

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ДЛИНЕ ТРУБЧАТОГО ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

*В.Ф. Чухарев, В.В. Кулаев, А.Д. Закутнев, И.Г. Лукашенко*

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

При исследовании трубчатых ТОТЭ представляет интерес изучение равномерности распределения электрических характеристик, таких, как ЭДС, внутреннее сопротивление и поляризационные потери, по длине ТОТЭ. Наличие градиента свойств по длине ТОТЭ может привести к работе некоторых участков ТОТЭ на нисходящей ветви зависимости мощности от тока, что может отрицательно сказаться на работоспособности элемента. В данной работе были проведены исследования распределения электрических характеристик по длине ТОТЭ на элементе, в котором катод разделен на три участка, имеющих примерно одинаковую площадь рабочей поверхности. Было обнаружено, что внутреннее сопротивление и поляризационные потери минимальны в нижней трети элемента и максимальны в верхней его трети. Предполагаемой причиной неравномерного распределения характеристик является проникновение воздуха в анодное пространство при работе ТОТЭ.

Результаты исследований по разработке конструкции трубчатого ТОТЭ с катодом на наружной поверхности и засыпным анодным токосъемом и последующие измерения его электрических характеристик показали, что такая конструкция ТОТЭ обеспечивает высокую удельную мощность  $P_{уд} = (100—150)$  мВт/см<sup>2</sup>. Однако приведенная величина является усредненной. В процессе работы ТОТЭ распределение снимаемой электрической мощности по длине может быть неравномерным, что обусловлено градиентом свойств (ЭДС, внутреннее сопротивление, поляризационные потери), а также изменением парциального давления топлива в анодном пространстве ТОТЭ. Это может приводить к работе некоторых участков ТОТЭ на нисходящей ветви зависимости мощности от тока, что может отрицательно сказаться на работе электродов.

Целью данной работы являлось исследование распределения электрических характеристик по длине трубчатого ТОТЭ с анодом на внутренней поверхности.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения работ использовался ТОТЭ (рис. 1), в котором катод разделен на три участка, имеющих примерно одинаковую площадь рабочей поверхности. Токосъем с каждого участка катода осуществлялся при помощи четырех колец из платиновой проволоки. По аноду разбиение на участки не производилось, токосъем осуществлялся с помощью засыпки из гранулированного никель—кермета состава 80 % Ni + 20 % YSZ. В процессе экспериментов измерялись

электрохимические характеристики каждого участка ТОТЭ: вольт–амперные характеристики, напряжение разомкнутой цепи, поляризационные потери, по которым рассчитывалось внутреннее сопротивление и максимальная мощность, строилась кривая мощности от тока. Температура измерялась на всех участках ТОТЭ. В качестве окислителя использовался воздух, в качестве топлива — водород, увлажненный при 20 °С.

Во время разогрева ТОТЭ до рабочей температуры 950 °С в анодное пространство подавался аргон с расходом 8 л/ч. При температуре 950 °С аргон был замещен водородом с расходом 6 л/ч. В катодное пространство воздух подавался на протяжении всего эксперимента с расходом 100–120 л/ч. Скорость нагрева не превышала 300 °С/ч.

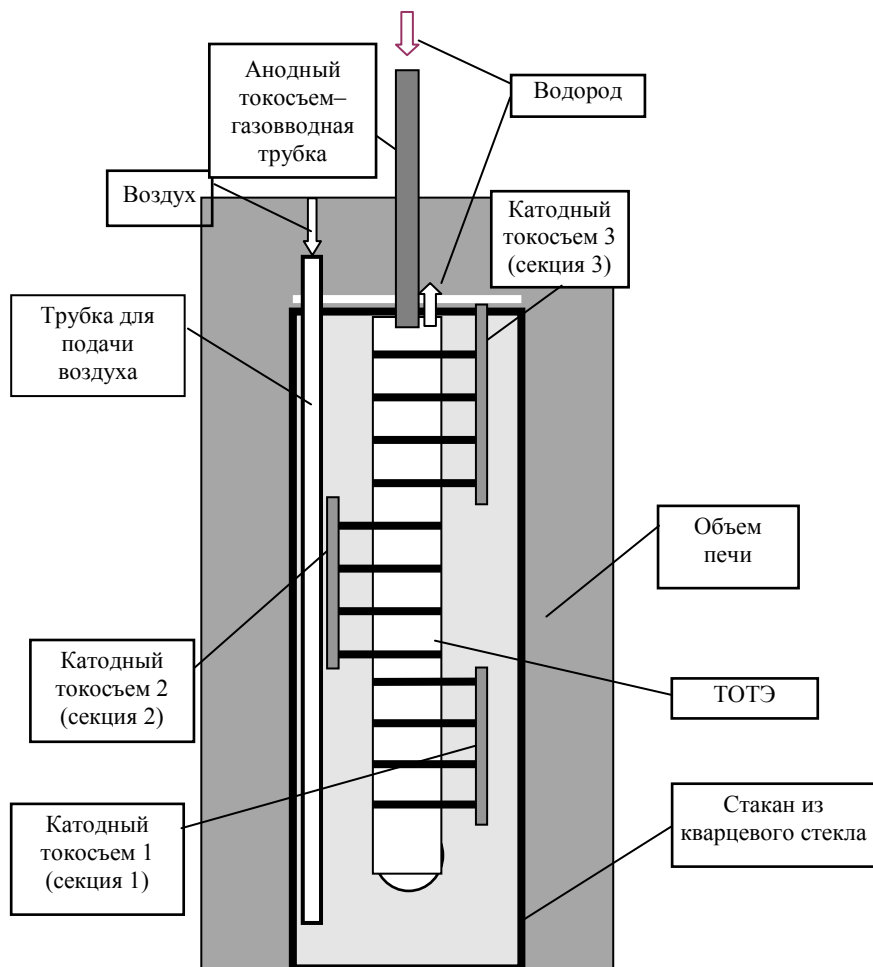


Рис. 1. Схема сборки трехсекционного ТОТЭ

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Установлено (табл. 1, рис. 2), что внутреннее сопротивление ТОТЭ и поляризационные потери минимальны в зоне дна и максимальны в зоне выхода топливного газа. Изменение температуры и расхода топлива в исследованном диапазоне не оказали влияния на характер распределения свойств. Градиент свойств приводит к несогласованной работе различных участков ТОТЭ и, как следствие, может привести к снижению электрических характеристик в процессе работы топливного элемента.

Таблица 1

Результаты испытаний ТОТЭ (эксперимент 1)

№ секции	$T$ , °С	Расход водорода, л/ч	Напряжение разомкнутой цепи, В	Максимальная мощность, Вт	Внутреннее сопротивление, Ом	Поляризационные потери, В
1	950	6	1,053	2,76	0,075	0,149
		—	—	—	—	—
	950	6	1,058	2,61	0,086	0,147
15		1,058	2,61	—	—	
2	944	6	1,055	2,16	0,093	0,177
		—	—	—	—	—
	950	6	1,058	2,16	0,095	0,169
15		1,058	2,16	—	—	
3	920	6	1,057	1,72	0,110	0,199
		—	—	—	—	—
	950	6	1,056	1,70	0,113	0,179
15		1,058	1,75	—	—	

Причинами возникновения градиента свойств могут являться:

- технологический фактор (неравномерность свойств компонентов ТОТЭ, а также толщины электродов и электролита);
- фактор, связанный с особенностями распределения состава топлива по длине ТОТЭ (разбавление топлива продуктами реакции и проникновение воздуха в анодное пространство).

Для определения доминирующего фактора был проведен эксперимент 2 по определению характеристик ТОТЭ с измененной схемой подачи водорода. С этой целью был использован ТОТЭ, аналогичный, испытывавшемуся в первом опыте. У изготовленного ТОТЭ отрезалось дно, а противоположная сторона герметизировалась заглушкой из YSZ путем пайки высокотемпературным герметиком. Таким образом, направление потока топлива в ТОТЭ в эксперименте 2 изменено на 180° по сравнению с экспериментом 1. Отличие методики испытаний заключалось в том, что при нагреве до рабочей температуры и в рабочем режиме использовался повышенный расход водорода (15 л/ч) с целью увеличения давления газов в анодном пространстве (табл. 2, рис. 3).

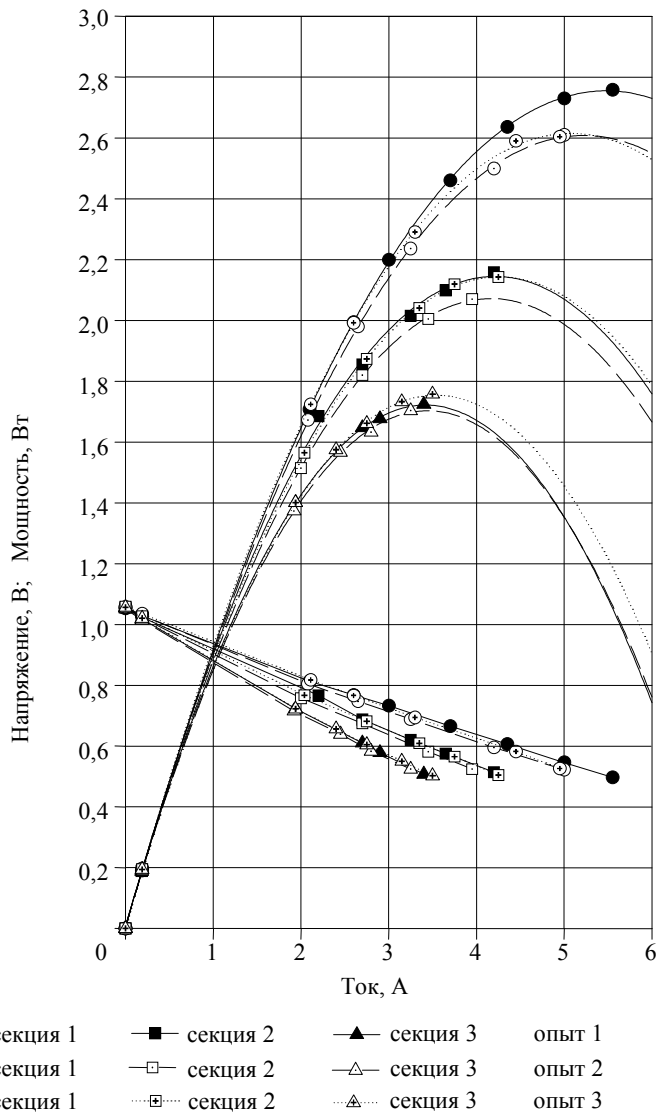


Рис. 2. Вольт–амперные характеристики и зависимости мощности от тока ТОТЭ (эксперимент 1):

опыт 1 — расход водорода 6 л/ч, температура нижней, средней и верхней секций 950, 944 и 920 °С соответственно;

опыт 2 — расход водорода 6 л/ч, температура нижней, средней и верхней секций 950 °С;

опыт 3 — расход водорода 15 л/ч, температура нижней, средней и верхней секций 950 °С

Таблица 2

Результаты испытаний ТОТЭ (эксперимент 2)

№ секции	$T$ , °C	Расход $H_2$ , л/час	Напряжение холостого хода, В	Максимальная мощность, Вт	Внутреннее сопротивление, Ом	Поляризационные потери, В
1	953	15	1,070	3,03	0,071	0,134
2	950	15	1,070	3,04	0,071	0,132
3	950	15	1,071	2,66	0,084	0,130

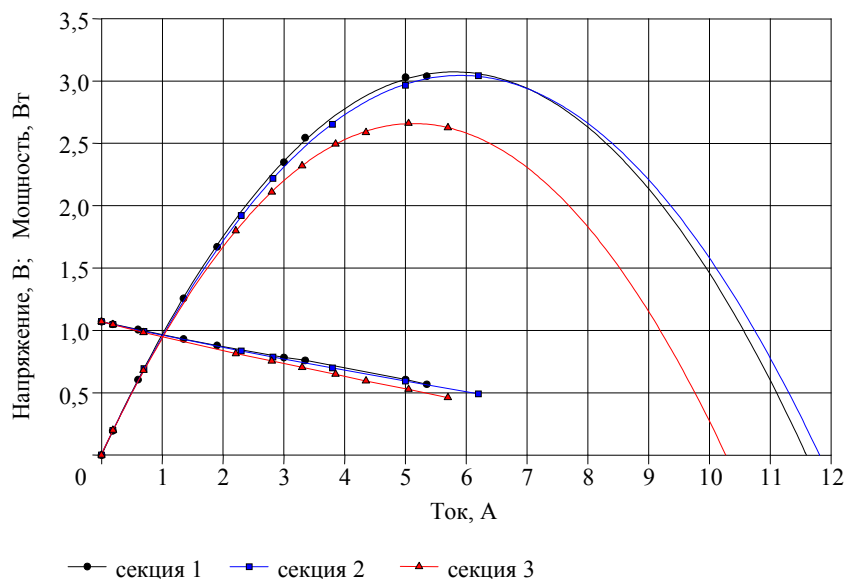


Рис. 3. Вольт–амперные характеристики и зависимость мощности от тока ТОТЭ (эксперимент 2)

Анализ данных, представленных в табл. 1 и 2, показал, что и при изменении схемы подачи водорода характер распределения характеристик ТОТЭ не изменился. По–прежнему внутреннее сопротивление минимально в зоне дна и максимально в зоне выхода водорода. По–видимому, неравномерное распределение характеристик по длине ТОТЭ в большей степени связано с особенностями распределения топлива в анодном пространстве для данной конструкции ТОТЭ и в меньшей степени — с технологическим фактором. Подтверждением этого предположения служит и то, что после разборки у ТОТЭ наблюдалось растрескивание и частичное отслоение анода в верхней части секций 3. Это связано с проникновением воздуха из катодного пространства в анодное и, предположительно, является основной причиной увеличения внутреннего сопротивления верхней зоны ТОТЭ. Для проверки этого предположения у ТОТЭ, испытывавшегося в эксперименте 1, была отрезана верхняя треть, на которой произошло

отслоение анода. Топливный элемент с отрезанной верхней третью был испытан с выводом на режим по той же методике. По окончании испытания, после разборки было вновь обнаружено отслоение и растрескивание анода в верхней части ТОТЭ.

### **3. ВЫВОДЫ**

Экспериментальным путем установлено:

1. Электрические характеристики распределены неравномерно по длине трубчатого ТОТЭ с анодом на внутренней поверхности — внутреннее сопротивление и поляризационные потери минимальны в зоне дна и максимальны в зоне выхода водорода.
2. Причиной возникновения градиента характеристик может быть проникновение воздуха из катодного пространства в анодное при работе ТОТЭ, поскольку эти пространства в зоне выхода водорода не изолированы друг от друга.
3. При проектировании электрохимических установок на основе ТОТЭ необходимо предусмотреть конструктивное разделение топливного и окислительного пространств в зоне выхода газов для предотвращения проникновения воздуха в анодное пространство ТОТЭ.