

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.О. Сайданов, д.т.н., профессор  
ВИ(ИТ) ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулева  
И.К. Ландграф, зам. директора–гл. конструктор  
М.А. Касаткин, нач. отдела

Филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Окончание. Начало см. в № 4 (270) 2017

В 2016 г. ИФТТ РАН (г. Черноголовка) совместно с филиалом ЦНИИ СЭТ разработали демонстрационный образец ЭУ с ТОТЭ мощностью 2 кВт (рис. 15), основанной (впервые в России) на ТОТЭ планарной конструкции. В табл. 5 представлены основные характеристики ЭУ.

Привлекательность внедрения ЭЭУ с ЭХГ на основе ТОТЭ состоит, помимо всего прочего, в том, что они могут успешно использоваться как в виде самостоятельного источника электрической энергии и теплоты, так и в составе комбинированных (гибридных) энергоустановок и систем (совместно с ЭЭУ на базе ДВС, ГТУ и т. п.) [1, 10, 11]. Применение ЭЭУ с ЭХГ на основе ТОТЭ целесообразно в диапазоне мощностей до 1 МВт в качестве автономных энергоблоков, например, для замены местных котельных, КПД которых очень низок и они в большинстве своем не отвечают требованиям по экологии; в качестве источников распределенной генерации; для оснащения промышленных предприятий. Еще более эффективно применение ЭЭУ с ТОТЭ простого, когенерационного и гибридного циклов в диапазоне мощностей 10–100 МВт в централизованной электроэнергетике и распределенной энергетике районного и городского масштаба [17]. Учитывая компактность и экологическую чистоту ЭЭУ с ЭХГ на основе ТОТЭ, они прекрасно могут быть интегрированы в инфраструктуру существующих объектов жилищно-коммунального хозяйства и промышленности.

Вместе с тем ЭЭУ с ЭХГ на основе ТОТЭ, несмотря на все свои преимущества, имеют один весьма существенный недостаток. Время пуска таких установок со-

ставляет несколько часов, что исключает возможность их использования на транспорте, а также в качестве резервных и аварийных источников энергии.

Таблица 5

Характеристики экспериментального образца батареи ТОТЭ, мощностью 2 кВт

| Наименование параметра, единица измерения  | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Вид и сила вырабатываемого тока, А   | Постоянный, 53,5   |
| Напряжение, В  | 37,5               |
| Количество ТЭТО в батарее  | 25                 |
| Количество батарей в ЭХГ   | 4                  |
| Давление природного горючего газа на входе ЭУ (определяется характеристикой источника подачи), бар               | 1,5–55,0           |
| Удельный расход природного горючего газа (при низшей теплотворной способности 35 МДж/нм <sup>3</sup> ), кг/кВт·ч | 0,311              |
| Расход воздуха, кг/ч   | 37                 |
| Электрический КПД, %   | 50 %               |
| Время пуска, ч   | 4                  |
| Наработка на отказ, ч  | 8000               |

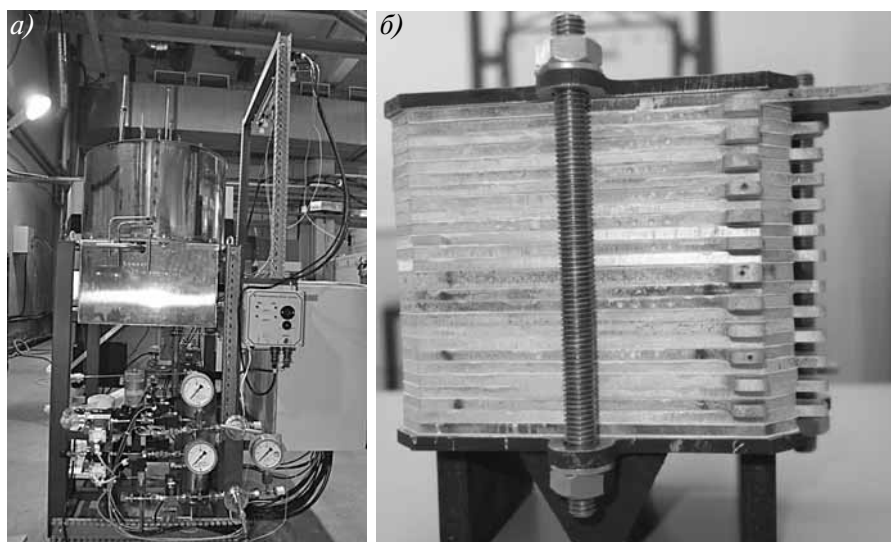


Рис. 15. Экспериментальный образец ЭУ с ТОТЭ мощностью 2 кВт:

а — внешний вид установки (без теплоизоляции);  
б — батарея ТОТЭ планарной конструкции

Кафедра двигатели и тепловые установки ВИ(ИТ) ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулева по роду своей деятельности сотрудничает с направлением водородной энергетики филиала ЦНИИ СЭТ с конца 1990-х гг.

Разрабатываемые энергоустановки на топливных элементах (ЭУ с ТЭ) по направлению водородной энергетики — реальная альтернатива существующим дизельным энергоустановкам, которые в настоящее время являются основой военной энергетики. ЭУ с ТЭ после их всесторонних испытаний и сертификации могут быть востребованы для резервного и автономного энергообеспечения объектов МО РФ, в том числе для расположенных в Арктической зоне РФ военных городков замкнутого цикла.

В ходе выполнения одной из НИР сотрудниками кафедры и филиала ЦНИИ СЭТ разработана комбинированная (гибридная) энергетическая установка на базе ЭХГ с ТОТЭ и ЭУ с ДВС, дооборудованного системой комплексной утилизации теплоты (СКУТ) [10].

Отличительной особенностью данной схемы является то, что водородосодержащий газ для ТЭТО на режиме пуска установки получают термохимической конверсией топлива в

собственных продуктах сгорания ДВС согласно реакции:

$$C_xH_y + x(H_2O + CO_2) \leftrightarrow (x+y)H_2 + 3xCO - Q,$$

где  $Q$  — тепловой эффект эндотермической реакции восстановления углеводородного топлива собственными продуктами сгорания.

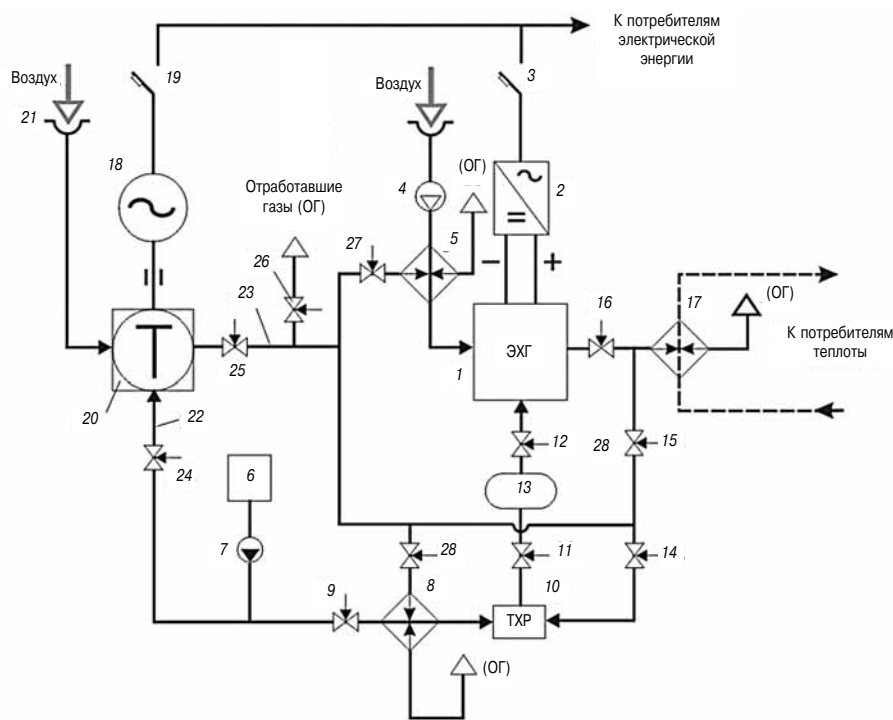
Процессы некаталитической конверсии дизельного топлива в собственные продукты сгорания исследовались сотрудниками кафедры двигатели и тепловые установки ВИ(ИТ) ВА МТО в 1990-х гг. Результаты исследований подробно описаны в литературе, например [9].

На рис. 16 представлена технологическая схема комбинированной энергоустановки на базе ЭХГ с ТОТЭ и ЭУ с ДВС, дооборудованного СКУТ [12].

Функционирование комбинированной энергоустановки (рис. 16) осуществляется по следующему алгоритму. Первоначально в течение нескольких десятков секунд запускается и достигает номинальной мощности ДВС 20, а электрический генератор 18 через коммутационную аппаратуру 19 присоединяется к шинам потребителей электрической энергии и полностью обеспечивает их электроснабжение. При этом в ДВС 20 через систему воздухозабора 21 поступает атмосферный воздух, а из системы топливоснабжения 22 (открыт запорно-регулирующий орган 24) углеводородное топливо.

При сгорании топлива в ДВС образуются продукты сгорания — ОГ, при расширении которых вырабатывается полезная мощность, которая передается на привод электрического генератора 18. После расширения ОГ поступают в систему газовыпуска 23, из которой через запорно-регулирующие органы 14, 15, 25, 28, поступают в газовые контуры: котла-утилизатора 17 для выработки пара или горячей воды в водяном контуре последнего, теплообменника-подогревателя топлива для конверсии 8, в топливный контур которого

получают пар или горячую воду в водяном контуре последнего, теплообменника-подогревателя топлива для конверсии 8, в топливный контур которого которого



**Рис. 16. Схема комбинированной энергетической установки:**

1 — ЭХГ с ТОТЭ; 2 — инвертор; 3, 19 — коммутационная аппаратура; 4 — воздушный компрессор; 5, 8 — подогреватели воздуха и топлива; 6 — емкость запаса углеводородного топлива; 7 — топливный насос (компрессор); 9, 11, 12, 14–16, 24–28 — запорно-регулирующие органы; 10 — термохимический реактор (ТХР); 13 — теплоизолированная буферная емкость; 17 — котел-утилизатор; 18 — генератор переменного тока; 20 — ДВС; 21–23 — системы воздухозабора, топливоснабжения и газовыпуска ДВС

который также поступает подогретое и испаренное углеводородное топливо (при этом запорно-регулирующие органы 26, 16 закрыты).

В ТХР 10 происходит эндотермическая реакция конверсии углеводородного топлива в водородосодержащий газ (смесь водорода и оксида углерода и пр.), который через запорно-регулирующий орган 11 поступает в буферную емкость 13 (при этом запорно-регулирующий орган 12 закрыт). После накопления в буферной емкости 13 достаточного для запуска ЭХГ количества водородосодержащего газа одновременно открываются запорно-регулирующие органы 12, 27 и включается компрессор 4, при этом водородосодержащий газ поступает в топливный контур ЭХГ 1, атмосферный воздух компрессором 4 подается сначала в воздушный контур теплообменника-подогревателя 5, в газовый контур которого поступают ОГ ДВС 20, а после подогрева — в воздушный контур ЭХГ 1, в топливных элементах происходит электрохимическая экзотермическая реакция, в результате которой вырабатывается постоянный электрический ток и образуются высокотемпературные продукты (газовая смесь двуокиси углерода и водяного пара). Постоянный ток поступает в инвертор 2, где преобразуется в переменный и через коммутационную аппаратуру 3 подается на шины потребителей электрической энергии. При этом высокотемпера-

турные продукты из ЭХГ 1 поступают через открытый запорно-регулирующий орган 16 в газовый контур котла-утилизатора 17, а через открытые запорно-регулирующие органы 15, 14, 28, 27 в ТХР 10 и газовые контуры теплообменников-подогревателей 5, 8. По мере набора электрической и тепловой мощности ЭХГ 1 ДВС 20 постепенно выводится из действия и останавливается, отключается коммутационная аппаратура 19, закрываются запорно-регулирующие органы 24, 25 и дальнейшее электро- и теплоснабжение потребителей осуществляется только от ЭХГ 1.

#### Выводы

1. Рассмотрены основные типы ТЭ и ЭЭУ на их основе, определены преимущества ЭЭУ на ТЭ перед другими источниками энергии, а также области их применения в энергетике и на транспорте.

2. Проанализированы результаты комплекса НИОКР, выполненных филиалом ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в 1990–2016 гг. по созданию ТПТЭ и ТОТЭ, а также ЭЭУ на их основе.

3. Отмечен значительный научно-технический задел в области разработки ТПТЭ и ТЭТО, который позволяет сократить сроки внедрения новых высокоэффективных и экологически чистых энергоустановок на объектах малой энергетики и военной инфраструктуры.

#### Литература

1. Аваков В.Б., Зинин В.И., Ландграф И.К. Автономные энергоустановки на основе высокотемпературных электрохимических генераторов для промышленных и коммунальных объектов // Теплоэнергоэффективные технологии. — 1997. — № 4. — С. 25–29.
2. Аваков В.Б., Ландграф И.К., Кулаков Г.В. и др. Состояние и потенциал развития водородной энергетики // Академия энергетики. — 2008. — № 4. — С. 28–32.
3. Аваков В.Б., Богдановская В.А., Ландграф И.К. и др. Характеристики мембранно-электродных блоков водородовоздушных топливных элементов с ртсост/с-катализатором // Электрохимия. — 2014. — Т. 50, № 7. — С. 733.
4. Аваков В.Б., Ландграф И.К., Ковалевский В.П. Экспериментальная стендовая доводка конструкции и эксплуатационных режимов твердооксидного электрохимического генератора мощностью около 1000 Вт // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2014. — Вып. 81 (365). — С. 5–24.
5. Аваков В.Б., Хайров Д.А., Ландграф И.К. и др. Разработка моноблочного конвертора углеводородного топлива с отбором водорода из зоны реакции // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — Вып. 2 (380). — С. 111–120.
6. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухо-независимые энергетические установки. — СПб.: Судостроение, 2006. — 424 с.
7. Ковалевский В.П., Аваков В.Б., Ландграф И.К. Конструкции трубчатых твердооксидных топливных элементов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2014. — Вып. 81 (365). — С. 25–50.
8. Системы малой энергетики. Современное состояние и перспективы развития / Аверьянов В.К., Карасевич А.М., Сайданов В.О. и др.; под ред. Аверьянова В.К. — М.: ИД «Страховое ревю», 2008. — Т. 1. — 466 с.
9. Сайданов В.О., Дыбок В.В., Складенко Е.В. Экспериментальное исследование работы дизеля 6Ч15/18 с системой термохимической обработки топлива по нагрузочной характеристике // Двигателестроение. — 1991. — № 12. — С. 5–6.

10. Сайданов В.О., Агафонов А.Н., Гудзь В.Н. Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2005. — 262 с.

11. Сайданов В.О., Михайлов А.К., Ландграф И.К. Энергетические установки на базе топливных элементов // Новости электротехники. — 2007. — № 5 (47). — С. 2–5; № 6 (48). — С. 27–29.

12. Патент РФ 2206777 С1 МПК 7 F 02 G 5/00. Способ работы комбинированной энергоустановки для совместной выработки электрической и тепловой энергии / Сайданов В.О., Агафонов А.Н., Аваков В.Б., Ландграф И.К. — Оpubл. 20. 06. 2003, бюл. № 17.

13. Патент РФ 2328060 С1 МПК H01M 8/00. Топливный элемент и батарея топливных элементов / Аваков В.Б., Кулаков Г.В., Ландграф И.К. и др. — Оpubл. 27. 06. 2008., бюл. № 18.

14. Патент РФ 114808 С1 МПК H01M 8/00. Полномасштабный топливный элемент с твердополимерным электролитом для батарей топливных элементов мощностью около 60 кВт / Аваков В.Б., Кулаков Г.В., Ландграф И.К. и др. — Оpubл. 25. 10. 2011.

15. Патент РФ 152752 С1 МПК G01B 3/34. Конвертор паровой органического топлива на базе нежаростойких конструкционных материалов со сниженными потерями энергии с уходящими газами / Аваков В.Б., Ландграф И.К., Хайров Д.А. и др. — Оpubл. 20. 06. 2015.

16. Патент РФ 154716 С1 МПК H01M 8/00. Батарея водородовоздушная многосекционная для энергоустановок мегаваттного класса / Аваков В.Б., Ландграф И.К., Хайров Д.А. и др. — Оpubл. 20. 06. 2015.

17. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: Материалы, Технологии, Рынки. — М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорация ЕЭЭК, 2017.

18. Yoshinari Kobayashi, Yoshima Sa Ando, Tatsuo Kabata, Masanori Nishiura, Kazuo Tomida, Norisha Mataka. Extremely high-efficiency thermal power system—solid oxide fuel cell (SOFC) triple combined-cycle system // Mitsubishi Heavy Industries technical review. — 2011. Vol. 48. — № 3. — P. 9–15.