

УДК 662.767.2:661.961.62:629.7.064.52

*А.Н. Чусов, М.Ю. Зубкова, В.В. Кораблёв,  
В.И. Масликов, Д.В. Молодцов*

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БИОГАЗОВ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

*A.N. Chusov, M.Yu. Zubkova, V.V. Korablev,  
V.I. Maslikov, D.V. Molodtsov*

## **THE TECHNOLOGY OF USING HYDROGEN-CONTAINING MIXTURES BASED ON BIOGAS IN FUEL CELLS FOR POWER SUPPLY OF AUTONOMOUS CONSUMERS**

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния водородсодержащего топлива с остаточным содержанием метана (2 % об.) на работу низкотемпературного топливного элемента. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования нестандартного топлива в низкотемпературном топливном элементе.

БИОГАЗ. ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЕ ТОПЛИВО. ОСТАТОЧНЫЙ МЕТАН. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ. ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ.

The experimental results of influence hydrogen fuel with residual methane content (2 % vol.) on low-temperature fuel cells are shown. The possibility of using non-standard fuel in low-temperature fuel cells was experimentally confirmed.

BIOGAS. HYDROGEN-CONTAINING FUEL. RESIDUAL METHANE. LOW-TEMPERATURE FUEL CELL. POWER SUPPLY.

В настоящее время основным и наиболее дешевым сырьем для получения водорода служит природный газ. Однако из-за ожидаемого его дефицита и увеличения стоимости уже сейчас ставится задача получения водорода с использованием возобновляемых энергоресурсов — ветровой, солнечной и гидравлической энергии, а также из биомассы с помощью термохимических и биоэнергетических методов. [1]

В работе [2] приведены данные о стоимости производства водорода (с учетом хранения и транспортировки), полученного с помощью различных технологий (рис. 1), в современных условиях и в перспективе до 2050 года.

Анализ этих данных показывает, что сегодня наиболее дешевый способ — получение водорода из природного газа. На втором месте — водород, получаемый из биогаза сельскохозяйственных отходов, который в 1,4–1,7 раза

дешевле водорода, получаемого электролизом, а также с использованием гидравлической либо ветровой энергии, и более чем в 10 раз дешевле водорода, получаемого с использованием электроэнергии от фотоэлектрических установок.

В перспективе следует ожидать удорожания природного газа, вследствие чего производство водорода из биогазов станет примерно в 2 раза дешевле, чем из природного газа. Стоимость водорода из биогаза будет сопоставима со стоимостью электролизного водорода, полученного с помощью электрической энергии гидравлических и ветровых электростанций, и в 4,5 раза дешевле водорода, полученного с использованием фотоэлектрических установок. Таким образом, целесообразность получения водорода из биогазов с последующим его использованием для производства электрической энергии совершенно очевидна.

Относительная стоимость  
1 кВт·ч, приведенная  
к показателю выработки  
электроэнергии на базе  
природного газа на 2005 г.

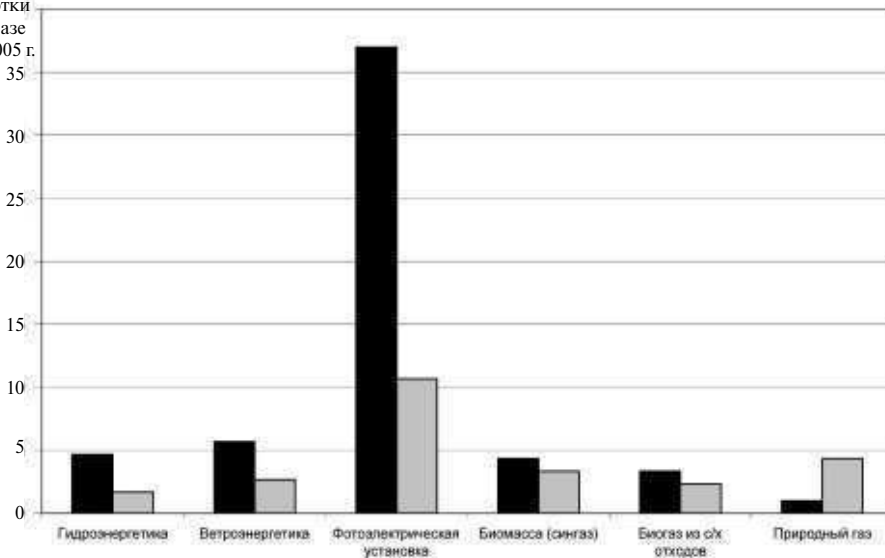


Рис. 1. Относительная стоимость производства водорода с использованием различных технологий (■ — современный уровень; □ — уровень 2050 года)

Биогазовые технологии находят все более широкое применение в местной энергетике, так как являются относительно простыми, недорогими и эффективными способами энергетической утилизации органосодержащих отходов.

Актуальная задача — создание эффективных технологий очистки биогазов для получения газа с содержанием метана 95 % об. и выше в зависимости от требований потребителя. При решении задачи очистки биогаза открывается перспектива получения из него водорода, основным сырьем для производства которого в настоящее время служит природный газ. Получать биогаз можно повсеместно, так как органосодержащие отходы постоянно образуются в процессе хозяйственной деятельности человека, в то время как ресурсы природного газа ограничены, а его использование лимитируется. Технологии получения водорода из отходов — дорогостоящие, поэтому возникает задача снизить затраты, используя имеющийся технологический задел по ключевым звеньям этого процесса.

Особый интерес представляет получение водорода для низкотемпературных топливных элементов, так как они в наибольшей степени подходят для автономных потребителей в широком диапазоне нагрузок — от сотен ватт до нескольких десятков киловатт. Их эффективность во

многом определяется чистотой и стоимостью водорода. За рубежом проводятся работы по получению водорода из биогазов и его использованию в электроснабжении мелких потребителей. Выявлены недостатки установок — низкое (70–80 % об.) содержание водорода в реформате и наличие в нем вредных примесей. Это требует применения дорогостоящих и сложных в эксплуатации систем для его очистки, что приводит к увеличению энергоемкости процесса и снижению эффективности. Поэтому крайне актуальна разработка технологий получения из биогазов относительно дешевого, достаточно «чистого» водорода и способов его прямого использования в низкотемпературных водородных топливных элементах.

В СПбГПУ создан экспериментальный комплекс для исследования процессов получения и использования биогаза, состоящий из следующих модулей: генерации биогаза, его аккумуляции и очистки, реформинга метана с получением водорода и топливного элемента. Экспериментально подтверждено стабильное получение водорода высокой чистоты (98,5 % об.) при подаче биометана (95 % об.) в широком диапазоне нагрузок реформера (30–100 % от номинальной) [3, 4]. Содержание CO в реформате составляет менее 10 ppm. Были так же проведе-

ны эксперименты при использовании «слабого» биогаза, содержащего 30–45 % об. метан. При этом концентрация водорода в реформате остается высокой (более 93 % об). Это расширяет возможности использования в автономной энергетике значительного потенциала «слабых» биогазов с относительно невысокой концентрацией органосодержащей компоненты для получения электрической и тепловой энергии. Низкое содержание остаточного метана открывает возможность прямого использования реформата в топливном элементе, что позволит отказаться от дорогостоящих технологий его очистки. Соответственно, возникает задача использования потенциала вторичного ресурса высококачественного топлива. Наличие остаточного содержания метана в реформате предполагает организацию в системе использования конверторного топлива стадии дорогостоящей очистки водорода от метана [5]. Вопрос о влиянии остаточных количеств метана в водородсодержащей смеси при ее использовании в твердополимерном топливном элементе малоизучен. Известно, что метан не окисляется на аноде низкотемпературного топливного элемента по термодинамическому запрету [6], однако присутствие  $\text{CH}_4$  в газовой водородсодержащей смеси может создать эффект экранирования каталитической

поверхности мембраны топливного элемента, а следовательно, замедлить стадию массопереноса молекул  $\text{H}_2$  и затруднить кинетику окисления водорода [7, 8]. Анализ публикаций по данному вопросу показал отсутствие необходимых данных об экспериментальных исследованиях, касающихся влияния остаточных количеств метана на состояние поверхности твердополимерной мембраны, эффективную площадь поверхности платинового катализатора, вольт-амперные характеристики топливной ячейки, индикаторы мощности при циклировании и в стационарных условиях [9, 10].

Настоящая статья посвящена выяснению принципиальной возможности использования водородсодержащего топлива с остаточным содержанием метана на пятиваттной топливной ячейке с целью оценить возможность использования нестандартного топлива в низкотемпературном топливном элементе.

Для проведения экспериментальных исследований был создан стенд (рис. 2) [3, 4], на котором отрабатывался режим прямой подачи в топливный элемент водородной газовой смеси с остаточным содержанием метана и параллельного тестирования исследуемой ячейки с использованием электролизных водорода и кислорода. Это позволяло проводить сравнительный

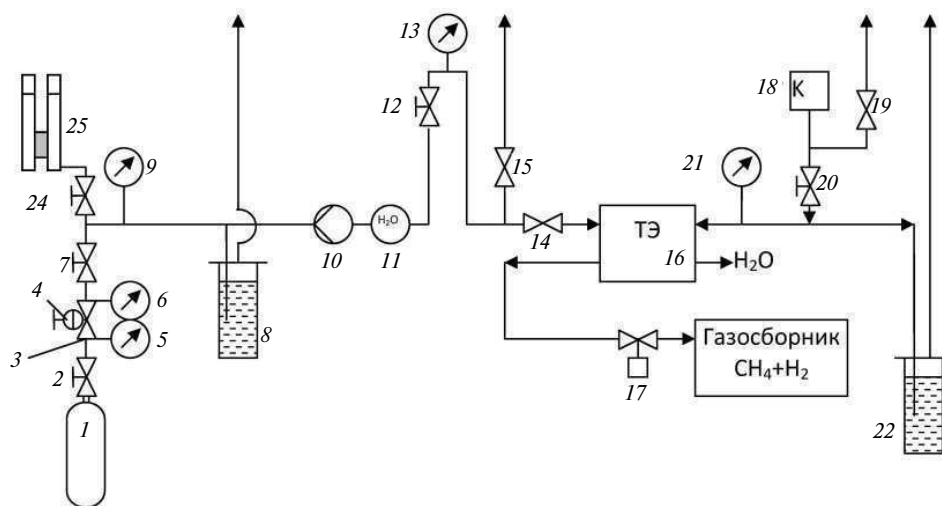


Рис. 2. Принципиальная схема стенда по исследованию использования водородной смеси с остаточным содержанием метана:

1 — баллон с водородно-метановой смесью под давлением; 3 — редуктор; 7, 12, 20 — вентили тонкой регулировки; 8, 22 — жидкостные предохранительные сбросные клапаны; 10 — счетчик газа; 11 — измеритель влажности газа; 16 — топливный элемент; 17 — клапан сброса водорода; 18 — компрессор воздушный; 5, 6, 13, 21 — манометры; 14, 15, 19, 23, 24 — краны; 25 — электролизер

анализ электрохимических характеристик по окислению топлива и отслеживать состояние мембраны топливного элемента после каждого цикла воздействия метаносодержащей смеси.

При прямой подаче водородной газовой смеси, полученной из биогаза [11], реализуется режим периодического автоматического сброса накапливающегося перед мембраной метана, который может создавать запирающий эффект [7]. Тестирование топливного элемента в течение многократных циклов (подача — сброс) позволяет определить его работоспособность и оптимальные режимы работы и оценить возможность использования полученного из биогазов путем двухстадийной конверсии [4] водородного топлива с метановой составляющей в низкотемпературном топливном элементе.

В качестве исходного исследуемого объекта была выбрана топливная ячейка E-Тек ( $P = 5$  Вт), для которой при тестирования на электролизном водороде и кислороде [8] были определены основные рабочие характеристики:

Ячейка.....	E-Тек_12W_MEA_Pol_1
Площадь активной поверхности платины, мг/см <sup>2</sup> .....	6,25
Напряжение холостого хода, мВ .....	940
Номинальная мощность при циклировании, мВт .....	130–160
Номинальная мощность в стационарных условиях, мВт .....	110–120
Омическое сопротивление, Ом·см <sup>2</sup> .....	0,49

Исследования влияния остаточных количеств метана при подаче газовой водородсодержащей смеси в топливную ячейку проводились на газе-имитаторе, состав которого соответствует реформату из топливного процессора (98 % об. H<sub>2</sub> и 2 % об. CH<sub>4</sub>). Скорость подачи водородсодержащего газа составляла ~ 20 мл/мин, что обеспечивало достаточное избыточное давление на мембране топливного элемента (~0,02 атм.). В качестве окислителя использовались электролизный кислород и кислород воздуха, подаваемые в количествах, обеспечивающих стехиометрию окислительно-восстановительного баланса с топливом. Проводилась автоматическая посекундная регистрация реализуемых зависимостей в цифровом и графическом формате; также фиксировался расход топлива (H<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>) в рабочем режиме и при сбросе.

При проведении исследований был реализован ряд последовательных мероприятий по оценке электрохимической восприимчивости ячейки и поддержанию ее потенциальных характеристик на имеющемся уровне с использованием поддерживающего и контролирующего электрохимического оборудования — потенциостата Р-150S в режимах воспроизведения потенциала «холостого хода», циклирования ( $E = f(I)$ ) в заданных пределах для расширения диапазона по току и, соответственно, по мощности, потенциостатирования ( $I = f(t)$ ) в режимах свободного выхода топлива и с «замкнутым концом» (dead end) на электролизном водороде и на водородсодержащей смеси с остаточным содержанием метана и использованием в качестве окислителя как электролизного кислорода, так и кислорода воздуха.

Для оценки соответствия регистрируемого значения электродвижущей силы (ЭДС) заявленным техническим возможностям используемой топливной ячейки каждая серия исследований начиналась с работы на электролизном водороде в режиме «холостого хода» (XX) (рис. 3 — кривая 1).

Для улучшения состояния ячейки после стабилизации потенциала проводилась переполюсовка (рис. 3, кривая 2) с последующим многократным циклированием, в результате чего достигался необходимый «разгон» по току вплоть до 3,5 А (рис. 4), что, как правило, приводило к улучшению показателя ЭДС.

Проведенные тестовые испытания (рис. 5) показали, что водородная смесь, содержащая

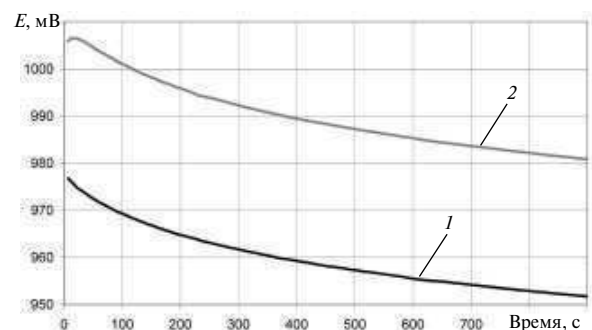


Рис. 3. Изменение потенциала холостого хода во времени:

1 — электролизный водород—кислород; 2 — электролизный водород — кислород после переполюсовки

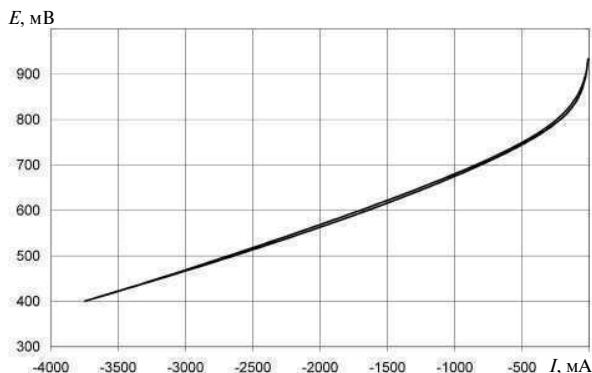


Рис. 4. Зависимость потенциала от тока (циклирование) при прямой подаче газовой смеси ( $H_2$ —98 % об.,  $CH_4$ —2 % об.) в топливную ячейку

2 % об.  $CH_4$  при прямой подаче (dead end) в низкотемпературный топливный элемент в потенциостатическом режиме ( $E = 500$  мВ) с использованием кислорода воздуха в качестве окислителя (кривая 1), достаточно продолжительное время (примерно  $(1,2-1,4) \cdot 10^4$  с) не требует регулировки по сбросу неотработанного топлива с анода [8]. Аналогичная зависимость  $I = f(t)$  при использовании электролизного  $H_2$  (99,999 % об), получаемого с помощью электролизера *Heliocentris* в идентичных по скорости потока и давлению на мембране условиях, представлена кривой 2.

Сопоставление полученных зависимостей показывает, что исследуемая топливная ячейка при прямой подаче как водородосодержащей смеси с остаточным содержанием метана, так и электролизного водорода имеет токовые характеристики одного диапазона.

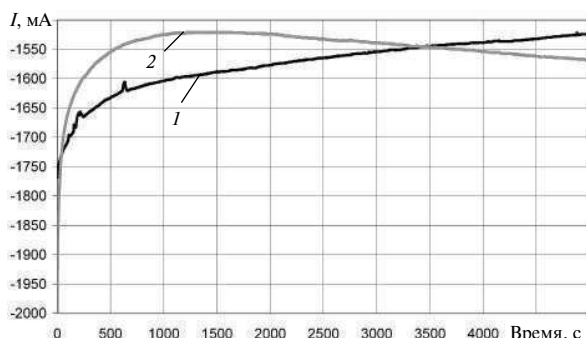


Рис. 5. Зависимость тока от времени (потенциостатирование,  $E = 500$  мВ):  
1 —  $H_2$ —98 % об.,  $CH_4$ —2 % об.; 2 — электролизный  $H_2$

Электролизный кислород и кислород воздуха, используемые в качестве окислителей топлива, воздействуют на ячейку по-разному (рис. 6), и, чтобы в дальнейшем при работе с топливом, содержащим метановую составляющую, выявить воздействие именно неокисляющегося компонента используемого топлива ( $CH_4$ ) на электрохимические параметры ячейки, мы проанализировали изменение характеристик ячейки при замене электролизного кислорода на кислород воздуха. Выявили ухудшение величины потенциала стабилизации (примерно 10 %) в режиме холостого хода при использовании в качестве окислителя кислорода воздуха по сравнению с вариантом, когда использовался электролизный кислород.

Сравнение результатов потенциостатирования в режиме «с замкнутым концом» на водородосодержащей смеси с остаточным содержанием метана (рис. 7) подтверждает сделанные ранее выводы о влиянии окислителя на токовые характеристики ячейки. Видно, что использование стандартного окислителя — электролизного кислорода — дает более высокие значения по току и обеспечивает устойчивый возврат по величине тока после сброса топлива.

Сравнение характеристик топливной ячейки (см. рис. 6 и 7) при использовании двух вариантов окислителя — электролизного кислорода и кислорода воздуха показало, что при работе с водородосодержащей смесью с остаточным количеством метана необходимо учитывать эффект затруднения кинетики протекания окислительно-восстановительных процессов, вносимый

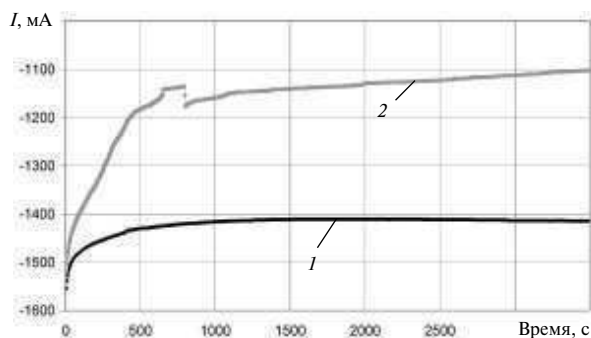


Рис. 6. Изменение тока во времени (потенциостатирование,  $E = 500$  мВ):  
1 — электролизный водород — кислород со свободным выходом; 2 — электролизный водород — воздух со свободным выходом

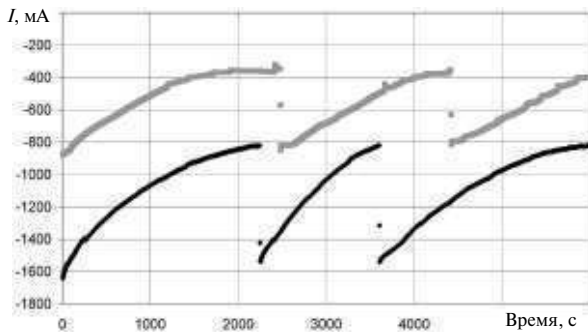


Рис. 7. Потенциостатирование при  $E = 500$  мВ в режиме dead end:

1 — водородсодержащая смесь с остаточным содержанием метана — кислород; 2 — водородсодержащая смесь с остаточным содержанием метана — воздух

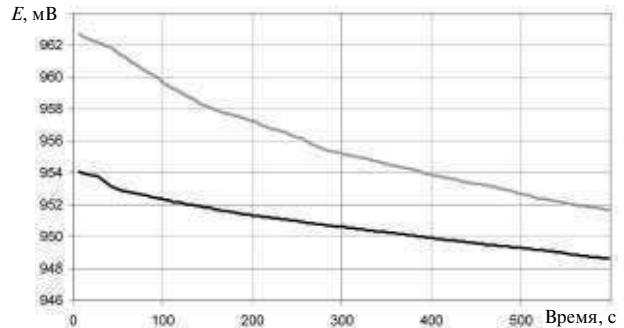


Рис. 8. Изменение потенциала холостого хода во времени в системе «водородсодержащая смесь с остаточным содержанием метана + воздух» с контролем избыточного давления воздуха, режимы:

1 —  $P_{\text{изб}} = 0,017$  бар; 2 —  $P_{\text{изб}} = 0,02$  бар

окислителем, в случае использования в этом качестве кислорода воздуха.

Избыточное давление подачи окислителя (с учетом стехиометрии и кинетики окисления-восстановления) также оказывает влияние на рассматриваемые характеристики топливной ячейки (рис. 8). Заметный избыток кислорода воздуха ( $\sim 20\%$ , режим 1) создает лучшие условия для протекания взаимосвязанных процессов окисления и восстановления. Дальнейшее увеличение избыточного давления подачи окислителя приводит со временем к пересыханию ячейки и ухудшению состояния готовности к работе (режим 2).

Отработанная в ходе этого этапа исследований система мер по подготовке состояния

ячейки к работе, включающая переполюсовку, циклирование с контролирующей регистрацией потенциала в режиме «холостого хода», позволила оперативно отслеживать и учитывать особенности поведения ячейки и воздействовать на ее работу для достижения лучшего результата.

Проведенные исследования режимов работы энергетической установки на водородсодержащем топливе с остаточным содержанием метана 2 % об., позволяют констатировать стабильную работу на таком нестандартном топливе и могут быть положены в основу дальнейших экспериментов по оценке эффективности подобных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуников, Д.О. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов [Текст] / Д.О. Дуников, В.И. Борзенко, С.П. Малышенко [и др.] // Теплоэнергетика. — 2013. №3 — М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2013. — С. 48–57.

2. Lehmann, J. German Hydrogen and Fuel Cell Association [Текст] / Lehmann, J.— Wasserstoff— Der neue Energieträger.— Hydrogeit Verlag, Berlin, 2009.

3. Федоров, М.П. Экспериментальный комплекс для производства водорода из органосодержащих отходов для применения в топливных элементах [Текст] / М.П. Федоров, В.И. Масликов, А.Н. Чусов, Д.В. Молодцов // Научно-технические ведомости СПбГПУ— 2011. №4(135).— С. 35–41.

4. Федоров, М.П. Разработка и создание экспериментального комплекса по оптимизации конверторных процессов получения водорода из биогазов

органосодержащих отходов [Текст] / М.П. Федоров, М.Ю. Зубкова, В.В. Коралёв [и др.] // Тез. докл. 6-й Российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики».— СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2010.— С. 197–198.

5. Лившиц А.И. Сверхпроводимость металлов по водороду и мембранное выделение водорода из газовых смесей [Текст] / А.И. Лившиц // Тез. докл. 4-й Российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики».— СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2007.— С. 1–3.

6. Stroganov A.A., Zubkova M.U. Thermodynamic extent of the ideal fuel cell efficiency [Text] / A.A. Stroganov, M.U. Zubkova // XVI International conference «Chemical Thermodynamic in Russia (RCCT 2007)» and X International conference «Problems Solvatic Complex Formation in Solution». Vol. II.— 2007.— P. 382.

7. **Fedorov, M.P.** Studies of processes direct feed converter biohydrogen in low temperature fuel cell [Text] / M.P. Fedorov, A.N. Chusov, V.I. Maslikov, M.Yu. Zubkova, D.V. Molodtsov // Abstracts of VIII International Conference «Fundamental Problems of electrochemical energy.» Saratov., 2011.— P. 436–439. (rus.)

8. **Федоров, М.П.** Исследование процессов прямой подачи конверторного биоводорода с остаточным содержанием метана в топливный элемент [Текст] / М.П. Федоров, М.Ю. Зубкова, А.А. Томасов, Д.В. Молодцов, Н.К. Зеленина // Тез. докл. 7-й Российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики». — СПб.: Изд-во ФТИ им. Иоффе, 2011.— С. 160–162.

9. **Giddey S., Ciacchi S., Badwal S.P.S.** Fuel Quality and Operational Issues for Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells [Text] / Ionics, 2005. No. 11.— P. 1–10.

10. **Blessing, I.** Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell [Text] / I. Blessing, C. Gardner, M. Ternan // International Journal of Hydrogen Energy.— 2007.— P. 908–914.

11. **Федоров, М.П.** Установки получения водорода из биогаза [Текст] / М.П. Федоров, В.И. Масликов, М.Ю. Зубкова, Д.В. Молодцов, А.Н. Чусов // Матер. конф. ISWA-2011 «Передовые технологии переработки и захоронения отходов: ориентиры применения и критерии выбора. Москва. 31 мая — 2 июня 2011 года.— С. 25–28;

## REFERENCES

1. **Dunikov D.O., Borzenko V.I., Malyshenko S.P., Blinov D.V., A.N. Kazakov.** Prospective technologies biohydrogen in power plants based on fuel cells [Text]. Thermal Engineering.— 2013. № 3.— P. 48–57. (rus.)

2. **Lehmann J.** German Hydrogen and Fuel Cell Association [Text].— Wasserstoff— Der neue Energieträger. Hydrogeit Verlag, Berlin, 2009.

3. **Fedorov M.P., Maslikov V.I., Chusov A.N., Molodtsov D.V.** Experimental complex for the production of hydrogen from organic wastes for use in fuel cells [Text] // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2011, № 4 (135), P. 35–41. (rus.)

4. **Fedorov M.P., Zubkova M.Yu., Korablev V.V., Maslikov V.I., Molodtsov D.V., Chusov A.N., Terukov E.I., Okunev A.G., Lysikov A.I.** Development and creation the experimental complex to optimize the converting process for producing hydrogen from organic wastes biogas [Tekst] // Proc. Reports. 6th Russian Conference «Physical Problems of Hydrogen Energy.» St. Petersburg.— 2010. P. 197–198. (rus.)

5. **Livshits A.I.** Metal membrane superconductivity for hydrogen and release of hydrogen from gas mixtures [Tekst] // Proc. Reports. 4th Russian Conference «Physical Problems of Hydrogen Energy».— St. Petersburg, 2007.— P. 1–3. (rus.)

6. **Stroganov A.A., Zubkova M.U.** Thermodynamic extent of the ideal fuel cell efficiency [Text].— XVI International conference «Chemical Thermodynamic in Russia (RCCT 2007)» and X International conference «Prob-

lems Solvatic Complex Formation in Solution». Vol. II.— 2007.— P. 382.

7. **Fedorov M.P., Chusov A.N., Maslikov V.I., Zubkova M.Yu., Molodtsov D.V.** Studies of processes direct feed converter biohydrogen in low temperature fuel cells of VIII International Conference «Fundamental Problems of electrochemical energy».— Saratov., 2011.— P. 436–439. (rus.)

8. **Fedorov M.P., Zubkova M.Yu., Thomasov A.A., Molodtsov D.V., Zelenina N.K.** Investigation of process direct feed converter biohydrogen with residual methane content in fuel cell [Text] // Proc. Reports. 7th Russian Conference «Physical Problems of Hydrogen Energy».— St. Petersburg.— 2011.— P. 160–162. (rus.)

9. **Giddey S., Ciacchi S., Badwal S.P.S.** Fuel Quality and Operational Issues for Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells [Text] // Ionics.— 2005. No. 11, P. 1–10.

10. **Blessing Ibeh, Gardner Chris, Ternan Marten.** Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell [Text] // International Journal of Hydrogen Energy.— 2007. P. 908–914.

11. **Fedorov, M.P., Maslikov V.I., Zubkova M.Yu., Molodtsov D.V., Chusov A.N.** Plants for hydrogen production from biogas [Tekst] // Materials of Conference ISWA-2011 «Advanced technology for processing and disposal of waste: Guidelines and application of the selection criteria. May 31 – June 2. 2011.— P. 25–28. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЧУСОВ Александр Николаевич** — кандидат технических наук заведующий кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: chusov17@mail.ru

**ЗУБКОВА Марина Юрьевна** — кандидат химических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: marina19zubkova@list.ru

**КОРАБЛЁВ Вадим Васильевич** — доктор физико-математических наук профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: korablev@spbstu.ru

**МАСЛИКОВ Владимир Иванович** — доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmaslikov@list.ru

**МОЛОДЦОВ Дмитрий Владиславович** — старший преподаватель кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kovu@bigcats.ru

#### **AUTHORS**

**CHUSOV Alexander N.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: chusov17@mail.ru

**ZUBKOVA Marina Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: marina19zubkova@list.ru

**KORABLEV Vadim V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: korablev@spbstu.ru

**MASLIKOV Vladimir I.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmaslikov@list.ru

**MOLODTSOV Dmitry V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kovu@bigcats.ru