–18):112–121. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.15-18.112-121> (in Russ.).

[5] Kothari R., Buddhi D., Sawhney R.L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008;12:553–563.

[6] Dubinin A.M., Sheklein S.E., Tuponogov V.G., Ershov M.I. Mini CHP based on the electrochemical generator and impeded fluidized bed reactor for methane steam reforming (Mini-TETS na baze elektrokhimicheskogo generatora i konvertora metana s zatormozhennym psepvdoozhizhennym sloem). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2017;(19–21):95–105. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.19-21.095-105> (in Russ.).



- [7] Abbasi T., Abbasi S.A. Renewable' hydrogen: Prospects and challenges. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011;(15):3034–3040 (in Russ.).
- [8] Contrerasa A., Possob F., Veziroglu T.N. Modeling and simulation of the production of hydrogen using hydroelectricity in Venezuela. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2018;(22–24):88–95.
<https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.088-095>
- [9] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Performance evaluation of hydrogen production on base of the off-peak electricity of atomic power station (Otsenka effektivnosti polucheniya vodoroda na baze vnepikovoi elektroenergii AES). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2016;(5–6):59–70.
<https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.05-06.006> (in Russ.).
- [10] Khan M.A. Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy. *Renewable Energy*, 2018;129B:754–768.
- [11] Golub N.B. Increase of hydrogen output due to combined conversion of different origin raw materials (Povysheniemykhoda vodoroda pri sovmestnoi konversii syr'ya raznogo proiskhozhdeniya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2014;(19):53–57 (in Russ.).
- [12] Golub N.B. Influence of substrate concentration on the formation of hydrogen during fermentation (Vliyaniekontsentratsii substrata na obrazovanie vodoroda v protsessefermentaTsII). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2014;(15):107–112 (in Russ.).
- [13] Marone A. Coupling dark fermentation and microbial electrolysis to enhance bio-hydrogen production from agro-industrial wastewaters and by-products in a bio-refinery framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42(3):1609–1621.
- [14] Kargi F., Pamukoglu M.Y. Dark fermentation of ground wheat starch for bio-hydrogen production by fed-batch operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009;34(7):2940–2946.
- [15] Bundhoo M.A.Z., Mohee R. Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016;41:6713–6733.
- [16] Holladay J.D., Hu J., King D.L., Wang Y. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 2009;139:244–260
- [17] Hawkes F., Hussy I., Kyazze G., Dinsdale R., Hawkes D. Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora: Principles and progress. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007;32:172–184
- [18] Kothari R., Kumar V., Pathak V.V., Ahmad S., Aoyi O., Tyagi V.V. A critical review on factors influencing fermentative hydrogen production. *Frontiers In Bioscience-Landmark*, 2017;22:1195–1220.
- [19] Wang J., Wan W. Factors influencing fermentative hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009;34(2):799–811.
- [20] Van Ginkel S.W., Oh S., Logan B.E. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewaters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005;30(15):1535–1542.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.017>
- [21] Ren N., Li J., Li B., Wang Y., . Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006;31:2147–2157.
- [22] Li D., Chen H. Biological hydrogen production from steam exploded straw by simultaneous saccharification and fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007;32:1742–1748.
- [23] Venkata Mohan S., Lalit Babu V., Sarma P.N. Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): Effect of organic loading rate. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007;41:506–515.
- [24] Salem A.H. et al. Effect of pre-treatment and hydraulic retention time on biohydrogen production from organic wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018;43(10):4856–4865.
- [25] Keskin T. et al. Determining the effect of trace elements on biohydrogen production from fruit and vegetable wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018;43(23):10666–10677.
- [26] Li C.L., Fang H.H.P. Fermentative hydrogen production from wastewater and solid wastes by mixed cultures. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2007;37:1–39.
- [27] Stanislaus M.S., Zhang N., Yuan Y., Zheng H., Zhao Ch., Hu X., Zhu Q., Yang Y. Improvement of Biohydrogen Production by Optimization of Pretreatment Method and Substrate to Inoculum Ratio from Microalgal Biomass and Digested Sludge. *Renewable Energy*, 2018;127:670–677.
- [28] Sinha P., Gaurav K., Roy S., Balachandar G., Das D. Improvement of Biohydrogen Production with Novel Augmentation Strategy Using Different Organic Residues (Povysheniemyrabortkibiovodoroda s pomoshch'yunovoistrategiiaugmentatsii s ispol'zovanie-mrazlichnykhorganicheskikhostatkov). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*



(*ISJAEE*), 2019;(34–36):26–40. (in Russ.); <https://doi.org/10.15518/isjaee.2019.34-36.026-040>

[29] Koutrouli E.C., Kalfas H., Gavala H.N., Skiadas I.V., Stamatelatos K., Lyberatos G. Hydrogen and methane production through two-stage mesophilic anaerobic digestion of olive pulp. *Bioresource Technology*, 2009;100:3718–3723.

[30] Carrillo-Reyes J., Albarrán-Contreras B.A., Buitrón G. Influence of Added Nutrients and Substrate Concentration in Biohydrogen Production from Winery Wastewaters Coupled to Methane Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2019;187(1):140–151.

[31] Lin C., Chang R-C. Fermentative hydrogen production at ambient. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;29:715–720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.09.002>.

[32] Collet C., Adler N., Schwitzguébel J.P., Péringer P. Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;29:1479–1485. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.009>.

[33] Jayalakshmi S., Joseph K., Sukumaran V. Bio hydrogen generation from kitchen waste in an inclined

plug flow reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009;34:8854–8858.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.048>.

[34] Nathao C., Sirisukpoka U., Pisutpaisal N. Production of hydrogen and methane by one and two stage fermentation of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013;38:15764–15769.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.047>

[35] Łukajtis R., Hołowacz I., Kucharska K., Glinka M., Rybarczyk P., Przyjazny A., Kamiński M. Hydrogen production from biomass using dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;91:665–694. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043>.

[36] Liu I.C., Whang L.-M., Ren W.-J., Lin P.-Y. The effect of pH on the production of biohydrogen by clostridia: Thermodynamic and metabolic considerations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011;36:439–449.

[37] Ruggeri, B. *BioH₂ & BioCH₄ Through Anaerobic Digestion* / B. Ruggeri, T. Tommasi, S. Sanfilippo.– London: Springer-Verlag, 2015.

Транслитерация по BSI



ICPEME 2021

The 5th International Conference on Power, Energy and Mechanical Engineering

Join us in Shanghai for the 5th International Conference on Power, Energy and Mechanical Engineering (ICPEME 2021) during Feb.01-03, 2021, the preeminent academic Conference in the field of Power, Energy and Mechanical Engineering. Organized and supported by University Lisbon, Portugal, and Washington University in St. Louis, USA, Université Grenoble Alpes, France, etc.

It dealing with new developments in theory, analytical and numerical simulation and modeling, experimentation, demonstration, advanced deployment and case studies, results of laboratory or field operational tests. Plan now to be part of this exceptional conference, as an attendee, event sponsor, or exhibitor. ICPEME 2019 is where you will meet and network with energy leaders, business innovators, researchers, academics and policy makers from across the globe.

Besides being the location of the 5th ICPEME, Shanghai also boasts one of the greatest concentrations of cultural attractions in the world. From The Oriental Pearl Tower to Huang Pu River, from Shanghai Municipal History Museum to The Jade Buddha Temple and The Shanghai Museum etc, you could spend endless days exploring Budapest.

Conference Proceedings

Accepted papers will be published into E3S conference proceedings, which will be indexed by EI Compendex, SCOPUS etc. Instructions submission can be browsed [here](#). Any further questions or check papers' status, please mail icpeme@scie.org.

ICPEME 2019- E3S proceedings with eISBN 2267-1242 vol. 95, online, Scopus, EI Compendex successfully

<http://icpeme.com/>

