

**УДК 621.352**

Е.Н. НИКУЛИНА, аспирант (СГТУ)  
Научный руководитель Е.А. Ларин, к.т.н., профессор (СГТУ)  
г. Саратов

## **ЭНЕРГОСИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И ИХ ПЕРСПЕКТИВЫ**

Топливные элементы (ТЭ) представляют собой устройства, которые осуществляют непосредственное преобразование химической энергии топлива в электрическую. Этот процесс осуществляется без необходимости преобразования энергии через промежуточные ступени (из химической в тепловую, из тепловой в механическую, из механической в электрическую). ТЭ обладают значительным потенциалом для совершенствования теплоэнергетических установок, благодаря их высокой эффективности и экологической безопасности.

Топливный элемент – это электрохимическое устройство, в котором используются любые углеводородные топлива (жидкие, газообразные) и кислород (из воздуха) для выработки энергии [2].

Применение топливных элементов в теплоэнергетических установках имеет большое значение для современных технологий и оборудования. Их использование способствует развитию чистых и эффективных источников энергии, что является основным требованием в современной энергетике. Топливные элементы также могут играть ключевую роль в реализации общенациональных и глобальных целей по снижению выбросов парниковых газов и борьбе с изменением климата.

Научные исследования подтверждают, что использование топливных элементов в теплоэнергетических установках может привести к существенному улучшению энергетической эффективности. Отсутствие промежуточных переходов в преобразовании энергии позволяет минимизировать потери и повысить общую эффективность системы. При производстве электрической энергии наиболее перспективным вариантом является использование ТЭ. Согласно исследованиям авторов [1], топливные элементы обладают высоким коэффициентом полезного действия, что делает их привлекательными для использования в теплоэнергетике. При малых мощностях в простейшем и когенерационном циклах, можно получить КПД до 60,5%. При больших мощностях в гибридном цикле с газотурбинными, паросиловыми и парогазовыми

установками коэффициент полезного действия энергоустановок может достигать до 75%. Суммарный КПД применения ТЭ на ЭУ при комбинированной выработке может вырасти до 95%.

Одним из положительных качеств использования ТЭ является минимальный выброс вредных веществ в атмосферу. Это связано с отсутствием непосредственного химического контакта топлива и окислителя.

В настоящее время выделяют пять основных типов ТЭ по составу электролита:

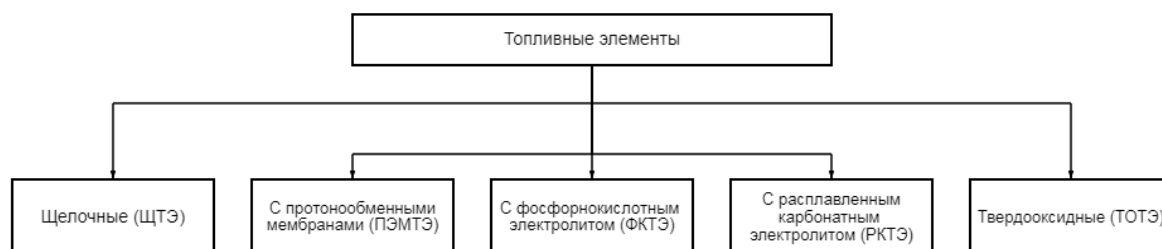


Рис. 1. Классификация топливных элементов

В таблице 1 сведены основные характеристики каждого из данных типов топливных элементов.

Таблица 1

Типы топливных элементов и их основные характеристики

Типы ТЭ	ЩТЭ	ПЭМТЭ	ФКТЭ	РКТЭ	ТОТЭ
Температура, °С	низкотемпературные		среднетемпературные	высокотемпературные	
	50-250	30-100	160-220	600-700	600-1000
Давление, МПа	0,1-0,4	0,1-0,5	0,1-1	0,1-1	0,1-1,6
Электролит	$KOH$	полимер	$H_3PO_4$	$LiCO_3/K_2CO_3$	$Y_2O_3 - ZrO_2$
Анод	$Pt/C$	$Pt/C$	$Pt/C$	Сплав $Ni$	$Ni/YSZ$
Катод	$Pt/C$	$Pt/C$	$Pt/C$	$NiO$	$LSM$
Основное топливо	$H_2$	$H_2$	$H_2$ /риформат	$H_2/CO$ /риформат	$H_2/CO/CH_4$ /риформат
Утилизация топлива, %	-	<65	<65	<80	<90
Окислитель	$O_2$ /воздух без $CO_2$	$O_2$ /воздух	$O_2$ /воздух	$CO_2/O_2$ /воздух	$O_2$ /воздух
Реакция на аноде	$2H_2 + 4OH \rightarrow 2H_2O + 4\bar{e}$	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4\bar{e}$	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4\bar{e}$	$2H_2 + 2CO_1^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4\bar{e}$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2\bar{e}$ $C_nH_{2n+2} + (3n+1)O^{2-} \rightarrow nCO_2 + (n+1)H_2O + (6n+2)\bar{e}$

Следует отметить растущую заинтересованность высокотемпературными топливными элементами – ТОТЭ и РКТЭ, связанную с большой устойчивостью к стандартным каталитическим ядам, с возможностями прямого использования углеводородов в качестве топлива, утилизации высокопотенциальной тепловой энергии для риформинга углеводородов и в когенерационных и гибридных циклах, с отсутствием необходимости в использовании катализаторов из драгметаллов. Из данных типов ТЭ преимущественно используются твердооксидные топливные элементы, так как позволяют применять любое газообразное топливо, и ещё, ТОТЭ в большей степени подходит для применения в мощных высокотемпературных энергоустановках. Наиболее подходящее топливо для твердооксидных топливных элементов - чистый водород.

### Принцип работы ТОТЭ

На рисунке 2 изображена принципиальная схема действия ТОТЭ. Топливный элемент состоит из анода, катода и электролита. Когда реакция окисления топливного элемента происходит в среде электролита,

разделяющего электроды, он получает не только тепло от химической реакции, но и ток в цепь, соединяющую электроды [2]. Ионы в ТЭ двигаются через электролит, когда в топливный элемент поступают окислитель и топливо. В ТОТЭ воздух ионизируется на катоде, а через электролит проходят ионы кислорода. На аноде ионы кислорода соединяются с топливом и окисляют топливо (водород) до молекул воды, а окись углерода при окислении преобразуется в углекислый газ. В ходе химических реакций происходит высвобождение электронов и их поток электронов преобразуется в постоянный ток. Химический процесс продолжается до тех пор, пока топливо не прекращена подача топлива и окислителя в ТЭ [1].

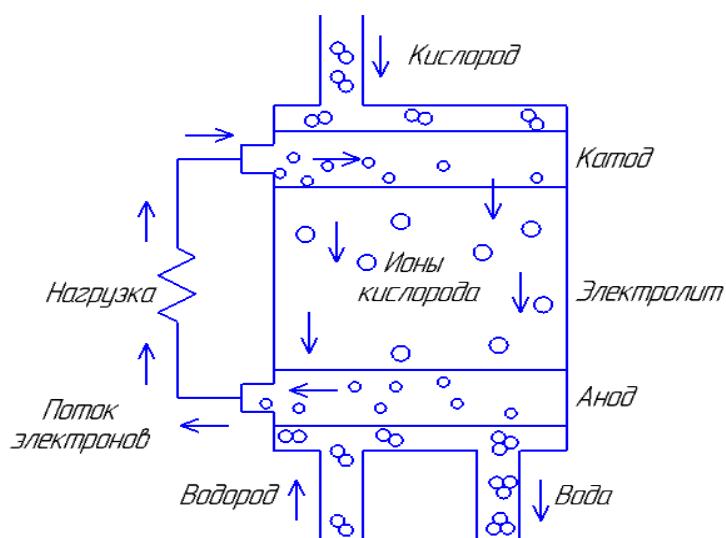


Рис. 2. Принципиальная схема действия ТОТЭ

Исследование энергосистем, основанных на твердооксидных топливных элементах, позволяет сделать вывод о их перспективности в будущем. Энергоустановки на ТЭ состоят из достаточно дорогостоящего оборудования и используют недешевое топливо. Это является одной из причин, по которой ТЭ на сегодняшний день не получили широкого распространения в станционной энергетике. Однако, несмотря на эти недостатки, ТОТЭ предлагают множество положительных свойств, которые позволяют ТОТЭ быть привлекательной альтернативой традиционным электростанциям.

Первым преимуществом ТОТЭ является его высокая эффективность. Поскольку топливо в ходе электрохимического процесса преобразуется в электричество, ТОТЭ значительно более эффективны, чем классические

системы производства энергии. Это снижает потери энергии и повышает общую энергоэффективность системы.

Второе преимущество ТОТЭ связано с их низкой эмиссией загрязняющих веществ. Так как в основе процесса работы лежит электрохимическая реакция, ТОТЭ не производят значительных выбросов шлаковых веществ и парниковых газов. Это делает их более экологичными в сравнении с традиционными видами энергетических установок, что представляется важным фактором в актуальных требованиях к устойчивому процессу развития.

Третье преимущество ТОТЭ заключается в их гибкости в использовании различных видов топлива. ТОТЭ могут работать на газе, жидком топливе и даже на биотопливе, что делает их универсальными в применении. Это позволяет диверсифицировать источники энергоснабжения и снизить зависимость от нефти и природного газа.

Третьим преимуществом ТОТЭ является гибкость использования различных видов топлива. ТОТЭ способны работать на газообразном, жидком топливе и даже биотопливе, что позволяет считать их универсальными в применении. Используя топливные элементы можно добиться глобальных изменений в использовании источников энергоснабжения - снизить зависимость от нефти и газа.

Таким образом, вопреки некоторым недостаткам, энергетические системы на основе твердооксидных топливных элементов, имеют потенциал для развития. Дальнейшее уменьшение цен на оборудование, а так же разработка более дешевых видов топлива могут привести к масштабному внедрению данной технологии. Учитывая их высокую эффективность, экологичность и гибкость в использовании топлива, ТОТЭ представляют собой перспективный метод применения их в стационарной энергетике.

#### Список литературы:

1. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. - М., 2017, НТФ "Энергопрогресс" Корпорации "ЕЭЭК" // Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки - 392 с.

2. Никулина Е.Н. Использование твердооксидных топливных элементов в теплоэнергетических установках // Бутаковские чтения: сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной

конференции / под ред. А.С. Заворина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – с. 470 - 472.

Информация об авторах:

Никулина Екатерина Николаевна, аспирант, СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77, [katehhka@mail.ru](mailto:katehhka@mail.ru)

Ларин Евгений Александрович, к.т.н, профессор, СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77, [larin@sstu.ru](mailto:larin@sstu.ru)