

Использование топливных элементов для выработки электроэнергии

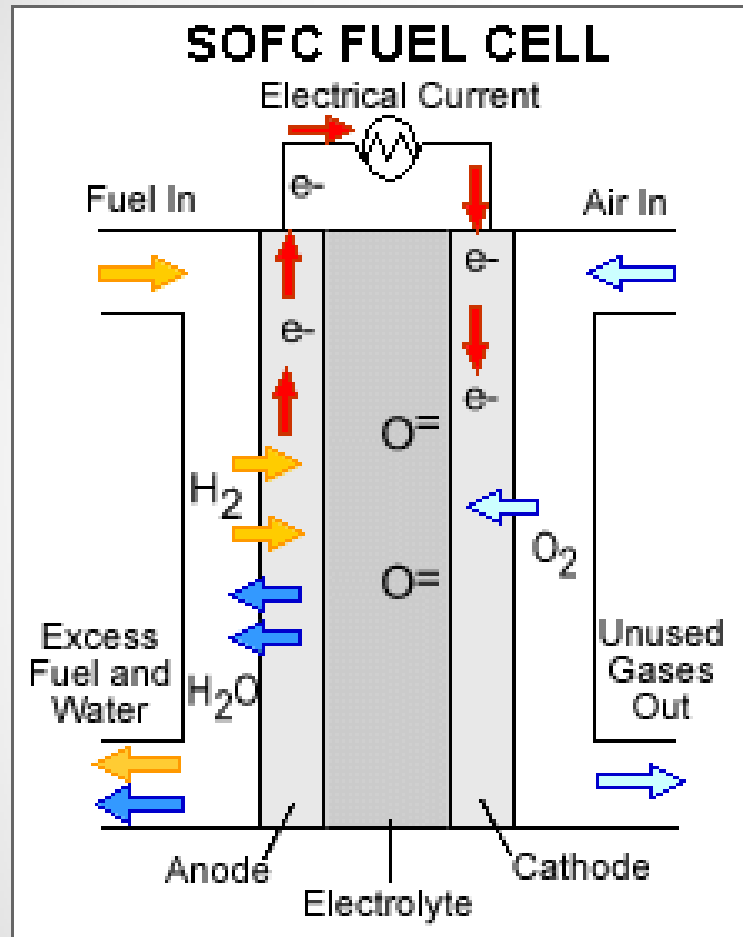
Энергетические установки малой мощности

Бржезинский Геннадий Вацлавович

Семинар «Развитие сотрудничества Россия и Германии в области
альтернативной энергетики»

2016 год

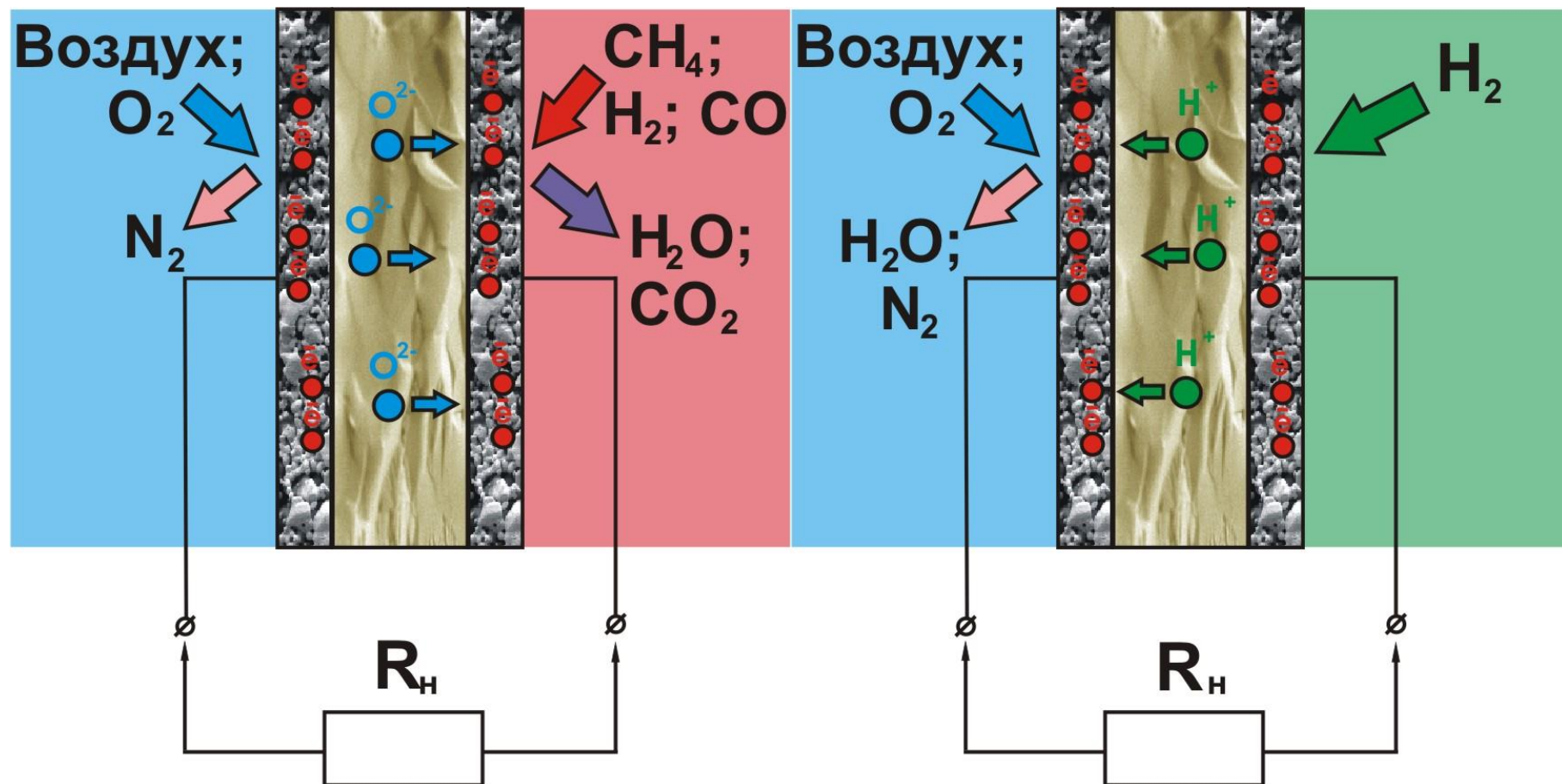
Что такое твердооксидные топливные элементы TOTЭ (SOFC)

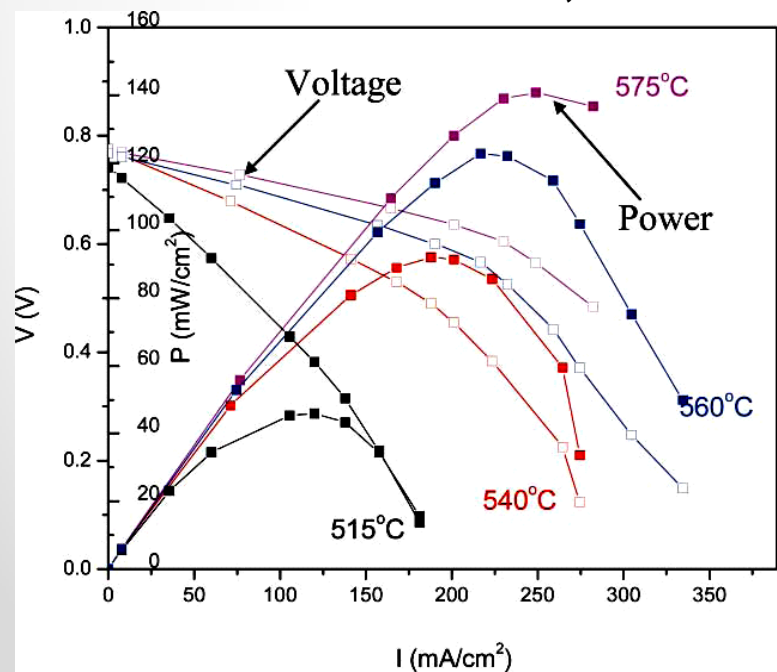
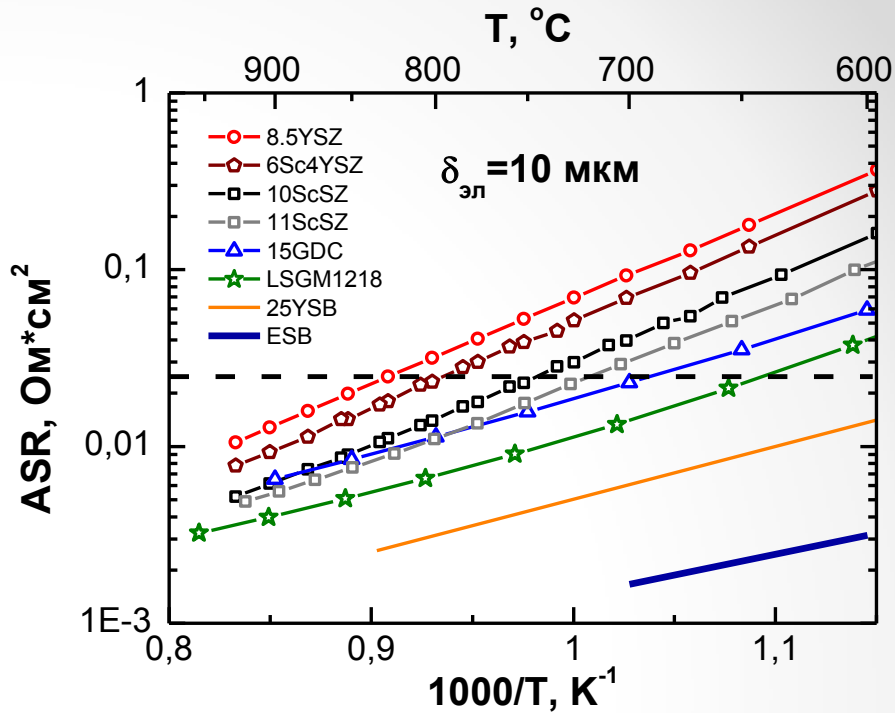
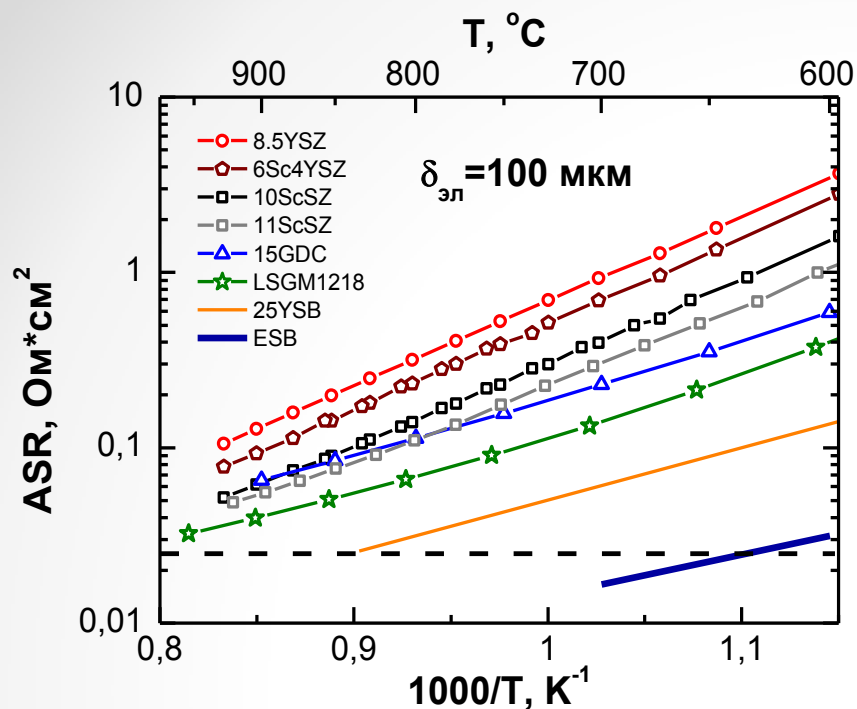


- Рабочая температура 500°C - 1000°C
- Высокая эффективность прямого преобразования химической энергии топлива в электричество
- Высокий КПД
- Топливом могут служить любые углеводороды – топливная универсальность: H_2 , природный газ, биогаз, другие газы, а окислителем – воздух
- Совместная выработка электричества и тепла
- Выходная мощность от Вт до МВт

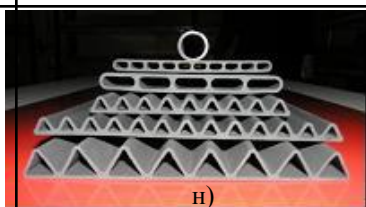
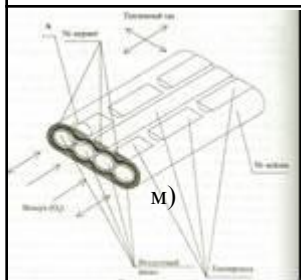
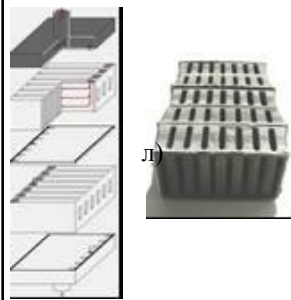
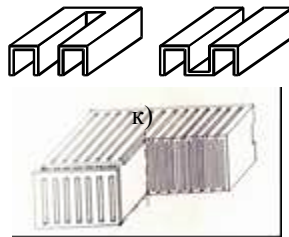
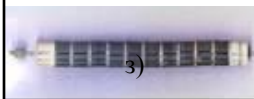
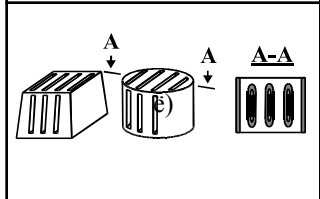
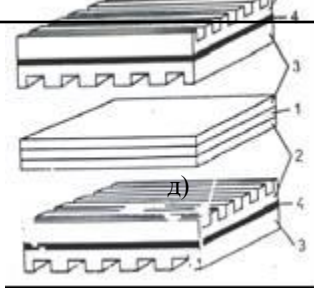
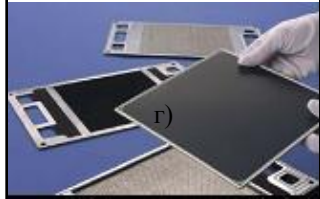
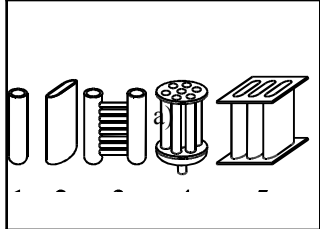
В TOTЭ плотный тонкий слой электролита, как правило, расположен между двумя пористыми электродами: анодом и катодом. На анод в зону контакта с электролитом подается топливо, где оно окисляется потоком ионов кислорода из твердого электролита. При этом, на аноде высвобождаются электроны, идущие во внешнюю цепь. Пройдя через внешнюю нагрузку замкнутой цепи, электроны попадают на катод, где происходит на границе с электролитом ионизация кислорода. Таким образом, через твердый электролит протекает ионный ток, равный электронному току, протекающему через внешнюю цепь. При соединении единичных элементов в батарею вводится еще один компонент TOTЭ – токопровод (интерконнект).

Топливный элемент





Пунктирной линией показаны приемлемые температуры и электролиты для создания ТОТЭ с несущим электролитом 100 мкм и пленочным электролитом 10 мкм при ASR равном 15 мкОм.

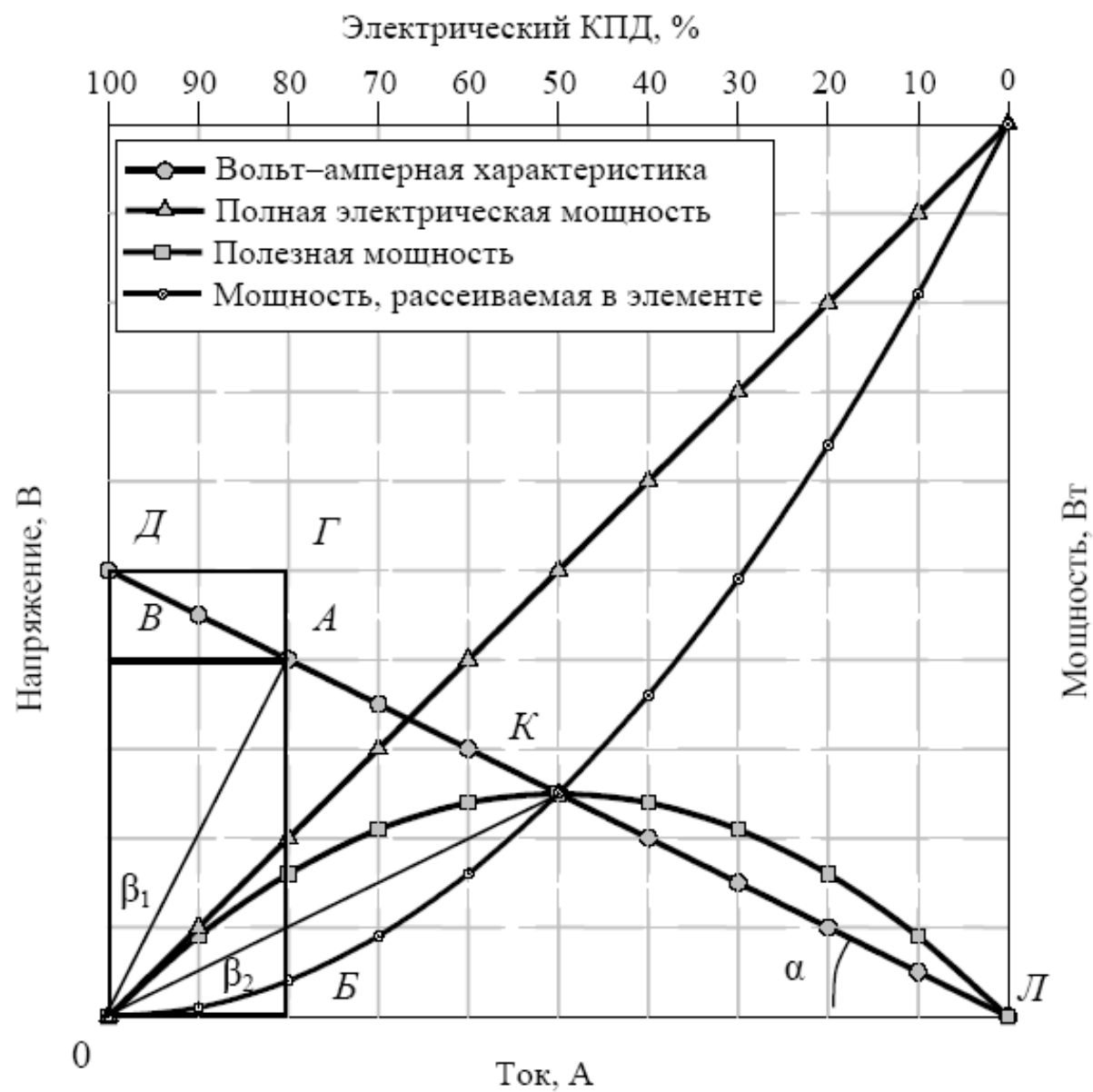


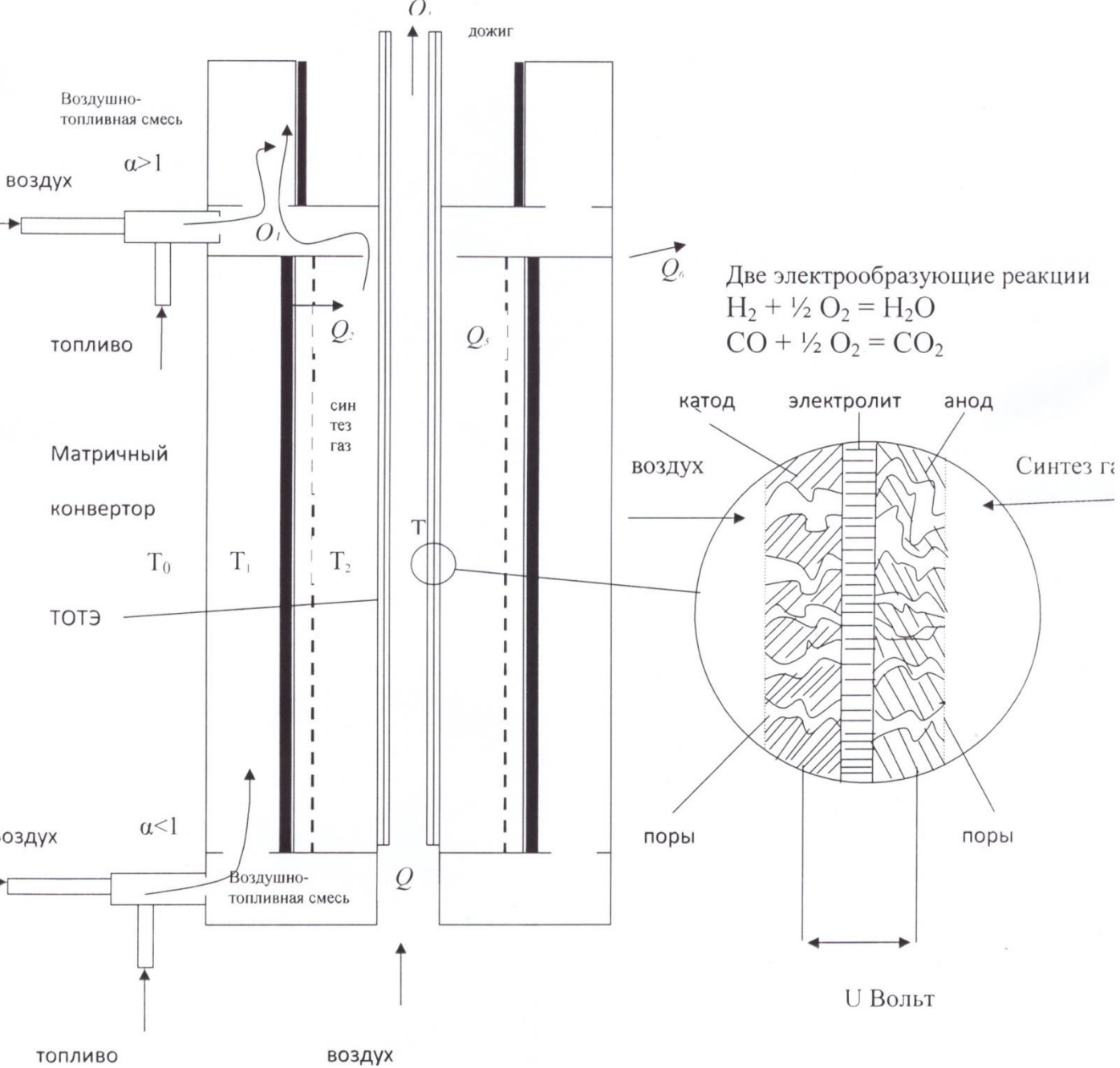
Трубчатые

Планарные

Блочные

Модифицированный
планар





- η_j - Коэффициент полезного действия (КПД) j-узла
- η_1 - КПД узла подачи топлива и воздуха - 0,95-0,98%
- η_2 - КПД конвертора - 0,95-0,98%
- η_3 - КПД ТОТЭ - не более 0,50%
- η_4 КПД утилизации топлива 0,65-0,90%
- η_5 - КПД интерконнектора 0,85-0,95%
- η_6 - КПД преобразования DC-DC, DC-AC 0,88-0,90%
- $\eta_{\text{общ}} = \prod_{j=1}^n \eta_j = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 = 0,245-0,382\%$

Немного истории 19 век

Павел Николаевич Яблочков

1876



«электродвижущий элемент»

- Сформулировали задачу.
- Не целесообразно энергию угля переводить в тепловую энергию.
 - Необходимо прямое преобразование химической энергии в электричество.
- Преобразование надо вести в электрохимических устройствах.



1894

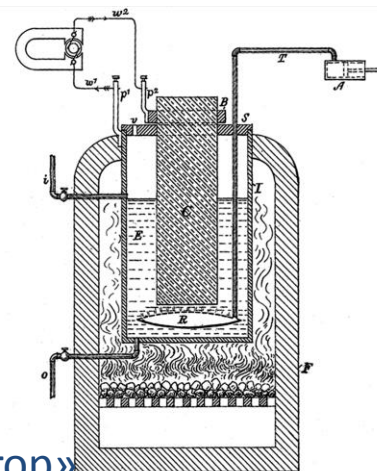
Вильгельм Фридрих Оствальд

Dr. William W. JACQUES

1896

«угольный генератор»

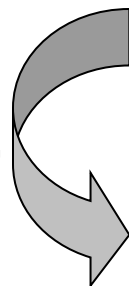
U.S Patent # 555,511 (3 March 1896)



Вальтер Герман Нернст

Первый твердый электролит с ионной проводимостью — оксид циркония стабилизированный оксидом иттрия

1897



Историческое развитие работ по ТОТЭ

Исследования ТОТЭ в течении XX- века велись отдельными лабораториями, в основном, для военных и космических целей

1957 год Начало исследований твердых электролитов
ИЭХ УфАН (Свердловск)



Pt

1989 год
ВТ ЭХГ-1000 (1кВт) 2000 часов ВТК в ИВТЭ (Свердловск)

2009 год
ЭУ (АИТ) -1 кВт 8800 часов ВНИИТФ (Снежинск)



Ni кермет
LSM
ВХ сталь

2013 год
ЭУ -1 кВт
Центр Келдыша (Москва)

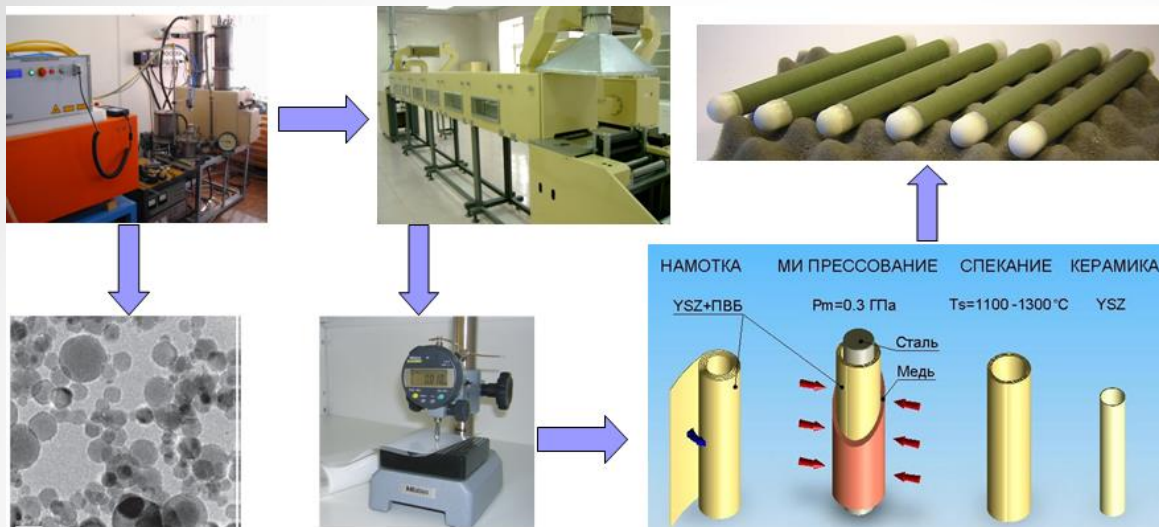


2014 год
ЭХГ 1500 для катодной защиты газопроводов (Новоуральск)



Pt

Уникальность разработок ИЭФ



Полностью стабилизированного
диоксида циркония

89% ZrO_2 – 10 % Sc_2O_3 – 1 % CeO_2



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ "РОСАТОМ"

ОАО "Чепецкий механический завод"

Уникальность слабо
агрегированных
нанокомпонентов **ТОТЭ**

Возможность получения
тонких пленок – 5-10 мкм

В рамках наших технологий возможно
совместное формирование гетероструктур
для ТОТЭ за один цикл



Продукция из диоксида
циркония

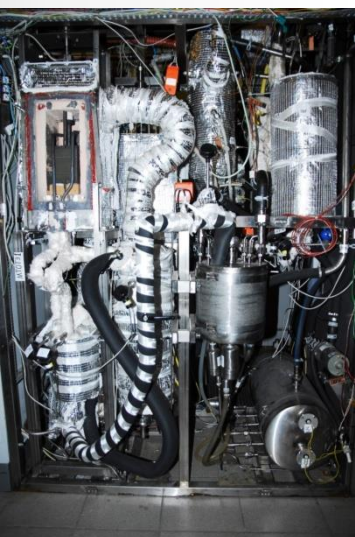
**НИОКР (совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева
и ФТИ УрФУ им. Б.Н. Ельцина)**

Российские разработки

Блок-контейнер с АИТЭ-ТОТЭ-ЭХГ-1500 Контейнер, Блок редуцирования, генераторная, пультовая.



Первый образец ЭХГ



Отличительные особенности:

- Раздельная компоновка модулей ЭХГ;
- Количество модулей в ЭХГ – 2 шт.;
- Мощность единичного модуля – 1 кВт;
- Габариты ЭХГ с двумя модулями (ВхШхГ) – 2060х1120х650 мм;
- Масса ЭХГ – не более 210 кг.

Недостатки:

- Высокие тепловые потери с внешних поверхностей ЭХГ.

Создание параметрического ряда ЭХГ



Общий вид батареи ЭХГ на 12 кВт (H_2).



Расположение батареи ЭХГ в контейнере энергоустановки

Российские разработки

Основные технические требования к ЭУ с ЭХГ на ТОТЭ (Снежинск)

Наименование параметра	Значение параметра
Выходное напряжение при номинальной электрической мощности, В	~220
Выходная номинальная электрическая мощность, кВт	1,5
Частота выходного переменного тока, Гц	50
Топливо	природный газ по ГОСТ 5542-87 (отбор газа на собственные нужды из газопровода, газ в газопровode по СТО 089-2010, газ не одорирован)
Расход природного газа, ст.м³/час (в ст. м³/час, соответствующих стандартным климатическим условиям t=20°C, P=101 кПа), не более	1,2
Давление газа на входе, МПа	0,15
Время стартового разогрева от внешнего источника электропитания, час	24
Требуемая электрическая мощность внешнего источника электропитания, кВт	10-12
Габаритные размеры (длина x ширина x высота), не более, мм:	2500 x 1230 x 1930
Масса, кг, не более	1500



В контейнере предусмотрены отсеки для размещения ЭУ с ЭХГ на ТОТЭ, блока редуцирования и подготовки газа, пускового/резервного источника электропитания



Источник пускового/резервного электропитания – ДГУ АДМІ-16 с комплектом аппаратуры регулирования, защиты и управления

Проблемы развития производства ЭХГ на ТОТЭ в России

В России отсутствует мелкосерийное и серийное производство ЭХГ на ТОТЭ для распределенной энергетики

Нет промышленного производства по элементам ЭХГ

Нет достаточно полных связей между разработчиками научно-технических решений и конструкторами, технологами промышленных предприятий

Отсутствует переход лабораторных технологий и методов контроля для серийного производства

Сегодня мы подошли к такому уровню, когда необходим переход к созданию опытно-промышленного и промышленного производства ЭУ на их основе.

Номенклатура энергоустановок на ТОТЭ может быть огромной. В зависимости от задач энергоустановки могут быть от долей кВт до МВт.

Различным может быть и исходное топливо от природного газа и биогаза, до продуктов газификации угля, жидких углеводородов, отходов. С использованием высокотемпературных электролизеров может приблизиться и эра водородной экономики.

**Гибридная энергоустановка на
основе твердооксидных топливных
элементов для бытового
энергоснабжения**

Преимущества гибридных установок

- быстрый запуск и форсирование мощности за счет теплового двигателя;
- улучшенные экологические показатели на номинальном режиме (радикальное снижение шума и выбросов вредных веществ);
- высокая экономичность выработки электроэнергии при работе в гибридном режиме за счет утилизации непрореагировавшего в электрохимическом генераторе топлива в тепловом двигателе;
- экономия топлива и моторесурса теплового двигателя на номинальном режиме (тепловой двигатель работает в экономичном режиме или отключен);
- безопасность: за счет высокой температуры накопления горючего газа не происходит даже при разгерметизации топливного тракта ТОТЭ.

Требования потребителя

- безопасность;
- низкая стоимость (в России, прежде всего, низкие капитальные затраты);
- простота обслуживания;
- надежность и ремонтпригодность.

Проблема стоимости

При круглогодичном использовании затраты на топливо 1 кВт-ной установки составят около 4000 \$ при использовании бензина или 800 \$ при использовании сетевого природного газа (по тарифам на июль 2016 г.).

Таким образом, установка использующая природный газ может стоить на порядок дороже бытового бензогенератора (цена около 150 \$/кВт) и быть выгодной.

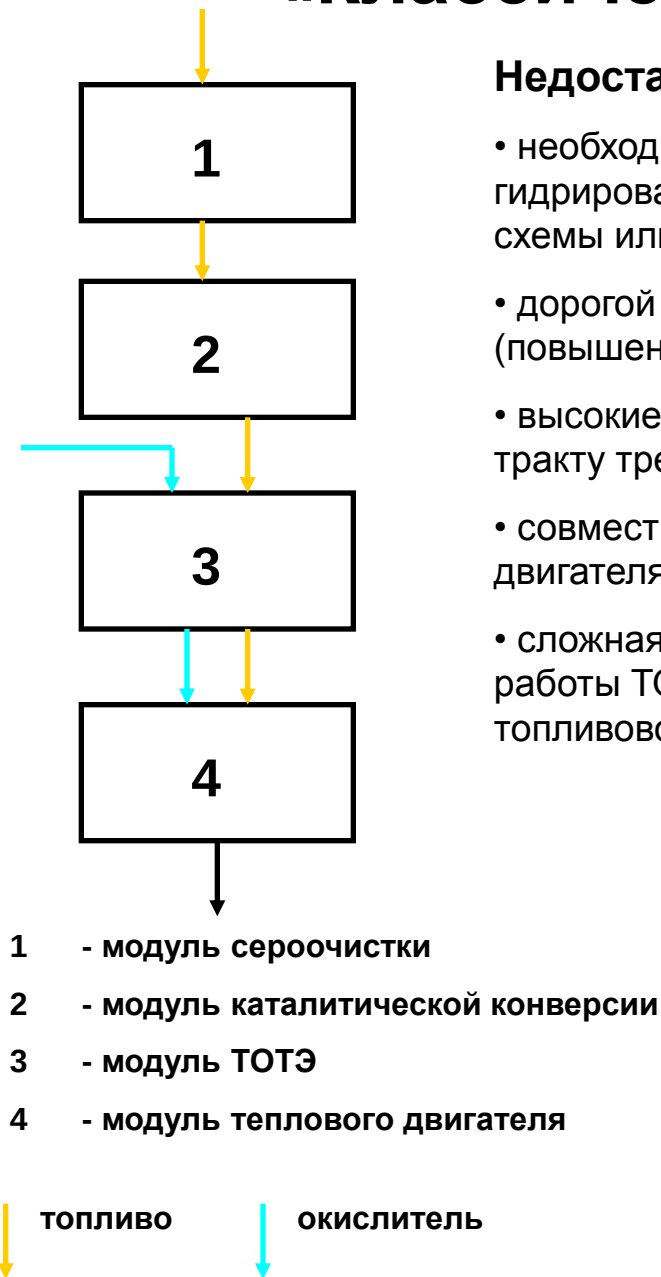
Текущая стоимость сборок ТОТЭ приблизилась к отметке 2000 \$/кВт при опытном производстве, что позволяет серьезно рассматривать установки на их основе, по-крайней мере, в России, как конкурентов бензогенераторам при наращивании производства и оптимизации вспомогательного оборудования.

«Классическая» гибридная схема

Недостатки:

- необходимость рециркуляции водорода (и запаса для старта) для гидрирования сероорганики или использование цеолитов (усложнение схемы или обслуживания);
- дорогой катализатор конверсии или необходимость водяного контура (повышение стоимости или усложнение схемы и обслуживания);
- высокие потери давления по воздушному (ТОТЭ + тепловой двигатель) тракту требуют использования компрессорного оборудования;
- совместная работа с ТОТЭ требует радикальной переработки теплового двигателя;
- сложная система управления, особенно в части согласования режимов работы ТОТЭ и теплового двигателя для получения требуемой топливовоздушной смеси.

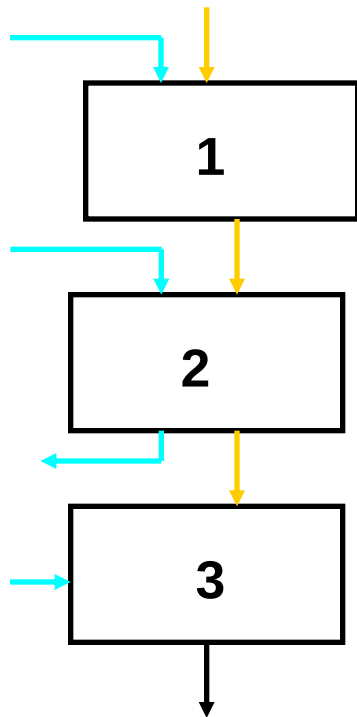
В результате гибридные энергоустановки, несмотря на их экономичность и взаимодополняемость электрохимического генератора и теплового двигателя, не рассматриваются для применения в бытовом секторе.



Предлагаемая гибридная схема

Преимущества:

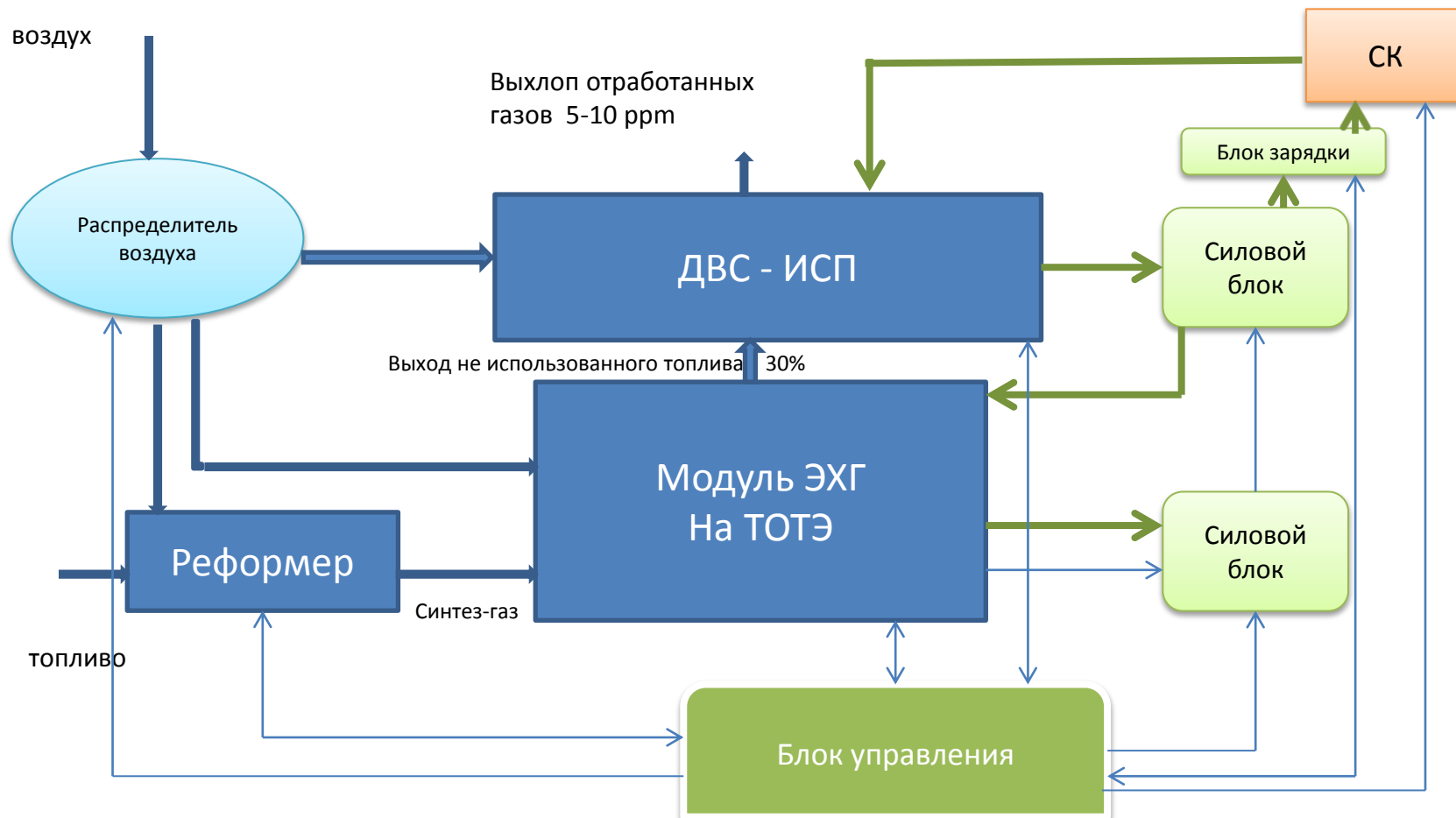
- строго модульная конструкция позволяет обеспечить гибкость технологической схемы для удовлетворения различных требований по мощности и типу газового топлива;
- применение адсорбента соединений серы безопасного при транспортировке и утилизации;
- одновременный нагрев адсорбента и выработка водородсодержащего газа для гидрирования (без рециркуляции) и работы ТОТЭ;
- отсутствует катализатор конверсии (применяется некаталитический матричный реактор);
- не требуется компрессорное оборудование для нагнетания окислителя в ТОТЭ;
- может быть использован любой тепловой двигатель (газопоршневой, газотурбинный, Стирлинга, ДВС-ИСП);
- состав топлива на входе в тепловой двигатель практически не меняется при подключении ТОТЭ;
- нет необходимости в глубокой адаптации теплового двигателя и его системы управления к ТОТЭ.



- 1 - модуль сероочистки
- 2 - модуль ТОТЭ
- 3 - модуль теплового двигателя

↓ топливо ↓ окислитель

**Принципиальная схема высокотемпературного
электрохимического устройства (ВЭХУ)
в составе: ЭХГ на ТОТЭ и двигателем со
свободным поршнем и цилиндром (ДВС-ИСП)**

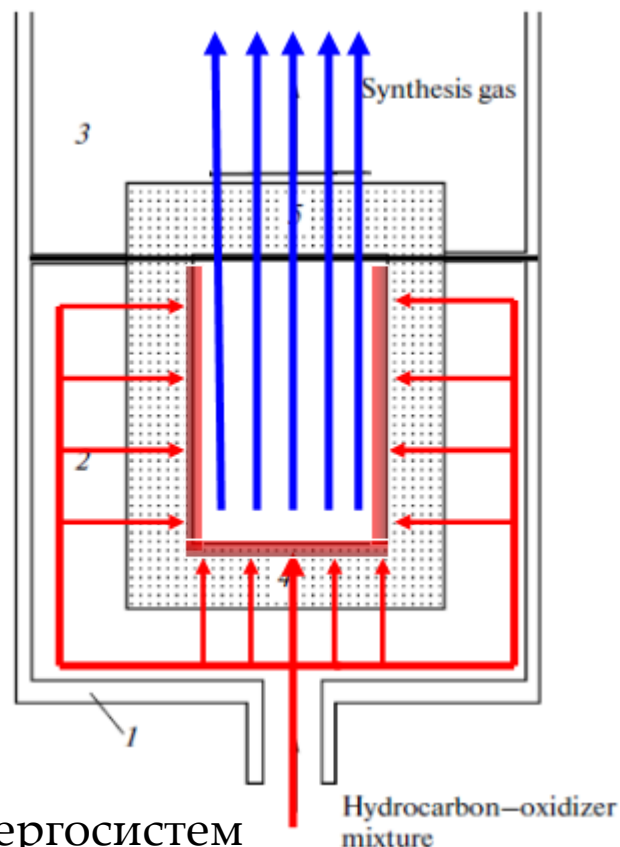


Модуль ЭХГ на ТОТЭ

500 Вт



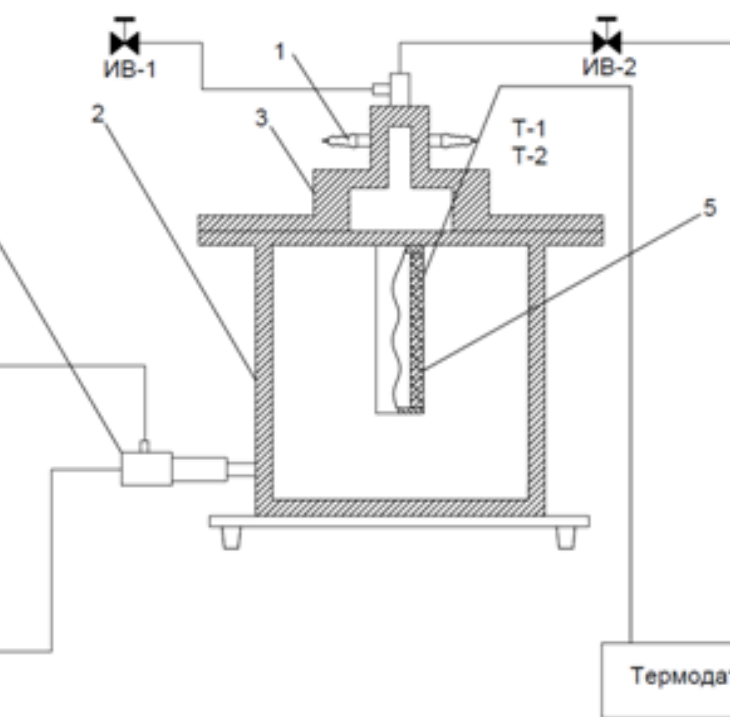
Матричный реформер



При разработке ТОТЭ и энергосистем на ТОТЭ с использованием в качестве топлива метана его предварительно преобразуют в синтез-газ в топливных процессорах (реформерах)

Патент РФ 2374173

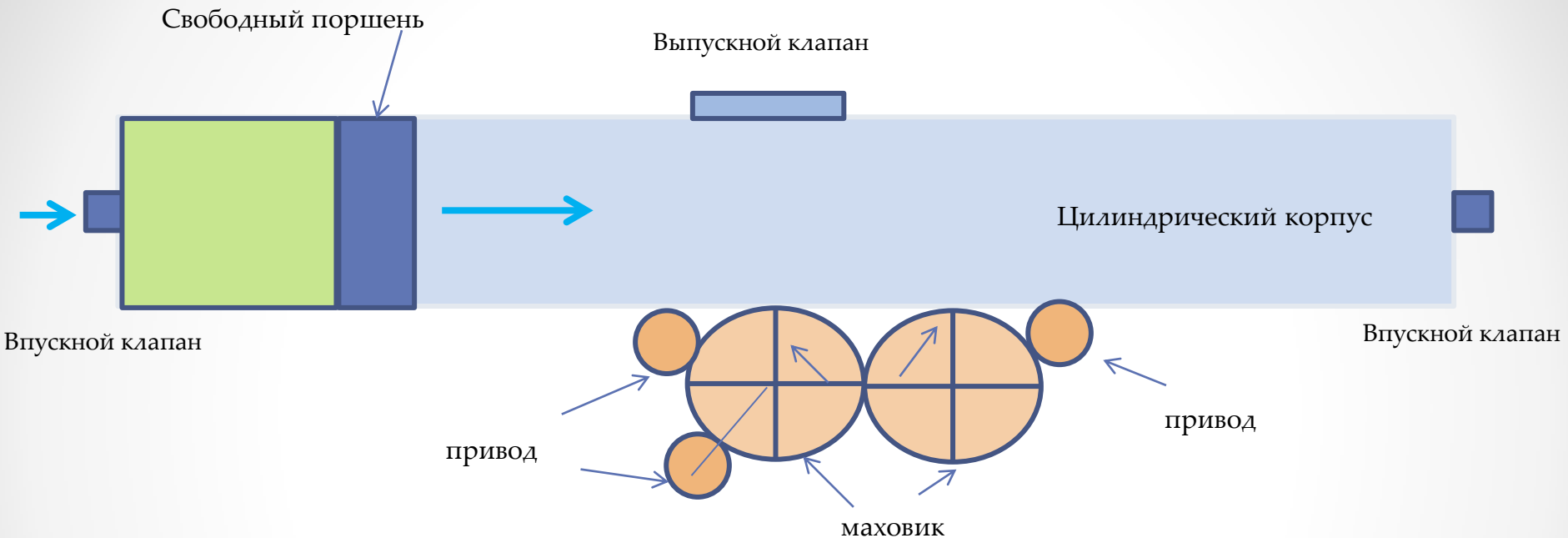
реформер



Отсутствие катализатора
Автотермичность



Двигатель со свободным поршнем и цилиндром (ДВС-ИСП)



- В отличие от разрабатываемых в настоящее время за рубежом электрогенераторов со свободным поршнем и неподвижным цилиндром данная технология ДВС-ИСП имеет принципиальное преимущество – идеальная сбалансированность системы. Для данной технологии нет проблемы удара свободного поршня о головку цилиндра, поскольку цилиндр также свободный. Следовательно, снимается серьезная проблема электронного контроля работы ДВС и возможность безопасной работы системы при высокой степени сжатия, проведения химических реакций с выделением тепла без режима горения.

Патент РФ 2138656

Предполагаемые линейные размеры модели не более 100 см. При внутреннем диаметре цилиндра 40–50 мм с использованием смесей газообразного углеводорода (пропана или метана) с воздухом при коэффициенте избытка воздуха от 1 до 2. Степень сжатия смеси - не менее 15. Достижимая тепловая мощность ДВС-ИСП - 10-30 кВт.

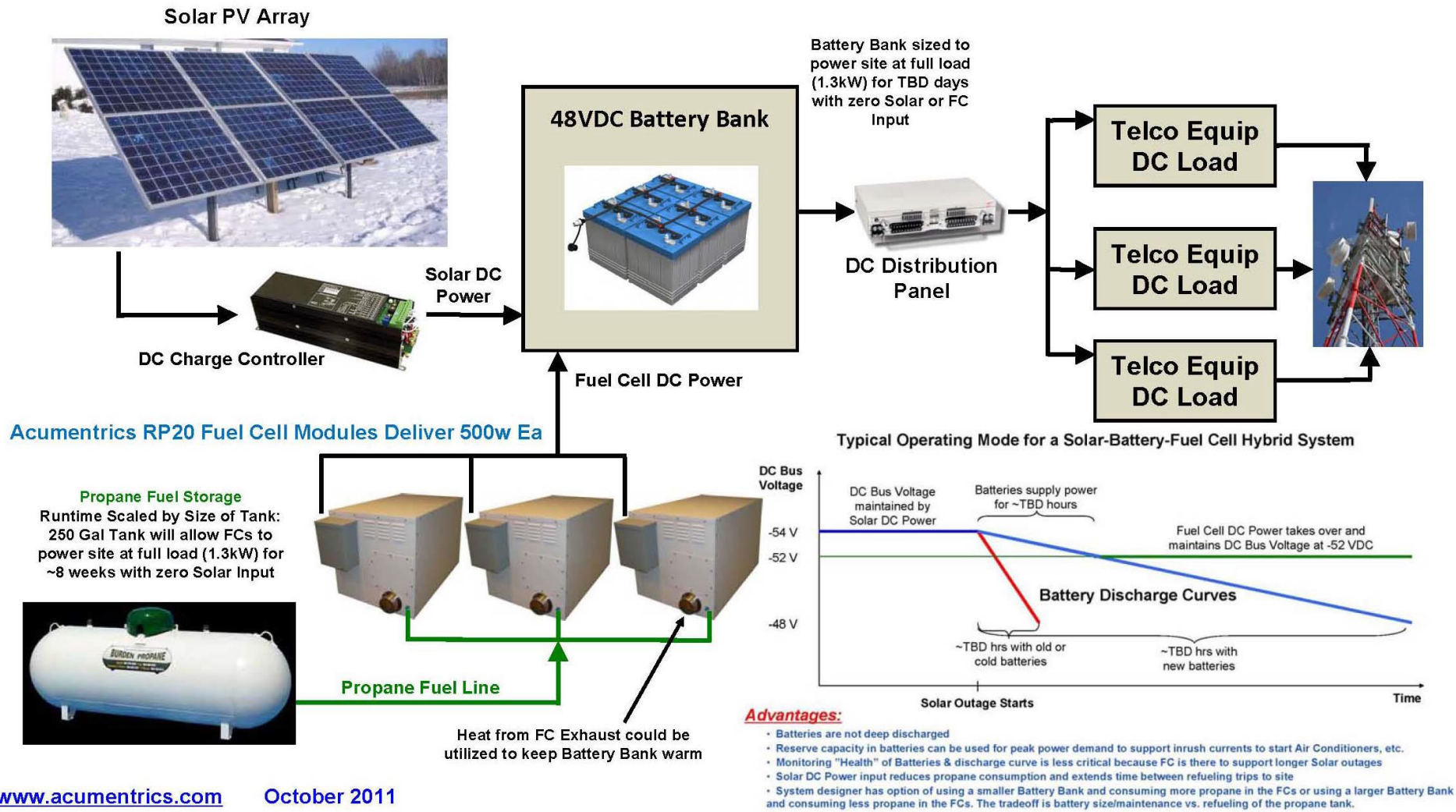
Краткое резюме по ВЭХУ

Что решает наш проект

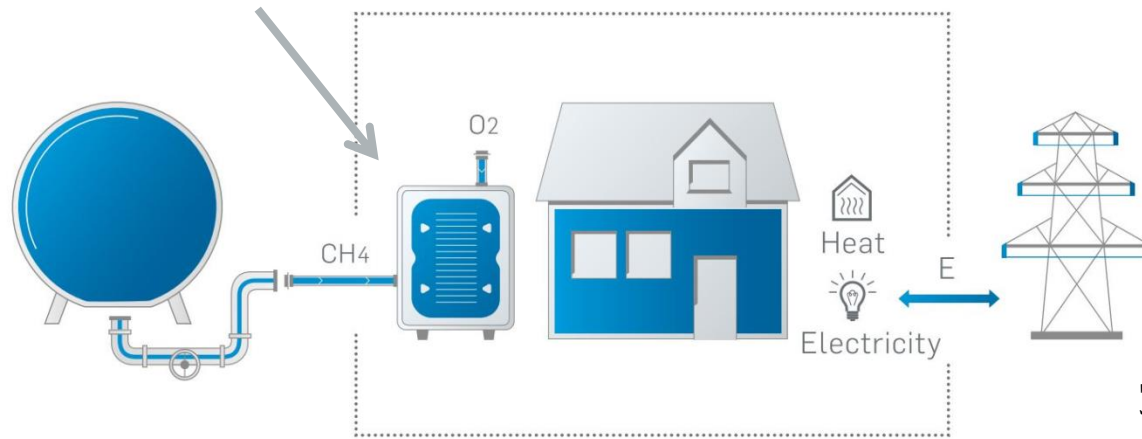
ВЭХУ позволяет решить ряд проблем ЭХГ

- Полное использование углеводородного топлива (в ЭХГ около 70%)
- Осуществить автозапуск с быстрым выходом на режим генератора
- Экологические выбросы не более 20 ppm
- Удешевить конструкцию

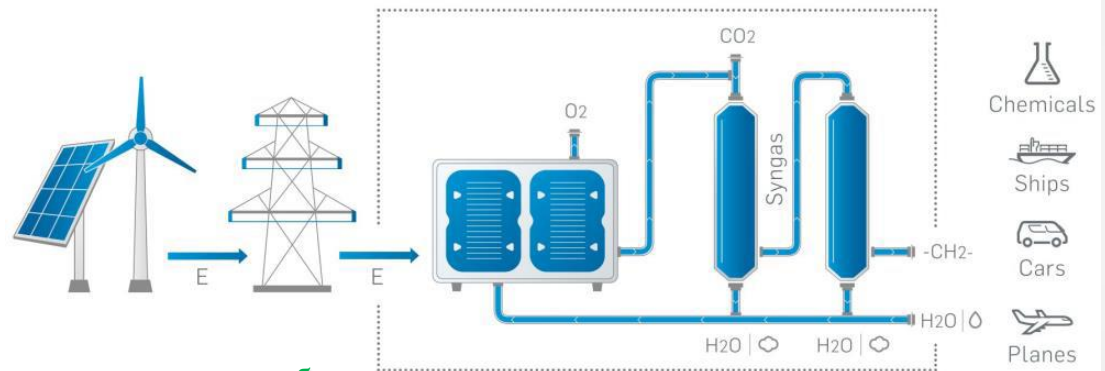
Гибридные схемы применения альтернативных источников



Электрохимический генератор (ЭХГ) на ТОТЭ

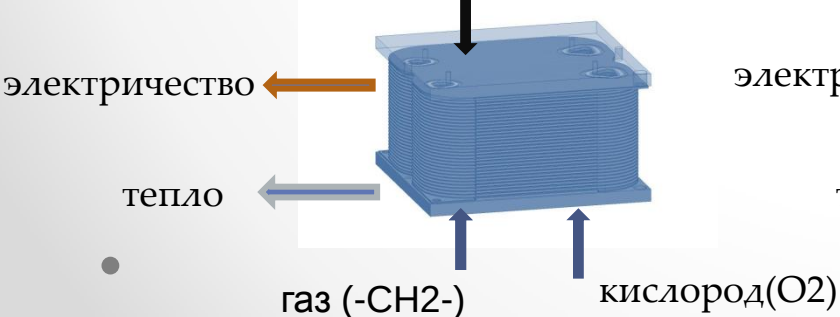


Электролизер на ТОТЭ

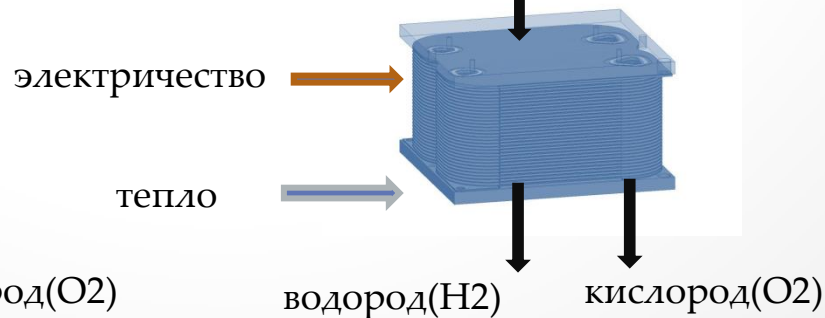


Так как ключевые компоненты одинаковые, то они могут быть использованы как в конструкции ТОТЭ, так и в электролизере

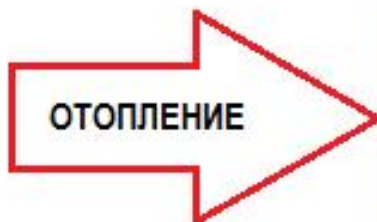
ТОТЭ
(CO₂ & H₂O)
Диоксид углерода и вода



Электролизер на ТОТЭ
вода(H₂O)

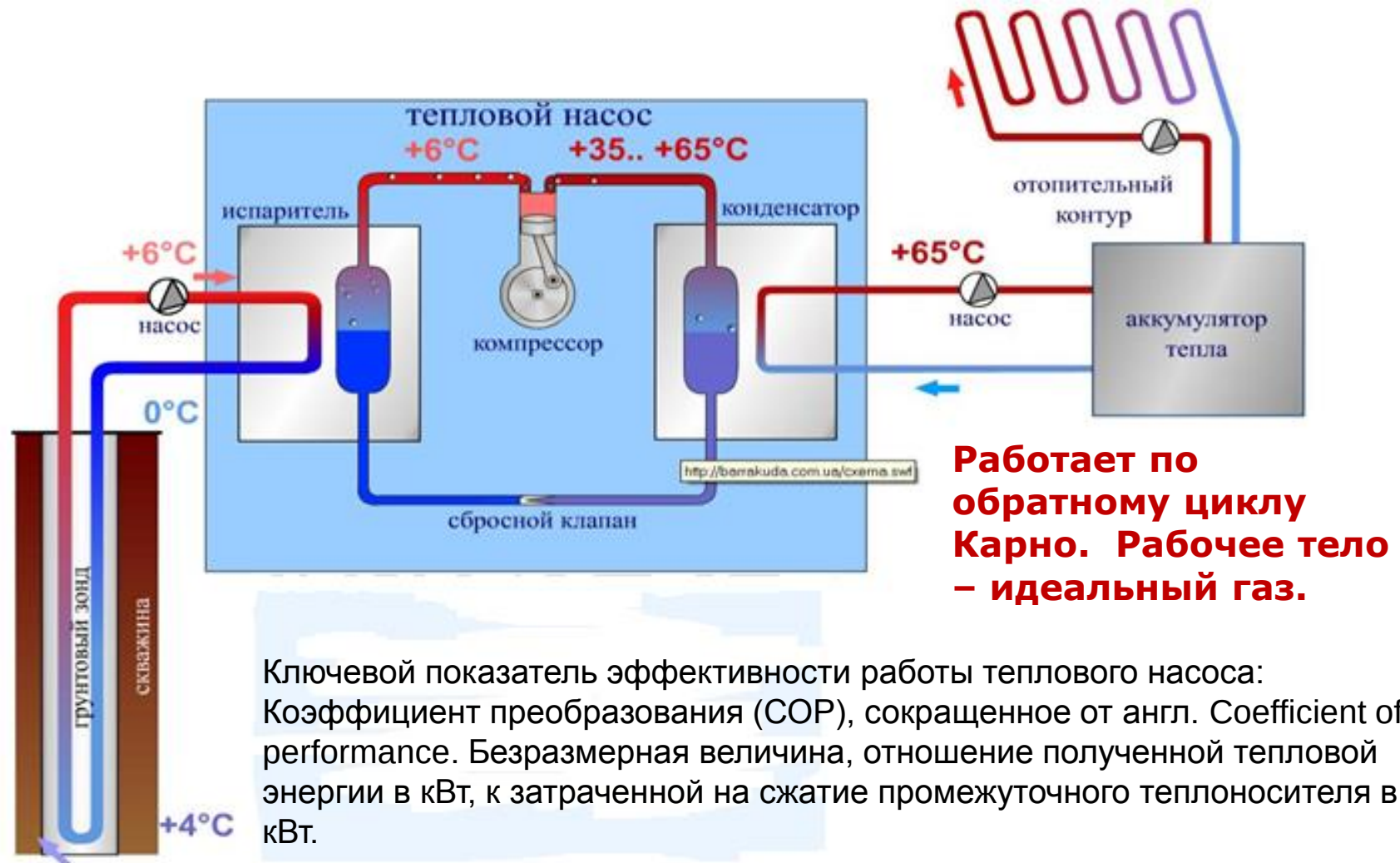


РЕВЕРСИВНЫЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ



В качестве источника электроэнергии ЭХГ на ТОТЭ

Что такое тепловой насос (ТН) (традиционный)



ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ



**Работает по обратному циклу Майера.
Рабочее тело – реальный газ.**

Состав:

1. Контур подвода тепла от внешнего источника.
2. Контур отвода тепла потребителю.
3. Масляный насос.
4. Камера адиабатического сжатия рабочего тела.
5. Поршень.
6. Емкость с маслом.

Разработан новый термодинамический цикл, в котором **COP зависит от природы рабочего тела**. Затраты энергии в цикле снижены в 7,43 раза по сравнению с циклом Карно!

Решение:

- Теоретическое значение COP может достигать 23;
- Разработаны, изготовлены и испытаны несколько моделей ТН;
- Уже достигнутое значение COP в ходе предварительных испытаний 9;
- Использованы новые конструктивные решения, которые позволяют:
 - Снизить стоимость ТН на 35-40%;
 - Снизить стоимость генерируемой тепловой энергии на 40-45 %.

Результаты



Лабораторный ТН, COP=9

Демонстрационный
ТН, COP=15 и более

Спроектированы, изготовлены и смонтированы два образца ТН. Проведены стендовые испытания. Параметры предлагаемого теплового насоса полностью соответствуют расчетным.



30-07-11 11:37

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

различных теплогенерирующих устройств равной мощности

Параметры	Электрокотел	Котел			Тепловой насос		
		На дизельном топливе	На природном газе	На сжиженном газе	Традиционный	Предлагаемый	Предлагаемый с ТОТЭ
Выходная тепловая мощность	30 кВт	30 кВт	30 кВт	30 кВт	30 кВт	30 кВт	30 кВт
Стоимость единицы энергоносителя	5,03 р/кВтч	33 р/л	4,58 р/ м3	20 р/л	5,03 р/кВтч	5,03 р/кВтч	1,3 р/кВтч
Потребление энергоносителя	33 кВт/ч	4 л/ч	3 м3/ч	6 л/ч	8,25	2,2 кВт/ч	2,2 кВт/ч
Стоимость энергии (топлива) за час	166 р	132 р	13,74 р	120 р	41,5 р	11 р	2,86 р
Сезонное потребление энергоносителя	132 000 кВт/ч	16 000 л	12 000 м3	24 000 л	33 000 кВт/ч	8 800 кВт/ч	8 800 кВт/ч
Затраты в рублях	663 960	528 000	54 960	480 000	165 990	44 264	25 168

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Данный проект предлагает возможность использования устройств как отдельно так и в различном сочетании
- Задача проекта – совместно с заказчиками изготовить и провести эксплуатационные испытания энергетических установок для различных объектов
- Предлагается подготовка специалистов из студентов путем участия в этом проекте