

УДК 544.47;544.65

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕРАЗДЕЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ И ЭЛЕКТРОДАМИ НА ОСНОВЕ ПЛАТИНЫ И МАНГАНИТА ЛАНТАНА, ДОПИРОВАННОГО СТРОНЦИЕМ, В МЕТАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

© 2022 г. М. В. Юсенко^а, В. Д. Беляев^а, А. К. Демин^б, Д. И. Бронин^б, В. А. Собянин^а, П. В. Снытников^а, *

^аФГБУН ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090 Россия

^бФГБУН Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 22/ул. Академическая, 20, Екатеринбург, 620066 Россия

*e-mail: pvsnyt@catalysis.ru

Поступила в редакцию 21.09.2021 г.

После доработки 04.10.2021 г.

Принята к публикации 04.10.2021 г.

Исследованы свойства твердооксидных топливных элементов с неразделенными электродными пространствами (ТОТЭ с НЭП) с электролитом на основе оксида циркония, допированного оксидом иттрия (YSZ), платиновым анодом и катодом на основе манганита лантана, допированного стронцием (LSM), в интервале температур 500–750°C в смеси метана с воздухом. Продемонстрировано, что на LSM конверсия метана при 650°C в реакции окисления не превышает 10%, поэтому LSM можно использовать в качестве катодного материала в ТОТЭ с НЭП. Показано, что ячейка Pt | YSZ | LSM позволяет получать электричество. Максимальные удельная мощность (36 мВт/см²), напряжение (0.85 В) и плотность тока короткого замыкания (132 мА/см²) достигались при 700°C, отношении [CH₄]/[O₂] ~ 1.0 при скорости подачи реакционной смеси 330 см³/мин. Проведенное исследование свидетельствует о возможности создания твердооксидных топливных элементов с неразделенными электродными пространствами, питаемых смесью метана и воздуха, которые способны генерировать электроэнергию. Остающийся после работы ТОТЭ с НЭП метан может быть использован для генерации тепла либо переработан в синтез-газ, применяемый в качестве сырья при производстве, например, аммиака, метанола или углеводов по Фишеру–Тропшу.

Ключевые слова: окисление метана, твердооксидный топливный элемент, неразделенные электродные пространства

DOI: 10.31857/S0453881122010105

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность Института катализа СО РАН с момента его создания и по настоящее время неразрывно связана с решением важных научных и технологических задач по получению, хранению и использованию водорода. Это относится не только к традиционным для химической и нефтехимической отраслям промышленности технологиям, но и достаточно специфическим направле-

ниям, например, применению водорода в ракетно-космической отрасли, для обеспечения потребностей которой в 1971 г. было создано уникальное криогенное гетерогенно-каталитическое промышленное производство жидкого пара-водорода и разработаны эффективные катализаторы для реализации этого процесса [1–11]. К сожалению, единственный крупный и стратегически важный промышленный объект по производству жидкого пара-водорода входил в состав Государственного Чирчикского электрохимического комбината им. И.В. Сталина в Узбекистане и прекратил свое существование вместе с распадом СССР [12].

Новое время ставит новые задачи, и есть надежда, что принятая в августе 2021 г. Правительством Российской Федерации “Концепция раз-

Сокращения и обозначения: ТОТЭ – твердооксидный топливный элемент; ТОТЭ с НЭП – твердооксидный топливный элемент с неразделенным электродным пространством; LSM – керамика на основе La_{1-x}Sr_xMnO_{3-δ}; YSZ – твердый электролит на основе раствора ZrO₂, допированного 8–10 мол. % Y₂O₃.

вития водородной энергетики” придаст импульс к возрождению утраченных технологий [13, 14], воссозданию разрушенных производств и развитию новых наукоемких направлений [15–18]. Современные вызовы по освоению “зеленых” технологий, декарбонизации промышленности, внедрению возобновляемых источников энергии, электрификации, повышению энергоэффективности требуют разработки новых подходов на стыке каталитических и электрохимических технологий. Учитывая известные запасы природного газа, текущее состояние по его разведке и добыче, нет никаких сомнений, что еще на протяжении долгого времени именно метан будет оставаться основным сырьем для получения ценных химических продуктов и использоваться как топливо в энергетике для производства тепла и электроэнергии. В этой связи особую привлекательность представляют высокотемпературные твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) с рабочей температурой 800–1000°C. Они могут потреблять в качестве топлива непосредственно метан, при электрохимическом окислении которого когенируются электроэнергия и тепло, и образуются такие ценные продукты, как синтез-газ и углеводороды C_2 [19].

Длительное время после создания традиционного топливного элемента с разделенными электродными пространствами предпринимались попытки по кардинальному упрощению его конструкции, в результате чего был предложен твердооксидный топливный элемент с неразделенными электродными пространствами (ТОТЭ с НЭП) [20–25]. Конструктивно ТОТЭ с НЭП также состоит из двух электродов (катода и анода) и электролита, но в отличие от традиционных ТОТЭ здесь в анодное и катодное пространства подается одинаковая по составу смесь топлива и окислителя. Такое упрощение конструкции предъявляет специфические требования к катоду и аноду. С одной стороны, они не должны проявлять высокую каталитическую активность в реакции глубокого окисления топлива, а с другой стороны – быть высокоактивными в отношении электрохимического окисления топлива в присутствии окислителя и электрохимического восстановления окислителя в присутствии топлива. Питаемый смесью метана и воздуха ТОТЭ с НЭП функционирует следующим образом. На аноде (в качестве которого могут, например, выступать Pt или Ni) вначале происходит парциальное каталитическое окисление метана с образованием синтез-газа. Затем водород и монооксид углерода электрохимически окисляются до углекислого газа и воды ионами O^{2-} , которые выделяются на катоде. Катодными материалами могут быть Ag, Au или обладающая высокой электронной проводимостью керамика на основе перовскитов $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-\delta}$ (LSM),

реже – кобальтиты типа $Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_3$ [26]. Образующиеся ионы O^{2-} за счет электрохимического восстановления кислорода в присутствии метана через электролит переносятся к аноду. Принципиально ТОТЭ с НЭП могут быть выполнены в двух конфигурациях, отличающихся относительным расположением катода и анода. В одной из них анод и катод наносятся на противоположные стороны твердого электролита, а в другой – на одну сторону, при этом подача смеси метана и воздуха для обеих конфигураций осуществляется одновременно и на анод, и на катод.

Так как электролит в ТЭ служит для транспорта ионов кислорода от катода к аноду, то одними из основных требований, предъявляемых к материалу электролита, являются высокая ионная проводимость и низкая (в идеале – отсутствие) электронная проводимость. Число возможных материалов ограничивается температурой, при которой достигается достаточная ионная проводимость, а также стабильностью в реакционных условиях. Наиболее известны ТОТЭ на электролитах с проводимостью по ионам кислорода. Обычно твердый кислородпроводящий электролит представляет раствор ZrO_2 , допированный 8–10 мол. % Y_2O_3 (YSZ). Другой вариант – электролит на основе SeO_2 , в котором церий частично заменен гадолинием $Se_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9}$. Он обладает сравнимой проводимостью даже при более низкой рабочей температуре [13, 14]. Однако более высокая стоимость этого материала, заметная электронная проводимость в восстановительной среде и низкие механические свойства по сравнению с электролитом на основе ZrO_2 несколько ограничивают его широкое использование в качестве электролита для ТОТЭ.

Основные усилия исследователей в области ТОТЭ с НЭП были направлены на поиск новых материалов для электролита, обладающих повышенной ионной проводимостью, а также более активных электродов. Обобщенная информация представлена в обзорных работах [27, 28].

В настоящей работе исследована каталитическая активность электродов на основе LSM в реакции окисления метана, а также проведено сопоставительное изучение электрохимических характеристик ячеек с неразделенными электродными пространствами и электродами на основе Pt (анод) и LSM (катод) в метан-воздушной смеси.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ТОТЭ с НЭП представлял собой трубку (диаметр – 10 мм, длина – 60 мм, толщина стенки – 0.5 мм) из твердого газоплотного кислородпроводящего электролита YSZ (состава $0.9ZrO_2 + 0.1Y_2O_3$). На внутреннюю поверхность трубки наносили Pt-керамический анод, который полу-



Рис. 1. Общий вид ячейки с неразделенными электродными пространствами (ТОТЭ с НЭП).

чали из пасты, содержащей смесь мелкодисперсных порошков Pt и YSZ (5 вес. %), припеканием при температуре 950°C. На внешнюю поверхность трубки наносили катод из LSM. Катод готовили из пасты, состоящей из смеси мелкодисперсных порошков $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (50 вес. %) и YSZ (50 вес. %). К электролиту пасту припекали на воздухе при температуре 1200°C. Внешний вид изготовленного ТОТЭ с НЭП Pt|YSZ|LSM показан на рис. 1.

Площадь каждого электрода составляла около 4 см². Для снижения поляризации электродов анод и катод пропитывали спиртовыми растворами $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ соответственно, после чего прокачивали на воздухе при 500°C. Содержание оксидов церия и празеодима в электродах составляло около 1 вес. %. Далее эти электроды обозначены как Pt + CeO₂ и LSM + PrO₂. В качестве токовыводов с электродов использовали платиновую проволоку. Ячейку помещали в кварцевый реактор, через который пропускали метан-воздушную смесь ($[\text{CH}_4]/[\text{O}_2] = 0.4\text{--}2.0$) со скоростью 120–360 см³/мин. Реактор нагревали при помощи электрической печи. Эксперименты проводили в проточной кинетической установке при атмосферном давлении в интервале температур 500–750°C. Состав газа на входе в реактор и на выходе из него анализировали на газовом хроматографе Цвет-500 (Россия). Измерение электрических характеристик осуществляли при помощи потенциостата-гальваностата ПИ-50-1 (Россия). За выходом системы на стационарное состояние следили по установлению постоянных концентраций газов на выходе из реактора и по достижению постоянных значений тока и напряжения ячейки.

Для исследования каталитической активности LSM и LSM + PrO₂ в реакции окисления метана на трубку из YSZ наносили только катод площадью 4 см². Как и в случае с ТОТЭ с НЭП, трубку помещали в кварцевый реактор, через который продували метан-воздушную смесь ($[\text{CH}_4]/[\text{O}_2] = 1.32$) со скоростью 120 см³/мин.

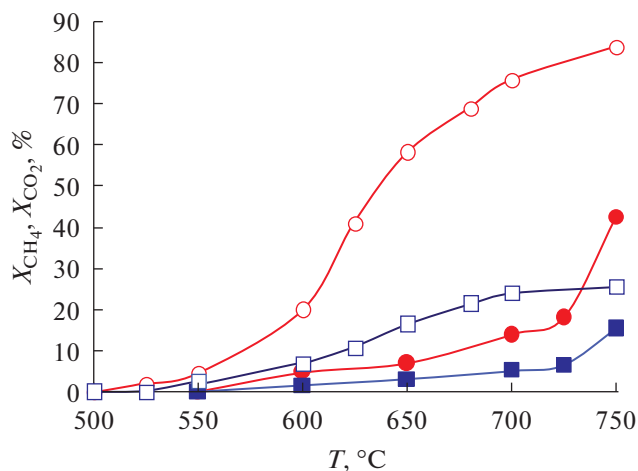


Рис. 2. Зависимости конверсии O₂ (круги) и CH₄ (квадраты) от температуры при окислении метана на LSM (закрытые символы) и LSM + PrO₂ (открытые символы). Скорость потока – 120 см³/мин; $[\text{CH}_4]/[\text{O}_2] = 1.32$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Каталитическая активность LSM и LSM + PrO₂ в окислении метана

При изучении каталитической активности LSM в окислении метана было обнаружено, что с ростом температуры конверсия реагентов увеличивалась (рис. 2).

Видно, что на LSM заметная конверсия метана и кислорода наблюдались при температурах выше 650°C. При 750°C значение X_{CH_4} составляло 18%, а X_{O_2} – 42.5%. Основными продуктами реакции являлись диоксид углерода и вода. Селективность по CO₂ достигала 92.6%. Модификация LSM оксидом празеодима приводила к росту каталитической активности в окислении метана. Заметная конверсия метана и кислорода фиксировались уже при температурах выше 600°C. При 750°C конверсия метана возрастала до 25.8%, а кислорода – до 84.2%. Селективность образования CO₂ превышала 99%.

Учитывая, что на LSM и LSM + PrO₂ протекает только каталитическая реакция глубокого окисления метана и существует широкий диапазон температур, где конверсия кислорода невысока, можно полагать, что эти материалы могут быть использованы в качестве катодов ТОТЭ с НЭП.

Электрохимические характеристики ТОТЭ с НЭП

Были исследованы электрохимические характеристики ТОТЭ с НЭП в зависимости от температуры, состава и скорости потока метан-воздушной смеси. При исследовании были использованы три ТОТЭ с немодифицированными и

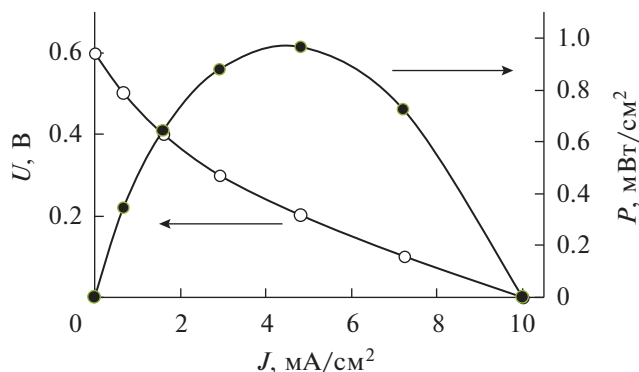


Рис. 3. Зависимости напряжения и удельной мощности от плотности тока для ТОТЭ с НЭП с немодифицированными электродами (Pt|YSZ|LSM). Условия эксперимента: температура – 750°С, скорость потока – 120 см³/мин, [CH₄]/[O₂] = 1.4.

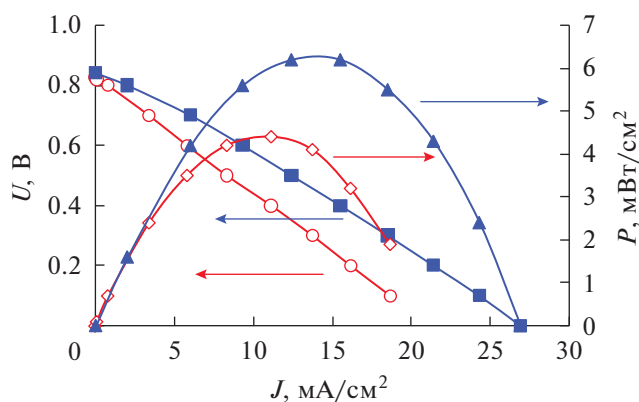


Рис. 4. Зависимости напряжения и удельной мощности от плотности тока для ТОТЭ с НЭП с модифицированным катодом (Pt|YSZ|LSM + PrO₂) при температурах 600 (открытые символы) и 650°С (закрытые символы). Условия эксперимента: скорость потока – 120 см³/мин, [CH₄]/[O₂] = 0.7.

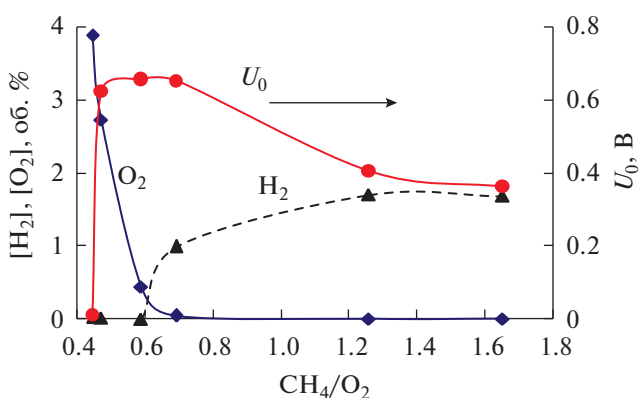


Рис. 5. Зависимости ЭДС и выходных концентраций H₂ и O₂ от отношения [CH₄]/[O₂] на входе в ТОТЭ с НЭП с модифицированным катодом (Pt|YSZ|LSM + PrO₂). Условия эксперимента: T = 750°С, скорость потока – 120 см³/мин.

модифицированными электродами: Pt|YSZ|LSM, Pt|YSZ|LSM + PrO₂ и GPt + CeO₂|YSZ|LSM + PrO₂. Сразу же отметим, что конверсия метана во всех экспериментах не превышала 20%.

Было обнаружено, что для топливного элемента с немодифицированными электродами (Pt|YSZ|LSM) при температурах выше 600°С ЭДС (U₀) достигала величин порядка 0.6 В. Это связано с тем, что в области анода появляется водород за счет протекания на нем каталитической реакции окисления CH₄ в синтез-газ, и при замыкании электрической цепи этот ТОТЭ генерирует электроэнергию. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости напряжения (U) и удельной электрической мощности (P) от плотности тока (J).

Видно, что при 750°С для смеси [CH₄]/[O₂] = 1.4 максимальная удельная мощность (P_{max}) и плотность тока короткого замыкания были равны 1 мВт/см² и 10 мА/см² соответственно.

Проведение активации катода спиртовым раствором Pr(NO₃)₃ с последующим прокаливанием привело к увеличению электрохимической активности катода и улучшению электрохимических характеристик ячейки (рис. 4): максимальная удельная мощность ТОТЭ уже при 650°С составляла 6.3 мВт/см².

Для оптимизации условий функционирования такого ТОТЭ были исследованы зависимости электрохимических характеристик от температуры, скорости потока и состава газовой смеси.

На рис. 5 показаны зависимости ЭДС и выходных концентраций H₂ и O₂ от соотношения [CH₄]/[O₂] на входе в ТОТЭ с НЭП с модифицированным катодом. Видно, что с ростом отношения [CH₄]/[O₂] концентрация водорода увеличивается, а концентрация кислорода уменьшается. Наибольшее значение ЭДС наблюдается при [CH₄]/[O₂] ~ 0.6–0.7, когда в выходящем из ТОТЭ газе одновременно присутствуют H₂ и O₂.

Следующую серию экспериментов проводили с ТОТЭ с НЭП, в котором была проведена модификация как катода (LSM + PrO₂), так и анода (Pt + CeO₂). Модификация анода мало отразилась на конверсии метана и кислорода по сравнению с ячейкой, в которой был модифицирован только катод, но существенно повлияла на электрохимические характеристики ячейки. Модификация обоих электродов приводила к улучшению их электрохимических характеристик и, соответственно, к увеличению удельной электрической мощности ТОТЭ с НЭП. Из рис. ба. видно, что зависимость P_{max} от температуры представляет собой кривую с максимумом при 650°С, где в газовой фазе одновременно присутствуют как водород, так и кислород. При этой температуре также наблюдаются наибольшие значения на-

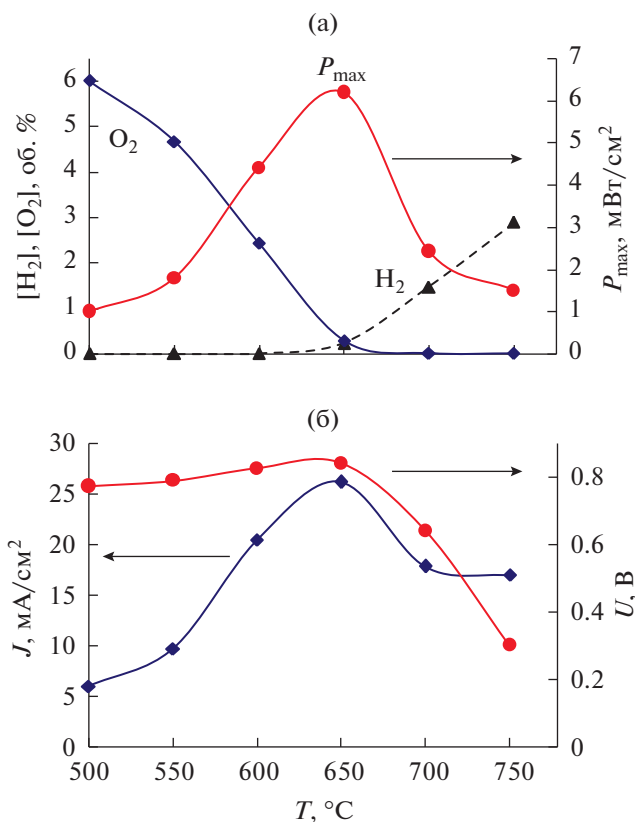


Рис. 6. Зависимости максимальной удельной мощности, концентраций водорода и кислорода (а), напряжения разомкнутой цепи и плотности тока короткого замыкания (б) от температуры ТОТЭ с НЭП с модифицированными электродами (Pt + CeO₂/YSZ/LSM + PrO₂). Условия эксперимента: скорость потока – 120 см³/мин, [CH₄]/[O₂] = 1.8.

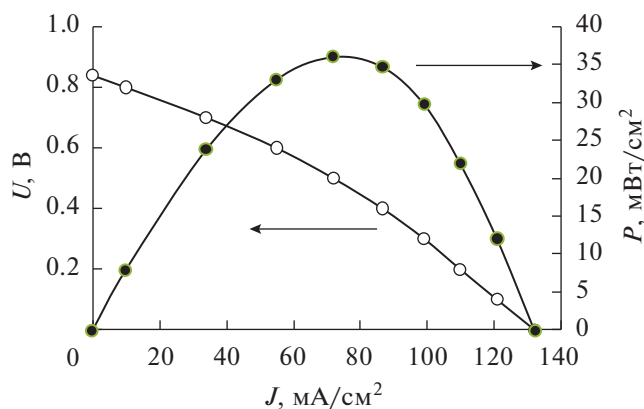


Рис. 7. Зависимости напряжения и удельной мощности от плотности тока для ТОТЭ с НЭП с модифицированными электродами (Pt + CeO₂/YSZ/LSM + PrO₂). Условия эксперимента: T = 700 °C, скорость потока – 330 см³/мин, [CH₄]/[O₂] = 1.04.

пряжения разомкнутой цепи и тока короткого замыкания (рис. 6б).

Последующие эксперименты, в которых варьировали скорость потока и состав смеси ме-

Таблица 1. ЭДС (U_0), ток короткого замыкания (I), максимальная электрическая мощность (P_{\max}), выходные концентрации водорода ([H₂]) и кислорода ([O₂]) при двух значениях скорости потока смеси метан–воздух (v) для ТОТЭ с НЭП с модифицированными электродами (Pt + CeO₂/YSZ/LSM + PrO_{2-x})*

v , см ³ /мин	U_0 , В	I , мА	P_{\max} , мВт	[H ₂], об. %	[O ₂], об. %
194	0.826	185	46.6	0.017	0.33
360	0.851	497	132	0.15	1.69

* Условия процесса: T = 690 °C; [CH₄]/[O₂] = 1.4.

тан–воздух, показали, что наилучшие электрохимические характеристики (мощность и ток короткого замыкания) для ТОТЭ с НЭП с модифицированными электродами также достигались, когда в выходящем газе одновременно присутствовали водород и кислород. Некоторые из полученных данных приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что увеличение скорости потока смеси метан–воздух от 194 до 360 см³/мин приводит к росту ЭДС, P_{\max} и выходных концентраций H₂ и O₂. Наилучшие электрические характеристики ТОТЭ с НЭП с модифицированными электродами представлены на рис. 7.

Максимальные удельная мощность и плотность тока короткого замыкания при 700 °C составили 36 мВт/см² и 130 мА/см² соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование свидетельствует о возможности создания твердооксидных топливных элементов с неразделенными электродными пространствами, питаемых смесью метана и воздуха, способных генерировать электроэнергию. Остающийся после работы ТОТЭ с НЭП метан может быть использован для генерации тепла либо переработан в синтез-газ, который может выступать в качестве сырья при производстве, например, аммиака, метанола, или углеводов по Фишеру–Тропшу.

Работы в этом направлении представляются перспективными, т. к. конструкция ТОТЭ с НЭП намного проще, чем конструкция традиционных ТОТЭ, и поэтому ТОТЭ с НЭП могут быть значительно дешевле. Кроме того, дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск более электрохимически активных анодов из неблагородных металлов, например Ni.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа частично поддержана из средств гранта Российского научного фонда № 17-79-30071.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1960. Т. 1. Вып. 2. С. 306.
2. Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1960. Т. 1. Вып. 3. С. 418.
3. Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1960. Т. 1. Вып. 4. С. 617.
4. Буянов Р.А., Зельдович А.Г., Пилипенко Ю.К. // Приборы и техника эксперимента. 1961. № 2. С. 188.
5. Буянов Р.А., Зельдович А.Г., Пилипенко Ю.К. // Хим. пром-сть. 1961. № 2. С. 31.
6. Виуанов Р.А., Zel'dovich A.G., Pilipenko Yu.K. // Cryogenics. 1962. V. 2(3). P. 143.
7. Головин А.В., Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1968. Т. 9. С. 464.
8. Головин А.В., Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1969. Т. 10. С. 113.
9. Головин А.В., Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1970. Т. 11. С. 957.
10. Буянов Р.А., Криворучко О.П., Малахов В.В., Матвиенко Л.Г., Буянова Н.Е., Чернявская О.Н. // Кинетика и катализ. 1969. Т. 10. Вып. 4. С. 894.
11. Криворучко О.П., Буянов Р.А. // Кинетика и катализ. 1972. Т. 13. Вып. 4. С. 1050.
12. Буянов Р.А., Пармон В.Н. // Катализ в промышленности. 2017. Т. 17. № 5. С. 390.
13. Жужгов А.В., Криворучко О.П., Исупова Л.А., Мартыанов О.Н., Пармон В.Н. // Катализ в промышленности. 2017. Т. 17. № 5. С. 6.
14. Жужгов А.В., Криворучко О.П., Исупова Л.А. // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 1. С. 50.
15. Ильичев А.Н., Быховский М.Я., Фаттахова З.Т., Шапкин Д.П., Корчак В.Н. // Кинетика и катализ. 2021. Т. 62. № 1. С. 44.
16. Горлова А.М., Симонов П.А., Стонкус О.А., Пахарукова В.П., Снытников П.В., Потемкин Д.И. // Кинетика и катализ. 2021. Т. 62. № 6. Принята в печать.
17. Марковская Д.В., Люлюкин М.Н. Журенок А.В., Козлова Е.А. // Кинетика и катализ. 2021. Т. 62. № 4. С. 437.
18. Куренкова А.Ю., Козлова Е.А., Каичев В.В. // Кинетика и катализ. 2020. Т. 61. № 6. С. 812.
19. Собянин В.А. // Рос. Хим. Журн. 2003. Т. 47. № 6. С. 62.
20. Dyer C.K. // Nature. 1990. V. 343. P. 547.
21. Moseley P., Willians D. // Nature. 1990. V. 346. P. 23.
22. Gottesfeld S. // Nature. 1990. V. 345. P. 673.
23. Riess I., Van der Put P.S., Schonman J. // Solid State Ionics. 1995. V. 82. P. 1.
24. Asano K., Hibino T., Iwahara H. // Denki Kagaku. 1996. V. 64. P. 649.
25. Demin A.K., Gulbis F.Ya. // Solid State Ionics. 2000. V. 135. P. 451.
26. Skinner S.J. // Int. J. Inorg. Mater. 2001. V. 3. P. 113.
27. Yano M., Tomita A., Sano M., Hibino T. // Solid State Ionics. 2007. V. 177. P. 3351.
28. Kuhn M., Napporn T.W. // Energies. 2010. V. 3. P. 57.

The Studies of Electrochemical Characteristics of Single-Chamber Solid-Oxide Fuel Cells with Electrodes Based on Platinum and Strontium-Doped Lanthanum Manganite, Fed by Methane–Air Gas Mixture

M. V. Yusenko¹, V. D. Belyaev¹, A. K. Demin², D. I. Bronin², V. A. Sobyanin¹, and P. V. Snytnikov^{1,*}

¹Borekov Institute of Catalysis, Siberian Branch of Russian Academy of Science,
Pr. Lavrentieva, 5, Novosibirsk, 630090 Russia

²Institute of High Temperature Electrochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Science,
Ekaterinburg, 620066 Russia

*e-mail: pvsnyt@catalysis.ru

The performance of a single-chamber solid oxide fuel cell (SC SOFC) with an yttria-stabilized zirconia (YSZ) electrolyte, a Pt-based anode and a strontium-doped lanthanum manganite (LSM) cathode was studied at 500–750°C in a mixture of methane and air. The conversion of methane on LSM at 650°C was below 10%. So, LSM can be used as a cathode material for SC SOFC. The Pt | YSZ | LSM chamber was shown capable to generate electricity. The maximum specific power (36 mW/cm²), voltage (0.85 V), and short-circuit current density (132 mA/cm²) were achieved at 700°C, [CH₄]/[O₂] ratio ~ 1.0, and the reaction mixture flow rate of 330 cm³/min. The present research proves feasible the development of SC SOFCs fed by a mixture of methane and air, which are capable to generate electricity. The unreacted methane in the SC SOFC outlet gas mixture can be used to generate heat or processed into synthesis gas, which is a valuable raw material for the production of, for example, ammonia, methanol, or hydrocarbons by Fischer–Tropsch process.

Keywords: oxidation of methane, solid oxide fuel cell, single-chamber