

**В. Д. НАЗАРОВ
И. С. ЕРИЛИН
М. В. НАЗАРОВ
О. В. СМОРОДОВА**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФЛОТАТОРА

**USE OF SOLID OXIDE FUEL CELL FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY
OF THE ELECTROFLOTATOR**

Предложена схема функционирования электрофлотатора совместно с твердооксидным топливным элементом. Проведены экспериментальные исследования топливного элемента на водородном топливе с получением вольтамперной характеристики и построением кривой зависимости КПД топливного элемента от удельной мощности и тока. Была построена поверхность КПД системы электрофлотатор-топливный элемент и сделаны выводы об экономии электроэнергии и оптимальных площадях активной поверхности исследуемого топливного элемента при работе с электрофлотаторами производительностью до 3 м³/ч.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, электрофлотатор, водород, очистка сточных вод, стоимость топливных элементов

Advances in fuel cells in recent years have made it possible to apply them with high efficiency in various engineering fields. In this paper, a scheme of functioning of an electroflotator was proposed in conjunction with a solid oxide fuel cell. Experimental studies of a hydrogen fuel cell were carried out to obtain a current-voltage characteristic and a curve for the dependence of the fuel cell efficiency on the specific power and current was obtained. The surface efficiency of the electroflotator-fuel cell system was built and conclusions were drawn about energy savings and optimal areas of the active surface of the fuel cell under investigation when working with electroflotators with a capacity of up to 3 m³ / h.

Keywords: solid oxide fuel cell, electroflotator, hydrogen, wastewater treatment, fuel cell cost

Достижения в области топливных элементов в последние годы позволяют применять их с высокой эффективностью в различных областях инженерии. Электрофлотатор представляет собой устройство для очистки воды, в котором в результате электролиза воды вырабатываются газообразные водород и кислород. Данные газы впоследствии используются для адсорбции частиц дисперсной фазы из очищаемой воды. Захваченные частицы вместе с пузырьками газа образуют стойкую пену, которая перемещается в емкость, называемую накопителем флотошлама.

Для увеличения эффективности очистки воды электрофлотатор объединяют с каталитическим блоком, в который поступает вода на доочистку. Доочистка производится путем окисления растворенных органических веществ кислородом, образующимся на анодах в процессе электролиза [1].

Однако процесс электрофлотации является энергозатратным, кроме того, существует вероятность образования взрывоопасной смеси кислорода с водородом. Для решения данных проблем существует вариант объединения электрофлотатора с топливным элементом, при этом водород, выделяющийся в процессе элек-

трофлотации, утилизируется в топливном элементе с генерацией электрической энергии [1].

Топливным элементом (ТЭ) называется устройство генерации электрической энергии в процессе электрохимического окисления топлива. Любой ТЭ состоит из трех основных элементов: анод, катод и электролит. На аноде происходит окисление топлива, на катоде – восстановление окислителя, при этом электроны перемещаются по внешней электрической цепи, а ионы – через электролит. В зависимости от вида ТЭ различается и механизм его работы.

Наиболее эффективными видами топливных элементов являются ТЭ с твердым электролитом, к ним относятся протонообменные полимерные ТЭ (PEMFC), твердооксидные ТЭ (SOFC), протонокерамические ТЭ (PCFC).

В табл.1 представлены основные характеристики твердоэлектролитных ТЭ различных типов.

В ходе работы электрофлотатора из него будет выделяться водород и непрореагировавший в каталитическом блоке кислород, данные газы могут быть успешно поданы в ТЭ, а электрическая связь ТЭ замкнута через электроды электрофлотатора. Таким образом, одновре-

Таблица 1

Основные характеристики твердоэлектrolитных ТЭ

Показатель	PEMFC	SOFC	PCFC (нет промышленных образцов)
Вид топлива	Водород	Водород, синтез. газ, метан, метанол, природный газ	
Температура работы, °C	20 – 100	650 – 1200	400 – 650
КПД по низшей теплоте существующих ТЭ, %	50	60	60 – 65

менно будут решены две задачи: утилизация водорода и повышение энергетической эффективности электрофлотатора.

Рассмотрим схему работы системы на базе SOFC ячейки как на наиболее эффективной, надежной и устойчивой к загрязнениям топлива из промышленно выпускаемых видов топливных элементов.

Предлагаемая схема работы электрофлотатора с SOFC представлена на рис. 1. Принцип работы предлагаемой системы заключается в следующем. Водород, отработавший в электрофлотаторе, поступает в SOFC блок, где он смешивается с рециркулирующим водородом, отсепарированным из выхлопов с анода SOFC, далее он подогревается до температуры, определяемой из условия максимально допустимых температурных напряжений в структуре SOFC

и подается на анод ТЭ. Разность температур между входящими и выходящими из ТЭ потоками обычно не должна превышать 200 – 250 °C [2]. Количество кислорода, уходящего из каталитического блока, недостаточно для окисления всего поступающего на анод водорода, так как часть кислорода была использована при доочистке воды, кроме того, работа ТЭ всегда осуществляется с некоторым избытком кислорода для поддержания высокого парциального давления кислорода на катоде и, следовательно, большего смещения термодинамического равновесия в сторону продуктов химической реакции. Степень утилизации кислорода обычно составляет не более 60 % [3]. В связи с этим необходимо предусмотреть дополнительную подачу воздуха на катод. Таким образом, кислород, непрореагировавший в каталитическом блоке флотатора, смешивается с воздухом и проходит через конденсатор, где из уходящих с анода потоков сепарируется водород и дистиллированная вода в жидком виде. После всех ступеней подогрева обогащенный кислородом воздух подается на катод SOFC. В топливных элементах протекают электрохимические реакции (1) – (3) с генерацией постоянного электрического тока, который частично обеспечивает энергией электродные блоки флотатора, таким образом повышая эффективность системы.

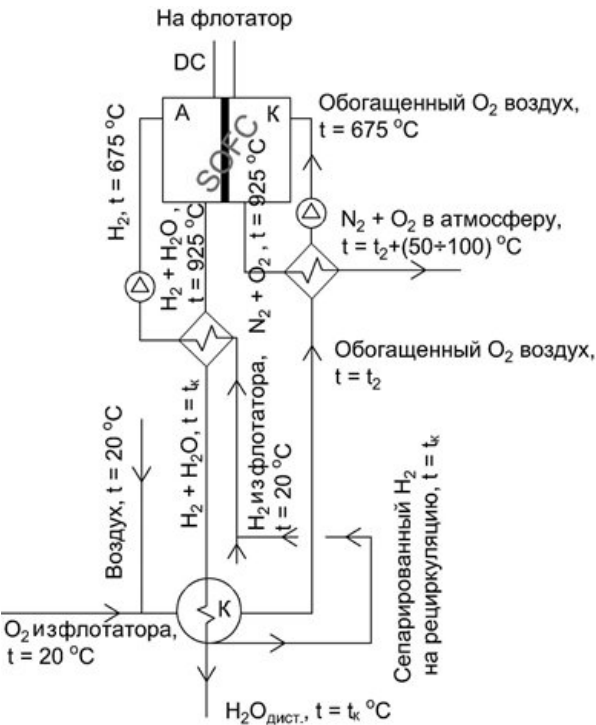
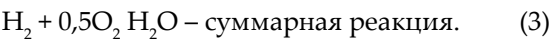
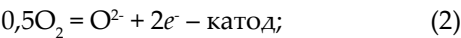
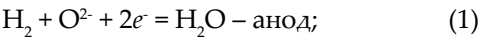


Рис. 1. Схема утилизации водорода из электрофлотатора на базе SOFC

Для целей определения энергетической эффективности работы SOFC на водороде из электрофлотатора проводилось экспериментальное измерение вольтамперной характеристики единичной SOFC ячейки, предоставленной Институтом высокотемпературной электрохимии УрО РАН при средней температуре работы в 800 °C. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

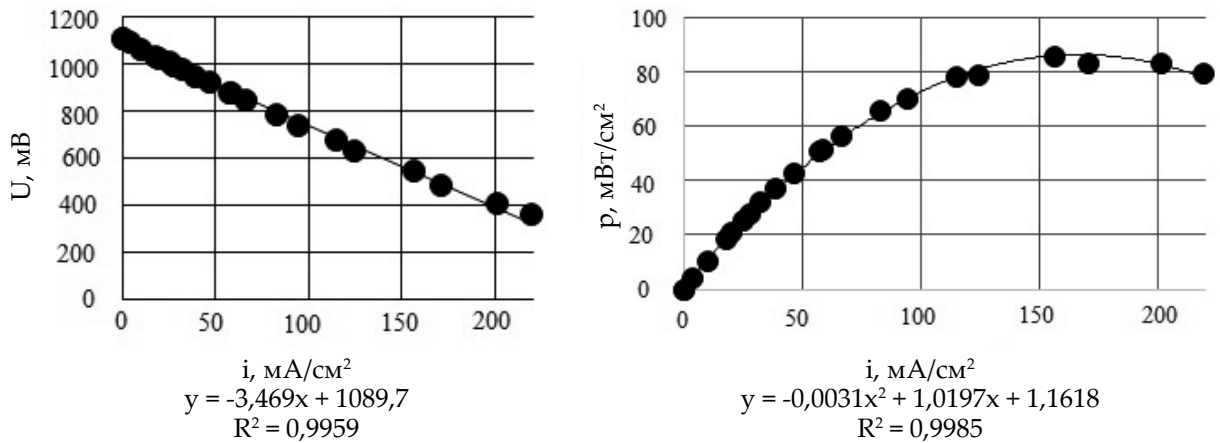


Рис. 2. Вольтамперная и мощностная характеристики ячейки SOFC

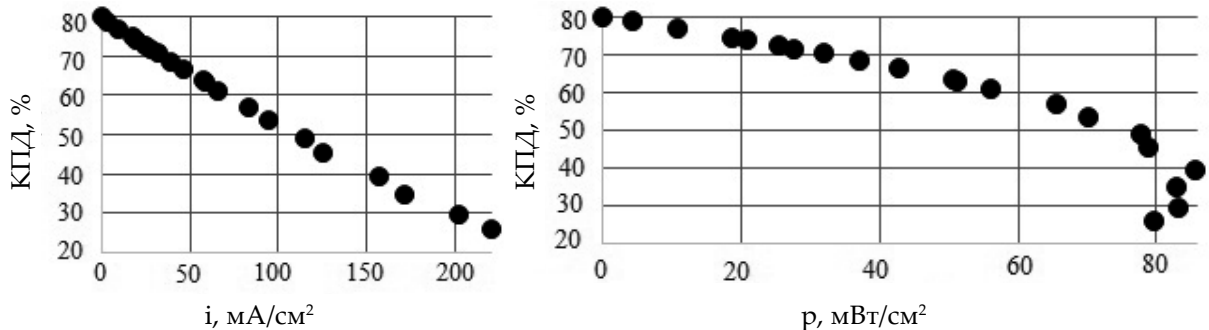


Рис. 3. Зависимость КПД SOFC от тока и мощности

В диапазоне исследуемого значения токов получена линейная вольтамперная характеристика, что указывает на преимущественно омический характер падений напряжения в ТЭ [2]. Мощностная характеристика представляет собой полином второй степени с экстремумом при значении плотности тока 150 мА/см², однако точка максимальной мощности ТЭ не всегда является оптимальным значением для работы, так как следует учитывать КПД топливного элемента, который снижается с ростом мощности.

Исходя из полученной вольтамперной характеристики, электрический КПД топливного элемента η_e , %, может быть найден по формуле [2]:

$$\eta_e = \frac{V_{cell}}{E_{OCV}^{max}} \cdot 100\%,$$

где V_{cell} – напряжение единичного топливного элемента, В;

E_{OCV}^{max} – ЭДС разомкнутой цепи идеального топливного элемента, В.

С учетом того, что необратимость при токах, близких к нулю, у ТЭ весьма низкая, примем:

$$E_{OCV}^{max} = E_{OCV},$$

где E_{OCV} – ЭДС разомкнутой цепи исследуемого топливного элемента, В [2].

Действительный электрический КПД топливного элемента η_e^{real} , %, с учетом неиспользованной энергии топлива определяется из уравнения

$$\eta_e^{real} = \eta_e \cdot U_{H_2},$$

где U_{H_2} – степень утилизации водорода.

Задав степень утилизации $U_{H_2} = 0,8$ [4], построим зависимости КПД SOFC от тока и мощности (рис. 3).

Если при объединении элементарных топливных ячеек используются металлические интерконнекты, то мощность, ток и напряжение являются аддитивными параметрами для систем невысокого напряжения, так как сопротивление металлических интерконнектов пренебрежимо мало [5].

Из рис. 3 определено, что исследуемый SOFC демонстрирует стабильную работу без скачкообразного падения КПД до значений удельной мощности в 70 мВт/см², поэтому эксплуатацию ТЭ целесообразно проводить, не превышая данное значение.

Исходя из измеренного значения тока, по закону Фарадея может быть найден расход топлива $\dot{m}_{H_2}$, г/с, проходящего через активную поверхность SOFC:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{I \cdot \mu_{H_2}}{2 \cdot F \cdot U_{H_2}},$$

где I – ток топливного элемента, А;

μ_{H_2} – молярная масса водорода, г/моль;

F – постоянная Фарадея, Кл/моль.

Тогда подбор SOFC может быть проведен исходя из заданного значения расхода водорода, площади активной поверхности топливного элемента и соответствующего значения КПД. Значение площади SOFC не всегда будет выбираться из условий максимальной мощности, так как с увеличением площади будут расти и капитальные затраты на ТЭ, поэтому окончательный выбор ТЭ определяется технико-экономическим обоснованием. На рис. 4 показана поверхность значений КПД ТЭ при различных расходах водорода и площадях активной поверхности ТЭ. Поверхности подобного рода могут быть построены для любого топливного

элемента при любых коэффициентах утилизации топлива. Исследуемый диапазон расходов водорода выбирался для однокамерных электрофлотаторов производительностью по очищаемой воде до 3 м³/ч, с удельными затратами энергии 0,3 кВт·ч/м³ и напряжением 15 В [1, 6]. В зависимости от планируемой мощности ТЭ необходимо предусмотреть несколько последовательно соединенных ячеек для увеличения напряжения до рабочего. Для эффективной работы ТЭ совместно с электрофлотатором напряжение на зажимах ТЭ должно соответствовать требуемому напряжению электрофлотатора. Однако вопрос максимально возможного количества подключаемых последовательно ячеек требует отдельного рассмотрения в связи со сложностями создания необходимого парциального давления водорода на аноде SOFC каждой элементарной ячейки.

КПД SOFC будет равно отношению экономии электроэнергии электрофлотатор-SOFC системы к электрофлотатору без использования ТЭ (без учета потерь энергии при электролизе). Следует отметить, что затраты электроэнергии на привод вентиляторов влияют на эффективность системы в незначительной степени, так как в случае отсутствия ТЭ необходимо предусмотреть систему вытяжной вентиляции для разбавления выделяющегося водорода [7].

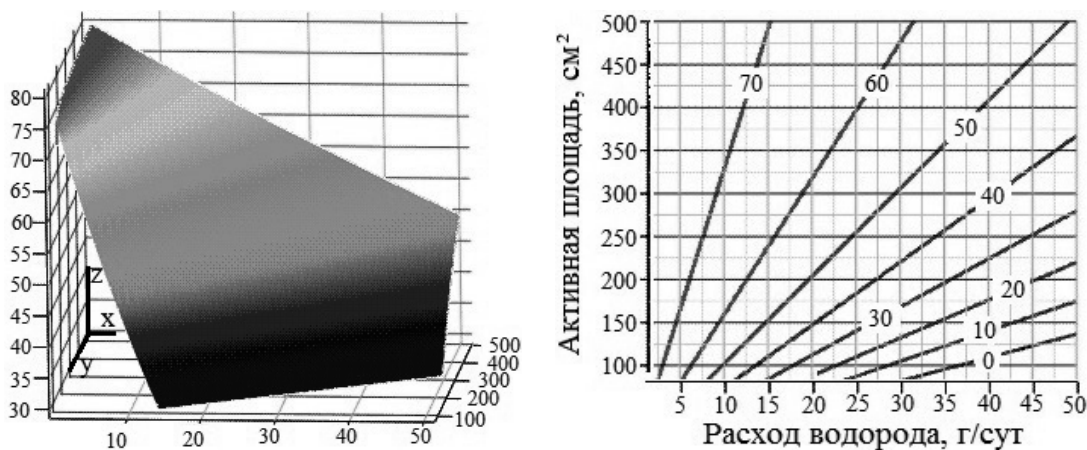


Рис. 4. Поверхность КПД исследуемой электрофлотатор-SOFC системы: z – КПД SOFC, %; x – расход водорода, г/сут; y – активная площадь SOFC, см².

Выводы. В результате исследования была доказана возможность применения SOFC российского производства для целей повышения энергетической эффективности и обеспечения безопасности работы электрофлотационной установки. При этом особенностью данной системы является стабильная работа в широком диапазоне расходов водорода из флотационной установки без значительного паде-

ния КПД или мощности топливного элемента. Оптимальным вариантом для однокамерных электрофлотаторов производительностью по очищаемой воде до 3 м³/ч являются SOFC с площадью активной поверхности в 250 – 500 см². Так, для установки производительностью по очищаемой воде 3 м³/ч (45 г/сут водорода) SOFC с напряжением на зажимах в 15 В и КПД 50 % будет обеспечивать мощность в 500 Вт, что

эквивалентно 55 % мощности рассматриваемого электрофлотатора.

Благодарности: Благодарим коллектив Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН за помощь в предоставлении оборудования и образцов для исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаров В.Д., Зенцов В.Н., Назаров М.В. Водоснабжение в нефтедобыче. Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. 400 с.

2. Dicks A., Rand D.A.J. Fuel cell systems explained. Wiley, 2018.

3. Milewski J., Świrski K., Santarelli M., Leone P. Advanced methods of solid oxide fuel cell modeling. Springer Science & Business Media, 2011.

4. Kupecki J., Motylinski K., Milewski J. Dynamic analysis of direct internal reforming in a SOFC stack with electrolyte-supported cells using a quasi-1D model. Applied Energy, 2018. Pp.198–205.

5. Jin L., Guan W., Niu J., Ma X., Wang W.G. Effect of contact area and depth between cell cathode and interconnect on stack performance for planar solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources, 2013. Pp.796–805.

6. Павлов Д.В., Вараксин С.О., Колесников В.А. Оборотное водоснабжение промышленных предприятий // Сантехника. 2010. №2. С. 30–39.

7. Назаров В.Д., Назаров М.В., Хабибуллина М.Р. Очистка производственных сточных вод электрофлотацией // Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 72–79.

Об авторах:

НАЗАРОВ Владимир Дмитриевич

доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Архитектурно-строительный институт
450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, 195
E-mail: ugntu-vv@mail.ru

NAZAROV Vladimir D.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Water Supply and Waste Water Chair
Ufa State Petroleum Technical University
Institute of Architecture and Civil Engineering
450080, Russia, Ufa, Mendeleeva str., 195
E-mail: ugntu-vv@mail.ru

ЕРИЛИН Иван Сергеевич

магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики
Уфимский государственный нефтяной технический университет
450062, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов 8/3
E-mail: ivanerilin@yandex.ru

ERILIN Ivan S.

Master's Degree Student of the Industrial Heat and Power Chair
Ufa State Petroleum Technical University
450080, Russia, Ufa, Kosmonavtov str., 8/3
E-mail: ivanerilin@yandex.ru

НАЗАРОВ Максим Владимирович

кандидат технических наук, директор ООО «МИП УГНТУ Аквита»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Архитектурно-строительный институт
450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, 195
E-mail: aqvita@mail.ru

NAZAROV Maxim V.

PhD in Engineering Science, Director of LLC «MIP UGNTU Aquita»
Ufa State Petroleum Technical University
Institute of Architecture and Civil Engineering
450080, Russia, Ufa, Mendeleeva str., 195
E-mail: aqvita@mail.ru

СМОРОДОВА Ольга Викторовна

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики
Уфимский государственный нефтяной технический университет
450062, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов 8/3
E-mail: olga_smorodova@mail.ru

SMORODOVA Olga V.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Industrial Heat and Power Chair
Ufa State Petroleum Technical University
450080, Russia, Ufa, Kosmonavtov str., 8/3
E-mail: olga_smorodova@mail.ru

Для цитирования: Назаров В.Д., Ерилин И.С., Назаров М.В., Смородова О.В. Использование твердооксидного топливного элемента для увеличения энергоэффективности электрофлотатора // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, №1. С. 47–51. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.8.

For citation: Nazarov V.D., Erilin I.S., Nazarov M.V., Smorodova O.V. Use of a Solid Oxide Fuel Cell for Increasing the Energy Efficiency of the Electroflotator // Urban Construction and Architecture. 2019. V. 9, 1. Pp. 47–51. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.8.