

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОММЕРЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В.И. Щекалов

Российский федеральный ядерный центр —
ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск

Дано краткое описание экспериментальных батарей ТОТЭ, разработанных в РФЯЦ — ВНИИТФ. Дан анализ разработок ТОТЭ ведущих мировых фирм и высказано предположение о максимальном коммерческом успехе у батарей ТОТЭ с большой мощностью. Дан вывод о необходимости разработок ТОТЭ для модернизации ими действующих ТЭЦ с целью повышения электрического КПД с 40 до 70 %.

Коммерческие ТОТЭ — это элементы, на основе которых могут быть созданы высокорентабельные энергоустановки. При поступлении их на мировой рынок энергетики, по оценкам зарубежных специалистов, мировая стоимость электростанций мегаваттного класса снизится к 2020 году до 750 долларов за кВт мощности, против 780 долларов за кВт мощности в настоящее время [1].

В России около тысячи электростанций мегаваттного класса, работающих на газе. Они вырабатывают электроэнергию путем сжигания газа, то есть прямым химическим окислением, с последующим получением электричества. Их КПД около 40 %. Если дополнительно в электростанции устанавливать высокоэффективные ТОТЭ с большой мощностью, которые вместо химического окисления газа окисляют его электрохимическим путем, сразу напрямую генерируя электроэнергию с КПД 50 %, и затем из теплоносителя получать дополнительную электроэнергию традиционным путем, то КПД электростанций увеличится в среднем до 70 % [2].

Достигнутые в институте научно-технические результаты позволяют рассмотреть, что из себя могут представлять коммерческие ТОТЭ и батареи на их основе.

Институтом разработано около двадцати экспериментальных батарей, часть из них была испытана. На их основе стало реальностью создание демонстрационных и специализированных ЭУ малой мощности. Для создания коммерческих ТОТЭ необходим также анализ работ ведущих зарубежных фирм.

Батареи ТОТЭ, включая сами ТОТЭ, являются наиболее наукоемкими, сложными и ответственными частями энергоустановки. Условно батареи классифицируются по форме ТОТЭ и их можно подразделить на следующие:

- батареи ТОТЭ трубчатой (здесь же пробирочной) формы;
- планарные (пластинчатые) батареи ТОТЭ;
- батареи сферических ТОТЭ;
- блочные (монолитные) батареи.

В разные периоды разработок батарей ТОТЭ в институте качество электродных покрытий и электролита было различным, и для объективной оценки конструкций батарей ТОТЭ в работе не приводятся вольт-амперные характеристики батарей ТОТЭ, хотя они являются важной характеристикой.

1. БАТАРЕИ ТОТЭ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ

Батареи ТОТЭ трубчатой формы можно разделить на батареи ТОТЭ трубчатой формы с наружным анодом и на батареи ТОТЭ трубчатой формы с наружным катодом.

В начале 90-х годов разработан модуль ЭХГ [3] мощностью 1 кВт для ЭУ 10-киловаттной мощности на основе ТОТЭ, разработанных в Институте высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ УрО РАН). В состав модуля входит батарея Р66-Р8.200 (рис. 1), состоящая из 154 ТОТЭ и двух электрических шин. Топливные элементы электрически соединены последовательно и расположены $26 \times 6 = 156$ в шахматном порядке. Расчетная номинальная мощность ТОТЭ равна 6,5 Вт.

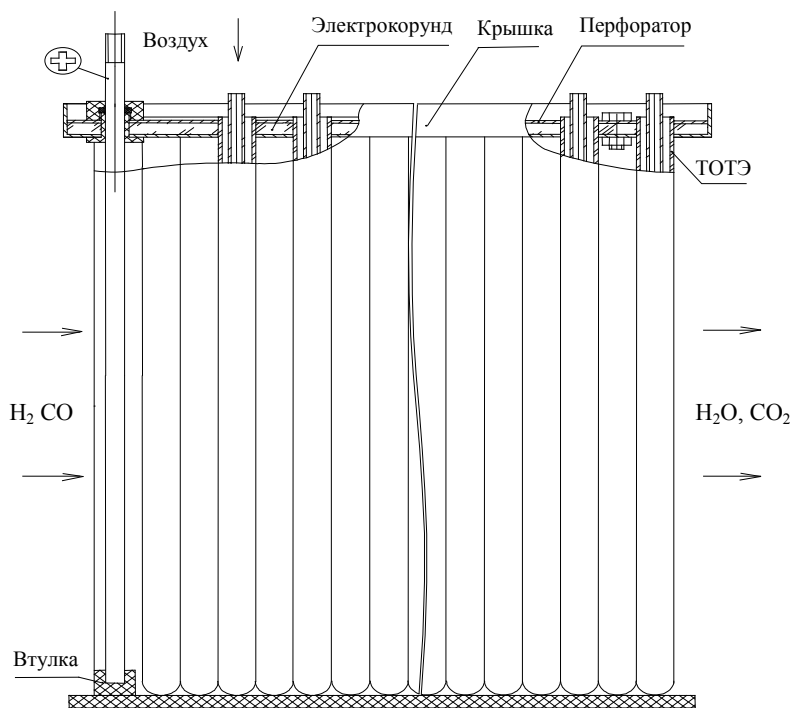


Рис. 1. Батарея ТОТЭ трубчатой формы с наружным анодом Р66-Р8.200

1.1. Батареи ТОТЭ трубчатой формы с наружным анодом

Конверсия метана осуществляется непосредственно в модуле перед батареей по такой же схеме, как у фирмы Westinghouse Electric Corporation: на отходящем анодном газе с помощью эжектора. Впервые зона дожигания отходящего

топливного газа располагается внутри корпуса конвертора. Это обеспечивает эффективный теплообмен и повышает КПД установки.

Для экспериментальной отработки батареи ТОТЭ изготовлен макет батареи Р66–Р8.200.01. В нем количество ТОТЭ уменьшено до 48 штук. Испытания проводились с подачей водорода в анодное пространство. В ходе испытаний часть ТОТЭ разрушилась (рис. 2, 3). После испытания проведена дефектация макета. Для наглядности на рис. 2 передняя стенка корпуса макета батареи снята. На рис. 3 видно, что часть топливных элементов разрушилась. Это привело к локальным перераспределениям газовых потоков и попаданию топливного газа в катодное пространство.

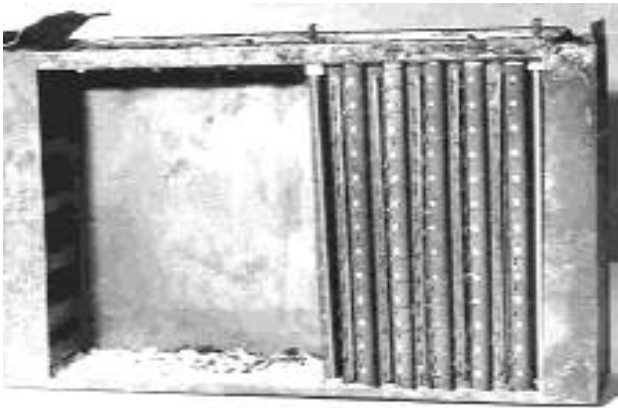


Рис. 2. Макет батареи ТОТЭ Р66–Р8.200.01 после испытаний

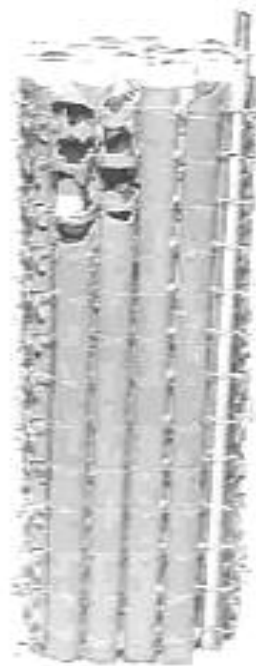


Рис. 3. Разрушения в макете батареи ТОТЭ Р66—Р8.200.01

В результате этих работ:

- сделан вывод, что при отработке различных конструктивных исполнений батарей ТОТЭ следует предусматривать изготовление и испытание макетов с небольшим числом ТОТЭ, обеспечивающих при этом полную проверку модульной схемы исполнения;
- выявлено деструктивное влияние разрушенных топливных элементов на соседние элементы. Отсюда, влияние разрушенного топливного элемента желательно конструктивно исключить;
- сделан вывод о необходимости избегать длинных последовательных электрических соединений ТОТЭ. Отсюда, целесообразно использовать параллельно–последовательное соединение ТОТЭ в батарее.

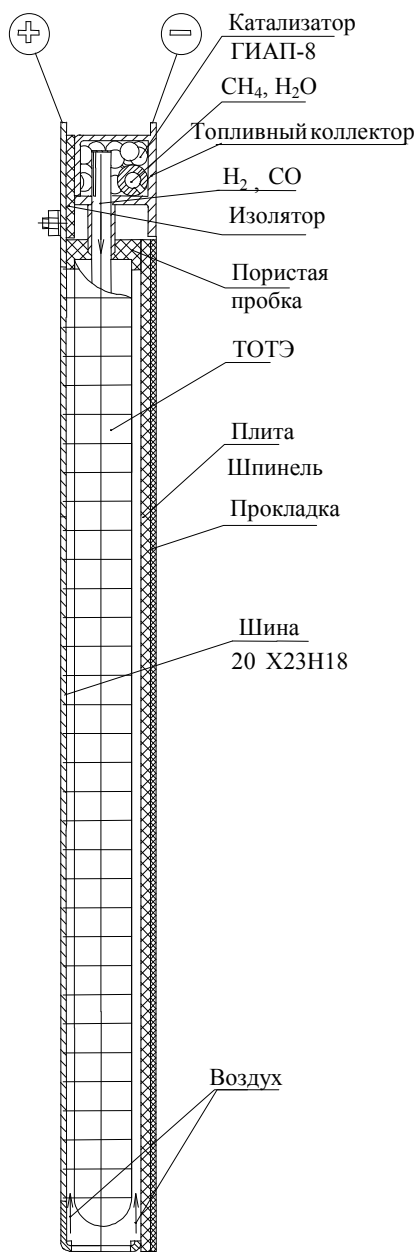


Рис. 4. Схема батареи ТОТЭ с наружным катодом P583–P301.02.01.100–03

1.2. Батареи ТОТЭ трубчатой формы с наружным катодом

Компактные батареи ТОТЭ разработаны на основе механического соединения в самой батарее катодных токосъемов с анодными через изоляторы.

Расположение ТОТЭ в одной из таких батарей P583–P301.02.01.100–03 и движение газовых потоков показаны на рис. 4.

Макет батареи ТОТЭ P583–P301.02.01.100–03 показан на рис. 5. Для наглядности два ТОТЭ и половина плиты сняты.

Батарея ТОТЭ P583–P301.02.01.100–03 (рис. 4, 5) состоит:

- из восьми ТОТЭ цилиндрической формы с наружным катодом и центральной топливной трубкой. Электрически топливные элементы в батарее соединены параллельно. Центральные трубки имеют радиальные отверстия. Расположение отверстий обеспечивает наиболее равномерное парциальное давление газов вдоль ТОТЭ. При этом дополнительно осуществляется конверсия парометановой смеси внутри ТОТЭ, за счет чего повышается КПД;
- из топливного коллектора, корпус которого одновременно является корпусом конвертора и теплообменником. Он расположен над ТОТЭ в зоне дожигания реагентов и использует отходящее тепло для основной конверсии парометановой смеси.

Кроме того, в батарее в качестве токосъема с ТОТЭ используется плоская металлическая шина с коммутирующими релаксационными элементами; имеется воздухораспределительная изоляторная плита и изоляторная пластина с помощью которой крепятся катодные токосъемы с анодными.

На основе такой батареи разработаны модули киловаттного класса и демонстрационный ЭХГ с выходной электрической мощностью 100 кВт.



Рис. 5. Макет батареи ТОТЭ трубчатой формы с наружным катодом Р583–Р301.02.01.100–03. Для наглядности два ТОТЭ и половина плиты сняты

2. ПЛАНАРНЫЕ БАТАРЕИ ТОТЭ

Проводятся исследования экспериментальных планарных батарей ТОТЭ сепараторной конструкции и планарных батарей бессепараторной конструкции.

2.1. Планарные батареи ТОТЭ сепараторной конструкции

Планарная батарея ТОТЭ сепараторной конструкции Р68–Л823.100 разработана для ЭХГ мощностью 1 кВт. Она состоит из 39 ТОТЭ и 40 сепараторов. Батарея собирается путем последовательного чередования сепараторов и ТОТЭ. Сверху и снизу батареи устанавливаются токосъемы из гранулированного мanganита лантана–стронция. Направление течения газовых потоков перекрестное. Подвод и отвод газов осуществляется через коллекторы. Сепараторы изготавливаются из LaCrO_3 или жаростойких сплавов и работают в двух средах: восстановительной и окислительной. Состав LaCrO_3 стехиометричен по отношению к кислороду в окислительной среде и обладает недостатком кислорода в восстановительной среде. Компенсация заряда для легирующих добавок в окислительных условиях происходит в основном за счет электронов и за счет образования ионов Cr^{4+} в кристаллической решетке. В достаточно сильных восстановительных средах ионная компенсация становится более значительной, поскольку образуются кислородные вакансии, и Cr^{4+} восстанавливается до Cr^{3+} . К сожалению, эти изменения связаны с изменением КЛТР и приводят к возникновению внутренних напряжений, короблению пластины сепаратора и спеченного с ним ТОТЭ [4]. К таким же последствиям приводит использование сепараторов на основе жаростойких сплавов, т. к. их КЛТР не полностью согласуется с КЛТР несущего слоя ТОТЭ.

Из-за критического изменения формы сепараторов при работе в двух средах и возникших технологических трудностей при их изготовлении, работы с данной батареей приостановлены.

2.2. Планарные батареи ТОТЭ бесепараторной конструкции

Планарная батареи ТОТЭ бесепараторной конструкции Р66–Л823.100.01 разработана как экспериментально–технологическая и состоит из 19 планарных ТОТЭ (рис. 6 и 7). С целью минимизации влияния различных факторов в конструкцию ТОТЭ введены платиновые токосъемы в виде полосок, припеченных с помощью платинового шликера в четырех равномерно разнесенных по поверхности точках. По экономическим соображениям применение платины нецелесообразно, однако для экспериментально–технологической отработки допустимо.

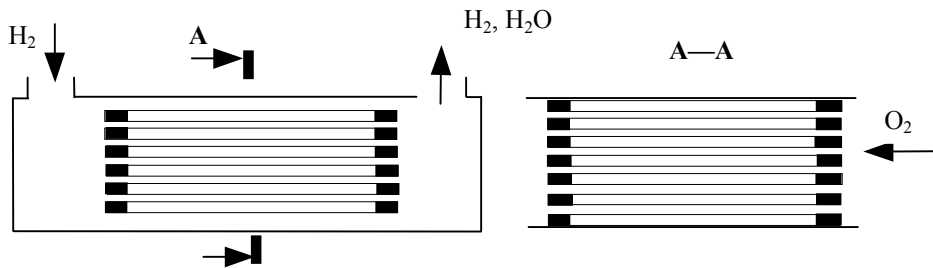


Рис. 6. Планарная батарея ТОТЭ бесепараторной конструкции Р66–Л823.100.01

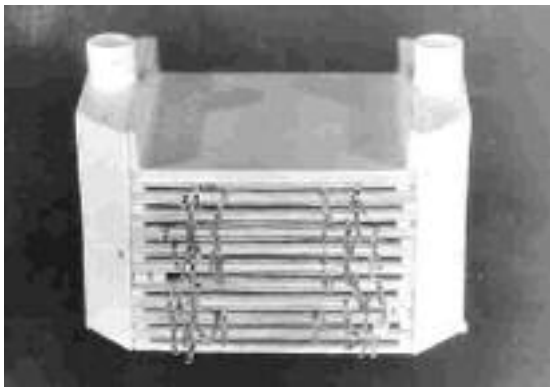


Рис. 7. Планарная батарея ТОТЭ бесепараторной конструкции Р66–Л823.100.01 после испытаний

В качестве несущего электролита ЕТЭ используется пластина YSZ размерами $50 \times 50 \times 0,4$ мм. На пластину с двух сторон припекаются электродные покрытия в форме квадратов 45×45 мм. ТОТЭ по краям соединяются стеклоприпоем через полосы из материала электролита одноименными электродными слоями навстречу друг другу. Образуются анодные и катодные полости с перекрестным течением газовых реагентов. К батарее ТОТЭ с двух сторон герметично припаиваются топливные коллекторы из диоксида циркония, исключаящие перетекание топливного газа в соседние полости. К коллекторам герметично припаяны трубопроводы для подвода и отвода реагентов.

В результате этих работ:

- освоена технология изготовления плоских электролитных пластин для ТОТЭ;
- созданы основы технологии герметичной сборки планарных батарей ТОТЭ бесепараторной конструкции;
- разработан высокотемпературный материал стеклоприпоя.

3. БАТАРЕИ СФЕРИЧЕСКИХ ТОТЭ

Разработаны новые конструкции ТОТЭ (рис. 8). Они имеют форму сферического сегмента или близки к ней и условно названы сферическими ТОТЭ [5].

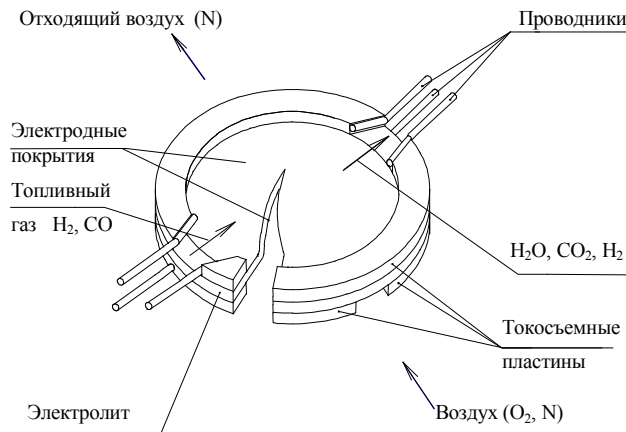


Рис. 8. Сферический ТОТЭ

По периметру элементы могут иметь плоскую отбуртовку. С точки зрения прочности, они превосходят планарные топливные элементы, т. к. их сферическая поверхность находится в незащемленном состоянии и компенсирует линейные температурные расширения материала за счет перемещения в радиальном и осевом направлениях в любой зоне. При этом внутреннее напряжение возрастает незначительно и не достигает критического значения. Сферические ТОТЭ состоят из ЭТЭ и токосъемных металлических пластин, покрытых защитным токопроводящим слоем.

Электродные и электролитные материалы, применяемые в сферических ТЭ, аналогичны материалам, применяемым в планарных ТОТЭ.

Материал токосъемных пластин — жаростойкие высокохромистые сплавы с покрытием. Предпочтительнее сплав ВХ–1И. Этот материал имеет КЛТР, согласованный с КЛТР несущего слоя ТОТЭ из диоксида циркония. Для защиты от анионов и, следовательно, от разрушения он покрыт хромитом лантана–стронция. Для улучшения электрического контакта на наружную поверхность токосъемов может наноситься безобжиговый электропроводящий материал [6].

ТОТЭ и токосъемные пластины снаружи покрыты герметизирующим стеклом с температурой размягчения ~ 780 °С.

Институтом разработана технология изготовления несущего электролита сферических ТОТЭ в форме круглых пластин с отбуртовкой. Электролит изготавливается путем раскатывания пластины, изготовленной из материала YSZ с пластификатором на основе поливинилбутирала. Затем из пластины вырубается круги с одновременным их формованием. Полученные заготовки подвергаются утильному отжигу в засыпке и затем окончательному отжигу. Нанесение анодного и катодного электродных слоев осуществляется по технологии планарных ТОТЭ.

Расчетный уровень мощности одного ТОТЭ диаметром 60 мм, при номинальной удельной мощности $0,1$ Вт/см² примерно равен $2,4$ Вт. Для лучшего омывания реагентами и уменьшения колебаний при вибрации на центральную зону укладывается высокотемпературная вата АТМ–11. Для ТОТЭ с большей мощностью рассматривается замена материала АТМ–11 на токопроводящие материалы, типа гранулированного КЛС, как в планарной батарее Р66–Л825.100, в катодных полостях, и никелевого войлока, как в ТОТЭ фирмы Westinghouse Electric Corporation, в анодных полостях. На основе круглых сферических ТОТЭ разработаны батареи двух типов. Оба типа — это бесепараторные батареи с внутренней коммутацией электродных слоев, что позволяет проводить вариацию вольт–амперных характеристик самой батареи.

В батарее первого типа (рис. 9), каждый ТОТЭ состоит из ЕТЭ и керамического кольца с токосъемами. ЕТЭ в батарее имеют два исполнения. Первое: снизу — анодный электродный слой, сверху — катодный. Второе: снизу — катодный электродный слой, сверху — анодный. У двух соседних ТОТЭ одноименные покрытия находятся в одной полости, батарея образуется из чередующихся анодных и катодных камер. Сборка осуществляется простым наложением ТОТЭ друг на друга с совмещением пазов, которые образуют вертикальные каналы для газообразных реагентов. Между керамическими кольцами наносится герметизирующий тонкодисперсный состав. Сквозные прорезы в кольцах обеспечивают сообщение вертикальных каналов с соответствующими электродными камерами. При сборке соседние керамические кольца повернуты друг относительно друга на 90° . Снятие электрического тока с кольцевых токосъемов осуществляется с помощью проволочных шин: токовыводов и токопроходов. Токопроходы из катодной камеры через специальные герметичные пазы в стенках колец выводятся в вертикальные каналы, предназначенные для восстановительного реагента.

Вся стопка помещается в цилиндрический керамический корпус, ограничивающий снаружи вертикальные каналы для подвода реагентов. Имеются также верхняя и нижняя крышки с патрубками для подвода и отвода реагентов, и электрические вертикальные шины для соединения токовыводов. Полости с топливным газом герметизируются высокотемпературными составами.

Сферические ТОТЭ второго типа состоят из ЕТЭ и токосъемных металлических серповидных пластин, покрытых защитным токопроводящим слоем.

Батареи второго типа собираются наложением ТОТЭ друг на друга аналогично батарее первого типа. Наружный корпус выполнен в виде тонкого металлического цилиндра, заполненного герметизирующим теплоизоляционным составом типа МКРК (муллитокремнеземистый картон). Батареи второго типа более технологичные и имеют меньшую себестоимость, чем батареи первого типа.

Изменения формы ТЭ и токосъема в батареях ТОТЭ позволяют отказаться от сепараторных пластин, имеющих достаточно сложную конструкцию. При этом сохраняется и даже расширяется количество вариаций планарных форм, используемых ЕТЭ, повышается технологичность герметичного соединения элементов между собой. Отношение высоты периферийного катодного утолщения к высоте периферийного анодного утолщения выбирается из диапазона 2—10. Выбором величины указанного отношения задается различный объем анодных и катодных камер, что обусловлено, как правило, повышенным расходом кислородсодержащего газа по сравнению с топливным.



Рис. 9. Батарея сферических ТОТЭ Р66–Л825.100

Разработанные батареи сферических ТОТЭ имеют удельную объемную мощность в 3 раза выше, чем у батарей трубчатого типа.

На основе сферической батареи ТОТЭ второго типа разработана конструкция ЭХГ Р66–Р004 киловаттной мощности.

3.1. Анализ состояния ТОТЭ в зависимости от действующих факторов

Аналитически оценим ТОТЭ и батареи на их основе с точки зрения влияния различных действующих факторов. Условно будем считать, что технология нанесения электродных или электролитных слоев для всех ТОТЭ одинакова и не создает в итоге критического напряжения. Хотя технология изготовления ТОТЭ имеет существенное влияние на прочность ТОТЭ.

3.1.1. Разнотемпературность поля

Появление нестационарности температурного поля в батареях неизбежно из-за различной концентрации вдоль ТОТЭ газовых реагентов и продуктов реакции, неравномерности плотности тока, различного тепловыделения и теплоотвода с поверхности ТОТЭ. Разница температур на поверхности ТОТЭ на длине 50 мм может достигать 80 °С, а удлинение элемента до 0,5 мм [8].

В этих условиях у трубчатых и сферических ТОТЭ значения возникающих внутренних напряжений меньше, чем у монолитных и планарных. Их поверхность имеет возможность перемещения в радиальном и частично в линейном направлении.

3.1.2. Взаимодействие сопрягаемых элементов

В трубчатых и сферических батареях у ТОТЭ сопрягаемыми элементами являются релаксирующие многоточечные токосъемы. В планарных и некоторых блочных батареях сопрягаемыми элементами у ТОТЭ являются сепараторы. Коробление сепараторов при работе приводит к короблению ТОТЭ.

В этом случае имеется преимущество у трубчатых и сферических ТОТЭ по отношению к сепараторным планарным и блочным батареям.

3.1.3. Концентраторы напряжений

Многие блочные ТОТЭ имеют изогнутую форму электролита с малым радиусом изгиба, часто не превышающим 1 мм. Это создает наличие концентраторов напряжения в ТОТЭ, что значительно снижает их прочность и трещиностойкость.

Трубчатые ТОТЭ фирмы Westinghouse Electric Corporation также имеют концентраторы напряжения. Они расположены в районе токосъемных шин и имеют следующий характер. На диаметре меньше миллиметра разными способами нанесены пять материалов с различной структурой и с разным тепловыделением при работе [9].

В данном случае плоские планарные ТОТЭ и трубчатые без ХЛС имеют существенные преимущества перед блочными с изогнутыми электродными слоями и незначительное — перед трубчатыми фирмы Westinghouse Electric Corporation.

Концентраторы напряжения и внутренние дефекты также могут возникать от воздействия инструмента при механической обработке ТОТЭ. Их влияние целесообразно оценивать отдельно, на основании конкретных экспериментальных материалов. Преимущества ТОТЭ, не подвергающихся механической обработке, очевидны.

3.1.4. Высокая температура

При высоких температурах в твердых растворах со структурой типа флюорита термоактивационные процессы ускоряются и существенно изменяются физико-механические характеристики. При достижении рабочей температуры 950 °С прочность ТОТЭ снижается и составляет только 36 % от прочности при нормальной температуре [10].

Влияние данного фактора может быть критичным для ТОТЭ с низким коэффициентом запаса прочности. ТОТЭ с несущим диоксидциркониевым электролитом толщиной 0,4 мм имеет коэффициент запаса прочности меньше, чем ТОТЭ с несущим воздушным электродом толщиной 2,1 мм. Преимущество трубчатых батарей ТОТЭ с несущим воздушным электродом из МЛС или КЛС признано [2].

3.1.5. Воздействие вибрационных и ударных нагрузок

Вибрационные и ударные нагрузки на ТОТЭ могут реализовываться при сборке, транспортировке и эксплуатации у мобильных ЭУ. У стационарных ЭУ — при сборке, транспортировке и монтаже.

Величина, направление, время и другие характеристики нагрузок реализуются в зависимости от назначения ЭУ. Их величина определяется заранее и задается в техническом задании на разработку ЭУ. При воздействии вибрационных и ударных нагрузок запас прочности ТОТЭ в основном зависит от величины нагрузки, формы ТОТЭ, жесткости системы закрепления и свободной длины ТОТЭ между заделками.

У трубчатых ТОТЭ длина между заделками часто достигает десятков сантиметров, у планарных и монокристаллических ТОТЭ всего около одного миллиметра. В данном случае преимущество у планарных и монокристаллических ТОТЭ.

3.1.6. Разрушение ТОТЭ

Разрушенный ТОТЭ оказывает деструктивное влияние на окружение и батарею в целом. Структура ТОТЭ — это система послойных материалов, один из которых газоплотный. При его разрушении окислительная и восстановительная среды смешиваются. В зоне разрушения происходит прямое химическое взаимодействие реагентов с резким увеличением температуры. Кроме этого, на катодный слой попадает топливный газ, и (или) на анодный — окислительный. Происходит химическое и физическое изменение состояния электродных слоев ТОТЭ. В результате нарушается согласованность КЛТР слоев ТОТЭ. Запас прочности и трещиностойкость ТОТЭ резко снижается. Разрушение ТОТЭ может прогрессировать и вызывать разрушения других элементов (см. рис. 3).

Учитывая, что от батареи требуется сохранение ее работоспособности, необходимо: во-первых, чтобы разрушение носило локальный характер, во-вторых, чтобы не изменялись расходы реагентов через разрушенный ТОТЭ и, в третьих, чтобы сохранялась электрическая цепь батареи.

В данном случае сепараторные планарные и блочные ТОТЭ имеют существенные преимущества перед трубчатыми ТОТЭ, так как в случае разрушения газоплотного слоя из-за короткого расстояния между заделками не происходит рассыпания ТОТЭ на отдельные фрагменты. Трубчатые ТОТЭ можно заключать в отдельные полости или в материалы с увеличенным диффузионным сопротивлением, но следует учитывать при этом увеличение материалоемкости и себестоимости батареи.

С точки зрения прочности конструкции батарей ТОТЭ трубчатой формы и сферической предпочтительнее, чем планарные и блочные.

4. ВЫВОДЫ

Достигнутые в РФЯЦ — ВНИИТФ научно–технические результаты в разработке батарей ТОТЭ достаточны для создания демонстрационных или специализированных ЭУ малой мощности.

В 1998 году в разработках института достигнута мощность 6,8 Вт на ТЭ с несущим диоксидциркониевым электролитом в форме пробирки длиной 210 мм. Данный уровень мощности фирма Westinghouse Electric Corporation на аналогичных ТОТЭ имела в 1975 году [11]. Тогда же, оценив, что основные электрические потери в ТОТЭ приходятся на несущий электролит, фирма Westinghouse Electric Corporation полностью перешла на разработку ТОТЭ с несущим керамическим, а затем катодным электродным слоем из МЛС. Толщина электролитного слоя была уменьшена на порядок. К 1996 году фирма имела ТОТЭ с мощностью 277 Вт. Однако себестоимость таких ТОТЭ все равно не позволяет перейти на создание коммерческих ЭУ.

Две мировые ведущие фирмы в области разработок ТОТЭ, Siemens и Westinghouse Electric Corporation, объединили свои усилия и создали Siemens–Westinghouse Power Corporation. Произведя демонстрационную ЭУ мощностью 100 кВт, они признали целесообразным продлить стадию НИОКР и продолжить поиск оптимальной геометрии ТОТЭ (рис. 10) с целью увеличения удельной объемной мощности [12].

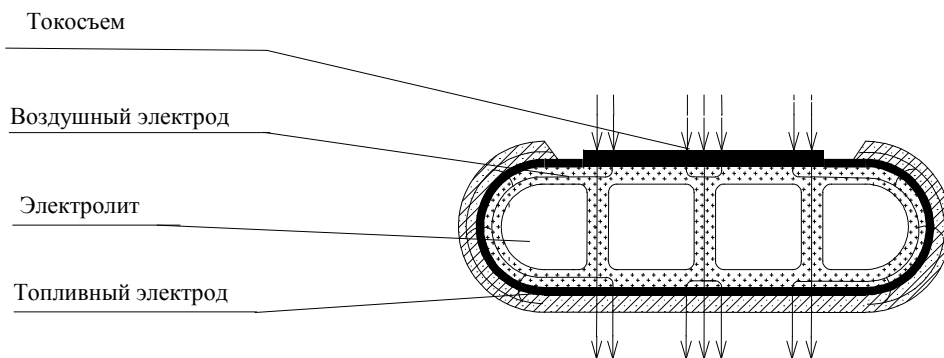


Рис. 10. Ребристый ТОТЭ корпорации Siemens–Westinghouse Power Corporation

В настоящее время в мире продолжают работы по уменьшению себестоимости ТОТЭ. Исследуется возможность снижения расхода редкоземельных элементов. Создаются новые высокотехнологичные методы изготовления ТОТЭ. Например, большая доля затрат при изготовлении ТОТЭ приходится на получение электролитного слоя методом электрохимического газового осаждения. Поэтому исследуются новые технологии, такие, как термолиз металлоорганики [13], электрофорезное осаждение электролита из коллоидного раствора [14] и другие.

Конструкцию коммерческого ТОТЭ с коммерческой технологией целесообразно строить на основе экспериментальных наработок в РФЯЦ — ВНИИТФ и анализа работ ведущих фирм. Исходя из этого можно с определенной достоверностью сформулировать основные требования к коммерческим ТОТЭ. Они должны иметь:

1. Электрическую мощность более 250 Вт, плотность тока 200—400 мА/см² и стоимость не более 750 долл. за 1 м² активной площади. Следовательно, электролит ТОТЭ должен быть тонкопленочным и иметь достаточно развитую поверхность.
2. Минимальную деградацию составляющих материалов, обеспечивающих требуемый ресурс работы (обычно более 10 000 часов). Отсюда, ТОТЭ и окружение должны иметь химически стабильные материалы.
3. Достаточный запас прочности, обеспечивающий отсутствие критического напряженно-деформированного состояния ТОТЭ, как в рабочем режиме, так и при термоциклированиях. Отсюда, геометрия ТОТЭ должна иметь высокотемпературную устойчивость, на поверхности не должно быть концентраторов напряжений, ТОТЭ не должны соприкасаться с материалами, изменяющими геометрию при работе и ТОТЭ должны состоять из материалов с согласованными КЛТР.
4. Структурную, физическую и размерно-объемную стабильность материалов ТОТЭ во времени, а также химическую стойкость и минимальное твердофазное взаимодействие в зоне контакта разных материалов, в основном с электролитом. Многочисленные исследования показали, что твердооксидный электролит предпочтительнее из стабилизированного диоксида циркония, анод — из никель-кермета, катод — из МЛС или КЛС, токосъем — из ХЛС с никелевым войлоком.
5. Доступность и низкую стоимость материалов. Отсюда, минимальное использование редкоземельных материалов и низкую материалоемкость.
6. Доступность воспроизводства свойств и управление основными характеристиками, такими, как фазовый состав, размер гранул, проводимость и другие. Таким образом, технология изготовления ТОТЭ должна быть серийной и автоматизированной.
7. Экологическую чистоту при их производстве и эксплуатации.

На основе вышесказанного целесообразно создание новых, высокоэффективных ТОТЭ с высокой мощностью. В этой связи институтом разработан новый тип конструкций ТОТЭ — многоканальные (двух-, трех-, четырехканальные) эллипсные ТОТЭ (рис. 11). При длине ТОТЭ равной 1500 мм мощность одного такого элемента достигает киловатта, а стоимость ТОТЭ с условной активной площадью 1 м² — 692 долл.

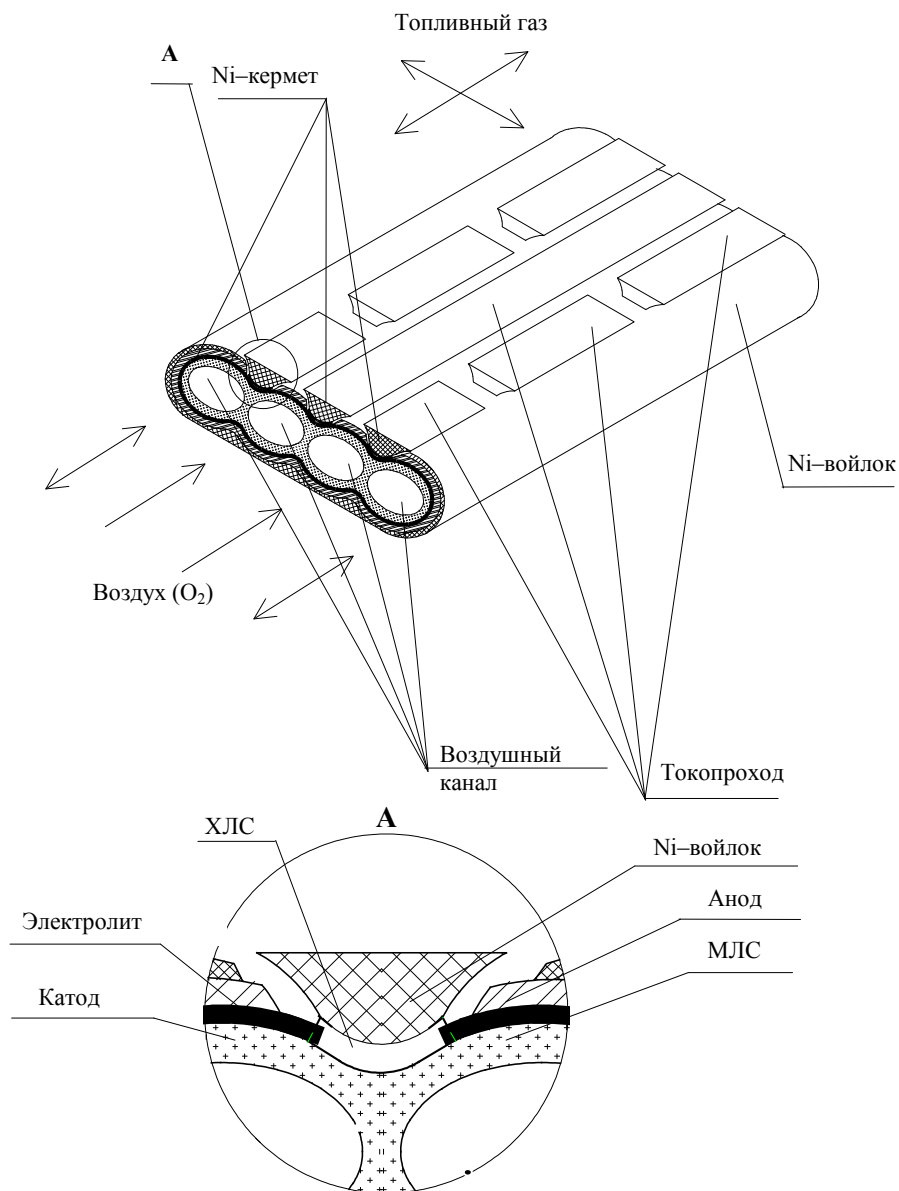


Рис. 11. Многоканальный эллипсный ТОТЭ

Преимущества многоканальных эллипсных ТОТЭ:

- электролит с развитой поверхностью и малой толщиной, что обеспечивает получение мощности от 0,1 до 1 кВт и более.
- воздушный электрод с короткими коммутирующими ребрами, топливный электрод с дополнительными никелевыми проводниками, многополосные прерывистые токосъемы, расположенные в зоне слияния токовых потоков и короткие коммутирующие проводники, что в совокупности обеспечивает

наикратчайший путь электронов и значительно снижает внутренние электрические потери;

- за счет внутренних эллипсных каналов и выгнуто–вогнутой формы наружной поверхности обеспечивается возможность перемещения большей части поверхности в трех направлениях при термическом расширении или сжатии в неравномерном тепловом поле, что улучшает напряженно–деформированное состояние несущего слоя ТОТЭ и обеспечивает его высокотемпературную устойчивость;
- за счет покрытия наружной поверхности ТОТЭ пористым никелем с никелевым войлоком при деструктивном появлении трещин в несущем слое элемента вероятность рассыпания ТОТЭ на отдельные фрагменты уменьшается, благодаря чему могут сохраниться заданные расходы реагентов через ТОТЭ, а также электрическая цепь и работоспособность батареи в целом;
- сборка ТОТЭ в батарею высокотехнологичная, так как осуществляется простым последовательным наложением ТОТЭ друг на друга;
- при изготовлении ТОТЭ сохраняется возможность использования наиболее передовых технологий, полученных в основном при разработке трубчатых ТОТЭ, таких, как экструзия катода, термолиз металлоорганики и др;
- ТОТЭ выполнен из материалов, успешно прошедших испытания в течение более 20 000 часов.

Материалоемкость, себестоимость и габаритно–весовые характеристики ТОТЭ — минимальные.

Материал	Анод		Электролит	Катод	Токосъем	
	Ni–войлок	Ni–кермет			ХЛС	Ni–войлок
Пористость, %	50	30	YSZ	МЛС	0	50
Толщина, мм	1—2	0,15	0,04	2,2	0,085	4
Электропроводность, См/см	7690	3000	0,1	400	30	7690

Расчет электрических характеристик многоканального ТОТЭ по исходным данным (таблица), проведенный путем деления ТОТЭ на дискретные части с учетом непрерывности анодного тока показывает, что многоканальные эллипсные ТОТЭ в сравнении с ТОТЭ фирмы Westinghouse Electric Corporation имеют более высокую удельную объемную мощность (рис. 12), при этом внутренние электрические потери на 18 % меньше. Экономический расчет показал, что стоимость мегаваттной установки на данных ТОТЭ может быть менее 750 долларов за 1 кВт.

Несмотря на достигнутый высокий уровень в познании протекания электрохимических процессов и значительный успех в создании материаловедческой базы, разработка конструкций батарей ТОТЭ в мире не закончена и ввиду крайней актуальности интенсивно продолжается. Через двадцать лет ведущие

специалисты по энергетике прогнозируют поступление на мировой рынок рентабельных и экологически чистых ЭУ на основе ТОТЭ [15].

В РФЯЦ — ВНИИТФ после отработки технологии серийного изготовления новых ТЭ с большой мощностью и низкой себестоимостью перспектива создания коммерческих ТОТЭ станет реальной. Это даст возможность модернизации действующих электростанций с целью увеличения выработки электрической энергии без увеличения расхода топлива и откроет новое направление в энергетике России.

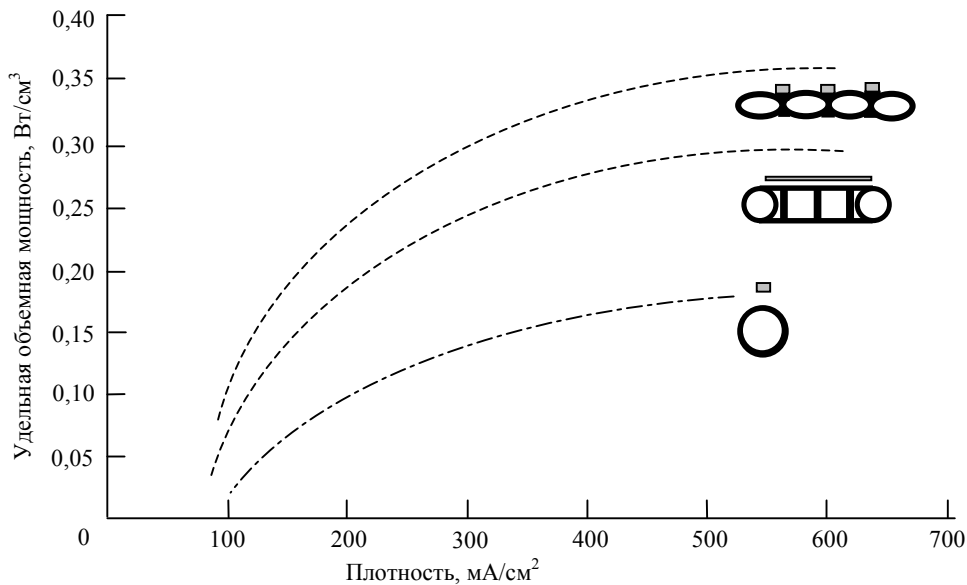


Рис. 12. Удельная объемная мощность ТОТЭ фирмы Westinghouse Electric Corporation диаметром 2,2 см, оребренного ТОТЭ корпорации Siemens–Westinghouse Power Corporation и многоканального эллипсного ТОТЭ

ССЫЛКИ

1. Frank Blaker. Fuel Cell, Gas Engines or Gas Turbines Perspectives of the Natural Gas Industry // European Solid Oxide Fuel Cell Forum. — October 3—7, 1994. — Vol. 1. — P. 58.
2. Veyo S.E. The Westinghouse Tubular SOFC Development Program // Presented to First Meeting SOCA. — October, 1997.
3. Патент № 2121191 от 27.10.98. Электрохимический генератор / В.И. Щекалов
4. Miliken C., Elandovan S., Khandkar A. Mechanical and Electrical Stability of Doped LaCrO in SOFC Applications // in Proceedinds of the International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (1993) / Edited by S.C. Sindnal, H. Iwahara. — P. 335—343.

5. Патент № 2084053. Батарея ТОТЭ / Щекалов В.И. — Бюллетень "Изобретения". — 1997. — Ч. 1, № 31. — С. 170.
6. Барыкин Б.М., Гордон В.Г., Спиридонов Э.Г. Безобжиговые электропроводящие материалы на основе хромитов для каналов МГД-генераторов // Высокотемпературные материалы для МГДЭС. — Издательство: "Наука", 1978.
7. Патент РФ № 2129323. Батарея ТОТЭ / Щекалов В.И. от 20.04.99.
8. Nisancioglu K.H. Cell and Stack Optimisation by Modelling NIT. — Trondheim/Norway. Vol. 1 // EUROPEAN SOFC FORUM, October 3—7, 1994.
9. Singhal S.C. Tubular Solid Oxide Fuel Technology. Overview and Status // An EPRI/GRI Fuel Cell Workshop on Fuel Cell Technology Research and Development. — April 4—5, 1995. — Irvine, California.
10. Огнеупоры. — 1990. — № 5.
11. Hirschenhofer J.H., Stauffer D.B. Engleman Fuel Cells a Handbook / Revision 3, United States Department of Energy. — January, 1994. — P. 5—4.
12. Singhal S.C. Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology // Fuel Cell Seminar, Palm Springs Convention Center. — November, 1998.
13. Патент РФ № 2125324 от 20.01.99. Способ изготовления единичного высокотемпературного топливного элемента ... / Севастьянов В.В., Липилин А.С. и др.
14. Swartz S.L., Dawson W.J. Colloidal. Fabrication Process for Thin-Film Solid Oxide Electrolyte Membranes // Fuel Cell Seminar. — Palm Springs Convention Center. — November, 1998.
15. Трубчатые твердооксидные топливные элементы: успехи по улучшению работы и снижению стоимости // Семинар EPRI/GRI по топливным элементам на тему: Исследование и разработка технологий топливных элементов; Апрель, 1996.