DOI: *10.25515/PMI.2017.5.540*

УДК 547.211:542.943

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНЫХ ЯЧЕЕК

В.М.ШАБЕР[1], **И.В.ИВАНОВА**[2]
[1] *Bio Eco Power, Стокгольм, Швеция*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Статья посвящена решению комплекса проблем, которые возникают на малых и средних очистных комплексах, заводах по производству газа и электростанциях малой и средней мощности, связанных с переработкой сырого метана и возможности уменьшения парникового эффекта.

Экономическая целесообразность разработки топливных ячеек (ТЯ) на сыром биометане была показана авторами в прежних публикациях.

Специфика решения задач ориентированна на малые и средние очистные комплексы, заводы по производству газа и электростанции малой и средней мощности.

Цель исследования – показать возможность решения многокомпонентной задачи развития топливных ячеек, включая экспериментальное определение реального использования формиата натрия в качестве восстановителя для производства электроэнергии в топливном элементе (ТЭ).

Результаты – доказана возможность решения вопросов снижения выбросов парниковых газов в атмосферу при переработке отходов продуктов жизнедеятельности человека. Показан способ преобразования выбросов метана и двуокиси углерода в полезные продукты.

***Ключевые слова*:** синтез-газ, топливная ячейка, топливный элемент, производство электроэнергии

Как цитировать эту статью: Шабер В.М. Перспективы развития топливных ячеек / В.М.Шабер, И.В.Иванова // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 540-546. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.540

Введение. В последние годы топливные элементы не используются и причин тому много: стоимость всех видов топливных ячеек чрезвычайно высока – не менее 1000 евро/100 Вт, высокая стоимость «сухого» водорода очистки класса 99,95 %. Обычно этот факт проходит мимо внимания большинства «непосвященных» и глаз замечает лишь высокий КПД, низкую стоимость эксплуатации, длительное время наработки на отказ. Несмотря на гарантированно долгое время функционирования (5-10 лет), сохраняется высокая окупаемость. Эксплуатация топливных ячеек с учетом стоимости ликвидации аварий в сравнении с атомными энергетическими сооружениями низка уже во многих странах. Даже сравнительно небольшая (обычная) авария на гидроэлектростанции (например, трещина плотины) исключает низкую стоимость электроэнергии.

Статья посвящена решению комплекса проблем, которые возникают на малых и средних очистных комплексах, заводах по производству газа и электростанциях малой и средней мощности, связанных с переработкой сырого метана и возможности уменьшения парникового эффекта.

Методы исследования. В работе были использованы различные методы: математическое моделирование, математическая статистика, методы анализа органической химии и методы анализа электрохимии: метод окислительной конверсии метана в синтез-газ $CO + H_2$; метод использования топливной ячейки на формиате натрия и промышленный способ получения муравьиной кислоты.

Метан и двуокись углерода – два побочных продукта, которые усиливают парниковый эффект и удорожают получение электроэнергии.

Вместе с тем одновременно с производством электроэнергии возможна переработка сырого метана в топливной ячейке.

Выбросы наибольшей массы метана происходят при добыче угля, нефти и природного газа. Более 40 % связано непосредственно с человеческой деятельностью: утилизация сельскохозяйственных отходов и сточных вод, сжигание растительных остатков на полях и биомассы. В то же время количество сельскохозяйственных выбросов остается на одном и том же уровне, выбросы от добычи ископаемого топлива существенно увеличиваются. Особенно это касается угледобычи в Китае [13].

Следует ввести обязательные правила по сокращению выбросов, если будет ясно, что ископаемые виды топлива становятся основной проблемой.

Метан представляет собой мощный парниковый газ. Через 100 лет воздействие метана на климат станет в 25 раз больше, чем действие углекислого газа, а через 20 лет метан создаст парниковый эффект в 72 раз бóльший, чем сейчас углекислый газ. Поэтому очень важно ограничивать выбросы метана и улучшать его переработку.

DOI: *10.25515/PMI.2017.5.540*

В отличие от метана углекислый газ сохраняется в атмосфере длительное время. Однако сокращение количества взрывоопасных газов позволит отодвинуть катастрофу глобального потепления. Выдвигалось много инициатив, в том числе глобальных, по сокращению опасных выбросов. Прилагаются усилия по ограничению выбросов углекислого газа. Определенное беспокойство вызвано тем, что метан может быть использован как предлог, чтобы избежать проблем с углекислым газом.

Метан также присутствует во всех источниках ископаемого топлива, поэтому должен быть утилизирован или испарен. Это взрывчатое вещество. Для расчета количества метана, выбрасываемого в атмосферу, можно использовать данные о наличии нефтяных и газовых скважин в Канаде и спутниковых снимков газовых факелов в мире.

Интерполирование данных на остальной мир дает консервативные оценки.

Существуют хорошие и достаточно дешевые технологии, которые можно применить для снижения выбросов ископаемого метана, но для их использования нужны международные соглашения. В преддверии Саммита по климату в Копенгагене (2009 г.) было подано на рассмотрение несколько проектов для реализации в китайских угольных шахтах. Но проекты не были реализованы, так как сократился рынок, который использовали для продажи технологии этого производства.

Метан является одним из так называемых парниковых газов, которые способствуют потеплению климата Земли. Вклад метана в парниковый эффект, возможно, завышен, так как расчетные модели не учитывают высоту нахождения газа в атмосфере при расчете его согревающего эффекта. Этот вопрос исследовался в Институте Макса Планка в Германии [20].

Наиболее важным из парниковых газов является углекислый газ. Несмотря на то, что метан присутствует в значительно меньших концентрациях, чем углекислый газ, он, по оценкам специалистов, влияет на потепление. Происходит это из-за его «нагревающего эффекта», который в 10 раз больше, чем от углекислого газа. За последние 10 лет концентрация метана в атмосфере выросла более чем в 2 раза.

Рассмотрение нашей задачи связано с решением проблемы использования метана, содержащегося в переработке сельскохозяйственных отходов и отходах продуктов жизнедеятельности человека. Конкретные данные были приведены в [1]. Что же у нас есть? Практически все очистные сооружения (Швеция, Канада) уже давно оборудованы аппаратами получения сырого метана в средней пропорции: 65 % CH_4, 35 % H_2O и CO_2. Множество таких сооружений (заводов по производству газа) производят синтетический биометан (примерно 95-97 % метана). Зачастую этим заняты сельскохозяйственные кооперативы в качестве побочной деятельности. Из синтетического биометана (метана высокой очистки и сушки) получают жидкое топливо – горючее для автотранспорта. Стоимость такого топлива почти в 2 раза превышает стоимость обычного горючего [1, 9, 14, 17, 18]. Основные затраты электроэнергии приходятся на сушку. Какой же потребитель, несмотря на общественное убеждение о важности экологии, может покупать такое топливо? Это возможно только для государственного автотранспорта, существующего на дотации и не платящего налогов. Действительность много хуже. Известный случай – в коммуне, недалеко от Стокгольма, на очистных сооружениях находятся два реактора производительностью 1600 м^3 в сутки, но работает лишь один – мощностью 800 м^3. Из них примерно 200 м^3 просто сжигается на факеле и при этом платится налог за производство двуокиси углерода. Остаточный метан сжигается для получения тепла. Это совершенно обычная картина и не только в Швеции. Зачастую и синтетический биометан также сжигается – дорогой продукт продать не просто. В открытых публикациях такая информация отсутствует.

Что же можно сделать уже сейчас, не дожидаясь очередной научно-технической революции? Ответ – использовать сырой метан для получения электроэнергии [1]. Наиболее подходящий способ переработки сырого метана – конверсией в риформере [4].

Углекислотная конверсия метана в синтез-газ. Это одна из важнейших химических реакций**,** пригодная для промышленного получения водорода и дающая начало синтезу углеводородов **(**жидкое топливо**)** и других технически ценных продуктов.

Существует три метода окислительной конверсии метана в синтез-газ $CO + H_2$:

• паровая конверсия

$$CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H_2,$$

$$\Delta H = +206 \text{ кДж/моль}; \quad (1)$$

DOI: *10.25515/PMI.2017.5.540*

• парциальное окисление кислородом

$$CH_4 + 1/2O_2 \rightleftarrows CO + 2H_2,$$

$$\Delta H = -35{,}6 \text{ кДж/моль;} \quad (2)$$

• углекислотная конверсия

$$CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2CO + 2H_2,$$

$$\Delta H = +247 \text{ кДж/моль.} \quad (3)$$

В промышленности используется практически лишь метод паровой конверсии (1). Реакцию проводят при нанесенном Ni-катализаторе и высокой температуре (700-900 °С). Что касается реакции (2), то на ее основе фирмой «Shell» был разработан технологический процесс в некаталитическом варианте при очень высоких температурах (1100-1300 °С), реализованный на небольшом заводе в Малайзии. К сожалению, по последним сведениям из-за аварии этот завод сейчас не работает. Реакция (3) пока находится в стадии исследования на уровне лабораторных и пилотных испытаний.

Как следует из уравнений (1)-(3), количественный состав образующегося синтез-газа в этих реакциях различный: в реакции (1) получается синтез-газ состава CO: H2= 1:3, в реакции (2) – смесь 1:2, в реакции (3) – смесь 1:1. Потребность в синтез-газе того или иного состава определяется его последующим техническим назначением. Так, для синтеза метанола требуется синтез-газ состава 1:2:

$$CO + 2H_2 \rightleftarrows CH_3OH.$$

Итак, из метана при помощи риформера мы получаем моноксид углерода CO и водород H_2 [2, 10-12, 15]. В настоящее время пока никакого прогресса в этой области не наблюдается, окись углерода при получении в риформере все также используется в двигателях, если не сжигается, и с крайне низким КПД.

При использовании топливных ячеек (ТЯ – Fuel Cell) достаточно разработанным способом является водородная ТЯ. Водородная технология существует почти 200 лет и никаких прогрессивных решений не предлагает, за исключением некоторых инженерных решений и небольших инноваций.

В ТЯ можно использовать множество газов, жидкостей, если есть носители (анионы, катионы). Это уже известно давно. Выбор компонентов для ТЯ сужает требования по температуре, коррозионной стойкости и пр.

Существует способ обойти множество и экологических, и энергетических проблем с использованием топливной ячейки на формиате натрия.

Еще в 1856 г. Марселен Бертло синтезировал формиат из угарного газа.

Бертло в 1856 г. поставил серию экспериментов по синтезу муравьиной кислоты. При пропускании угарного газа через твердый нагретый гидроксид натрия образуется соль муравьиной кислоты – формиат натрия:

$$NaOH + CO \longrightarrow H-C(=O)-ONa.$$

Вытеснить муравьиную кислоту из ее соли можно действием раствора более сильной серной кислоты:

$$2H-C(=O)-ONa + H_2SO_4 \longrightarrow 2H-C(=O)-OH + Na_2SO_4.$$

До сих пор этот процесс – главный промышленный способ получения муравьиной кислоты. Взаимодействие угарного газа с твердым гидроксидом натрия происходит под давлением 600-800 кПа и температуре 120-150 °С.

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.540

Известно, что основной составляющей стоимости химических процессов является энергия. Если можно получить на водородной ТЯ дешевую электроэнергию, то и можно производить дешево муравьиную кислоту, формиат натрия, метанол. Электричество – самый затратный продукт. При наличии очистных сооружений, аппаратов для риформинга и топливных ячеек стоимость энергии минимальна.

Если недорого производить формиат натрия или муравьиную кислоту, эти продукты можно продать не увеличивая количество парниковых газов.

Есть и еще один положительный аспект применения формиата натрия.

Разработан топливный элемент для получения электроэнергии из негорючего вещества – формиата натрия. Эксперименты показали, что такой топливный элемент может работать без использования благородных металлов, а значит, дешевле в производстве. При работе топливного элемента отсутствуют выбросы углекислого газа, окиси азота и других токсичных веществ. Энергоноситель нетоксичен и биоразлагаем [5]. В топливном элементе «сгорает» формиат.

Цель исследования – экспериментальное определение реального использования формиата натрия в качестве восстановителя для производства электроэнергии в топливном элементе.

Формиат натрия – биологическое вещество природного происхождения. В топливной ячейке окисляется до двуокиси углерода, он не горюч и не взрывоопасен. Такое «топливо» не требует специальных мер обеспечения безопасности, они сводятся к нулю, в отличие от водорода, имеет высокую плотность. Анион формиата натрия – достаточно химически активный восстановитель, окисляется на электроде. В результате этого его заряд на графите

$$HC(O)O^- = HC(O)O^* + e^-;$$
$$HC(O)O^* = OC^*OH;$$
$$OC^*OH + H_2O = OC(OH)_2 + H^*;$$
$$H^* + C = H^*\ldots C;$$
$$H^*\ldots C = H^+ + C + e^-.$$

Таким образом, формиат отдает два электрона.

Графит не имеет ярко выраженную каталитическую активность, но при этом процесс идет с достаточной скоростью.

Кислород, растворенный в электролите, восстанавливается на графите в реакции между водой и щелочной средой:

$$O_2 + C = O_2\ldots C;\ O_2\ldots C + 2e^- = O_2^{2-} + C;$$
$$O_2^{2-} + H_2O = 2OH^- + O;$$
$$O + C = O\ldots C;$$
$$O_2\ldots C + 2e^- = O_2^{2-} + C;$$
$$O_2^{2-} + H_2O = 2OH^+.$$

Ионы гидроксида переносят заряд аниона к мембране:

$$2OH^- + R - S(O)_2^- H^+ = H_2O + R - S(O)_2^-.$$

Но возникает дополнительный противоположный потенциал, в то же время гидратированные протоны через мембрану проходят беспрепятственно. Последнее обстоятельство снижается ЭДС теоретического значения. Кислород, растворенный в электролите, восстанавливается на графите путем реакции в кислой среде:

$$O_2 + C = O_2\ldots C;$$
$$O_2\ldots C + 2e^- = O_2^{2-} + C;$$
$$O_2^{2-} + 2H^+ = 2H_2O + O;$$
$$O + C = O\ldots C;$$
$$O\ldots C + 2e^- = O_2^{2-} + C;$$
$$O_2^{2-} + 2H^+ = 2H_2O.$$

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.540

Результаты и их обсуждение. Активность формиата натрия в качестве восстановителя в процессе окисления с различными окислителями: кислорода из воздуха и перекиси водорода – высокая. Даже при низких концентрациях окисляющего агента обладает устойчивым эффектом. Это значит, что электрокаталитическая активность графитового электрода была достаточной для непрерывной работы топливного элемента в течение длительного времени (см. таблицы). Время каждого эксперимента 50 мин.

Результаты эксперимента, выполненного для ТЯ с мембраной

Электролит	ЭДС, мВ	*U*, мВ (нагрузка 2 кОм)	*I*, мА
Атмосферный кислород (15 мг/л) – среда NaOH (1 моль/л)	81	70	34
Кислород в воде (15 мг/ л)	135	100	50
H_2O_2 20 % по объему	330	302	149
Кислород (15 мг/л), $NaHCO_3$, раствор 1 моль/л	208	80	41
Кислород (15 мг/л), H_2SO_4, раствор 1 моль/л	381	–	150
Кислород (15 мг/л), H_2SO_4, раствор 0,2 моль/л	636	–	–
Кислород (15 мг/л), H_2SO_4, раствор 0,1 моль/л	465	405	205

Во время эксперимента напряжение было достаточно стабильным. Относительно низкое значение ЭДС связано с высоким сопротивлением мембраны. В качестве катионообменной мембраны использовался Tofion (Германия), сульфированный фторполимер. Носители заряда – гидратированный катион водорода. Этим достигается значительный эффект и концентрация кислоты. Лучшая концентрация соответствует 0,2 моль/л серной кислоты. По мере увеличения концентрации кислоты ионная сила раствора увеличивается, соответственно вследствие набухания изменяется проводимость мембраны. Поэтому, когда концентрация кислоты превышает моль/литр, ЭДС снова уменьшается.

Исследования показали, что наличие риформера, сырого метана, двуокиси углерода, воды и электроэнергии без особых сложностей позволяет производить необходимые в различных областях продукты. В том числе и те, которые могут быть применены при решении наших проблем.

Экономичный способ получения муравьиной кислоты окислением формальдегида. В ряде реакций концентрации продуктов и реагенты в процессе вычисляются для различных временных периодов. Операция моделируется как производство муравьиной кислоты (HCOOH) путем окисления формальдегида (HCHO). Во время окисления происходит побочная реакция, в которой формальдегид взаимодействует сам с собой с образованием метилформиата ($HCOOCH_3$):

$$HCHO(g) + 1/2\,O_2(g) \underset{k_{12}}{\overset{k_{11}}{\rightleftarrows}} HCOH(g), \quad \Delta H_f = -279 \text{ кДж/моль}^{-1}; \tag{4}$$

$$2HCHO(g) \underset{k_{22}}{\overset{k_{21}}{\rightleftarrows}} HCOOCH_3(g), \quad \Delta H_f = -226{,}9 \text{ кДж/моль}^{-1}. \tag{5}$$

Обозначим уравнение (4) как желаемую реакцию, (5) – нежелаемая побочная реакция, где формальдегид реагирует сам с собой и образует метилформиат ($HCOOCH_3$). Обе реакции протекают в газовой фазе, предполагаются элементарными, и в процессе применяется титан-ванадиевый оксидный катализатор.

Для получения относительно максимального количества муравьиной кислоты необходим длительный период времени.

Метод получения муравьиной кислоты окислением метана на катализаторе. Этот метод достаточно известен, хорошо разработан и прост:

$$2CH_4 + 3O_2 \xrightarrow{t,\text{кат}} 2HCOOH + 2H_2O\,.$$

Получение формиата взаимодействием угарного газа CO со щелочью:

$$CO + NaOH \xrightarrow{120\text{–}130\,^\circ C,\ 0{,}6\text{-}0{,}8\ \text{МПа}} HCOONa;$$

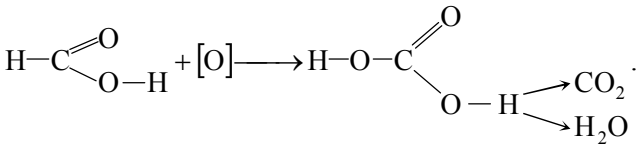
$$HCOONa + HCl \longrightarrow HCOOH + NaCl.$$

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.540

Наиболее выгодным способом (с точки зрения экономических затрат – безотходный процесс) получения муравьиной кислоты является получение сложного эфира муравьиной кислоты (с последующим кислотным гидролизом) из угарного газа и предельного одноатомного спирта [8]:

$$CO + ROH \xrightarrow{80\ ^\circ C,\ P=3\ МПа,\ RONa} HCOOR;$$

$$HCOOR + H_2O \xrightarrow{H^+} HCOOH + ROH;$$



Одной из попыток применения муравьиной кислоты – альтернативы аккумуляторных батарей и водородных емкостей – был электромобиль [16, 19, 21].

Некоторые из этих процессов могут быть использованы в топливных элементах (*FuelCellstack*). Тоновый метод получения муравьиной кислоты – соединение молекул водорода и двуокиси углерода. В этом случае, возможно, что муравьиная кислота – горючее будущего.

Однако теплота сгорания муравьиной кислоты небольшая, расчет по формуле Менделеева дает 5,74 МДж/кг, по Гессу 5,62 МДж/кг, в справочнике Корольченко [3] – 4,58 МДж/кг. Это для современного автомобиля немного маловато, хотя экологические претензии высоки.

Приведем несколько решений, которые могут быть полезными при производстве электроэнергии при помощи топливных элементов [7].

Главное достоинство этой разработки – получение электроэнергии при производстве химических продуктов и в процессе переработки различных отходов, при попутном производстве химических продуктов достигается технический эффект – снижение затрат электроэнергии, т.е. в процессе очистки сточных вод происходит получение новых ценных химических продуктов.

Системы очистных сооружений практически любого города используют около 30 % всей производимой электроэнергии лишь на очистку сточных вод, что следует всегда учитывать.

Предлагаемая установка [7] относится к области энергетики и устройствам для получения электроэнергии, предназначена для применения в объектах с взрыво- огнеопасной средой. Выработка электроэнергии производится из сточных вод и подается в ТЯ или же используется попутный газ.

Существующие топливные элементы в качестве топлива используют водород, метанол и другие легко воспламеняющиеся, взрывоопасные и токсичные вещества. Для безопасной работы таких устройств требуется их тщательная герметизация, сложные и дорогие устройства подачи топлива и окислителя. Электроды в топливных элементах изготавливаются из драгоценных металлов: платины, палладия. Поэтому они дороги и сложны в изготовлении. Существующие топливные элементы плохо адаптируются для работы во взрывоопасной среде, так как содержат взрывоопасную среду и сложные электрические и механические устройства.

Таким образом, очевидно, что может быть решена задача создания топливного элемента, позволяющего получить электроэнергию из негорючего энергоносителя с применением дешевых электродов.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

• снижение затрат электроэнергии возможно за счет применения ТЭ для утилизации парниковых газов (метана и двуокиси углерода);

• доказана возможность переработки отходов жизнедеятельности человека и преобразование их в полезные продукты;

• после проведения пароуглеродного риформинга, использующего двуокись углерода, производится формиат натрия для получения электроэнергии.

DOI: *10.25515/PMI.2017.5.540*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванова И.В.* Современные перспективы получения газа / И.В.Иванова, В.М.Шабер // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.403-411. DOI 10/18454/PMI.2016.3/40.

2. Конверсия метана и окиси углерода. Джайджест – промышленная безопасность [Электронный ресурс]. 2016. Режим доступа: http://ru.safety.info/post/101416500030003/ (дата обращения 01.12.2016).

3. *Корольченко А.Я.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник: В 2-х ч. / А.Я.Корольченко, Д.А.Корольченко. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. 713 с.

4. *Крылов О.В.* Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Российский химический журнал. 2000. Т. XLIV. № 1. Вып. 1. С. 19-34.

5. *Новиков О.Н.* История биологической очистки сточных вод [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.firmscan.com/page4.html…http://ecoalfa.ru/file/ecoalfa_ru/tezarius.pdf (дата обращения 01.12.2016).

6. Патент РФ 2308125. Способ получения электрической энергии / О.Н.Новиков. Опубл. 10.10.2007. Бюл. № 18.

7. Патент РФ 86796. Топливный элемент / О.Н.Новиков, К.А.Лагутин, Г.А.Белоусов. Опубл. 10.09.2009. Бюл. № 36.

8. *Эткинс П.* Молекулы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 216 с.

9. *Achten W.M.J.* Jatropha bio diesel production and use / W.M.J.Achten, L.Verchot, Y.J.Franken, E.Mathijs,V.P.Singh, R.Aerts, B.Muys // Biomass and Bioenergy. 2005. № 32(12). P.1063-1084.

10. *Ahmed M.* Methanol and formic acid electrooxidation on nafion modified Pd/Pt{1 1 1}: The role of anion specific adsorption in electrocatalytic activity: Electrocatalysis / M.Ahmed, G.A.Attard, E.Wright, J.Sharman // Catalysis Today. 2013. Vol. 202. P. 128-134.

11. *Almazán-Sánchez P.T.* Wastewater treatment of methyl methacrylate (MMA) by Fenton's reagent and adsorption: International Symposium on Advances in Hydroprocessing of Oil Fractions (ISAHOF 2013) / P.T.Almazán-Sánchez, I.Linares-Hernández, V.Martínez-Miranda, V.Lugo-Lugo R.M., G.Fonseca-Montes de Oca // Catalysis Today. 2014. Vol. 220. P. 39-48.

12. *Amin Roohul.* Hydrogen and syn gas production via CO_2 dry reforming of methane over Mg/La promoted Co-Ni/MSU-S catalyst / Roohul Amin, Bingsi Liu, Zhao Biao Huang, Yin Chuan Zhao // International Journal of Hydrogen Energy Available, online, 12 December, 2015.

13. *Axelsson M.G.* Kor inte de storsta metanbovarna. Available at: http://fof.se/tidning/2013/5/artikel/kor-inte-de-storsta-metanbovarna (date of access 04.05.2013).

14. *Bournay L.* New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerine produced by biodiesel plants / L.Bournay, D.Casanave, B.Delfort, G.Hillion, J.A.Chodorge // Catalysis Today. 2005. № 106. P. 190-192.

15. *Braunchweig B.* Electrocatalysis: A direct alcohol fuel cell and surface science perspective / B.Braunchweig, D.Hibbitts, M.Neurock, A.Wieckowski // Catalysis Today. 2013. Vol. 202. P. 197-209.

16. *Ekstrand P.* Myrsyra alternative till batterier och vatgastankar. Available at: www.elbilen.org/myrsyra-alternativ-till-batterier-och-vatgastankar (date of access 15.01.2016).

17. Electricity Research. Electricity from new plants (Sweden). 2007. 40 p. Available at: http://www.elforsk.se/varme/Slutrapport%202383%20Final%20rev_080114_inkl%20Bilagor.pdf (date of access 01.12/2016).

18. *Hernández-Hipólito P.* Biodiesel production with nanotubular sodium titanate as a catalyst: International Symposium on Advances in Hydroprocessing of Oil Fractions (ISAHOF 2013) / P.Hernández-Hipólito, M.García-Castillejos, E.Martínez-Klimova, N.Juárez-Flores, A.Gómez-Cortés, T.E.Klimova // Catalysis Today. 2014. Vol. 220. P. 4-11.

19. Hydrogen Production: Selected papers from the Hydrogen Production Symposium at the American Chemical // Society 234-th National Meeting & Exposition, August 19-23, 2007, Boston. 212 p.

20. *Lelieveldoch J.* Earth system analysis for sustainability / J.Lelieveldoch, P.J.Crutzen; Ed. by H.J.Schellnhuber, P.J.Crutzen, W.C.Clark, M.Claussen, H.Held. London: MIT Press, 2004. 454 p.

21. *Liu X.* Hydrogen and methane production by co-digestion of waste activated sludge and food waste in the two-stage fermentation process: Substrate conversion and energy yield / X.Liu, R.Li, Min Ji, Li Han // Bioresource Technology. 2013. Vol. 146. P. 317-323.

Авторы: **В.М.Шабер**, *канд. техн. наук*, *руководитель проекта*, *viktor.schber@bioecopower.se* (*Bio Eco Power*, *Стокгольм, Швеция*), **И.В.Иванова**, *д-р техн. наук, профессор, rilaba_spb@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 26.12.2016.