УДК 544.65

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОТРУБЧАТЫХ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2020 г. С. В. Зажигалов^{*a*, *c*}, М. П. Попов^{*b*, *c*}, А. П. Немудрый^{*b*}, В. А. Белоцерковский^{*b*}, А. Н. Загоруйко^{*a*, *c*, *}

^аИнститут катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия ^bИнститут химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия ^cНовосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия *e-mail: zagor@catalysis.ru Поступила в редакцию 30.12.2019 г. После доработки 14.02.2020 г. Принята к публикации 14.02.2020 г.

Работа посвящена математическому моделированию и экспериментальным исследованиям генерации электрического тока при сжигании водородного топлива в микротрубчатых твердооксидных топливных элементах. Описана технология изготовления топливных элементов и методика проведения экспериментов. Построена математическая модель, описывающая протекание химических реакций, процессов диффузии и теплопереноса. При верификации модели на примере окисления водорода в диапазоне температур 600–850°С определены кинетические параметры, позволяющие добиться наилучшего соответствия экспериментальных и модельных данных.

Ключевые слова: микротрубчатый твердооксидный топливный элемент, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0040357120040168

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимические генераторы на основе твердооксидных топливных элементов (**ТОТЭ**), способные напрямую преобразовывать химическую энергию органического топлива в электроэнергию, особо актуальны для России, поскольку большая часть российских территорий малопригодна для централизованной энергетики.

Концептуально ТОТЭ можно разделить на трубчатые и планарные конструкции. В зависимости от области применения трубчатые ТОТЭ имеют различные размеры от нескольких сантиметров до 2 м для быстрого запуска и большой мощности соответственно. Планарные конструкции могут быть разделены на стеки, содержащие металлические или керамические соединительные элементы, и ячейки с массивными (несущий электролит) или тонкими (несущие электроды) мембранами, толщина которых, как правило, в диапазоне 150–250 и 5–20 мкм соответственно.

В последнее время отдельно выделяют конструкцию ТОТЭ, называемую микротрубчатой (**MT**) [1–4]. К МТ ТОТЭ относят трубчатые элементы, внешний диаметр которых варьируется от 5 мм и ниже. Несущий элемент МТ ТОТЭ, преимущественно анод, получают при помощи метода фазовой инверсии. Главным преимуществом данного метода является то, что размер пор в образце может быть уменьшен постепенно от внешней поверхности к центру микротрубки. Это означает, что контролируемая микроструктура, обеспечивающая улучшенную газовую диффузию и высокую производительность, может также обеспечить оптимальное нанесение электролита. В отличие от обычной экструзии, для электродов, полученных методом фазовой инверсии, достигается снижение поляризационных потерь. Функциональные слои обычно наносят путем контролируемого погружения (dip coating) образца в соответствующую пасту.

Технология МТ ТОТЭ находится на ранней стадии своего развития и привлекает множество исследователей по всему миру. Благодаря высокой пористости и малым размерам МТ ТОТЭ обладают высокой стойкостью к термошоку, что позволит использовать их в устройствах, где требуется высокая скорость запуска (вспомогательный блок питания в грузовых автомобилях, портативные и мобильные устройства и т.п.) [5–13]. Несмотря на то, что большинство проблем, связанных с подбором компонентов МТ ТОТЭ, ре-



Рис. 1. Общая схема процесса окисления водорода на топливном элементе.

шены [1-5], основной проблемой для использования МТ ТОТЭ в электроустройствах является разработка и оптимизация конструкции реактора и в дальнейшем стека. Данное направление является не только сложной фундаментальной, но и комплексной инженерной проблемой. Конструкция рабочей зоны реактора требует решения проблем, связанных с высокотемпературной герметизацией элементов, организацией токосъемов, распределением топлива и окислителя. регулированием температуры печи. Разработка математической модели, описывающей протекающие в МТ ТОТЭ процессы, могла бы помочь в решении данной проблемы. Работы, связанные с математическим моделированием процессов, протекающих в МТ ТОТЭ, как правило, зарубежные [14–18]. В России данное направление еше не освоено.

Цель настоящей работы — изготовление МТ ТОТЭ на основе электролита $Y_{0.08}Zr_{0.92}O_{2-\delta}$ и разработка математической модели высокотемпературного процесса генерации электричества при сжигании водорода. В рамках работы также измерены вольтамперные характеристики полученных единичных МТ ТОТЭ с использованием водорода в качестве топлива и проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами расчетов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Для моделирования стационарного процесса получения тока в реакции окисления водорода на топливном элементе было использовано коммерческое программное обеспечение Comsol Multiphysics.

Описание модели. Математическая модель процесса построена на базе двумерной осесимметричной геометрии в цилиндрических координатах. Учитывая полную осевую симметричность топливного элемента, выбранная геометрия эквивалентна геометрии в трехмерном пространстве.

Общая схема процесса представлена на рис. 1. Таким образом, топливный элемент представляет собой трубку с проницаемыми для газовой фазы внутренним — анодным, внешним — катодным слоями, между которыми находится непроницаемый для газовой фазы слой электролита.

Топливный элемент помещен в воздушную среду, кислород из которой диффундирует в катодном слое, образуя анионы кислорода на границе катод—электролит по реакции

$$O_2 + 4\overline{e} \to 2O^{2-}.$$
 (1)

Во внутреннее пространство элемента подается водород, который вступает в реакцию с анионами кислорода на границе анод—электролит, образуя пары воды:

$$2\mathrm{H}_2 + 2\mathrm{O}^{2-} \to 2\mathrm{H}_2\mathrm{O} + 4\overline{e}.$$
 (2)

В математическом описании материального баланса был использован интерфейс "Transport of Concentrated Species" (3)–(5) для концентраций кислорода и азота во внешнем пространстве и катодном слое и концентраций водорода и воды во внутреннем пространстве и анодном слое:

$$\nabla \cdot j_i + \rho(u \cdot \nabla) \omega_i = 0, \qquad (3)$$

$$j_{i} = -\left(\rho\omega_{i}\sum_{k}D_{ik}\left[\nabla x_{k} + \frac{1}{p}((x_{k} - \omega_{k})\nabla p)\right]\right), \quad (4)$$

$$x_k = \frac{\omega_k}{M_k} M_n, \quad M_n = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i}\right)^{-1}.$$
 (5)



Рис. 2. Общий вид расчетной области.

Реакция на границе раздела электродов и электролита определена следующим образом:

$$-n \cdot j_i = \sum_k M_i R_{i,k}.$$
 (6)

Для описания диффузии анионов кислорода в электролите был выбран интерфейс "Transport of Diluted Species" (7) с реакцией на границе (8):

$$-\nabla \cdot \left(D_{\mathcal{O}_2}^s \nabla c^- \right) = 0, \tag{7}$$

$$-n \cdot j_i = \sum_k R_{i,k}.$$
 (8)

Поле скоростей и давление рассчитывались интерфейсом "Laminar Flow" (9), (10) для внутреннего пространства топливного элемента:

$$\rho(u \cdot \nabla)u =$$

$$= \nabla \cdot \left[-pI + \mu \left(\nabla u + \left(\nabla u \right)^T \right) - \frac{2\mu}{3} \left(\nabla \cdot u \right) I \right], \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0. \quad (10)$$

Тепловой баланс описывался интерфейсом "Heat Transfer in Porous Media" (11) и тепловыделением в ходе реакции на границах электрод электролит (12):

$$\rho C_{P} u \cdot \nabla T - \nabla \cdot \left(\left(1 - \varepsilon_{p} \right) \lambda_{s} + \varepsilon_{p} \lambda \right) \nabla T = 0, \quad (11)$$

$$-n \cdot q = Q. \tag{12}$$

Параметры модели. Общий вид расчетной области (прямоугольник 4.5 × 1.5 см) с учетом воздушного пространства печи вокруг топливного элемента и подводящей/отводящей трубки водорода представлен на рис. 2. На верхней и боковых воздушных границах области заданы температура печи T^* (варьировалась в процессе расчетов и экспериментов от 600 до 850°С) и концентрация кислорода (0.21 об. %). На входной границе водородной трубки задана концентрация (1 мол. д.), расход (300 мл/мин при нормальных условиях) и температура (T^*) водорода.

В качестве используемых материалов газовой фазы были выбраны воздух для внешней области и водород для внутренней области. Теплопроводность электролита (λ_s) определялась оксидом цир-

кония ZrO_2 (около 2.1 Дж/(с м К) в рассматриваемом диапазоне температур), а анода и катода заданием фиксированных значений 35 и 1.5 Дж/(с м К) соответственно. Пористость анодного и катодного слоев составила 0.5 и 0.25.

Скорости реакций (1) и (2) были определены на границе электролита с катодом и анодом соответственно следующим образом:

$$R_{\rm l} = k_{\rm l} \left(c_o - \frac{c^-}{k_{eq}} \right), \tag{13}$$

$$R_2 = k_2 x_H c^{-}. \tag{14}$$

Константы скоростей реакций (13) и (14) и константа равновесия определялись согласно закону Аррениуса $k_i = k_i^0 \exp(-E_i/(R_g T))$ со значе-

ниями параметров предэкспоненты и энергии активации (табл. 1), обеспечивающими наилучшее совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными.

В уравнениях массового баланса необходимо определить коэффициенты бинарной диффузии для кислорода и воды, которые были взяты исходя из табличных значений:

$$D_{\rm H_{2O}} = 7 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \,{\rm m}^2/{\rm c}\,,$$
$$D_{\rm O_2} = 1.8 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.75} \,{\rm m}^2/{\rm c}\,.$$

Твердофазная диффузия в электролите была определена согласно [19]

$$D_{O_2}^s = 1.5 \times 10^{-8} \exp(-8120/T) \text{ m}^2/\text{c}.$$

Тепловой эффект реакций (1) и (2) определен на границе анод—электролит как для брутто-реакции окисления водорода: 241 кДж/моль.

Таблица 1. Кинетические параметры в реакциях (1) и (2)

i	1	2	eq
E_i , Дж/моль	40000	70000	2365
k_i^0	1 моль/(м ² с)	10 м/с	20800

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ том 54 № 4 2020



Рис. 3. Схема реактора для измерения вольтамперной характеристики МТ ТОТЭ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Изготовление микротрубчатых анодных заготовок состава NiO/Y_{0.08}Zr_{0.92}O_{2 - δ} (YSZ) (в соотношении 60/40 мас. %) проводили методом фазовой инверсии. Стехиометрическую смесь NiO (марка "Х. Ч.") и электролита YSZ (марка "Х. Ч.") смешивали с N-метилпирролидоном (марка "Х. Ч.") (в качестве растворителя) и с полисульфоном (марка "Х. Ч.") (в качестве полимера) в пропорции 12 : 4 : 1 соответственно. Полимерную пасту экструдировали через фильеру в ванну с коагулянтом, где полимерная суспензия подвергалась разделению фаз. Полученные анодные заготовки прокаливали при 600°С на воздухе в течение 2 ч для выгорания органического связующего, затем спекали при 1150°С на воздухе в течение 6 ч.

Далее методом погружения (dip coating) последовательно наносили слои электролита YSZ (толщина слоя 10 мкм) и катода $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-z}$ (LSCF) + + $Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-z}$ (GDC) (марка "Х. Ч,") (толщина слоя 20 мкм). Катод состоял из функционального слоя – 50% LSCF плюс 50% GDC и токосъемного слоя – чистый LSCF. Температуры спекания электролита/катода составляли 1400/950°C соответственно.

Изучение морфологии и элементного анализа полученных составов проводили на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM 1000 (ускоряющее напряжение 15 кВ, разрешающая способность 30 нм) с системой рентгеновского элементного анализа SwiftED-TM EDX (EDS).

Измерения вольтамперной характеристики единичных МТ ТОТЭ были выполнены в реакторе, показанном на рис. 3.

Коммутацию анода и катода ТОТЭ ячейки осуществляли при помощи платиновой (диаметр 0.3 мм) и никелевой проволоки. Во внутреннюю часть трубки (анод) помещали спираль из Ni-проволоки. На внешнюю часть трубки (катод) наматывали проволоку в виде спирали (шаг между витками 1.5–2 мм). Для улучшения контакта между намотанной проволокой и катодом места контакта также покрывали платиновой пастой (Heraeus, Германия). Герметизацию ячейки производили при помощи керамического клея. Для этого ячейку склеивали и выдерживали при температуре 130°С в течение 60 мин. Приготовленную таким образом ячейку помещали в безградиентную область печи и проводили восстановление анода при температуре 500°С в течение 120 мин в токе чистого водорода (с внутренней стороны). В качестве окислителя использовался воздух (F = 80 мл/мин). В качестве топлива (F = 300 мл/мин) использовали чистый водород марки "А". Исследования проводили при температурах 600–850°С. Размер ячейки: внутренний/наружный диаметр = 1.4/2 мм; общая длина = 50 мм; длина катода = 15 мм; активная площадь = 0.94 см². Потоки газов контролировали при помощи смесителя газов УФПГС-4 (СоЛО, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования. Результаты моделирования для температуры $T^* = 850^{\circ}$ С представлены на следующих рисунках.

На рис. 4 показано распределение температуры — границы внешней области соответствуют значению 850°С, при этом топливный элемент в процессе реакции нагревается до 880°С.

Рисунок 5 показывает распределение кислорода во внешней области — концентрация кислорода остается почти неизменной.

На рис. 6 показаны концентрации водорода и воды во внутренней области топливного элемента и в анодном слое, здесь наблюдается окисление водорода до воды. При этом реагирует около 1.5 об. % подаваемого водорода.

Сравнение результатов экспериментов и расчетов. В силу того что в процессе экспериментов не регистрировалась концентрация компонентов газовой смеси на выходе, единственным показателем, по которому возможно сравнить представленную модель и проведенные эксперименты, является плотность тока, т.е. количество тока, которое можно получить с заданной площади топливного элемента (граница анод—электролит). Данный показатель пропорционален количеству образуемого водяного пара, таким образом, можно говорить об однозначном соответствии между концентрацией воды на выходе и плотностью тока. В модели этот параметр рассчитывался по следующей формуле:

2020



Рис. 4. Распределение температуры.



Рис. 5. Концентрация кислорода во внешней области (мольные доли).

$$I = \frac{F \int w c_{\rm H_2O} dS}{S_{\rm reac}},$$
 (15)

где F — постоянная Фарадея, S — площадь выходного сечения внутренней области топливного топэлемента, w — аксиальная компонента поля ско- ри

ростей, $c_{\rm H_2O}$ — молярная концентрация паров воды, $S_{\rm reac}$ — площадь реакционной поверхности, т.е. границы анод—электролит (~0.94 см²).

525

На рис. 7 изображена зависимость плотности тока от температуры для модели (кривая) и экспериментов (точки). Видно, что модельная кривая



Рис. 6. Концентрация водорода (сверху) и воды (снизу) во внутренней области топливного элемента (мольные доли).



Рис. 7. Плотность тока в экспериментах (точки) и модели.



Рис. 8. Зависимость плотности тока и максимальной температуры в топливном элементе от расхода подаваемого водорода.



Рис. 9. Зависимость плотности тока и максимальной температуры в топливном элементе от длины топливного элемента.

хорошо описывает полученные экспериментальные данные и модель может быть применена для определения общих закономерностей протекания процесса путем варьирования параметров.

Варьирование расхода подаваемого топлива. В работе предполагалось. что в топливный элемент подается неразбавленный водород, расход которого в экспериментальных исследованиях составлял 300 мл/мин. С помошью математического моделирования было проведено варьирование расхода топлива на входной границе в диапазоне от 1 до 300 мл/мин. Результаты, отражающие плотность тока и максимальную температуру в элементе, представлены на рис. 8. Данные величины взаимосвязаны, так как увеличение температуры ускоряет превращение топлива, и наоборот, окисление водорода вызывает подъем температуры. При малых расхолах волорола наблюлается рост плотности тока и максимальной температуры в топливном элементе (пунктирная кривая), так как растет количество реагирующего водорода. Температурная кривая начинает быстро снижаться, так как подаваемая смесь (850°С) охлаждает топливный элемент. Начиная со значения 30 мл/мин процесс не лимитируется количеством водорода и массопереносом, и плотность тока начинает снижаться, что связано со снижением температуры в элементе. Таким образом, слишком большой расход топлива не приводит к росту эффективности, так как процесс будет лимитирован реакцией окисления водорода.

Варьирование длины топливного элемента. Наибольшая плотность тока была получена при расходе водорода ~50 мл/мин, при этом представляется интересным вопрос, как повлияет на процесс длина топливного элемента. На рис. 9 представлены плотность тока и максимальная температура при варьировании длины топливного элемента в диапазоне от 5 до 70 мм для расхода водорода 50 мл/мин. Наблюдается рост максимальной температуры с ростом длины элемента, так как короткие слои легко захолаживаются и в них температура близка к температуре подаваемого топлива (850°С). Плотность тока растет в длинных слоях, так как в силу роста температуры количество окисляемого водорода растет более чем пропорционально площади реакционной поверхности.

Однако, несмотря на положительную динамику плотности тока в более длинных элементах, температура в них может достигать значений 1000°С, что может оказывать необратимое отрицательное влияние на физико-химические и каталитические свойства топливного элемента.

Полученная математическая модель требует дополнительных экспериментальных исследований, позволяющих более уверенно утверждать о качестве описания процесса моделью. Однако в данной работе представлен подход к моделирова-

нию МТ ТОТЭ, позволяющий использовать модель для различных типов топливных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи метода фазовой инверсии получены пористые анодные заготовки на основе оксида никеля. Методом погружения поэтапно нанесены 5 различных слоев с различной пористостью (пористые функциональные слои, газоплотный электролит, буферный слой и высокопористый катодный токосъемный слой).

Была измерена вольтамперная характеристика единичного МТ ТОТЭ и предложена математическая модель. Показано, что модель адекватно описывает экспериментальные результаты и может быть применена для дальнейших исследований процесса и поиска геометрических и технологических параметров, обеспечивающих наилучшее его протекание.

Варьирование расхода подаваемого топлива, а также длины топливного элемента методом математического моделирования показало, что существуют рекомендуемые диапазоны параметров, обеспечивающие наибольшую эффективность, позволяющие оптимизировать расход топлива, а также избежать перегрева элемента.

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН II.1 (проект ИК СО РАН 0303-2018-0005).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- С_р теплоемкость газовой среды, Дж/(кг К)
- *c*_O, *c*_{H₂O} молярная концентрация кислорода и паров воды, моль/м³
- *c*⁻ молярная концентрация анионов кислорода, моль/м³
- D_{ik} бинарные коэффициенты диффузии, м²/с
- $D_{\Omega_{2}}^{s}$ коэффициент твердофазной диффузии, м²/с
- *F* постоянная Фарадея, Кл/моль;
- *M_i*, *M_n* молярная масса *i*-го компонента и средняя молярная масса раствора, кг/моль

- р давление, Па
- *Q* реакционный тепловой источник, Дж/(м² с)
- *R_{i,k}* реакционный источник для *i*-го компонента, моль/(м² с)
- *S* площадь выходного сечения внутренней области топливного элемента, м²
- S_{reac} площадь реакционной поверхности, м²

- Т температура, К
- и поле скоростей, м/с
- *w* аксиальная компонента поля скоростей, м/с
- *x_k* мольная доля вещества
- λ, λ_s коэффициенты теплопроводности газовой и твердой фаз соответственно, Дж/(с м К)
- μ вязкость среды, Па с
- ρ плотность газового потока, кг/м³
- ω_i массовая доля вещества

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Kendall K., Sales G.* A rapid heating ceramic fuel cell // 2nd International Conference on Ceramics in Energy Applications. London, 1994. P. 55.
- Lawlor V., Griesser S., Buchinger G., Olabi A.G., Cordiner S., Meissner D. Review of the micro-tubular solid oxide fuel cell: Part I. Stack design issues and research activities // J. Power Sources. 2009. V. 193. P. 387.
- Jamil S.M., Othman M.H.D., Rahman M.A., Jaafar J., Ismail A.F., Li K. Recent fabrication techniques for micro-tubular solidoxide fuel cell support: A review // J. Eur. Ceram. Soc. 2015. V. 35. № 1. P. 1.
- Wang W., Qu J., Julião P.S.B., Shao Z. Recent advances in the development of anode materials for solid oxide fuel cells utilizing liquid oxygenated hydrocarbon fuels: A mini review // Energy Technol. 2019. V. 7. P. 33.
- 5. Burer M., Tanaka K., Favrat D., Yamada K. Multi-Criteria Optimization of a District Cogeneration Plant Integrating a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycle, Heat Pumps and Chillers // Energy. 2003. V. 28. № 6. P. 497.
- 6. *Lutsey N., Brodrick C.-J., Lipman T.* Analysis of Potential Fuel Consumption and Emissions Reductions from Fuel Cell Auxiliary Power Units (Apus) in Long-Haul Trucks // Energy. 2007. V. 32. № 12. P. 2428.
- Wakui T., Yokoyama R., Shimizu K.-I. Suitable Operational Strategy for Power Interchange Operation Using Multiple Residential SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) Cogeneration Systems // Energy. 2010. V. 35. № 2. P. 740.
- 8. *Ghosh S., De S.* Energy Analysis of a Cogeneration Plant Using Coal Gasification and Solid Oxide Fuel Cell // Energy. 2006. V. 31. № 2–3. P. 345.
- 9. Lawlor V., Hochenauer C., Griesser S., Zauner G., Buchinger G., Meissner D., Olabi A.G., Klein K., Kuehn S., Cordiner S., Mariani A. The Use of a High Temperature Wind Tunnel for MT-SOFC Testing–Part II: Use of Computational Fluid Dynamics Software in Order to Study Previous Measurements // J. Fuel Cell Sci. Technol. 2011. V. 8. № 6. Article number 061019. https://doi.org/10.1115/1.4004507
- Lawlor V., Hochenauer C., Mariani A., Griesser S., Kuehn S., Klein K., Olabi A.G., Cordiner S., Meissner D., Buchinger G. Scrutiny of MT-SOFC Stack Manifolding Design Using CFD // Open Fuel Cells J. 2012. V. 5. P. 1.
- 11. Wu C.-C., Chen T.-L. Design and dynamics simulations of small scale solid oxide fuel cell tri-generation system // Energy Convers. Manage.: X. 2019. V. 1. Ar-

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ том 54 № 4 2020

n внешняя нормаль

ticle number 100001.

https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2018.100001

- Hering M., Brouwer J., Winkler W. Evaluation and optimization of a micro-tubular solid oxide fuel cell stack model including an integrated cooling system // J. Power Sources. 2016. V. 303. P. 10.
- Cordiner S., Mariani A., Mulone V. An Integrated CFD Approach to Design Micro-Tubular Solid Oxide Fuel Cells // Proceedings of 2008 Second International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies, Cairo, 2008. P. 85.
- Cordiner S., Mariani A., Mulone V. Cfd-Based Design of Microtubular Solid Oxide Fuel Cells // J. Heat Transfer. 2010. V. 132. № 6. P. 1.
- 15. *Sciacovelli A., Verda V.* Entropy Generation Analysis in a Monolithic-Type Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) // Energy. 2009. V. 34. № 7. P. 850.

- Lockett M., Simmons M.J.H., Kendall K. CFD to Predict Temperature Profile for Scale up of Micro-Tubular SOFC Stacks // J. Power Sources. 2004. V. 131. № 1–2. P. 243.
- Serincan M.F., Pasaogullari U., Sammes N.M. Computational Thermal-Fluid Analysis of a Microtubular Solid Oxide Fuel Cell // J. Electrochem. Soc. 2008. V. 55. Nº 11. P. B1117.
- Recknagle K.P., Williford R.E., Chick L.A., Rector D.R., Khaleel M.A. Three-Dimensional Thermo-Fluid Electrochemical Modeling of Planar SOFC Stacks // J. Power Sources. 2003. V. 113. № 1. P. 109.
- 19. *Kilo M., Argirusis C., Borchardt G., Jackson R.A.* Oxygen diffusion in yttria stabilised zirconia—experimental results and molecular dynamics calculations // Phys. Chem. Chem. Phys. 2003. V. 5. P. 2219.