

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ В ЭНЕРГОСНАБЖЕНИИ

*В.Н. Борисов*

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

Кратко представлены принципы работы существующих ТЭ различного состава электролита (электродные реакции, газовые и электрические потоки), показаны технические и экологические преимущества ТОТЭ и основные проблемы, препятствующие в настоящее время их коммерческому применению в энергоустановках ТОТЭ. Приведен оценочный технико-экономический анализ, доказывающий конкурентоспособность энергоустановок на основе ТОТЭ большой мощности (свыше 100 кВт) для энергообеспечения жилых районов и промышленности.

В условиях постоянно нарастающего дефицита топлива и ухудшающейся экологической обстановки в большинстве регионов промышленно развитых стран применение энергетических установок на основе ТЭ является одним из действенных путей снижения энергетической и экологической напряженности [1, 2].

Отличительной особенностью ЭУ на основе ТЭ является использование принципа прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, минуя традиционные стадии преобразования энергии (химическая — тепловая — механическая — электрическая). Благодаря этому экономичность таких ЭУ почти вдвое выше, чем у традиционных, и КПД может достигать от 70 до 85 % с учетом утилизации тепла. Количество вредных выбросов ЭУ на ТЭ почти в 100 раз ниже традиционных из-за отсутствия непосредственного химического контакта топлива с окислителем [2].

В настоящее время практически во всех промышленно развитых странах существуют национальные программы по развитию энергетики на ТЭ. Некоторые сведения по финансированию ряда национальных программ приведены в табл. 1 [3—5].

Как видно из табл. 1, суммарная стоимость работ по этим программам составляет почти 100 М\$ США в год. При этом работы ведутся по топливным элементам, работающим на водород- и углеродсодержащем топливе, с различным составом электролита [1, 2, 6]:

- щелочной водный раствор;
- фосфорнокислый водный раствор;
- полимерная мембрана;
- расплав карбонатов щелочных металлов;
- твердооксидная система.

Таблица 1

**Финансирование ряда национальных и промышленных программ**

Страна, организация	Начало программы	Длительность программы, годы	Годовой бюджет, М\$ США
"Комитет Европейского сообщества", СЭС	1992	8	4,2
Голландия	1992	5	6,4
Италия	1994	3	10,7
Германия	1992	4	6,0
Испания	1993	5	2,4
Дания	1993	4	2,8
Швейцария	1993	3	4,0
Англия	1992	5	1,6
Япония	1993	10	—*
Норвегия	1991	5	3,2
США	1990	(ежегодно)	50

\* Данные отсутствуют.

**1. ТИПЫ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРИНЦИПЫ ИХ РАБОТЫ**

Представленные выше типы ТЭ отличаются механизмами электродных реакций и, соответственно, конструкцией и технологией их изготовления. Схематическое представление принципов работы ТЭ с различным составом электролита и соответствующие электродные реакции, газовые и электрические потоки приведены на рисунке.

Каждый из представленных ТЭ имеет свои преимущества и недостатки.

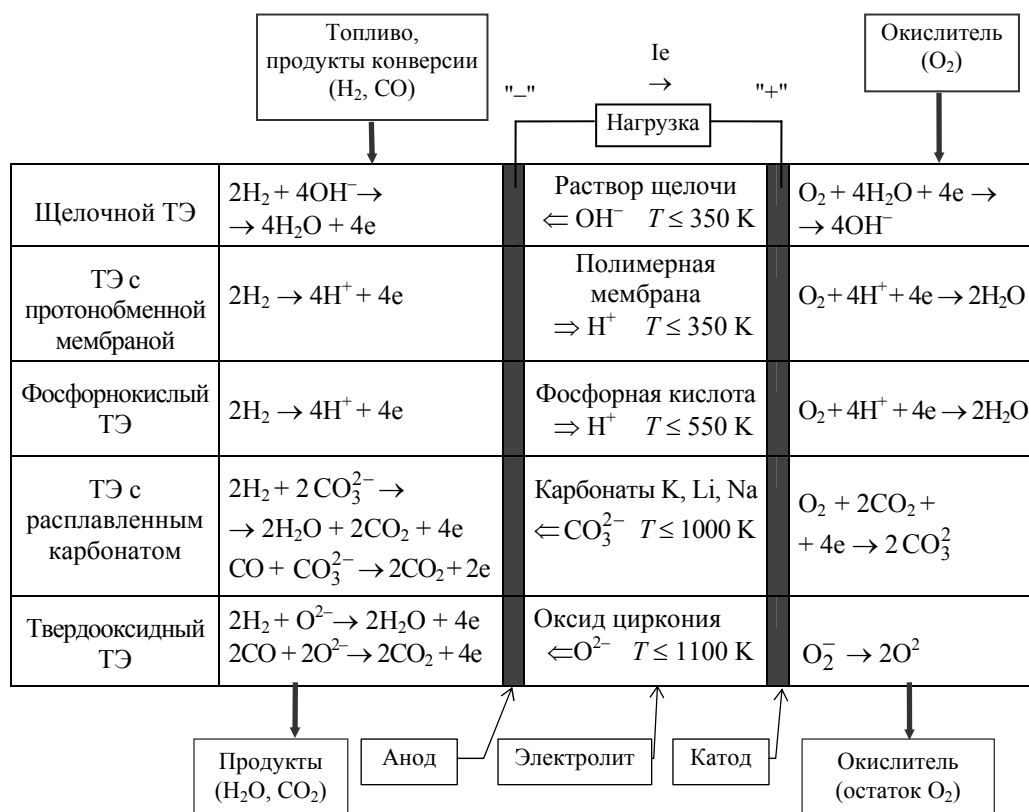
**1.1. Топливные элементы на основе щелочного электролита**

Растворы щелочей обладают высокой анионной и катионной электропроводностью, и при температуре до 100 °С в них устойчивы многие металлы и их сплавы (железо, никель, магний, серебро и др.), применяемые в качестве недорогих конструкционных, электродных и коммутирующих материалов. Недостатком таких ТЭ, препятствующим их широкому использованию, является карбонизация электролита оксидом углерода (IV). Щелочные ТЭ работают на водороде и кислороде и требуют глубокой очистки топлива и окислителя от углеродсодержащих примесей, ресурс их работы на ТЭ не превышает 5000 часов. Основная область применения — космическая и подводная техника. В настоящее время функционируют ЭУ на ТЭ мощностью до 10 кВт, разработанные в России, США и Германии [1, 2].

**1.2. Топливные элементы на основе кислотного электролита**

Кислотные растворы обладают, как правило, более низкой электропроводностью, чем щелочные, и поэтому такие ТЭ работают при более высокой температуре, чем щелочные, в диапазоне от 150 до 200 °С. В этом интервале температур

химически наиболее устойчивыми являются концентрированные растворы фосфорной кислоты. Недостатком таких ТЭ является необходимость применения электродов из благородных металлов для обеспечения их сохранности и низкотемпературной активации водорода. Фосфорнокислые ТЭ могут работать на природных видах топлива, и ресурс их работы достигает 40 000 часов. В настоящее время функционируют пилотные ЭУ мощностью до 10 МВт, разработанные в США и Японии [1, 2].



Типы топливных элементов и основные электродные процессы

### 1.3. Топливные элементы на основе полимерной протонпроводящей мембраны

Некоторые полимерные материалы обладают протонной проводимостью, связанной с подвижностью катионов водорода. Рабочая температура ТЭ ограничена термостойкостью полимера и составляет не более 100 °С. Недостатком таких ТЭ является высокая степень старения полимера в условиях электрического нагружения, а также необходимость применения электродов из благородных металлов для обеспечения низкотемпературной активации водорода. Полимерные ТЭ работают на водороде и кислороде и требуют очистки топлива и окислителя от

углеродсодержащих примесей, снижающих каталитическую активность электродов. Ресурс работы ЭУ на таких ТЭ не превышает 10 000 часов. В настоящее время функционируют пилотные ЭУ мощностью до 10 кВт, разработанные в Европе.

#### **1.4. Топливные элементы на основе расплавкарбонатного электролита**

Расплавы неорганических солей металлов обладают высокой анионной и катионной электропроводностью. Выбор карбонатов щелочных металлов в качестве электролита обусловлен их химической устойчивостью в расплавленном состоянии, а также возможностью применения природных углеводородов в качестве топлива. Температура плавления электролита определяет рабочую температуру ТЭ, составляющую от 550 до 900 °С. Недостатком таких ТЭ является возможность испарения электролита, а также снижения его характеристик серосодержащими веществами. Ресурс работы ЭУ на таких ТЭ превышает 30 000 часов. В настоящее время функционируют пилотные ЭУ мощностью до 100 кВт, разработанные в США, России и Японии [1, 2].

#### **1.5. Топливные элементы на основе твердооксидного электролита**

Многие оксидные системы обладают существенной анионной кислородной проводимостью при температурах, значительно ниже температуры их плавления. Среди таких систем особое место занимает стабилизированный оксид циркония (IV), что определяется его высокой химической стойкостью и стабильностью физико-механических свойств как в окислительной, так и в восстановительной среде. Рабочая температура ТОТЭ составляет от 800 до 1000 °С. Недостатком таких ТЭ является ограниченность выбора конструкционных и коммутирующих материалов, работоспособных при высоких температурах и в столь агрессивной окислительной и восстановительной среде, а также ограниченная совместимость составляющих ЭУ материалов по химическим и термомеханическим свойствам. Ресурс работы таких единичных ТЭ может превышать 50 000 часов. В настоящее время функционируют пилотные ЭУ мощностью до 100 кВт, разработанные в США и Японии [1—6].

Анализ развития ТЭ показывает, что для широкомасштабного применения в энергетике наиболее перспективны ЭУ на ТЭ с расплавкарбонатным и твердооксидным электролитом, обладающие более высокой эффективностью, чем традиционные ЭУ, но способные работать на природном и биологическом топливе, в отличие от других ТЭ. С точки зрения конструктивно-компоновочных решений, технологичности изготовления и эксплуатации более перспективным представляется твердоэлектролитный вариант ТЭ. Именно в этом направлении концентрируются научно-исследовательские и технологические исследования ведущих фирм электрохимической энергетики мира.

Основные проблемы, препятствующие в настоящее время коммерциализации ЭУ на ТОТЭ, заключаются в необходимости разработки рецептур коммути-

рующих и электродных материалов, не содержащих благородных металлов, для высокотемпературной окислительной среды, не лимитирующих ресурс работы ЭУ.

Решение представленных проблем позволит приступить к широкой коммерциализации ЭУ на ТОТЭ для нужд энергетики стран мира. Вместе с тем разные виды традиционных ЭУ имеют свои преимущества и недостатки и, соответственно, свои области и даже природные регионы наиболее оптимального применения. Так, гидроэлектростанции имеют, например, привязку к речным бассейнам, имеющим достаточный водный баланс; топливоориентированность теплоэлектростанций определяется приближенностью тех или иных видов природного топлива или продуктов его переработки; дизель–генераторы широко применяются на отдаленных объектах энергообеспечения и так далее.

В связи с этим несомненный интерес представляет определение конкурентоспособной по сравнению с традиционными ЭУ области применения ЭУ на ТЭ, прежде всего ТОТЭ.

## 2. ТЕХНИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Техническое сравнение ЭУ проведено на основании сопоставительного анализа. Значимость технических характеристик ЭУ для различных сфер энергообеспечения определена методом экспертных оценок. Сумма коэффициентов значимости технических характеристик ЭУ для каждой сферы энергообеспечения принята равной единице. Наилучшее значение технического параметра для ЭУ также принято за единицу, а остальные параметры выражены в относительных долях. Общий технический показатель энергоустановок определен суммированием произведений соответствующих относительных долей технических параметров на коэффициенты их значимости.

Рассматривались следующие области применения ЭУ:

- I — энергообеспечение диагностических комплексов газовых и нефтяных магистральных трубопроводов (мощность до 1 кВт);
- II — энергообеспечение технологического оборудования, вахт и жилых поселков газовых и нефтяных месторождений (мощность до 100 кВт);
- III — энергообеспечение отдаленных объектов систем связи, геологоразведки и метеослужбы (мощность до 100 кВт);
- IV — энергообеспечение жилых районов и промышленности (мощность свыше 100 кВт).

Сопоставительный анализ проведен для ЭУ на основе ТОТЭ, термоэлектрического генератора (ТЭГ), дизель–генератора, линий электропередачи (ЛЭП), атомной электростанции (АЭС) и теплоэлектростанции (ТЭС) [7—10].

Исходные данные и результаты сопоставительного анализа различных энергоустановок для представленных областей их применения приведены в табл. 2—5.

Как видно из табл. 2, наиболее оптимальными ЭУ малой мощности (до 1 кВт) для энергообеспечения диагностических комплексов газовых и нефтяных магистральных трубопроводов являются ТЭГ. Это связано с особенностями эксплуатации комплексов. Такие комплексы размещаются через каждые 25 км длины трубопроводов, причем существенная доля общей длины магистральных трубопроводов находится в жестких климатических условиях России — Крайнего Севера, Сибири и Урала. Учитывая существующую технологию и условия газо- и нефтедобычи, приоритетными параметрами работы таких ЭУ являются автономность и надежность (ресурс работы на отказ). Эффективность использования топлива (КПД ЭУ) при этом — не столь значимый параметр, тем более, что при нефтедобыче попутный газ, как правило, просто утилизируется (сжигается).

Таблица 2

**Сопоставительный технический анализ энергоустановок малой мощности  
(I область применения)**

№ п/п	Технический параметр	Значимость параметра	Абсолютная величина (отн. доля) параметра		
			ЭУ на ТОГЭ	ТЭГ	Дизель
1	Ресурс работы, годы	0,3	2 (0,2)	10 (1,0)	4 (0,4)
2	КПД, отн. ед.	0,05	0,7 (1,0)	0,05 (0,07)	0,25 (0,36)
3	Автономность, отн. ед.	0,35	1 (1,0)	1 (1,0)	0 (0)
4	Топливообеспеченность, отн. ед.	0,2	1 (1,0)	1 (1,0)	0 (0)
5	Время регламентных работ, часы	0,1	6 (0,33)	2 (1,0)	6 (0,33)
6	Общий показатель, отн. ед.	1	0,69	0,95	0,17

Таблица 3

**Сопоставительный технический анализ энергоустановок средней мощности  
(II область применения)**

№ п/п	Технический параметр	Значимость параметра	Абсолютная величина (отн. доля) параметра		
			ЭУ на ТОГЭ	ЛЭП	Дизель
1	Ресурс работы, годы	0,3	2 (0,1)	20 (1,0)	4 (0,2)
2	КПД, отн. ед.	0,05	0,7 (0,875)	0,8 (1,0)	0,25 (0,3125)
3	Метеостойкость, отн. ед.	0,35	1	0,5	1
4	Время регламентных работ, часы	0,1	6 (0,33)	2 (1,0)	6 (0,33)
5	Энергообеспеченность, отн. ед.	0,2	1 (1,0)	0 (0)	0 (0)
6	Общий показатель, отн. ед.	1	0,66	0,63	0,46

Как видно из табл. 3, наиболее оптимальными ЭУ средней мощности (до 100 кВт) для энергообеспечения технологического оборудования, вахт и жилых поселков газовых и нефтяных месторождений являются ЭУ на ТОГЭ

и ЛЭП. Конкурентоспособность ЭУ на ТОТЭ обусловлена их автономной энергообеспеченностью и независимостью от метеоусловий, так как одной из проблем эксплуатации ЛЭП в условиях Крайнего Севера, Урала и Сибири является достаточно высокая метеоуязвимость линий (ветер, обледенение, морозы) и, соответственно, вероятность их повреждения и нарушения энергообеспечения.

Как видно из табл. 4, наиболее оптимальными ЭУ средней мощности (до 100 кВт) для энергообеспечения отдаленных объектов систем связи, геологоразведки и метеослужбы являются ЭУ на ТОТЭ. Это обусловлено, прежде всего, высокой эффективностью ЭУ, позволяющей снизить транспортные затраты на доставку топлива на отдаленные объекты.

Таблица 4

**Сопоставительный технический анализ энергоустановок средней мощности  
(III область применения)**

№ п/п	Технический параметр	Значимость параметра	Абсолютная величина (отн. доля) параметра		
			ЭУ на ТОТЭ	ТЭГ	Дизель
1	Ресурс работы, годы	0,2	2 (0,2)	10 (1,0)	4 (0,4)
2	КПД, отн. ед.	0,5	0,7 (1,0)	0,05 (0,07)	0,25 (0,36)
3	Надежность, отн. ед.	0,25	0,5 (0,5)	1 (1,0)	0,7 (0,7)
4	Время регламентных работ, часы	0,05	6 (0,33)	2 (1,0)	6 (0,33)
5	Общий показатель, отн. ед.	1	0,68	0,54	0,45

Таблица 5

**Сопоставительный технический анализ энергоустановок большой мощности  
(IV область применения)**

№ п/п	Технический параметр	Значимость параметра	Абсолютная величина (отн. доля) параметра		
			ЭУ на ТОТЭ	ТЭС	АЭС
1	Ресурс работы, годы	0,2	2 (0,05)	10 (0,25)	40 (1,0)
2	КПД, отн. ед.	0,4	0,7 (1,0)	0,3 (0,43)	0,5 (0,72)
3	Экологичность эксплуатации, отн. ед.	0,15	1,0 (1,0)	0,7 (0,7)	1,0 (1,0)
4	Отсутствие риска глобальных экологических катастроф, отн. ед.	0,25	1,0 (1,0)	1,0 (1,0)	0,7 (0,7)
5	Общий показатель, отн. ед.	1	0,81	0,58	0,81

Как видно из табл. 5, централизованное энергообеспечение жилых районов и промышленности представляется наиболее перспективной областью применения ЭУ на ТОТЭ. Возрастает значимость высокой эффективности ЭУ (КПД ЭУ с учетом утилизации тепла), поскольку она напрямую связана с финансированием потребителем стоимости энергообеспечения. В условиях населенных

районов сказываются преимущества эксплуатации экологически чистых, по сравнению с ТЭС, а также глобально безопасных, по сравнению с АЭС, ЭУ на ТОТЭ. Наличие высококвалифицированного персонала населенных пунктов позволяет осуществлять управление и обслуживание ЭУ на ТОТЭ.

Таким образом, с технической точки зрения, наиболее оптимальной сферой применения ТОТЭ являются ЭУ средней (до 100 кВт) и большой (свыше 100 кВт) мощности для энергообеспечения вахт и жилых поселков газовых и нефтяных месторождений, отдаленных объектов систем связи, геологоразведки и метеослужбы, а также для централизованного энергообеспечения жилых районов и промышленности. Однако для коммерческой реализации программ разработки и внедрения ЭУ на ТОТЭ кроме технического сравнения необходим и экономический анализ перспективности их применения.

### 3. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ТВЕРДОКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Сравнение экономической эффективности ЭУ на ТОТЭ с другими традиционными ЭУ для энергообеспечения вахт и жилых поселков газовых и нефтяных месторождений, отдаленных объектов систем связи, геологоразведки и метеослужбы, а также для централизованного энергообеспечения жилых районов и промышленности приведено в табл. 6—8.

Затраты на ЭУ приведены в ценах на начало 1999 года для следующих параметров и условий эксплуатации:

- ресурс работы (непрерывной эксплуатации) — 10 лет;
- мощность — 100 кВт;
- доставка топлива на расстояние — 100 км;
- вид транспорта доставки — автомобильный (для отдаленных районов — вертолет);
- изготовление — серийное.

Таблица 6

#### Сопоставительный экономический анализ энергоустановок средней мощности (II область применения)

№ п/п	Экономический параметр	Стоимость, тыс. руб.		
		ЛЭП – 110	ЭУ на ТОТЭ	ЭУ на ТОТЭ
1	Капитальные затраты	50	5	5
2	Изготовление, монтаж	20	1000	1000
3	Обслуживание, регламент, ремонт	50 (с учетом ремонта)	1000 (4 регламента)	250 (1 регламент)
4	Стоимость топлива, электроэнергии	1000	—	—
5	Суммарные затраты	1120	2005	1205



Как видно из табл. 6, в настоящее время по оценочным экономическим параметрам ЭУ на основе ТОТЭ почти в два раза уступают традиционным линиям электропередач. Это вызвано высокой стоимостью изготовления ТОТЭ и необходимостью замены ТОТЭ энергоустановок каждые 2 года (то есть 4 регламента на 10 лет эксплуатации). При увеличении ресурса ТОТЭ до 45 000 часов ЭУ на их основе могут быть конкурентоспособными с ЛЭП.

Как видно из табл. 7, по оценочным экономическим параметрам ЭУ на основе ТОТЭ в настоящее время почти в два раза уступают дизель-генераторам. Это вызвано высокой стоимостью изготовления ТОТЭ и необходимостью замены ТОТЭ энергоустановок через каждые 2—5 лет эксплуатации. В условиях отдаленности объектов энергоснабжения стоимость энергии, вырабатываемой дизель-генератором, определяется стоимостью доставки топлива. Даже при доставке топлива вертолетом дизель-генератор обладает экономическим преимуществом.

Таблица 7

**Сопоставительный экономический анализ энергоустановок средней мощности  
(III область применения)**

№ п/п	Экономический параметр	Стоимость, тыс. руб.		
		Дизель	ЭУ на ТОТЭ	ЭУ на ТОТЭ
1	Капитальные затраты	5	5	5
2	Изготовление, монтаж	10	1 000	1 000
3	Обслуживание, регламент, ремонт	5 (с учетом ремонта)	1 000 (4 регламента)	250 (1 регламент)
4	Стоимость топлива	1 200	700	700
5	Стоимость доставки топлива	200	100	100
6	Суммарные затраты	1 420	2 805	2 055

Таблица 8

**Сопоставительный экономический анализ энергоустановок большой мощности  
(IV область применения)**

№ п/п	Экономический параметр	Величина параметра, тыс. руб.		
		АЭС	ЭУ на ТОТЭ	ТЭС
1	Капитальные затраты	100	50	150
2	Изготовление, монтаж	400	1 000	200
3	Обслуживание, регламент, ремонт	150	250 (1 регламент)	50
4	Стоимость топлива	1 700	700	1 600
5	Утилизация отходов	600	—	200
6	Суммарные затраты	2 950	2 000	2 200

Как видно из табл. 8, по оценочным экономическим параметрам ЭУ на основе ТОТЭ могут быть конкурентоспособны с традиционными энергостанциями (ТЭС и АЭС) при увеличении ресурса ТОТЭ до 45 000 часов. По сравнению с АЭС преимущества ЭУ на ТОТЭ обусловлены экологической безопасностью продуктов преобразования топлива, не требующих специальных методов их утилизации. По сравнению с ТЭС преимущества ЭУ на ТОТЭ обусловлены высокой степенью использования топлива и, в меньшей степени, экологической безопасностью продуктов преобразования топлива. В условиях снижения запасов природного топлива в мире и, соответственно, увеличения его стоимости конкурентоспособность ЭУ на ТОТЭ будет только возрастать.

#### 4. ВЫВОДЫ

Сопоставительный технико-экономический анализ энергетических установок, показал, что благодаря ряду несомненных технических достоинств, включая экономичность и высокую экологическую чистоту эксплуатации, при современном уровне развития науки, техники и технологии производства, ЭУ на основе ТОТЭ (при мощности свыше 100 кВт) могут быть коммерчески конкурентоспособными по сравнению с традиционными для энергообеспечения жилых районов и промышленности. В условиях снижения запасов природного топлива в мире и, соответственно, увеличения его стоимости можно ожидать расширения области применения ЭУ на ТОТЭ для энергообеспечения отдаленных объектов (систем связи, геологоразведки, метеослужбы и др.).

#### ССЫЛКИ

1. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 264 с.
2. Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф. Электрохимические генераторы. — М.: Энергоиздат, 1982. — 430 с.
3. Williams M.C. U.S. Solid Oxide Fuel Cell Powerplant and Commercialization // Proceedings of the Fifth International Symposium on SOLID OXIDE FUEL CELLS (SOFC-V). The Electrochemical Society, Inc., 10 South Main Street, Pennington, New Jersey 08534-2896. — USA — P. 3—11.
4. Sasaki H. and Takasu K. Status of SOFC Development in Japan // Proceedings of the Fifth International Symposium on SOLID OXIDE FUEL CELLS (SOFC-V). The Electrochemical Society, Inc., 10 South Main Street, Pennington. — New Jersey 08534-2896. — USA — P. 12—19.
5. Ponthieu E. SOFC Support Programmes by the European Commission // Proceedings of the Fifth International Symposium on SOLID OXIDE FUEL CELLS (SOFC-V). The Electrochemical Society, Inc., 10 South Main Street, Pennington, New Jersey 08534-2896. — USA. — P. 20—25.

6. Перфильев М.В., Демин А.К., Кузин Б.Л., Липилин А.С. Высокотемпературный электролиз газов. — М.: Наука, 1988. — 232 с.
7. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. — Киев: Наукова думка, 1979. — 768 с.
8. Жигалин О.И., Лупачев П.Д. Уменьшение токсичности автомобильных двигателей. — М.: Транспорт, 1986. — 366 с.
9. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
10. Шведов В.П., Седов В.М., Рыбальченко И.Л., Власов И.Н. Ядерная технология. — М.: Атомиздат, 1979. — 336 с.