

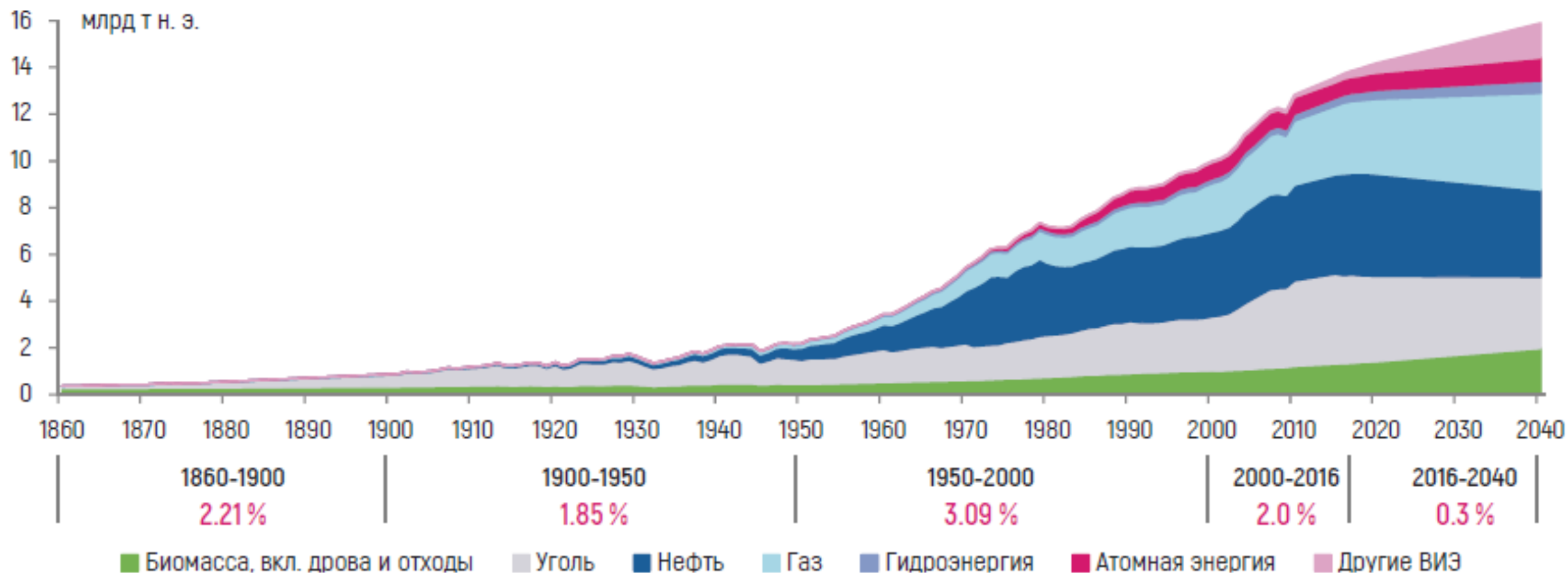
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ИХ ОСНОВЕ В ИФТТ РАН



ДМИТРИЙ АГАРКОВ, К.Ф.-М.Н.
СТАРШИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ИФТТ РАН
ДОЦЕНТ ФЭФМ МФТИ

РОСТ МИРОВОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Рисунок 1.17 – Объемы мирового энергопотребления по видам топлива и темпы роста энергопотребления



Источник: составлено ИНЭИ РАН по данным МЭА, МВФ

Рисунок 1.10 – Изменение структуры мирового первичного энергопотребления по видам топлива с 1860 г. и четыре энергетических перехода

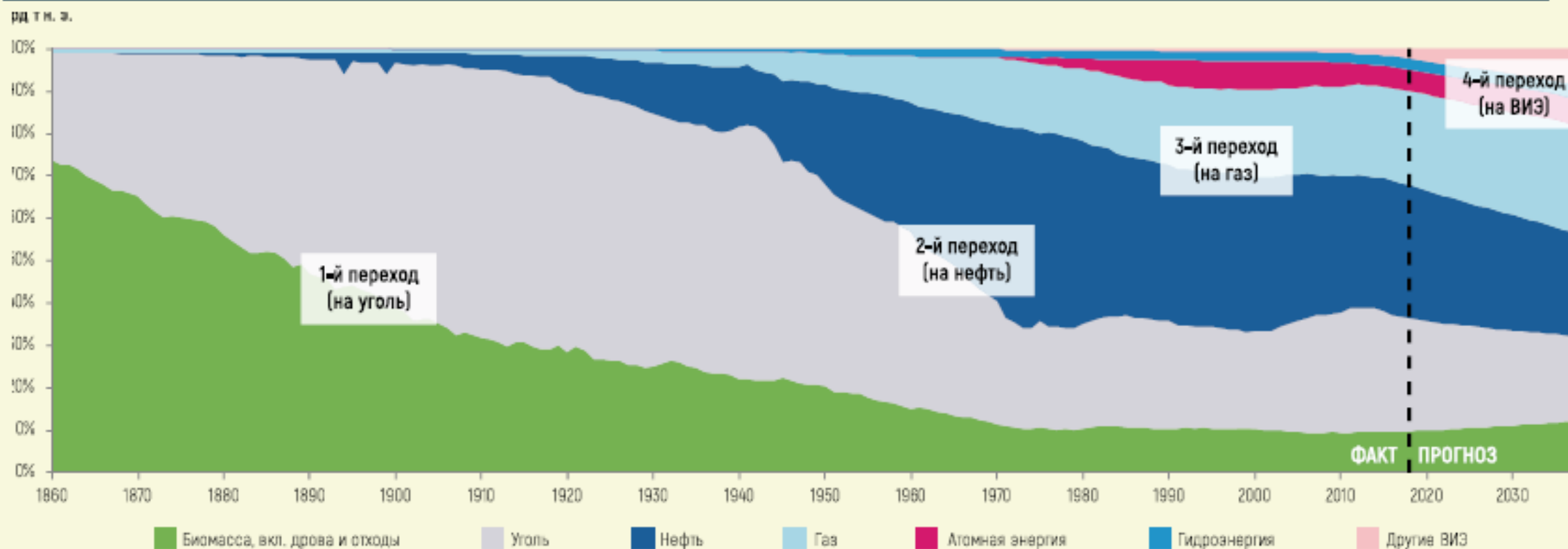
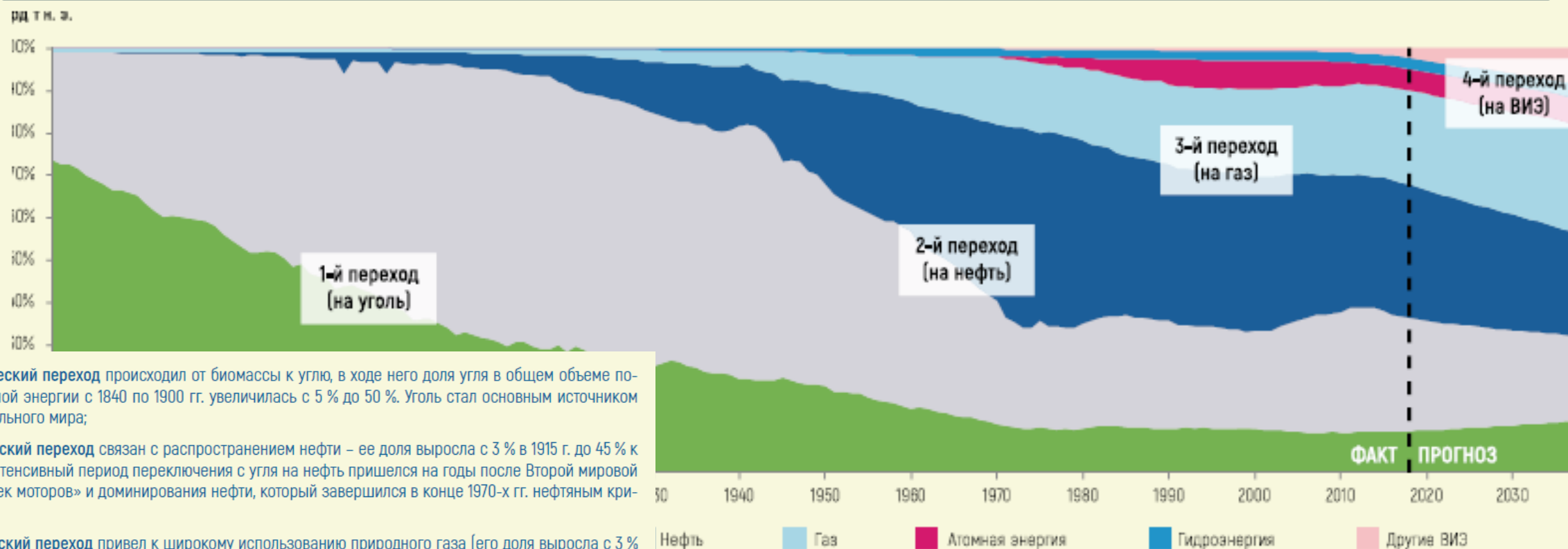
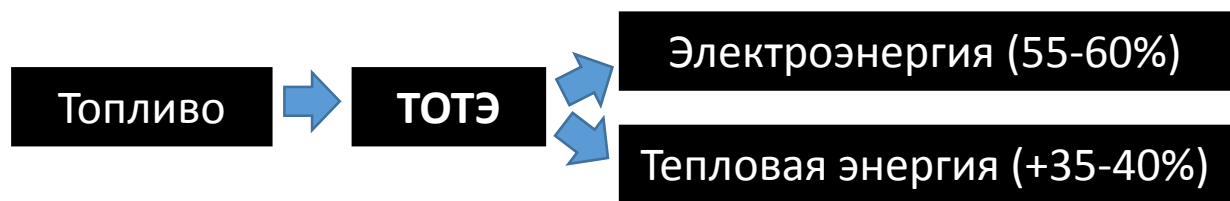
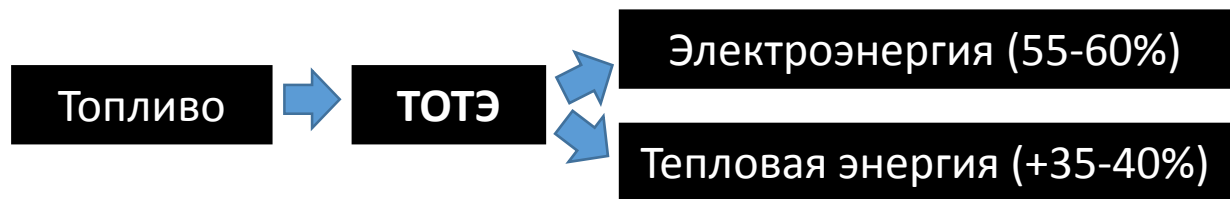


Рисунок 1.10 – Изменение структуры мирового первичного энергопотребления по видам топлива с 1860 г. и четыре энергетических перехода



- ♦ **первый энергетический переход** происходил от биомассы к углю, в ходе него доля угля в общем объеме потребления первичной энергии с 1840 по 1900 гг. увеличилась с 5 % до 50 %. Уголь стал основным источником энергии индустриального мира;
- ♦ **второй энергетический переход** связан с распространением нефти – ее доля выросла с 3 % в 1915 г. до 45 % к 1975 г. Наиболее интенсивный период переключения с угля на нефть пришелся на годы после Второй мировой войны. Начался «век моторов» и доминирования нефти, который завершился в конце 1970-х гг. нефтяным кризисом;
- ♦ **третий энергетический переход** привел к широкому использованию природного газа (его доля выросла с 3 % в 1930 г. до 23 % в 2017 г.) за счет частичного вытеснения как угля, так и нефти;
- ♦ В настоящее время мы являемся свидетелями начала **четвертого энергетического перехода**. В последнее десятилетие были получены важные продвижения в коммерциализации широкого спектра нетрадиционных энергетических ресурсов и технологий – ветровые электростанции, солнечные батареи, аккумуляторы электроэнергии и другие. Доля НВИЭ (без учета гидроэнергии) в общем объеме потребления первичной энергии в 2017 г. составила 3 %, но она стремительно растет.





100 кВт

Дизельный генератор



Система на ТОТЭ



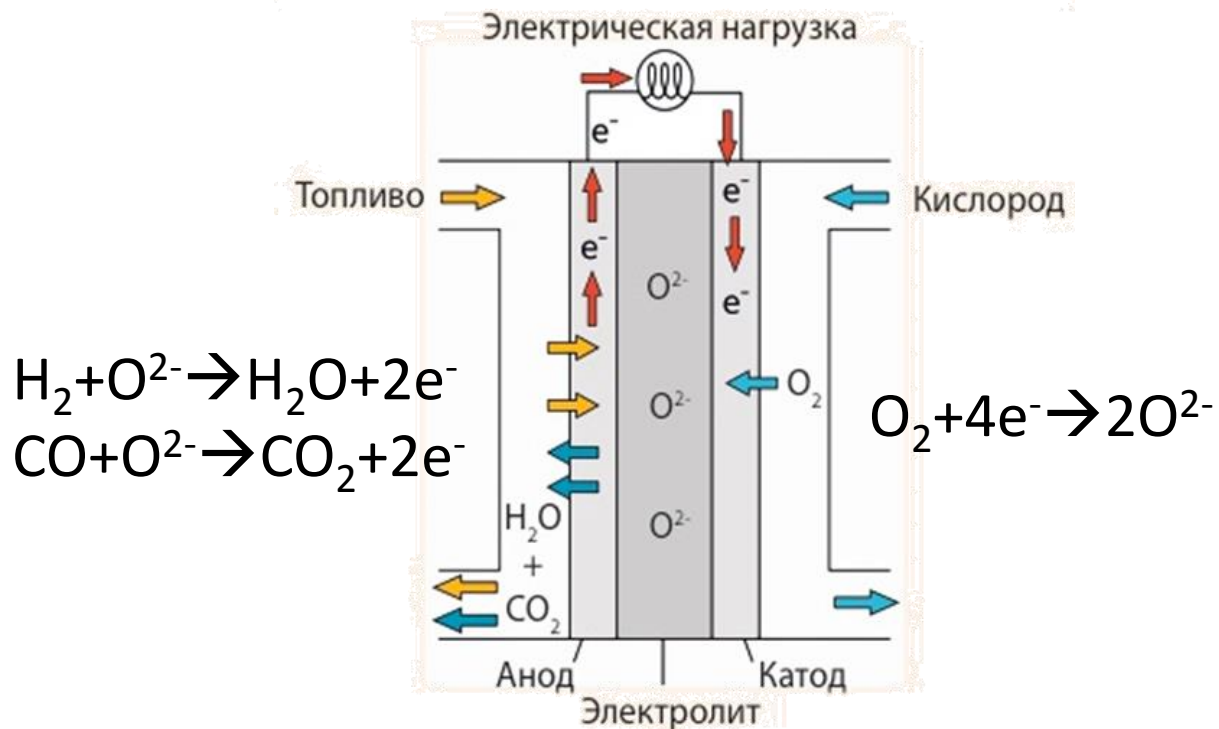
КПД (электроэнергия), %		35-40		55-60
КПД (тепловая энергия), %		-		+35-40
Расход топлива, л/ч кг/ч		30 25		20 16
Ресурс без обслуживания, часов		1 000		10 000
Выбросы, мг/кВт·ч	NOx	Tier 4*	400	4.5
	CO		5000	23
Габариты, м³		4-8		10
Топливо		Дизельное топливо		Водород, метан, пропан-бутан, ПНГ*, метанол, ДМЭ*, ДММ*

По различным оценкам, капитальные затраты на производство ЭУ на ТОТЭ при массовом производстве (>20 МВт/год) составляют от 500 до 800\$/кВт

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ТОТЭ

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТОТЭ

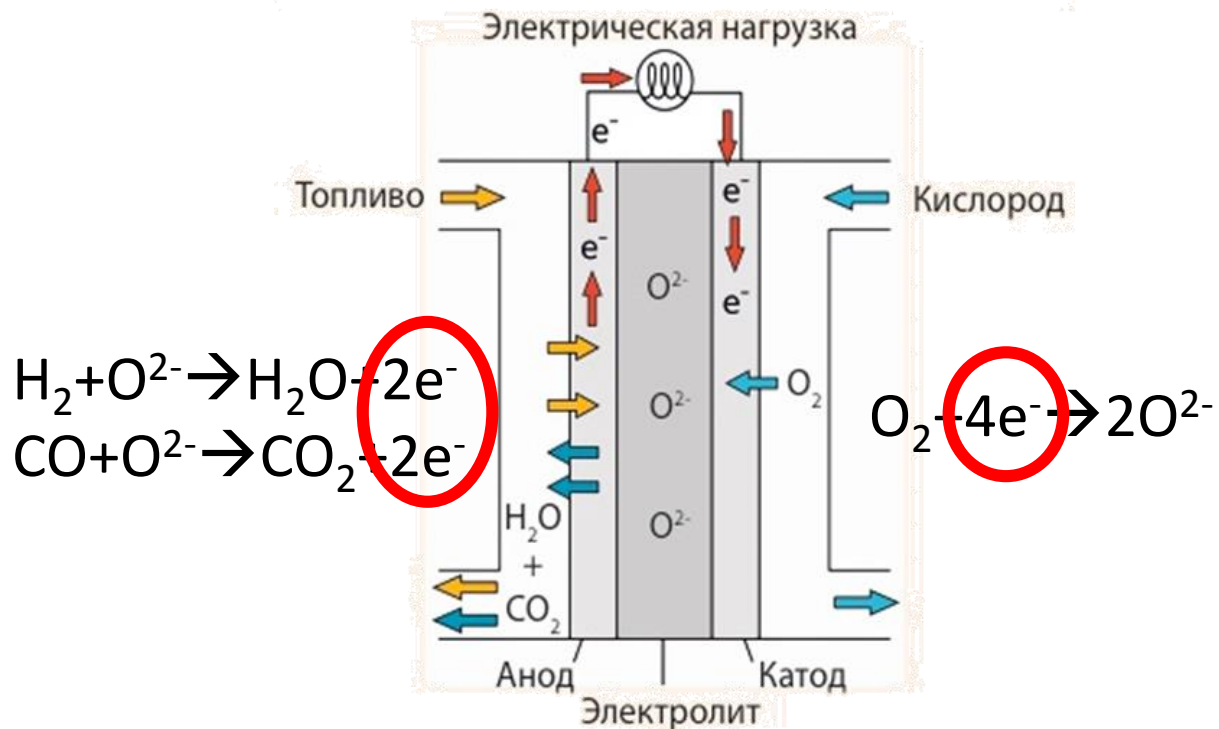
Электрохимические устройства прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, в основе которых лежит принцип работы электрохимических ячеек с разделенными газовыми пространствами, в которых энергия взаимодействия топлива и окислителя, непрерывно и раздельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую



Принцип работы
топливного элемента

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТОТЭ

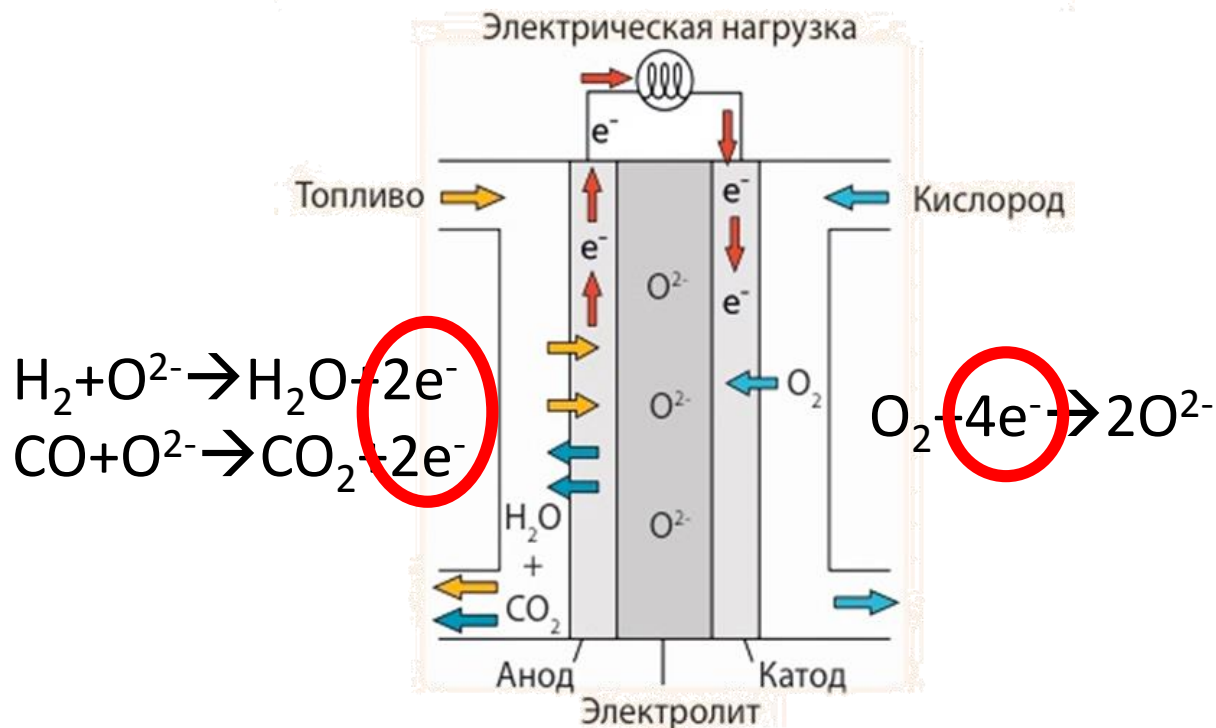
Электрохимические устройства прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, в основе которых лежит принцип работы электрохимических ячеек с разделенными газовыми пространствами, в которых энергия взаимодействия топлива и окислителя, непрерывно и раздельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую



Принцип работы
топливного элемента

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТОТЭ

Электрохимические устройства прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, в основе которых лежит принцип работы электрохимических ячеек с разделенными газовыми пространствами, в которых энергия взаимодействия топлива и окислителя, непрерывно и раздельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую



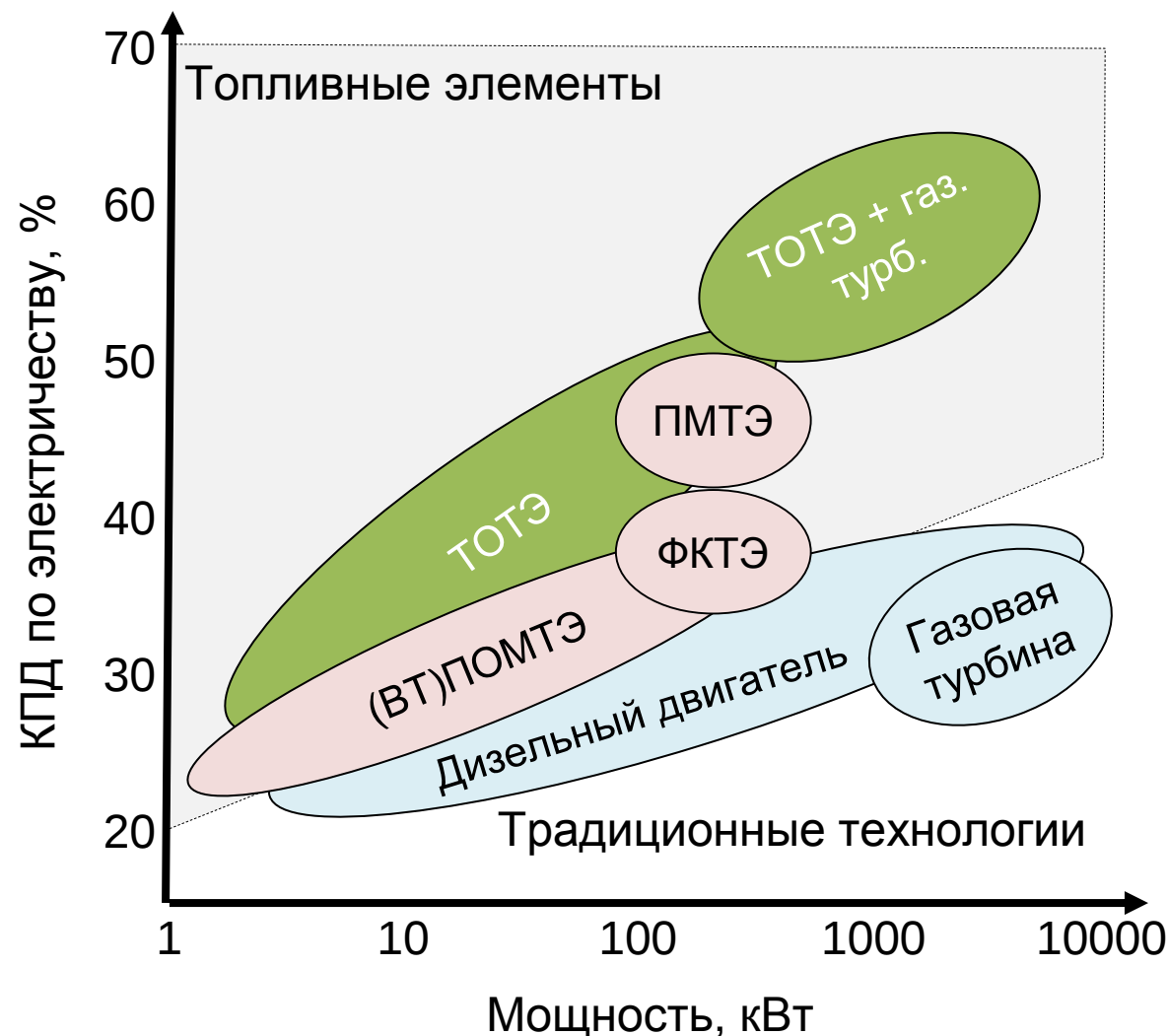
Принцип работы
топливного элемента

Достоинства топливных элементов:

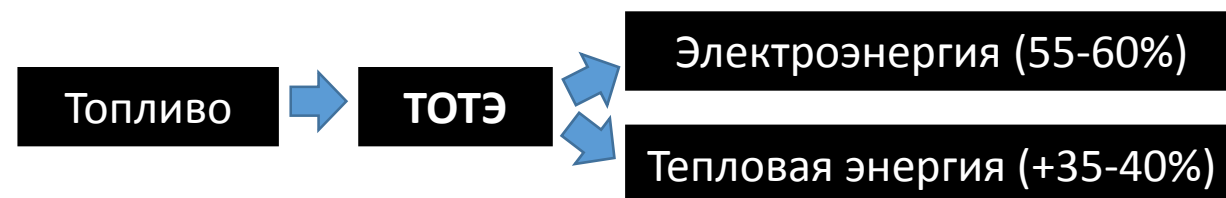
- высокий КПД;
- простота конструкции и обслуживания, малые вибрации и шум;
- отсутствие вредных выбросов в атмосферу (при использовании водорода)
- при использовании углеводородных топлив выбросы NO_x в 100 раз и CO в 200 раз меньше чем у энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания (экологический стандарт Tier-4, Stage IV);

Место ТОТЭ СРЕДИ ДРУГИХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

- ТОТЭ имеют ряд важных эксплуатационных преимуществ перед другими технологиями генерации электроэнергии:



- Высокая эффективность преобразования химической энергии топлива в электрическую (более 55%)
- Экологичность
- Модульная конструкция ЭУ позволяет собирать установки требуемой мощности.
- Возможность использования ТОТЭ в комбинированных установках с газовыми турбинами, с суммарным КПД более 70%.



СРАВНЕНИЕ РАЗНЫХ ТИПОВ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Характеристика	Тип топливного элемента				
	ТОТЭ(Пл)	ТПТЭ	ЩТЭ	РКТЭ	ФКТЭ
Рабочая температура батареи	800	80	100	650	200
Возможность использования тепла токообразующей реакции	+	-	-	+	-
Окислитель	Кислород / воздух	Кислород / воздух	Особо чистый кислород	Кислород / воздух + CO ₂	Кислород / воздух
Виды топлива	Синтез-газ, водород, СО и др.	Очищенный водород	Особо чистый водород	Синтез-газ	Очищенный водород

Место TOTЭ СРЕДИ ДРУГИХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

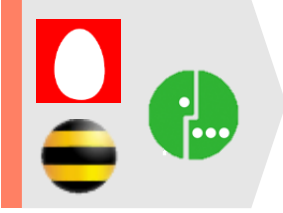
Компания	Модель	Способ генерации	Номинальная мощность	КПД электрический	Топливо
Capstone Turbine Corporation	C30HP	Микротурбина + электрогенератор	30* кВт	26%	Природный газ
Aisin Seiki Co., Ltd.	COREMO	Газопоршневой двигатель + электрогенератор	1,5 кВт	26%	
Panasonic Co., Tokyo Gas Co.	ENE FARM	Твердополимерные топливные элементы	0,7 кВт	39%	
Aisin Seiki Co., Ltd., Kyocera Ltd.	ENE FARM type S	Твердооксидные топливные элементы	0,7 кВт	52%	

* Коммерчески доступные микротурбины меньшей мощности не производятся

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОТЭ

НИШИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ТОТЭ

Сегменты рынка

Катодная защита		- Катодная защита – актуальная проблема для нефтяных и газовых трубопроводов - ТОТЭ идеально подходит из-за большого времени автономной работы (более 10 тыс часов) - Протяженность магистральных газопроводов и нефтепроводов более 170 и 90 тыс км соответственно, станции катодной защиты ставятся раз в 10-30 км, то есть порядка 10 000 станций работают и периодически заменяются - Вводятся в работу новые газо- и нефтепроводы
Мобильные операторы		- ТОТЭ удовлетворяет режиму энергопотребления базовых станций (постоянное напряжение 48В и необходимая мощность 1-3 кВт) - Развитие телекоммуникационных технологий, повышение нагрузки на сети и постоянный рост числа базовых станций обеспечивают привлекательность рынка - Более 40 тыс станций в 2014 году, с потенциалом роста, значительная доля не обеспечена электричеством от сети
Удаленные жилые объекты		- Возможность когенерационных решений с общим КПД до 95% - Экологически чистый бесшумный источник энергии, что делает привлекательным использование для жилых объектов - Увеличение доли малоэтажного строительства обеспечивает спрос на распределенные решения мощностью до 10 кВт - Может потребоваться оснащение аккумуляторными батареями для сглаживания пиков
Спец. применения		- Питание удаленных объектов инфраструктуры, в том числе РЛС, - Питание инфраструктуры МЧС (энергообеспечение техники в зонах чрезвычайных ситуаций, полевых госпиталях) - Питание автономных объектах систем видеонаблюдения и фиксации правонарушений - Питание пограничной инфраструктуры - Вспомогательные силовые установки для питания бортовых систем

Источники: открытая информация, росстат, газпром, транснефть

ПРОДУКТЫ КОМПАНИИ BLOOM ENERGY (США)



ПРОДУКТЫ КОМПАНИИ BLOOM ENERGY (США)

Энергетический сервер ES5 компании Bloom Energy:



Энергетический сервер ES-5710:



Максимальная мощность	кВт	262.5
Топливо	Природный газ, биогаз	
Давление топлива	атм	0.7-1.2, номинал 1.03
Общий КПД по электроэнергии	%	65-53
Тепловая энергия	кДж/кВт·ч	6.1-7.5
NO _x	г/МВт·ч	<4.5
CO		<23
VOC _s		<9
CO ₂	кг/МВт·ч	308-378
Масса	т	14.3
Размеры	м х м х м	4.5 х 2.7 х 2.1
Температурный диапазон	°C	-20 ÷ +45
Влажность	%	0-100
Шумность	дБ на 2 м	<70

Основные стимулы к установке энергетических серверов:

- Энергонезависимость
- Экологичность

Основные потребители:

- Владельцы дата-центров
- Компании с выделенными объектами (например, обособленный кампус), нуждающиеся в энергонезависимой генерации

ПОКУПАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕРВЕРОВ КОМПАНИИ BLOOM ENERGY (США)

Покупатель	Мощность, кВт	Год установки	Топливо	Примечание
AC Transit	422	2013	биогаз	Экономия до \$2М за 10 лет, снижение выбросов парниковых газов на 1500 т/год
Adobe	1 200	2010		14 000 МВт·ч/год, 30% всей электроэнергии - собственные
	400	2012		
AT & T	21 000	2013		
Bank of America	500	2010		Основная причина установки - экология
Caltech	2 000	2010		
The Coca-Cola Company	500	2012		Основная причина установки – экология
	1 000			
Delmarva Power	30 000			Основная причина установки – экология
Dreamworks	750	2013		6 миллионов кВтч·ч/год
eBay	500	2009	Биогаз	
	6 000	2013		Основной источник энергии
FedEx	500	2010		Снижение выбросов CO ₂ на 30%
Google	400	2008		
Hines	500			
Honda	1000	2012		Снижение выбросов CO ₂ на 750 тонн/год

Покупатель	Мощность, кВт	Год установки	Топливо	Примечание
Johnson & Johnson	500	2015		Основная причина установки – экология
JBM Realty	400	2011		
Kaiser Permanente	4 300			
Life Technologies	1 000			
	1 000			
Medtronic	400			
Nokia	400			Снижение выбросов CO ₂ на 580 тонн/год
Owens Corning	400	2011		
Panasonic	750	2014		85% потребляемой электроэнергии
Prime Healthcare	600	2014		Выбросы CO ₂ снижены на 22%
Sharks Sports & Entertainment	500			
	400			
Staples	300			
	600	2011		
Sutter Health	375	2014		
Walmart				40+ проектов
Yahoo	1 000	2014		

Суммарная мощность установок – свыше 80 МВт





LG: 3 кВт
КПД_{эл} 52% КПД_Σ 90%
Природный газ



Aisin: 700 Вт, КПД_{эл} 47%, КПД_Σ 90%

Системы устанавливаются в домохозяйствах и для малого бизнеса.

Назначение – производство электроэнергии и горячей воды для ГВС и отопления из природного газа и холодной воды

Суммарно установлено более 80 000 систем



Miura: 4.2 кВт
КПД_{эл} 48% КПД_Σ 90%

ene.field★

Fuel Cells x Combined Heat and Power



BlueGen:

1.5 кВт

КПД_{эл} 60%

КПД_Σ 85%

Природный газ



Законтрактовано 1200 систем!



250 кВт
КПД 55%
Природный газ



Kyushu University



NGK Spark Plug Co, Ltd.



Tokyo Gas Co. Ltd.



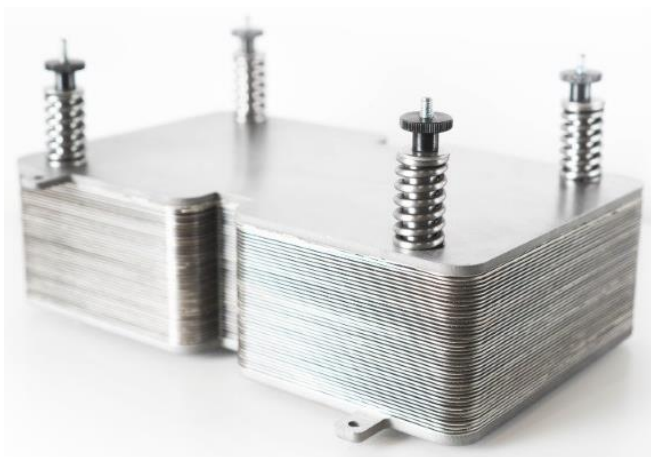
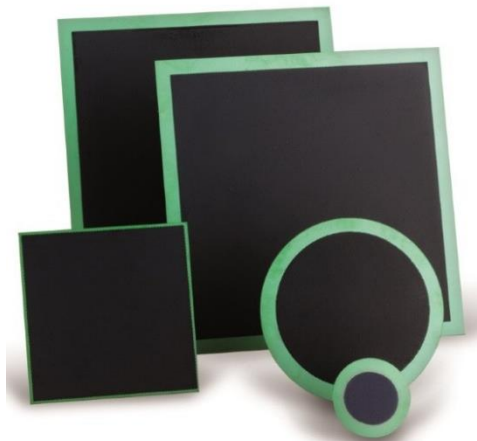
Taisei Corporation



Toyota Motor Corporation



СИСТЕМА CONVION (Финляндия) НА БАЗЕ БАТАРЕЙ ELCOGEN (Эстония)



Система мощностью 50 кВт:



ТОТЭ и батареи производства Elcogen

Назначение – переработка биогаза
на объектах сточных вод в Италии

Европейский проект DESTA «Demonstration of 1st European SOFC Truck APU» в партнерстве — AVL, Eberspächer, Volvo, TOFC, FZJ. Демонстрационные пробеги вспомогательной 3 кВт энергоустановки (ВЭУ) в грузовике Volvo Truck HD начались в 2014 году. Одно из применений ВЭУ – на бронемашине.

DESTA impact - AVL

Type of project: Demonstration

Timing: 01/01/2012 > 30/06/2015

Project Budget: 10.441.618 €

Project website:

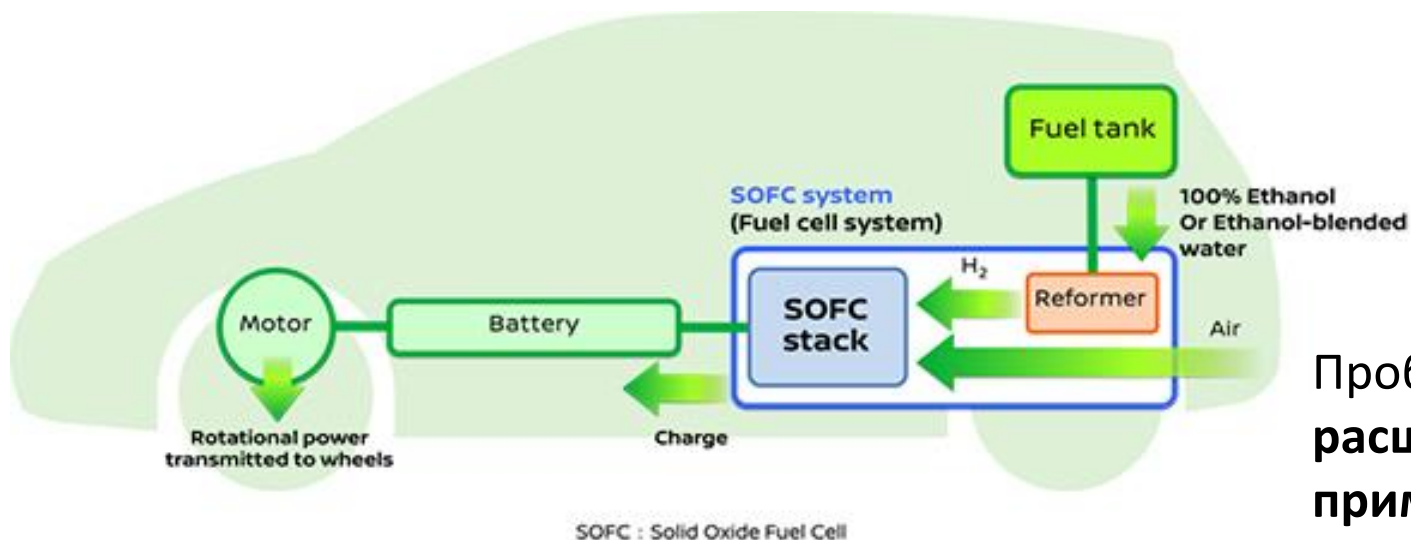
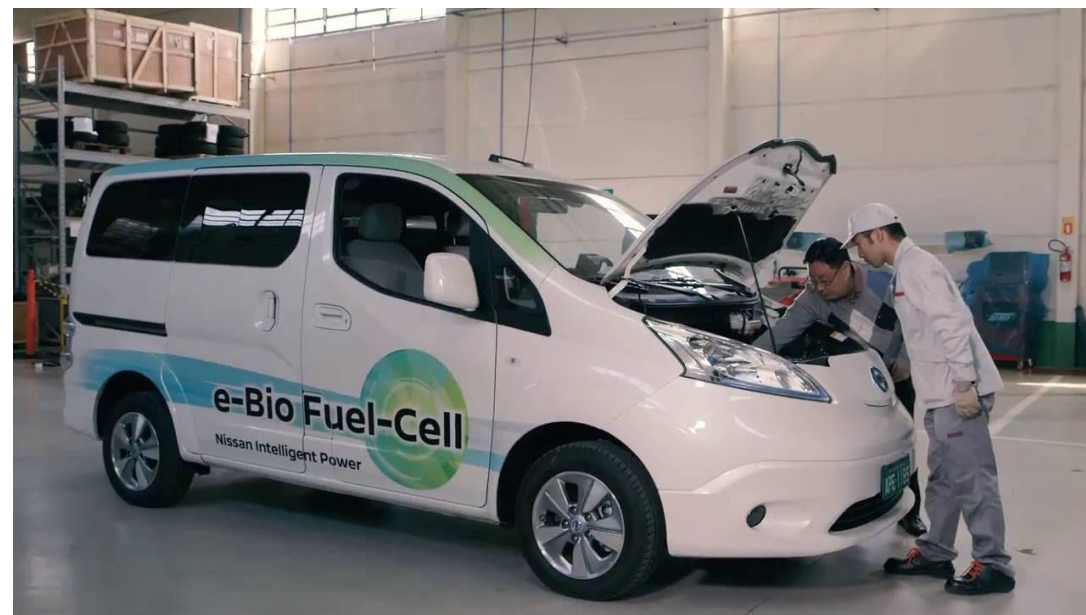
<http://www.fch.europa.eu/project/demonstration-1st-european-sofc-truck-apu>



РАСШИРИТЕЛЬ ПРОБЕГА ДЛЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ



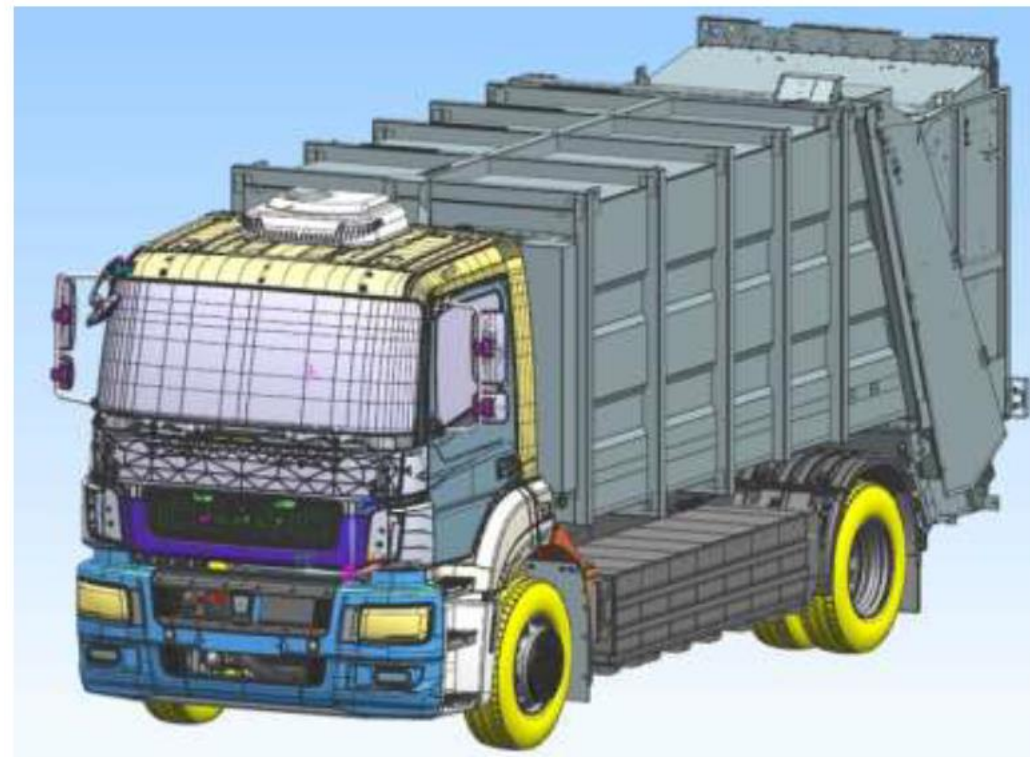
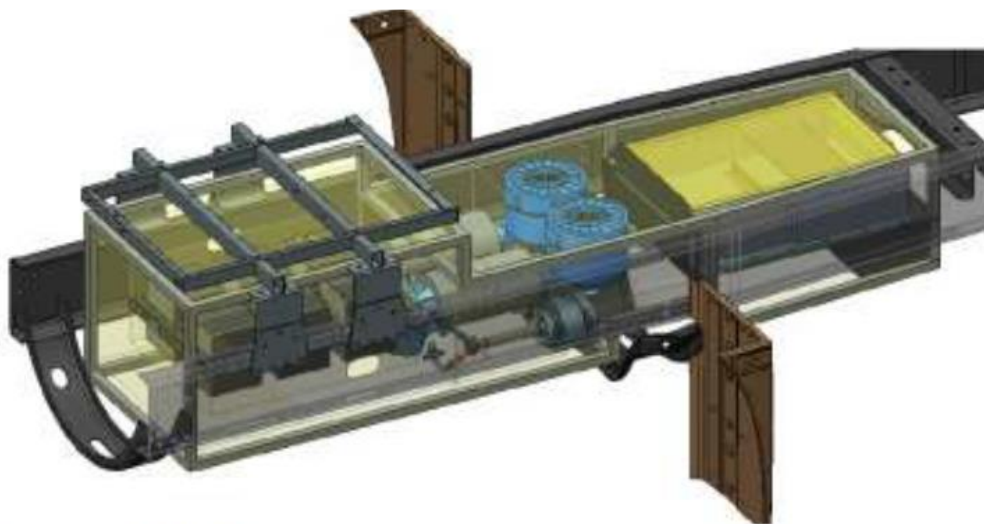
Мощность расширителя пробега составляет 5 кВт.
Топливо – био-этанол.



Пробег на аккумуляторах **без применения расширителя пробега составляет 120 км**, а с применением расширителя пробега – **около 600 км.**

Nissan вместе с австрийской инженеринговой компанией AVL List GmbH создали первый в мире легковой автомобиль с **расширителем пробега на твердооксидных топливных элементах.**

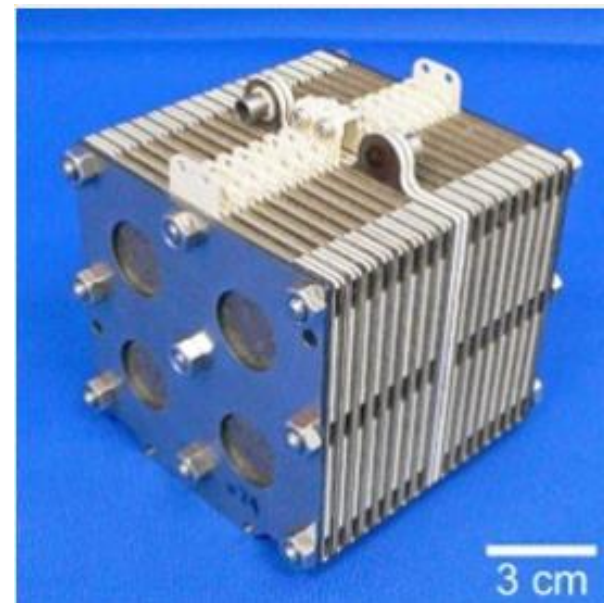
Тип элементов – с поддерживающей анодной подложкой.



По заказу ПАО «КАМАЗ» вместе с австрийской инженеринговой компанией AVL List GmbH выполняется проект по созданию первого в мире малого коммерческого грузового автомобиля с **расширителем пробега на твердооксидных топливных элементах**.

Тип элементов – с поддерживающей металлической подложкой. Ожидается увеличение пробега по сравнению с простым грузовиком на аккумуляторах в 4-5 раз. Топливо – СПГ.

ПЕРВЫЙ В МИРЕ ВОЗДУШНЫЙ БЕСПИЛОТНИК С ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ НА ТОТЭ

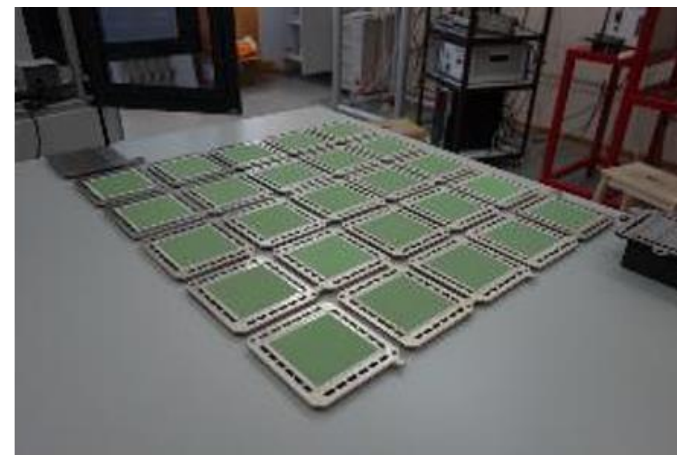


Массогабаритные характеристики стека улучшены на 60% по сравнению со стандартным продуктом Elcogen. Внутренний риформинг сжиженных углеводородных газов.

Применение – логистика, инспектирование инфраструктуры, реакция на чрезвычайные происшествия

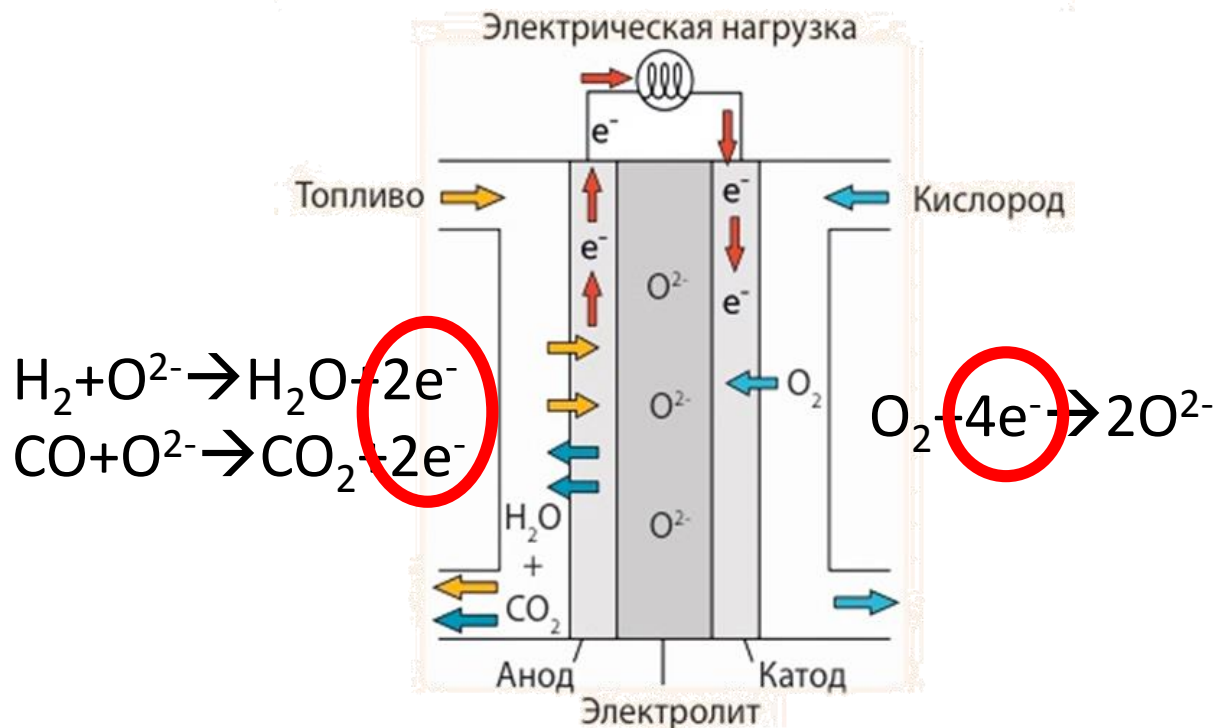
ЗАДЕЛ ИФТТ РАН В ОБЛАСТИ ТОТЭ

ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ



ПРИНЦИП РАБОТЫ ТОТЭ

Электрохимические устройства прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, в основе которых лежит принцип работы электрохимических ячеек с разделенными газовыми пространствами, в которых энергия взаимодействия топлива и окислителя, непрерывно и раздельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую



Принцип работы
топливного элемента

Достоинства топливных элементов:

- высокий КПД;
- простота конструкции и обслуживания, малые вибрации и шум;
- отсутствие вредных выбросов в атмосферу (при использовании водорода)
- при использовании углеводородных топлив выбросы NO_x в 100 раз и CO в 200 раз меньше чем у энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания (экологический стандарт Tier-4, Stage IV);

Классификация ТОТЭ по типу поддерживающего элемента

- + простота изготовления
- + надежность

- высокая температура
- низкая мощность

(a)



(b)



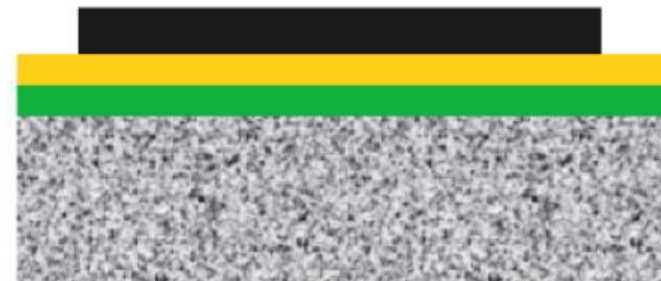
- + ниже температура
- + выше мощность

- тонкопленочный электролит

(c)

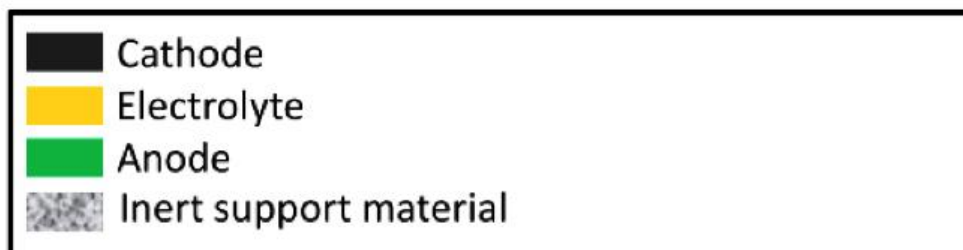


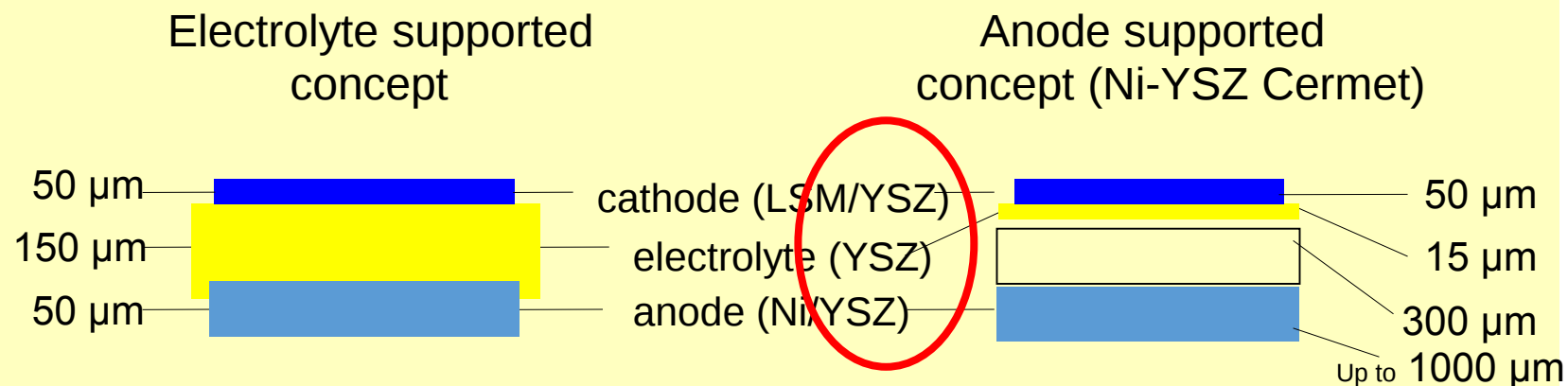
(d)



- + ниже температура
- + выше мощность
- + надежная подложка

- тонкопленочный электролит





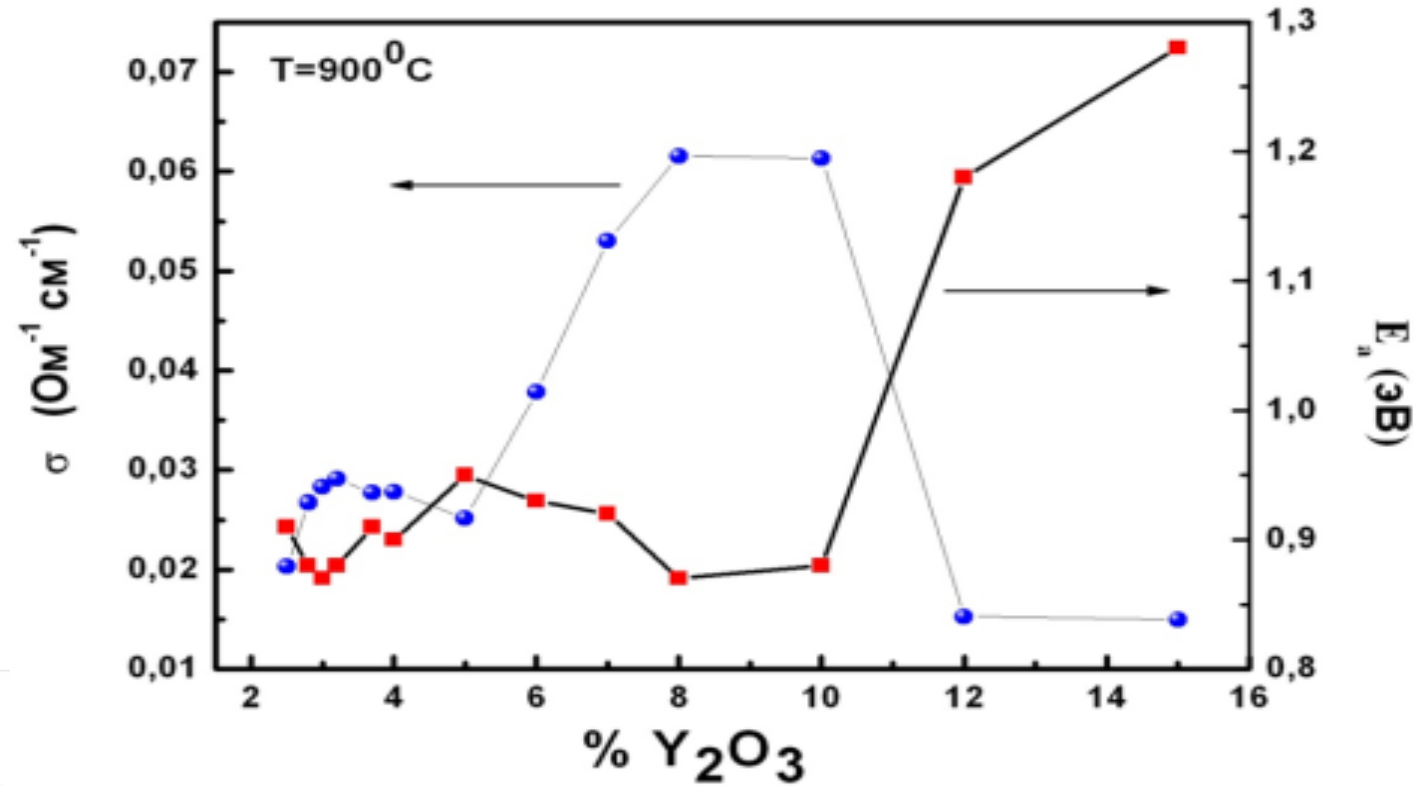
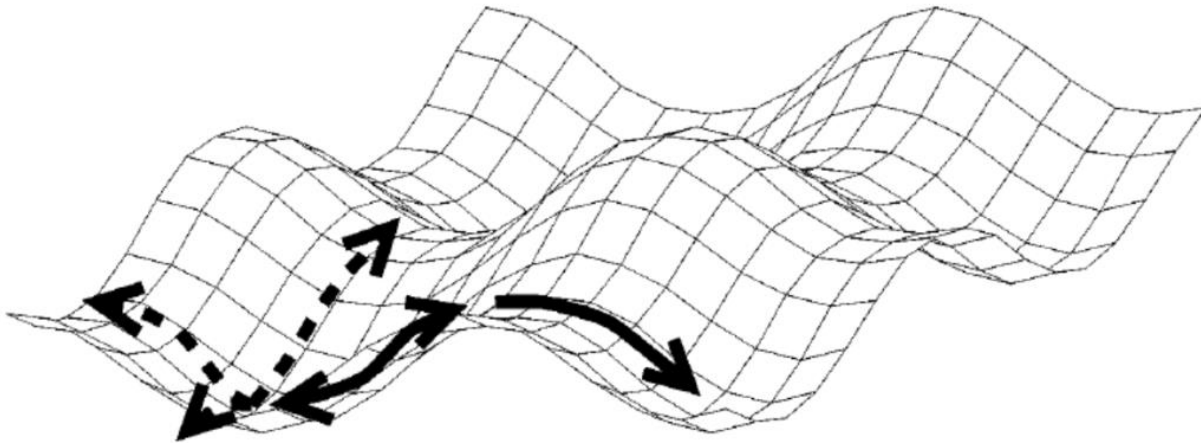
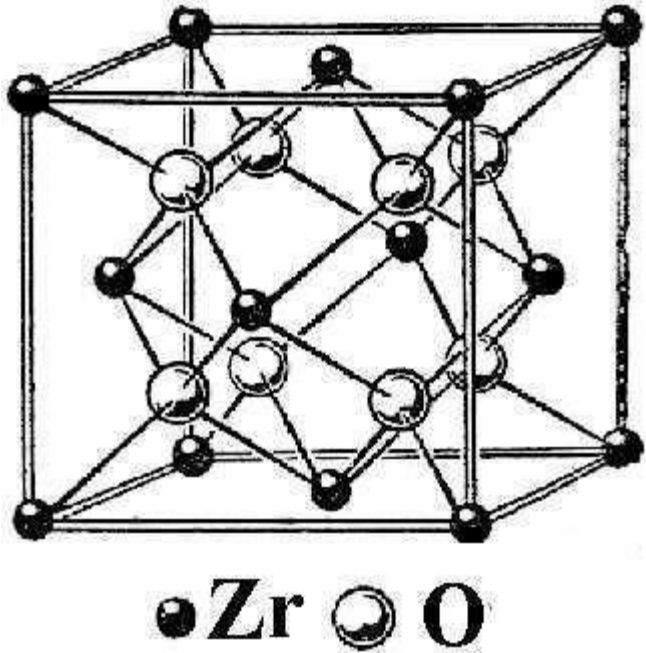
Advantage: - relative redox stability due to thin anode

Disadvantage: - high operating temperature

Advantages: - lower operating temperature
- larger cells

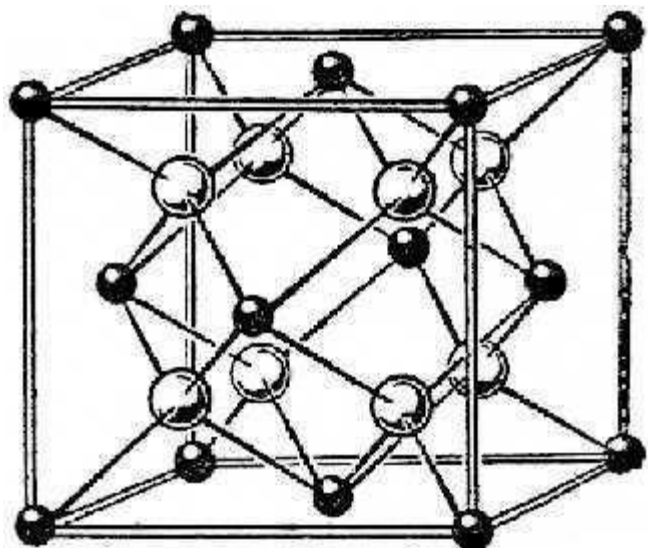
Disadvantages: - low redox stability

АНИОННЫЕ ПРОВОДНИКИ НА ОСНОВЕ ZrO_2

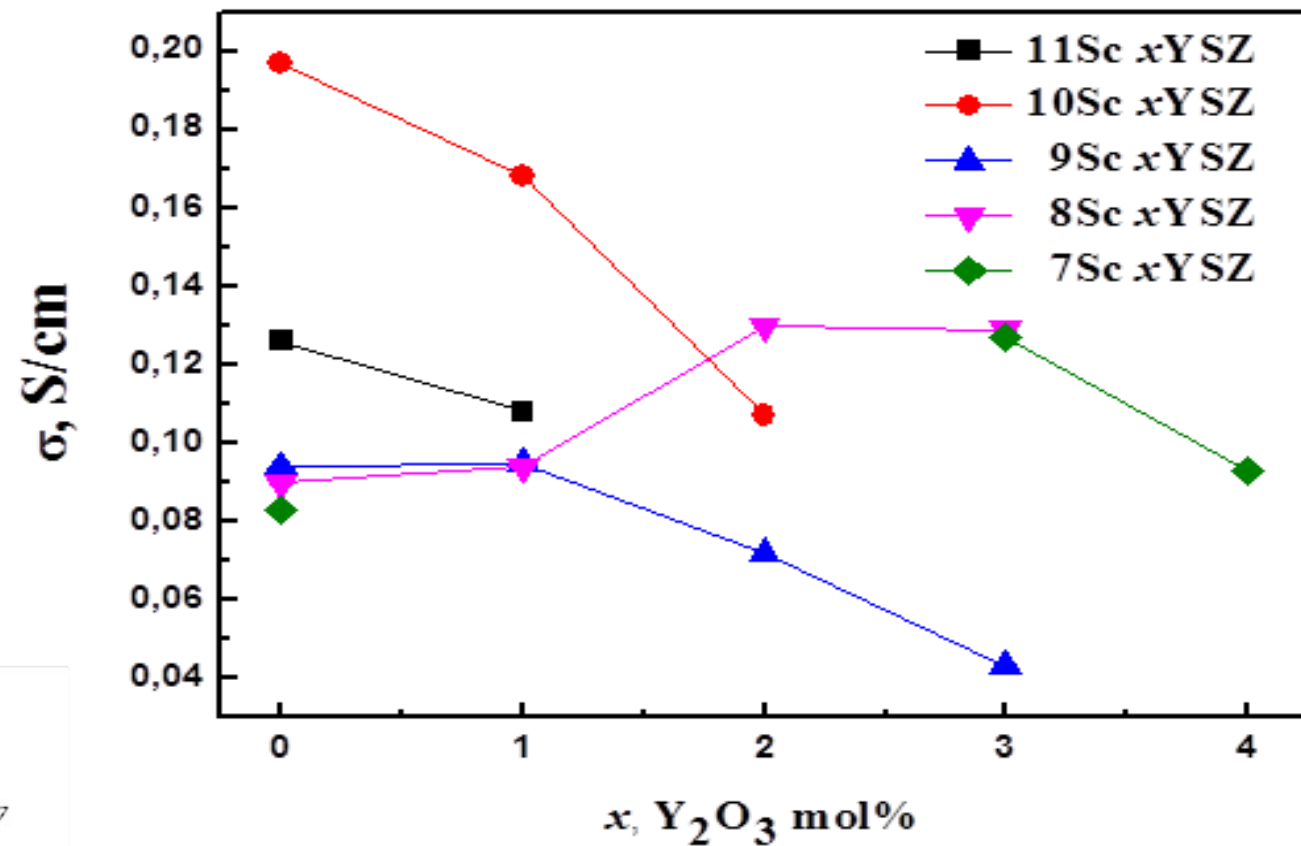
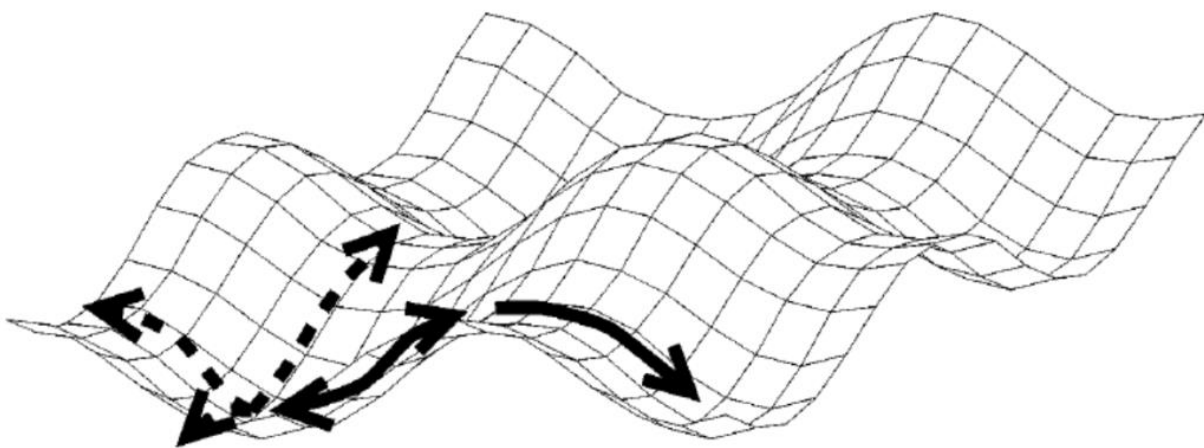


Зависимость проводимости $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ от концентрации Y_2O_3

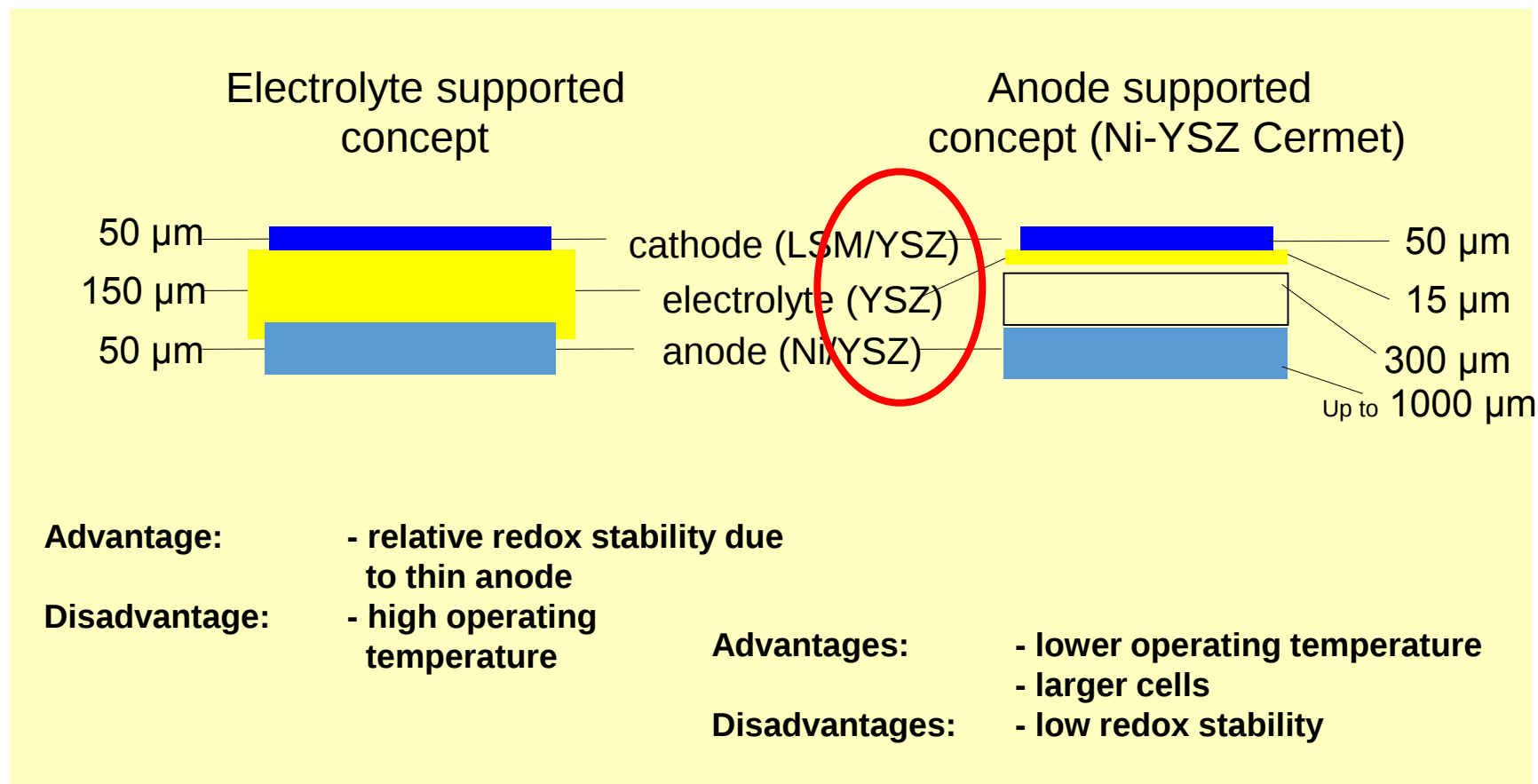
АНИОННЫЕ ПРОВОДНИКИ НА ОСНОВЕ ZrO_2



● Zr ○ O



Зависимость проводимости твердых растворов $(\text{ZrO}_2)_{1-x-y}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_x(\text{Y}_2\text{O}_3)_y$ при температуре 900°C от содержания Y_2O_3



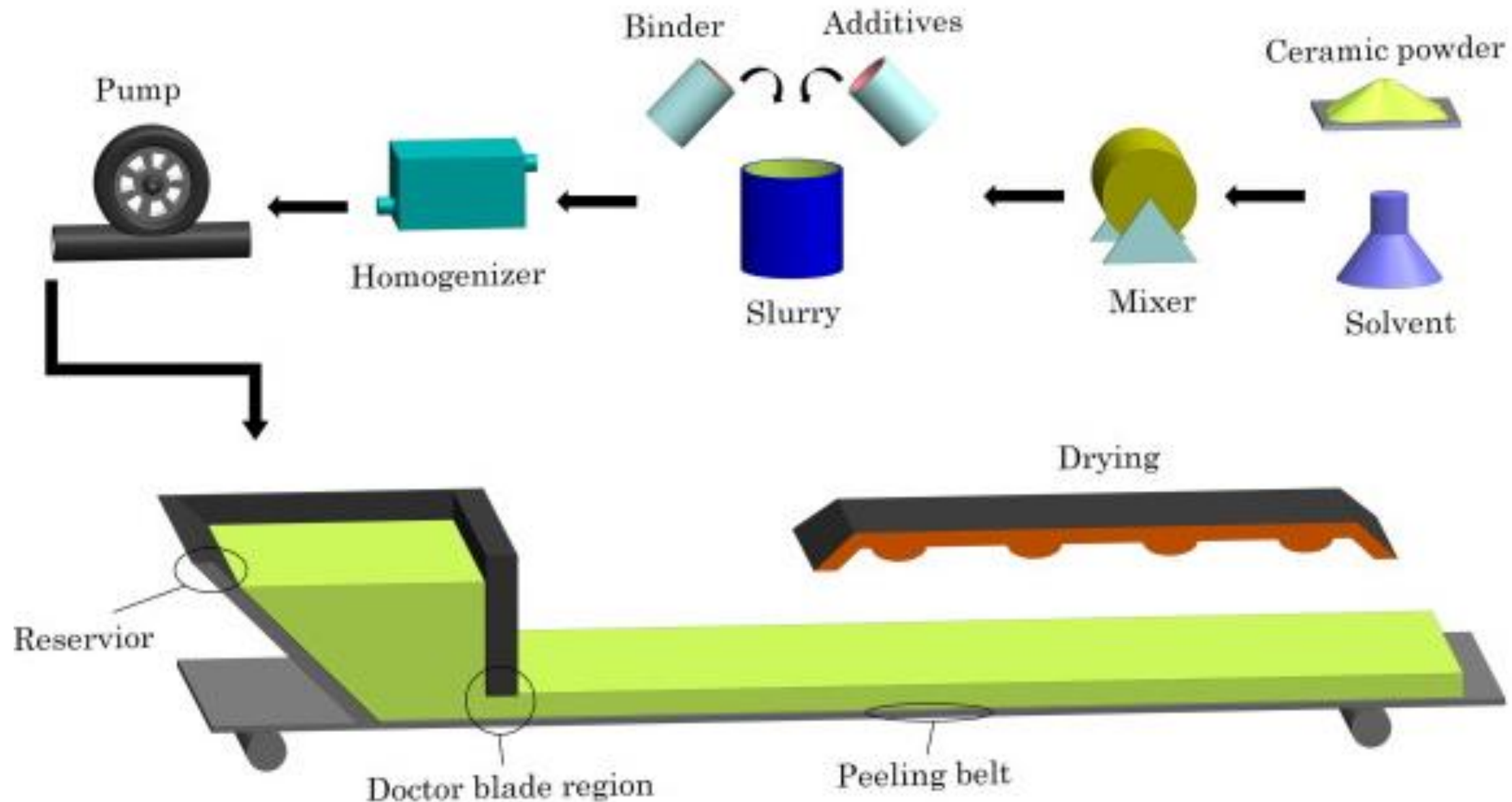
ЗАО «НеоХим» (А.Е. Досовицкий)

разработана технология получения порошков стабилизированного оксида циркония с помощью аммиачного гидролиза растворов, содержащих цирконий, скандий и иттрий.

Разработанная технология позволяет получать порошки составов 10Sc1YSZ, 10Sc1CeSZ, 6ScSZ в промышленных масштабах.



ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ НА ДВИЖУЩУЮСЯ ЛЕНТУ



ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕМБРАН АНИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ



ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕМБРАН АНИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН


А.А. Левченко
«14» мая 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»


К.И. Мартынов
«12» 05 2022 г.

ПЛАСТИНЫ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Технические условия

ТУ 23.44.12.190-193-30742093 – 2022

Дата введения: «__» _____ 2022 г.

СОГЛАСОВАНО

Заведующий лабораторией ЛСДС
ИФТТ РАН


С.И. Бредихин
«12» мая 2022 г.

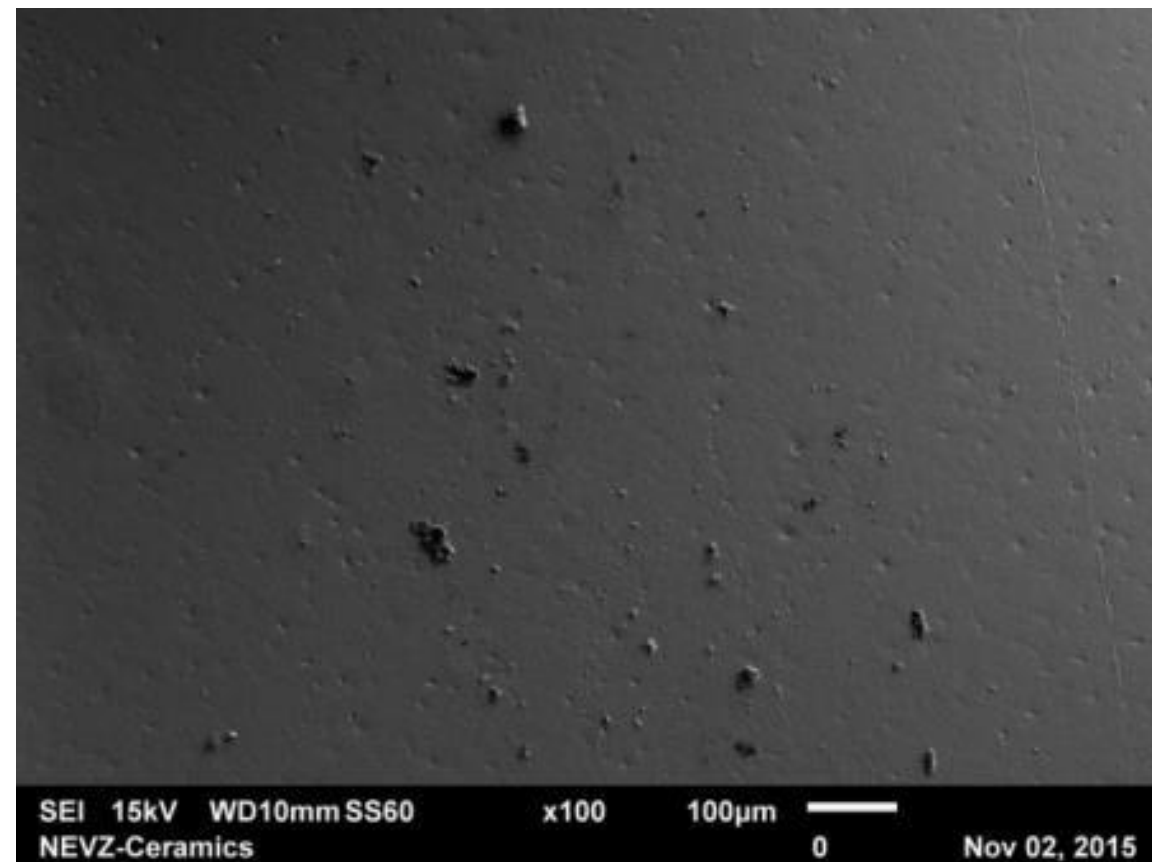
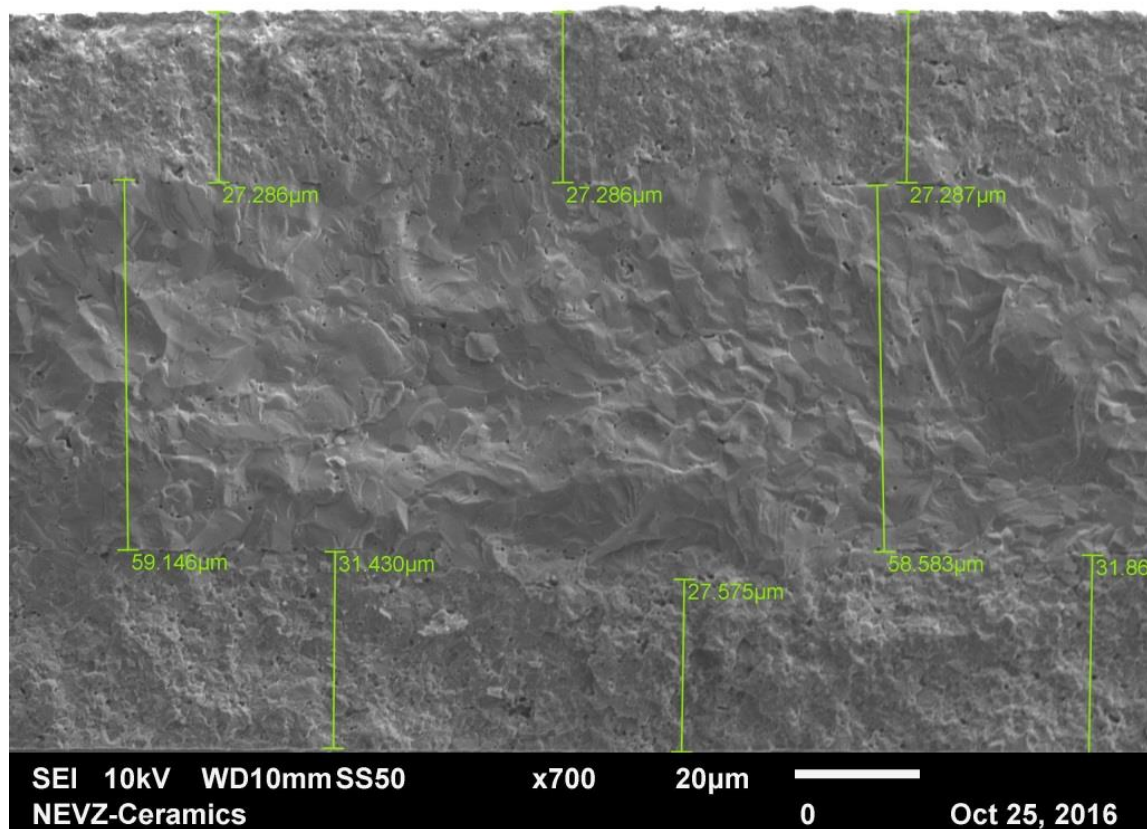
СОГЛАСОВАНО

Технический директор
АО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»


А.В. Татарский
«13» 05 2022 г.

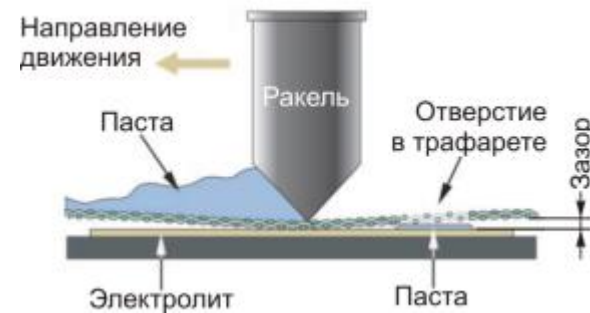
2022





- Создано новое техническое решение, относящееся к изготовлению пластин твердого электролита, используемых при изготовлении мембранно-электродных блоков (МЭБ) твердооксидных топливных элементов
- Получен патент на полезную модель Д.А. Агарков, И.Н. Бурмистров, И.Е. Курицына, О.В. Тиунова, Ю.К. Непочатов, С.И. Бредихин «Мембрана твердого электролита для твердооксидных топливных элементов» Патент на полезную модель, 161024, дата приоритета 17.09.2015, зарегистрирован 17.03.2016, срок действия 17.09.2025 (2016)

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ



Навеска
порошков

Перемол

Изготовление пасты

Нанесение
слоев

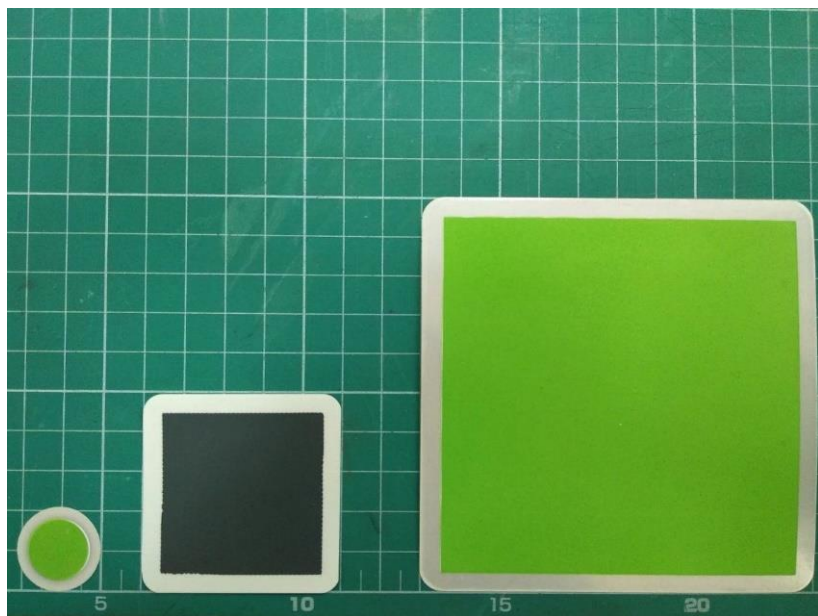
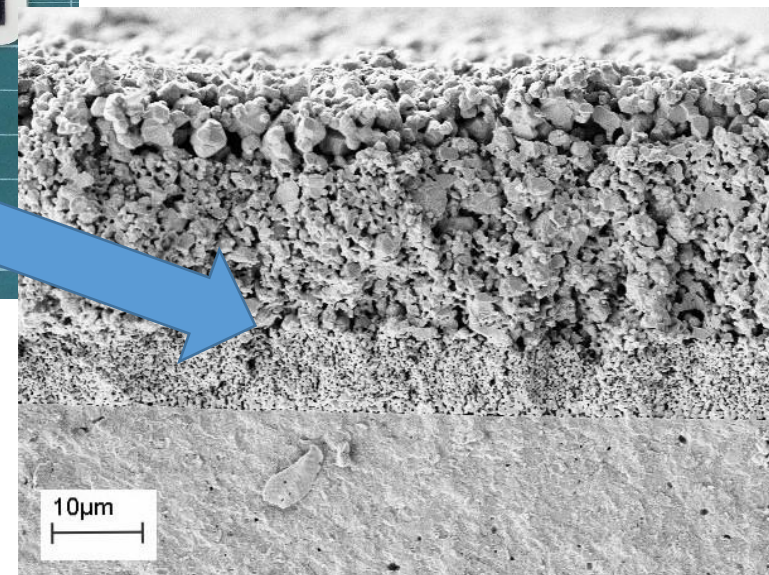
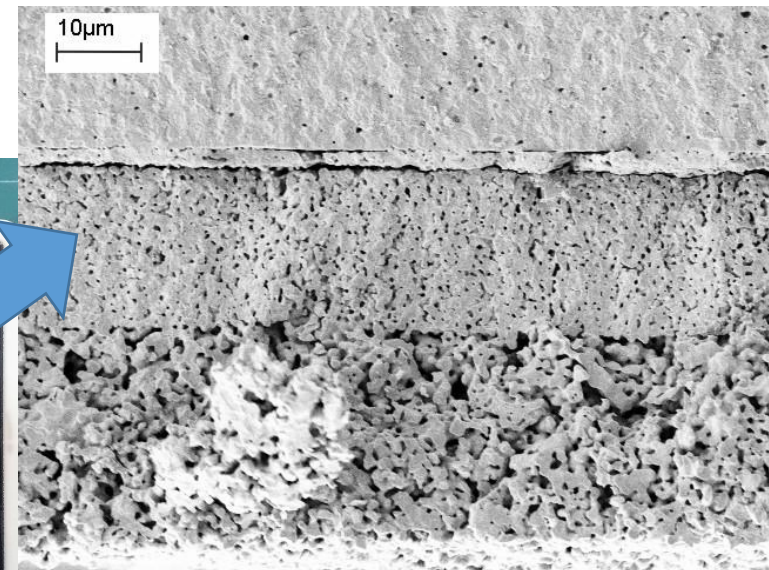
ВТ отжиг





Слой	Состав	Толщина слоя, мкм
Токосъемный анод	NiO	10
	NiO/10Sc1CeSZ = 60/40	35
Функциональный анод	NiO/GDC = 50/50	10
Защитный слой	GDC	менее 5
Электролит	6ScSZ/10Sc1YSZ/6ScSZ	150
Защитный слой	GDC	менее 5
Функциональный катод	LSM/GDC	10
Токосъемный катод	LSM	30

Многослойные электроды ТОТЭ

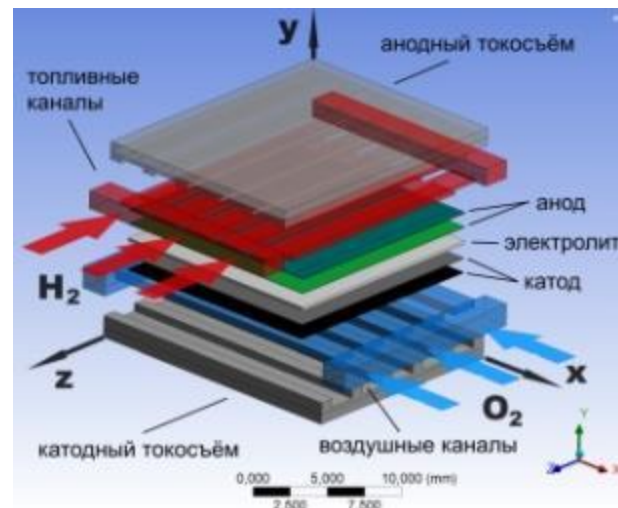






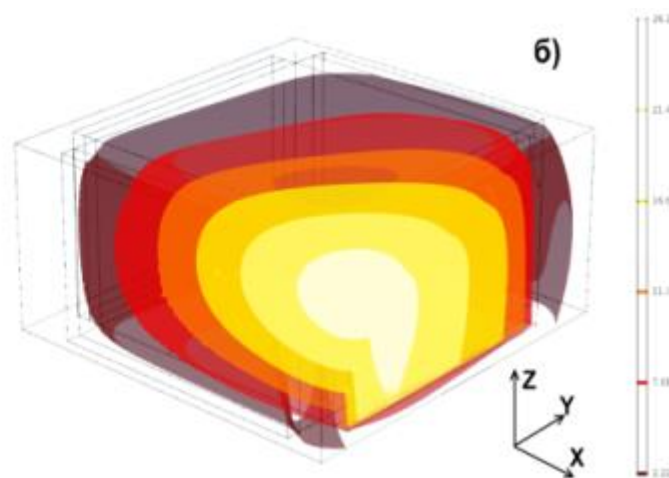
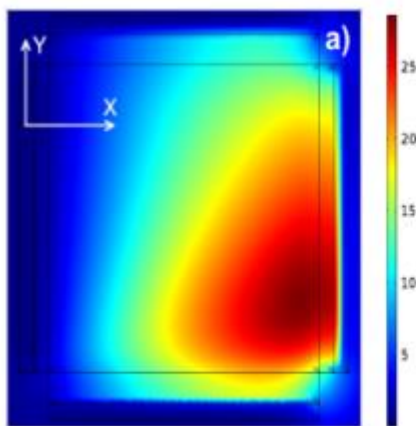
Металлический «хаузинг» собственной конструкции позволяет проводить электрохимические испытания МЭБ ТОТЭ размером 50x50 мм

Геометрия батареи:



Результаты компьютерного моделирования полей распределения температур, токов и давлений позволили оптимизировать геометрические параметры батарей ТОТЭ

17.5 В

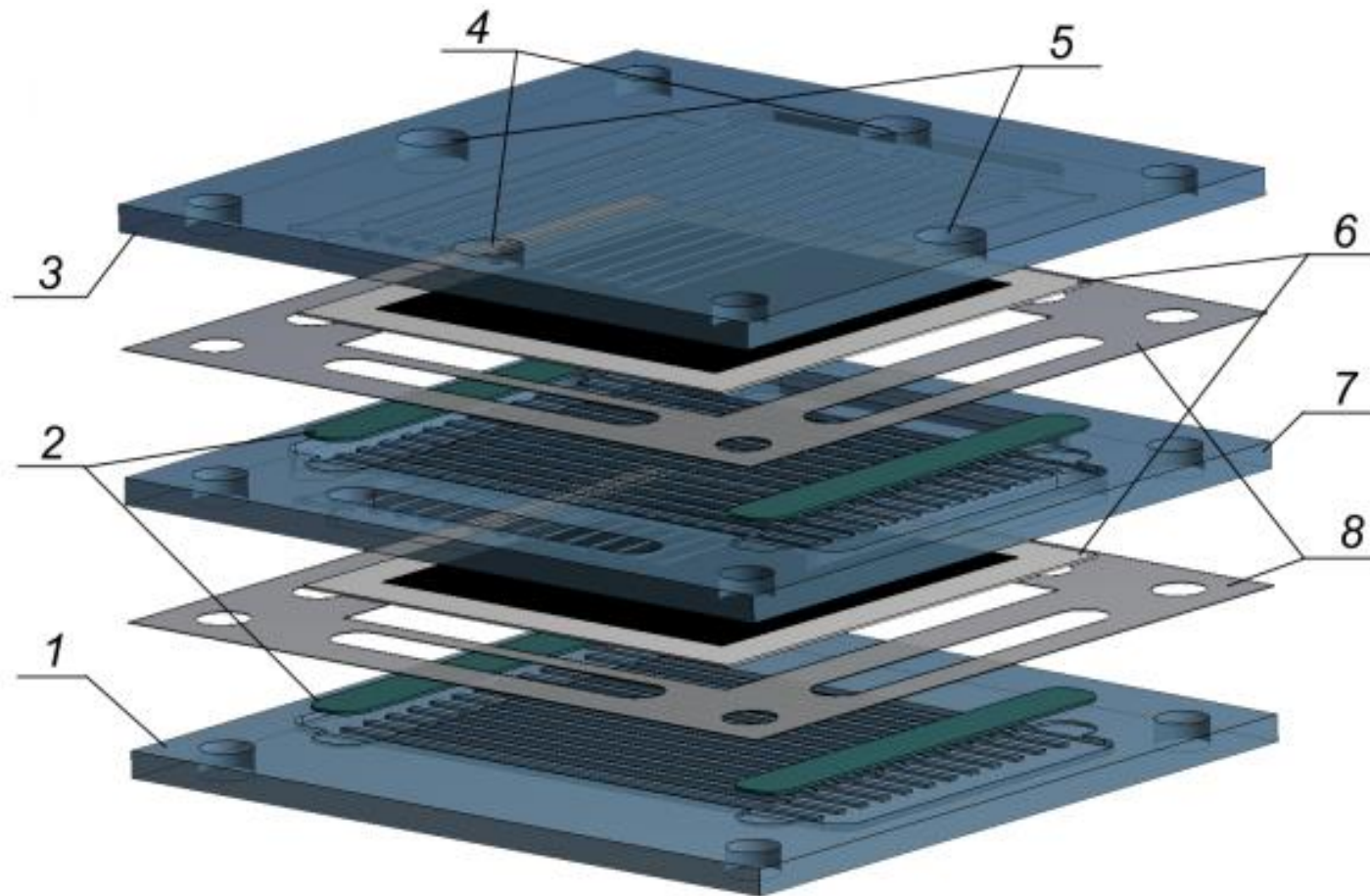


Карта распределения температуры в срединном сечении батареи (а) и трёхмерное изображение поверхностей постоянной температуры (б); напряжение на батарее 17,5 В

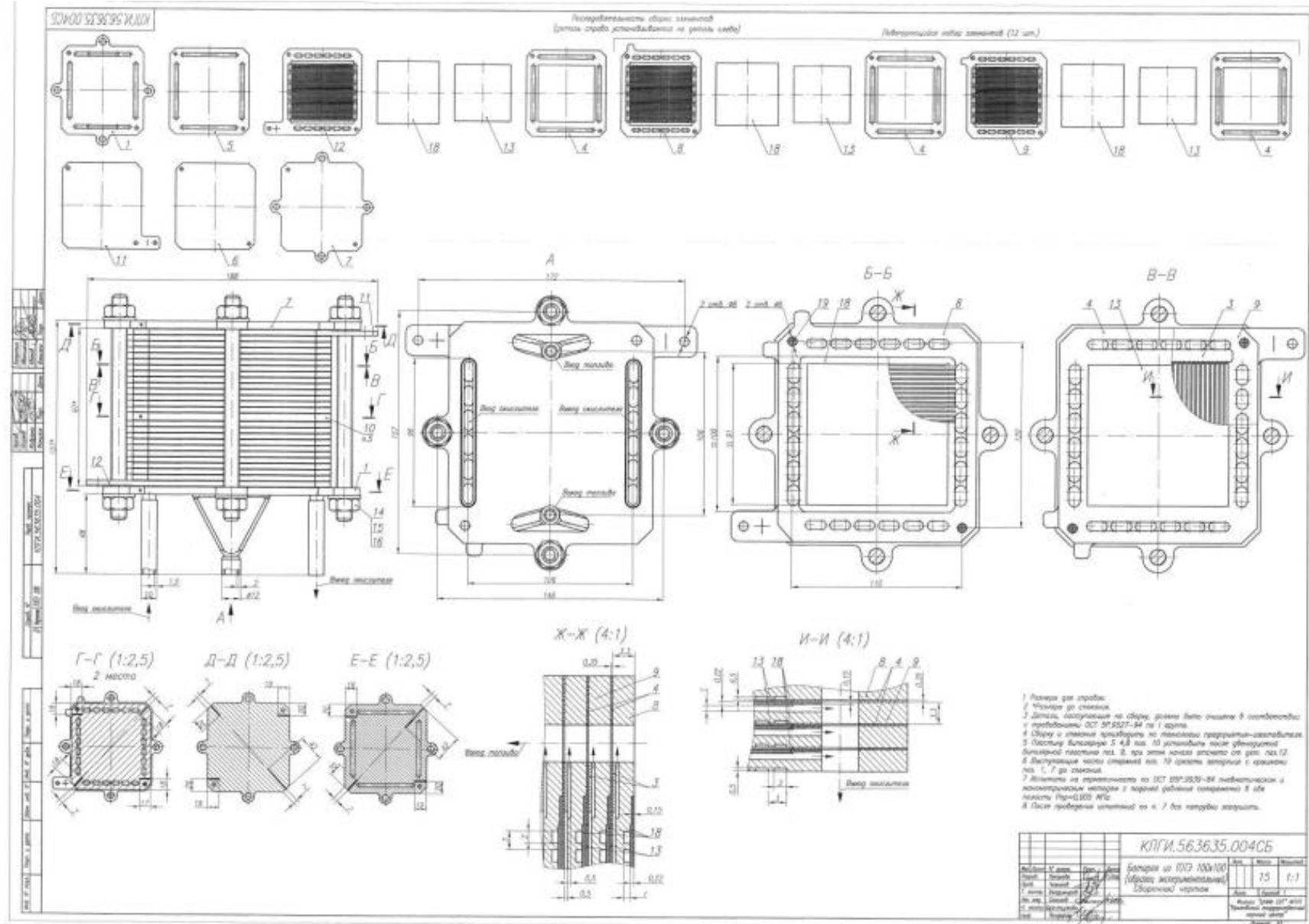
КОНСТРУКЦИЯ БАТАРЕЙ ТОТЭ

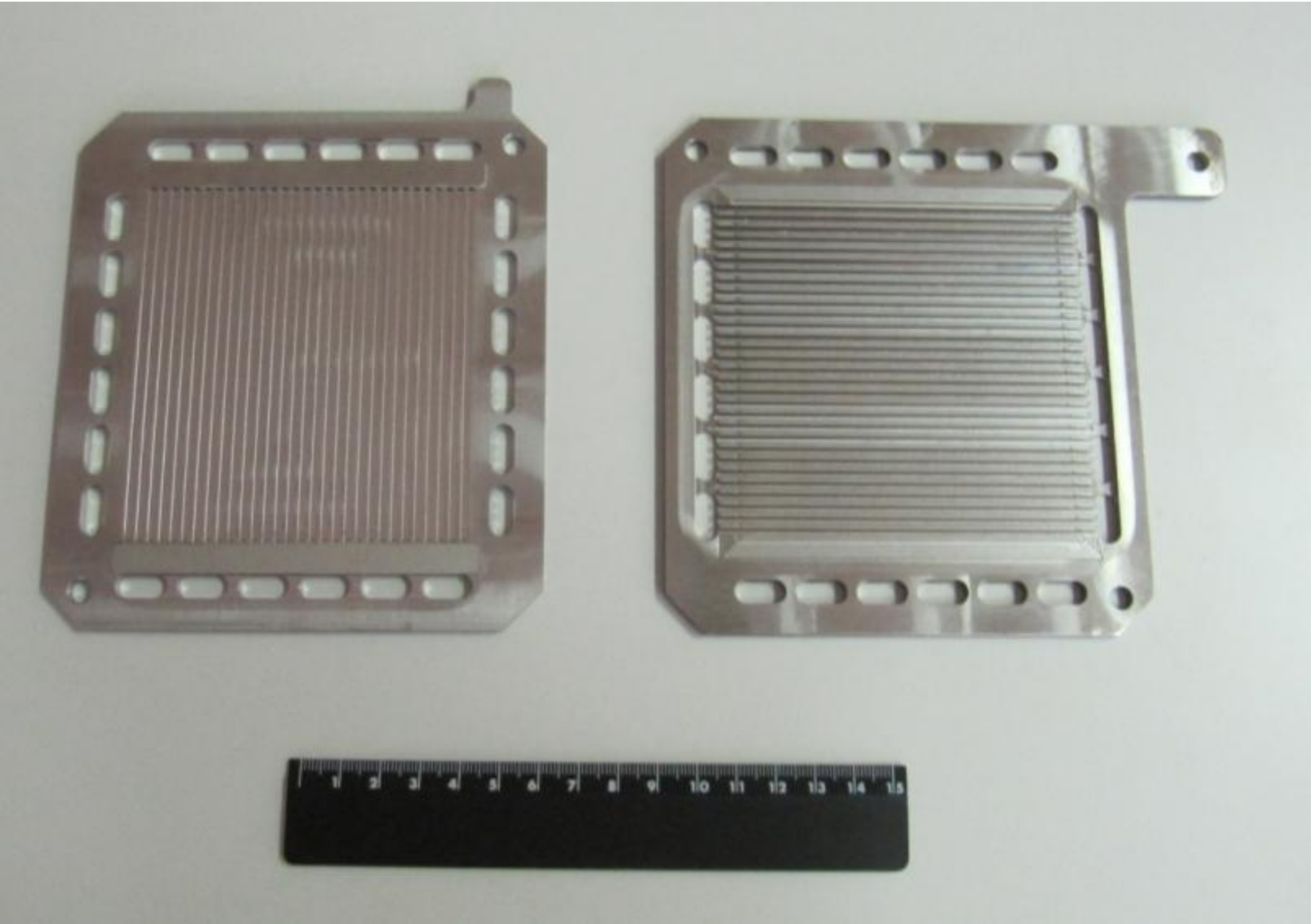
Проведено компьютерное моделирование:

- системы газораспределения в батареях ТОТЭ двух видов ТОТЭ размером 50×50 мм и 100×100 мм;
- температурных полей в батареях ТОТЭ при разных режимах электрической нагрузки;
- распределения токов при разных коэффициентах утилизации топлива.



ЦНИИ СЭТ и ИФТТ РАН разработали ЭКД на БАТАРЕЮ ТОТЭ РАЗМЕРОМ 100X100 мм





SOFC stack cost volume trends are shown in Figure 5-29 through Figure 5-32.

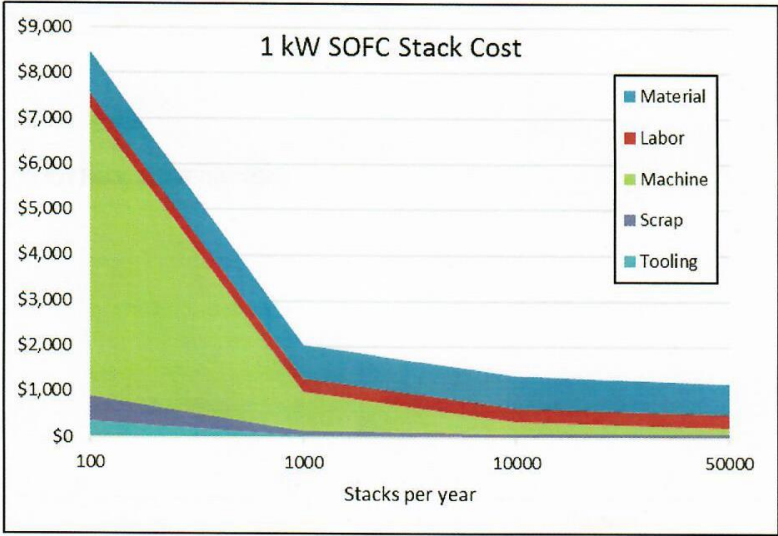
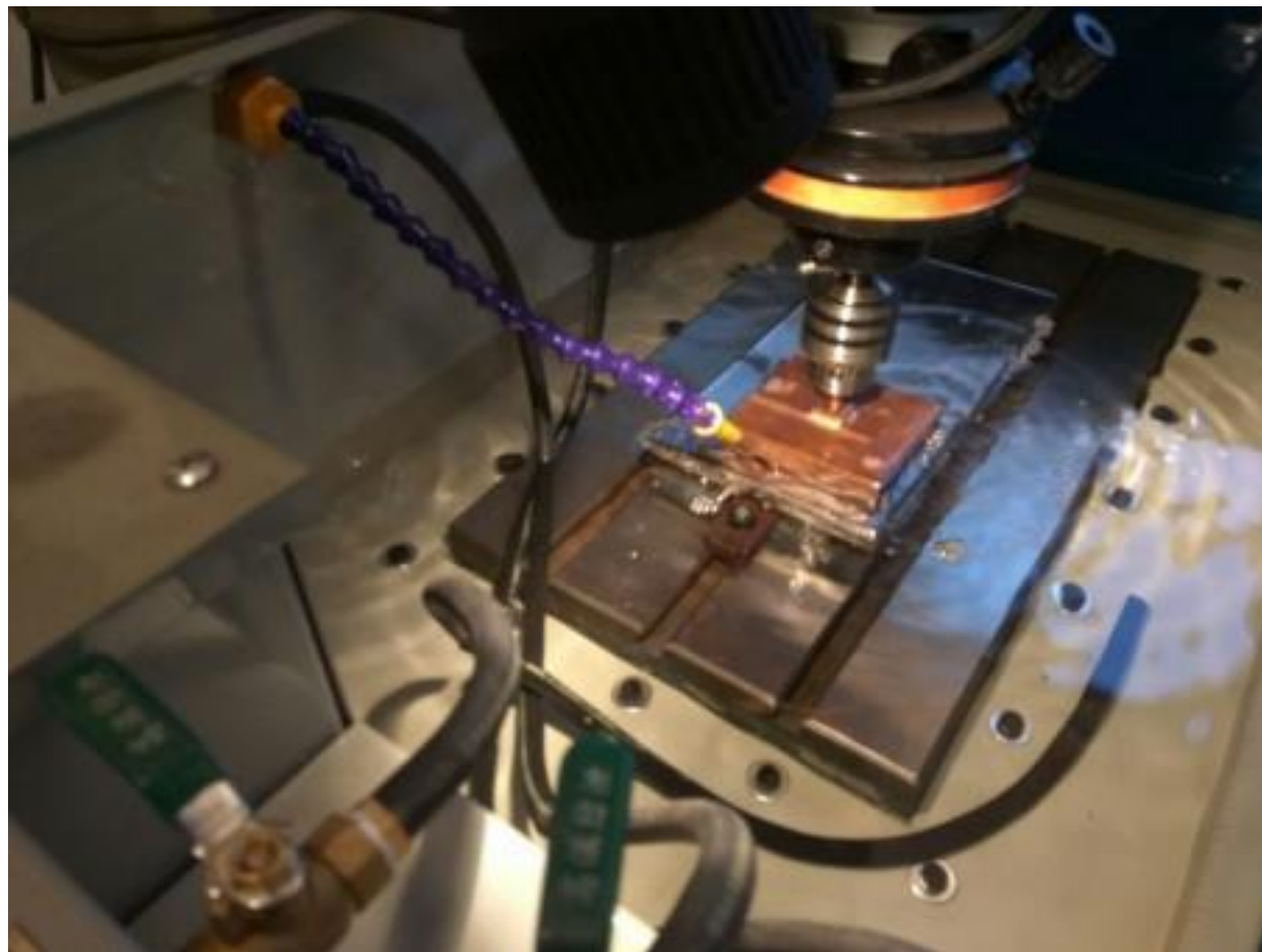


Figure 5-29. 1-kW SOFC stack cost volume trends

Manufacturing Cost Analysis: 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications
DOE Contract No. DE-EE0005250

Table 5-71. SOFC Stack Manufacturing Cost Summary: 10- and 25-kW Systems

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$2,280.83	\$1,777.87	\$1,599.36	\$1,564.18	\$3,937.28	\$3,064.09	\$2,800.17	\$2,784.63
Labor	\$940.18	\$886.73	\$881.74	\$881.32	\$2,006.39	\$1,924.09	\$1,915.92	\$1,915.19
Machine	\$7,396.43	\$1,783.58	\$649.70	\$466.49	\$9,257.67	\$2,586.06	\$1,214.10	\$997.82
Scrap	\$795.32	\$330.31	\$226.41	\$208.54	\$1,158.65	\$579.28	\$448.36	\$429.19
Tooling	\$469.32	\$101.68	\$73.34	\$70.71	\$490.37	\$207.02	\$178.73	\$176.92
Part Total	\$11,882.08	\$4,880.17	\$3,430.55	\$3,191.23	\$16,850.37	\$8,360.54	\$6,557.28	\$6,303.76

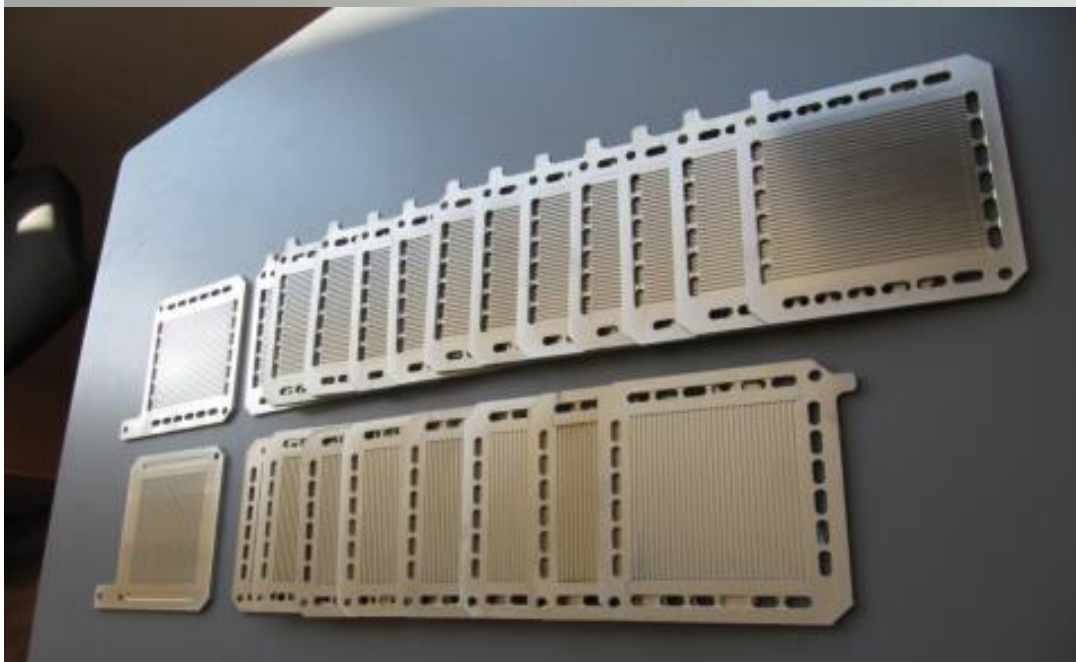
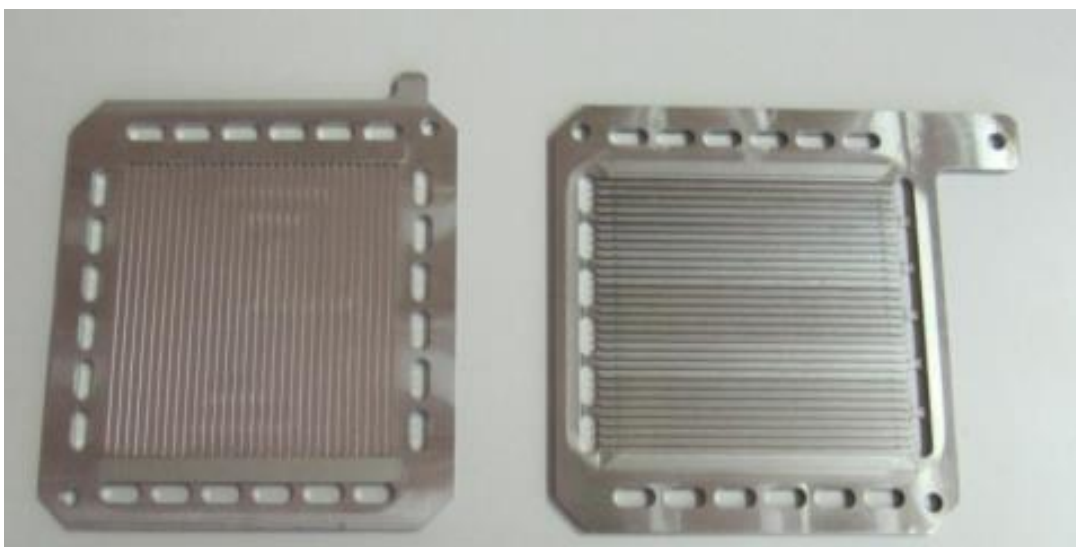


Фотография электроэрозионного копировально-прошивочного станка с ЧПУ D7125



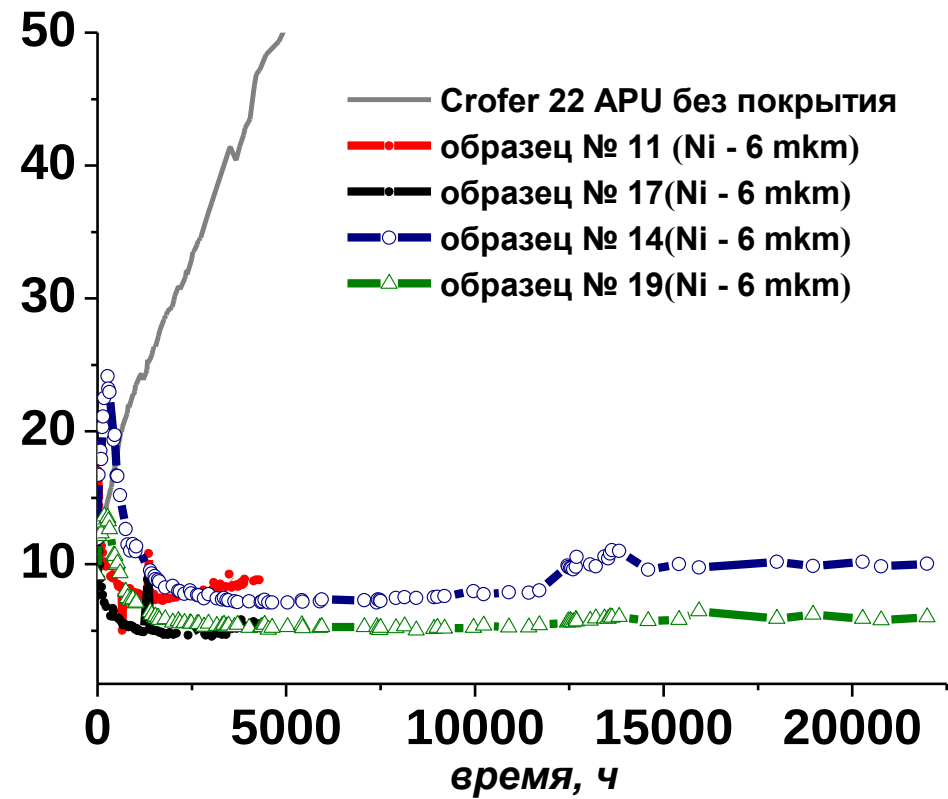
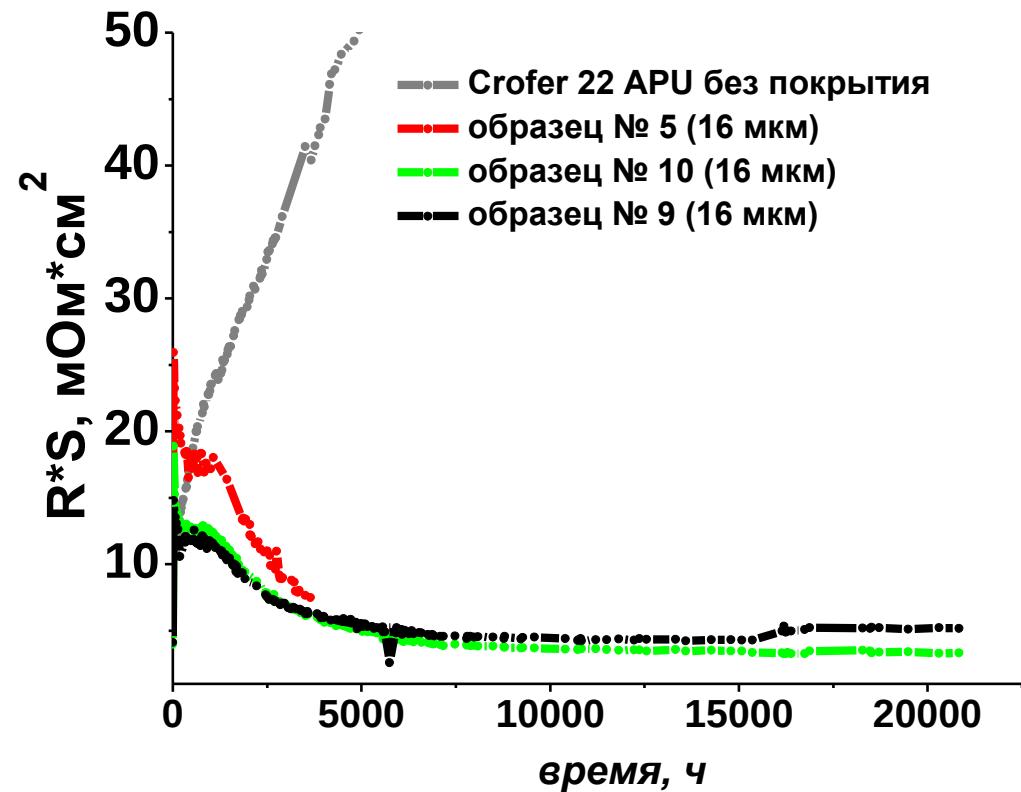
Медный и графитовый электроды для электроэрозионного станка

НАНЕСЕНИЕ ПРОВОДЯЩИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ



ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Поведение электросопротивления перехода «La_{0,8}Sr_{0,2}MnO₃ катод–Crofer 22 APU» без покрытия и с защитными Ni покрытиями толщиной 6 и 16 мкм в зависимости от времени испытаний.



	$D_{\text{Ni}}, \text{см}^2/\text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$
Диффузия Ni в Crofer 22APU	$\sim 2,7-9 \times 10^{-14} \text{см}^2/\text{с}$	850
Диффузия Ni в $\alpha\text{-Fe}$	$\sim 10^{-13} \text{см}^2/\text{с}$	930

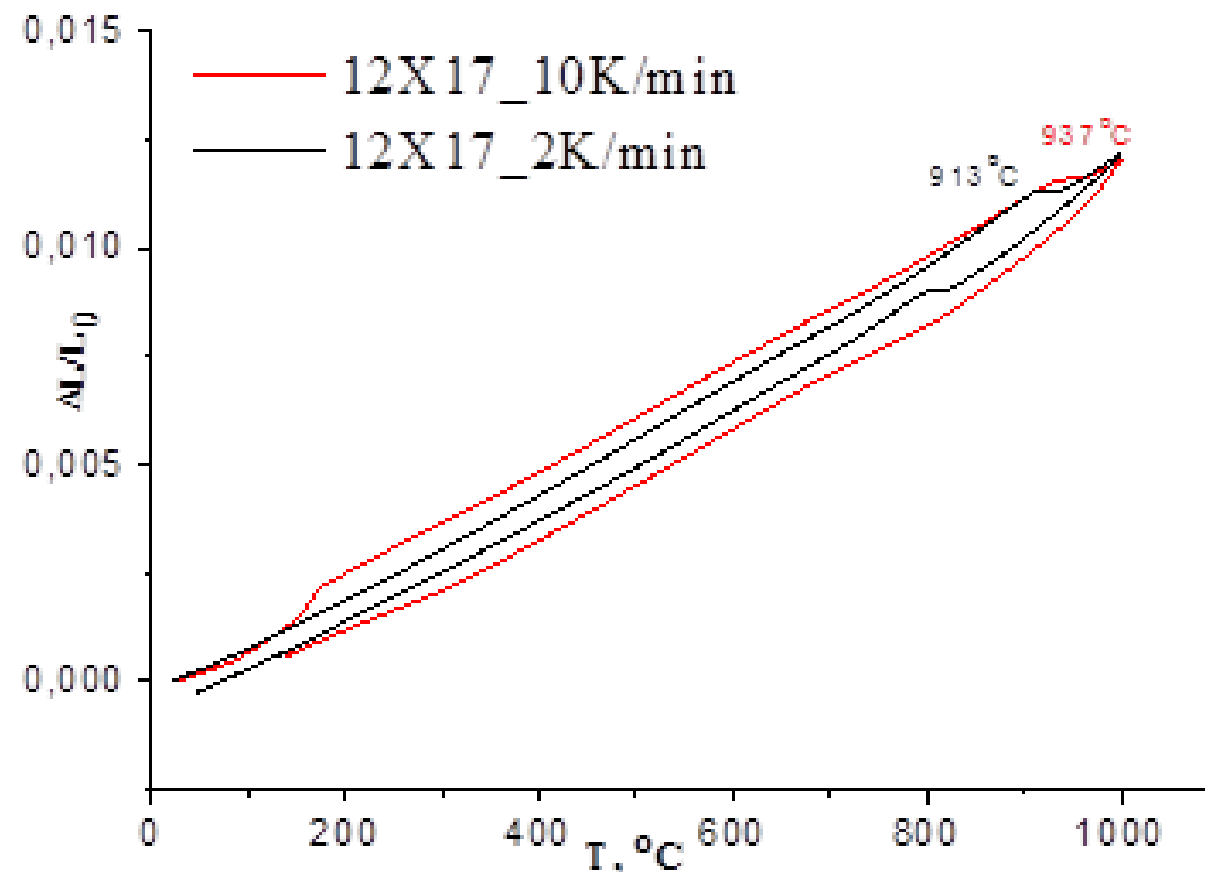
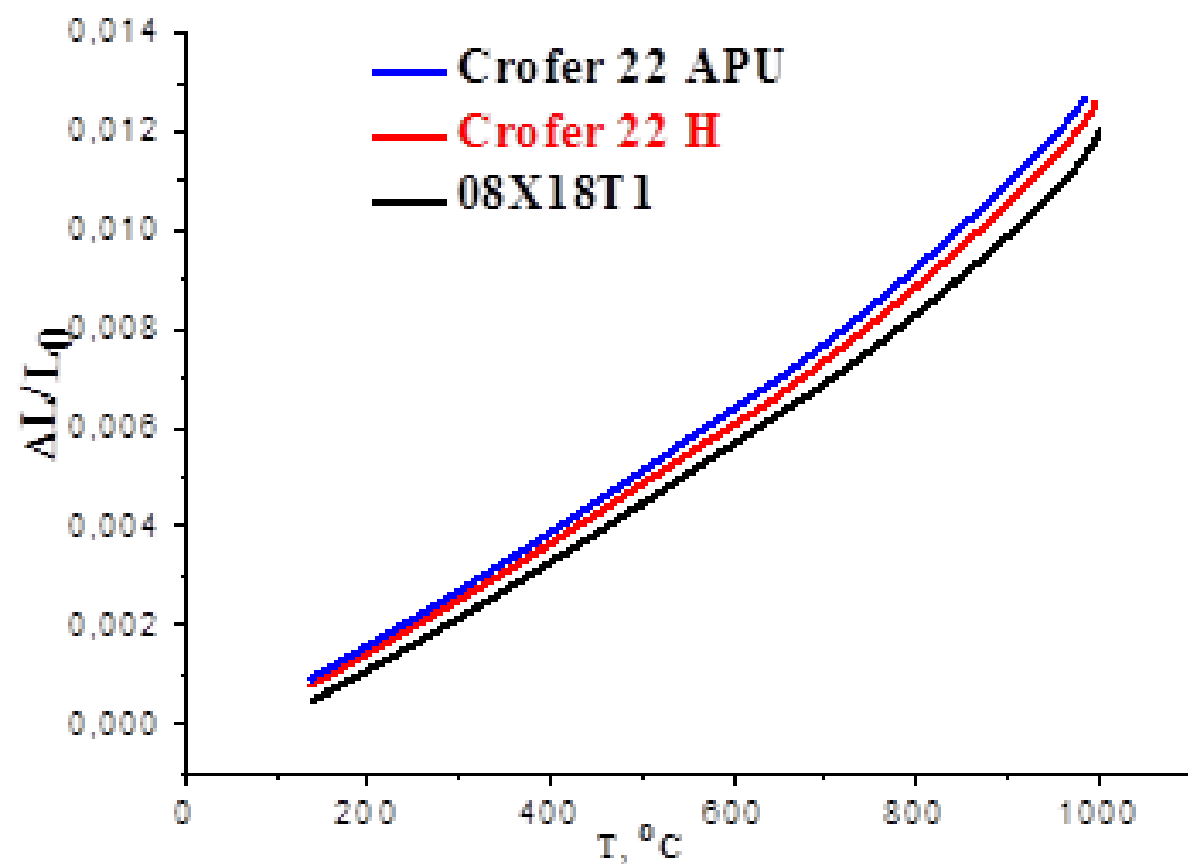
БЮДЖЕТНЫЕ ХРОМИСТЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ТОКОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Были исследованы нержавеющие хромистые стали:

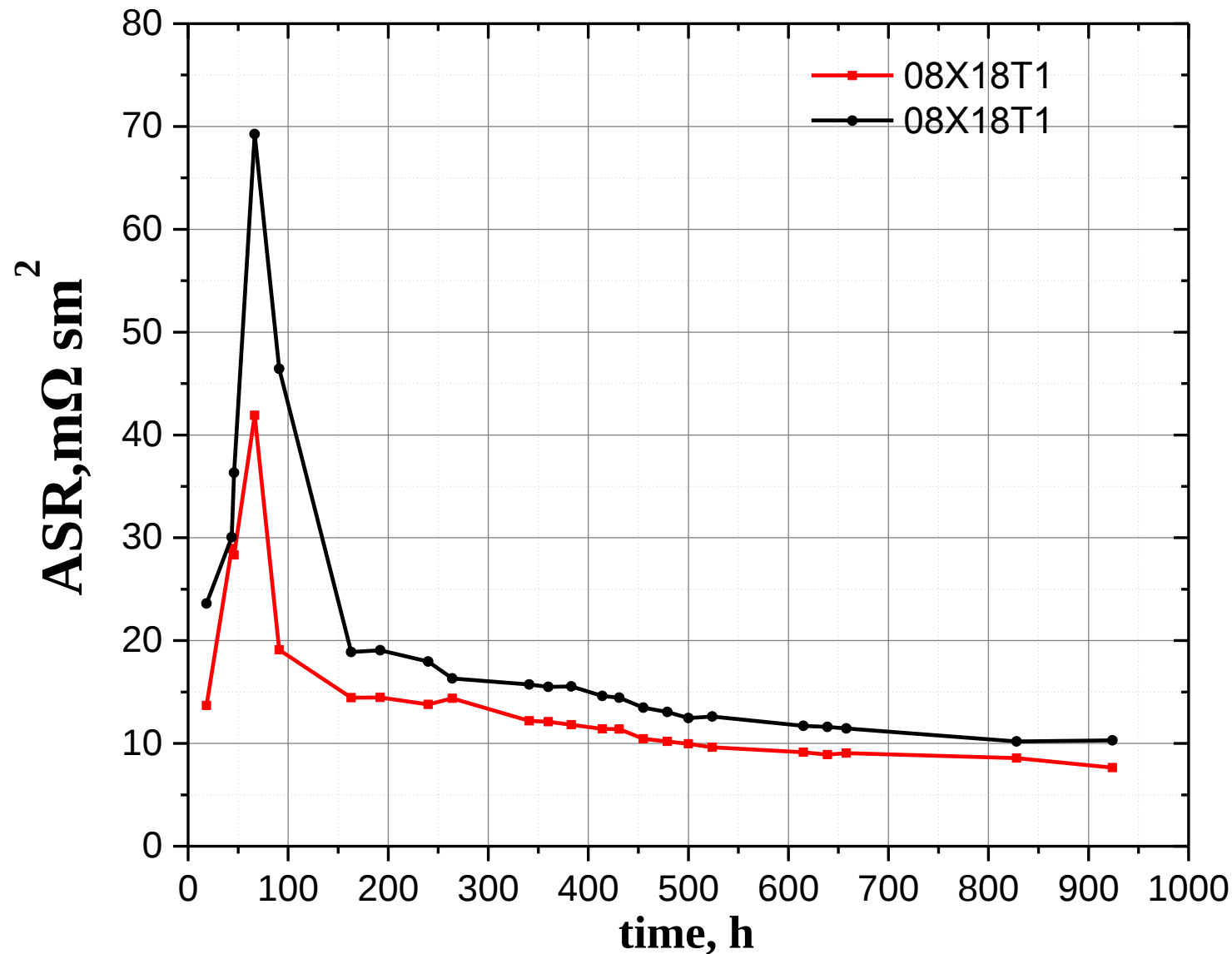
AISI 430 (Китай),

12X17-ГР (Россия),

08X18T1(Россия)

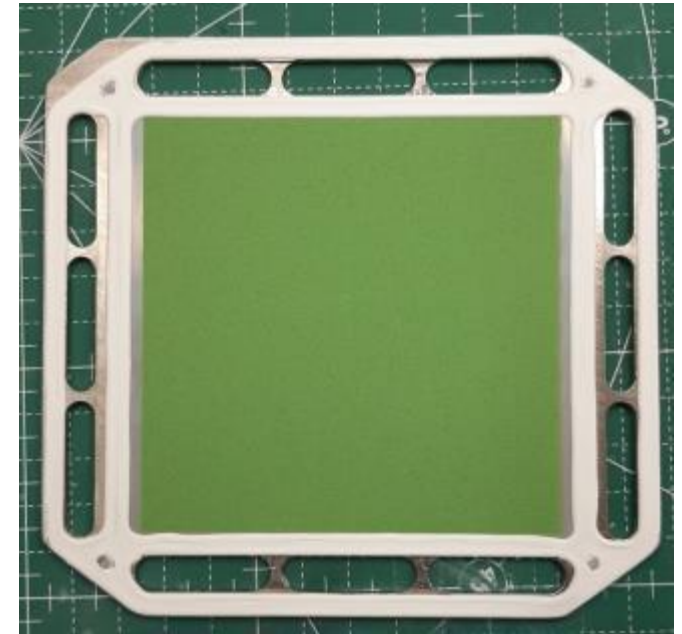
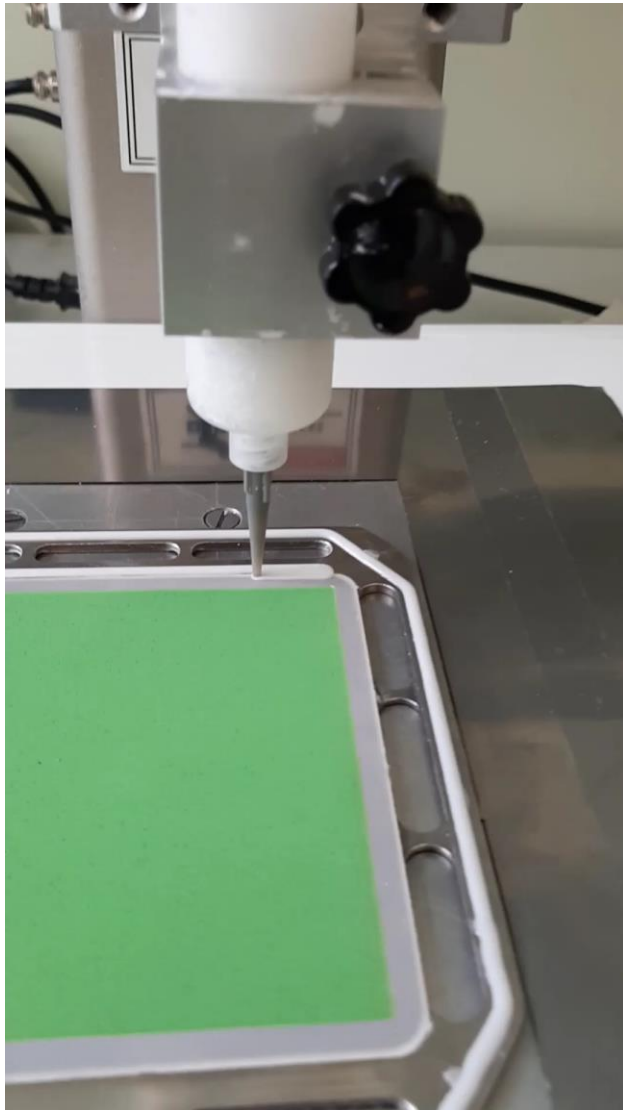


Эволюция сопротивления «LSM-катод – токовый коллектор» для стали 08Х18Т1

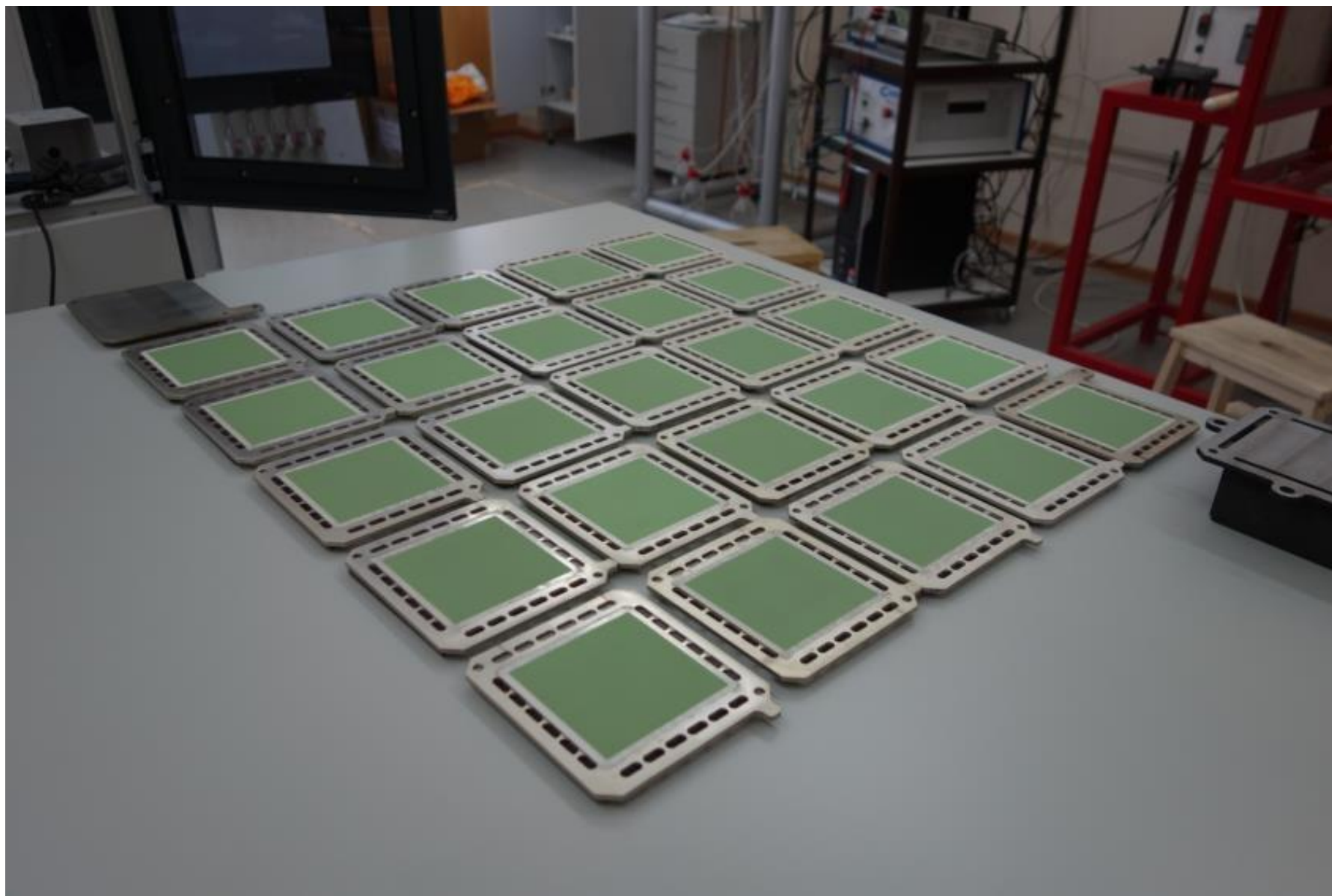


На текущий момент показана стабильность на времени около 1000 часов, деградации не наблюдается, **сопротивление снижается**.
Измерения продолжаются

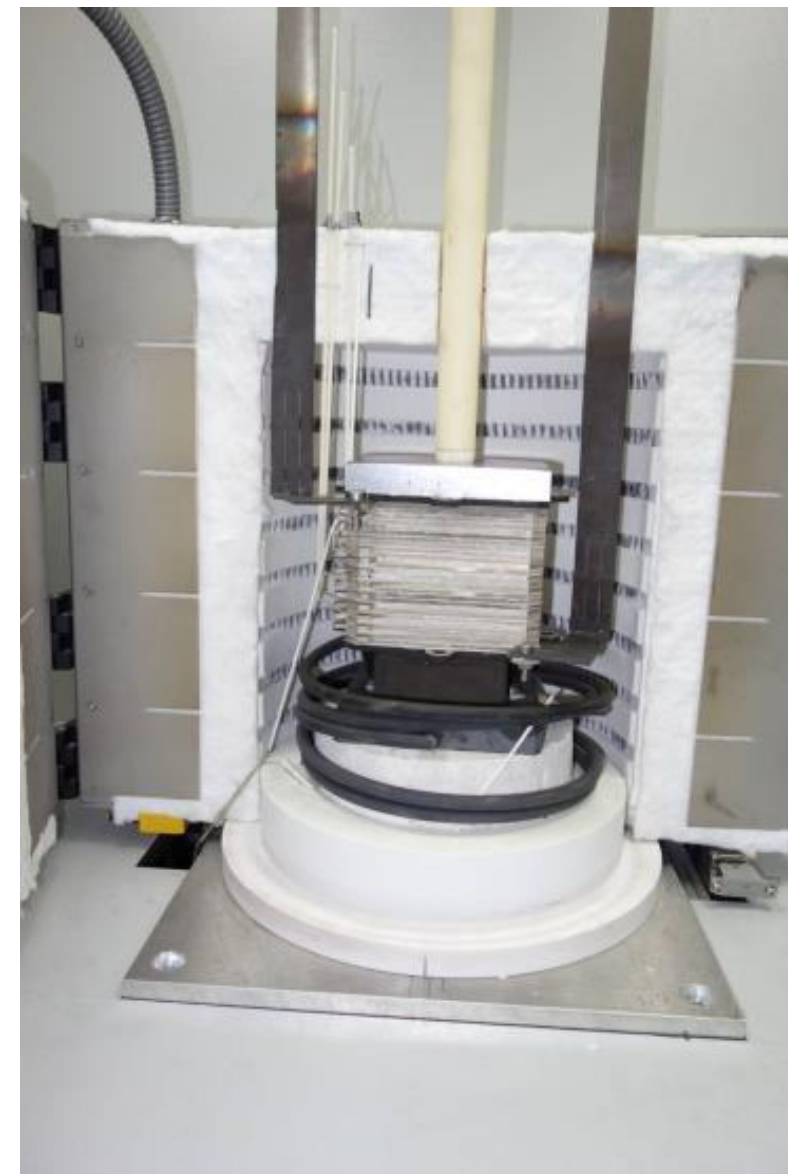
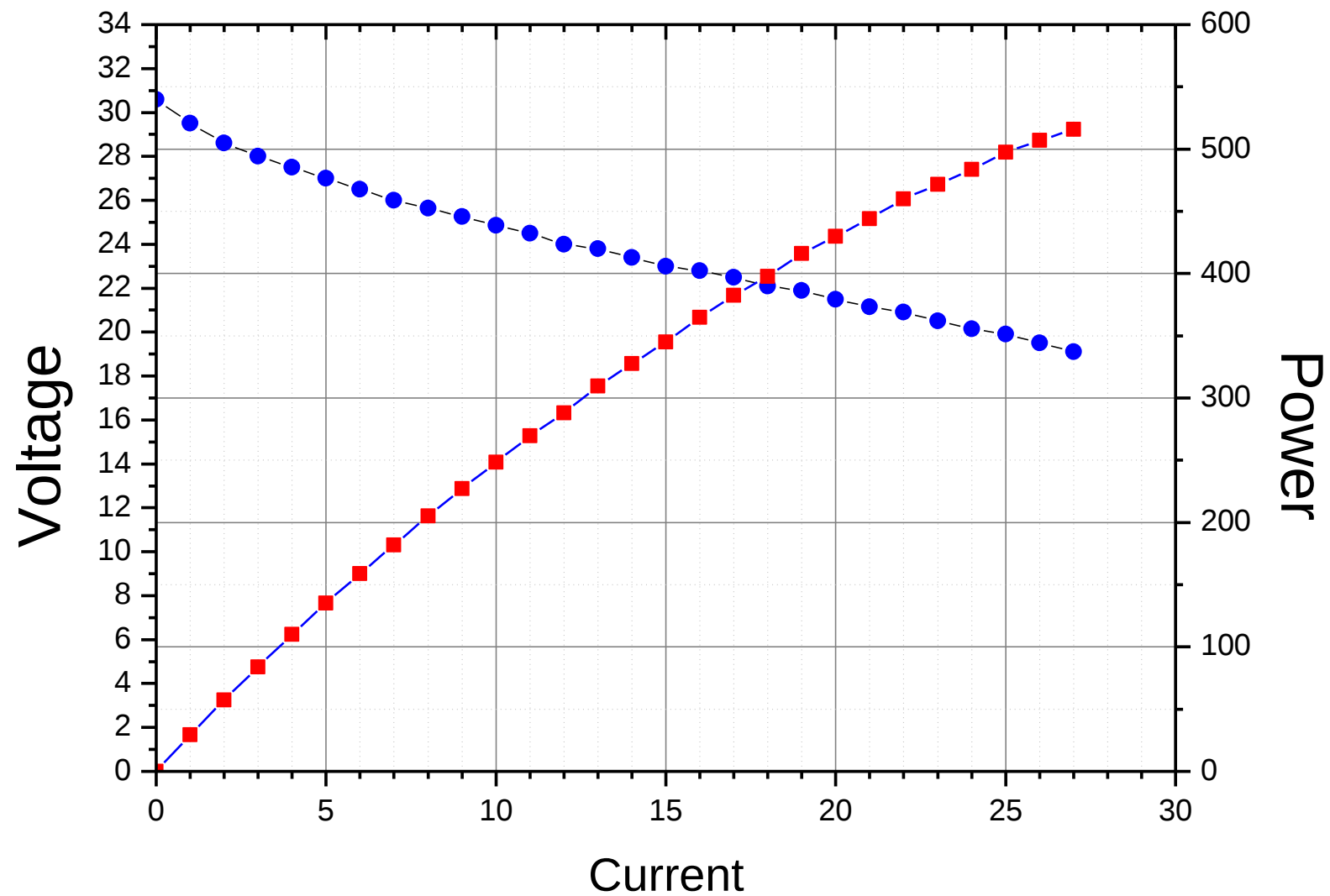
СТЕКЛОГЕРМЕТИКИ — НАНЕСЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ РОБОТА ДОЗАТОРА



БАТАРЕИ МОЩНОСТЬЮ 500 Вт СОБИРАЮТСЯ ИЗ СБОРОК: ТОТЭ + ТОКОВЫЙ КОЛЛЕКТОР

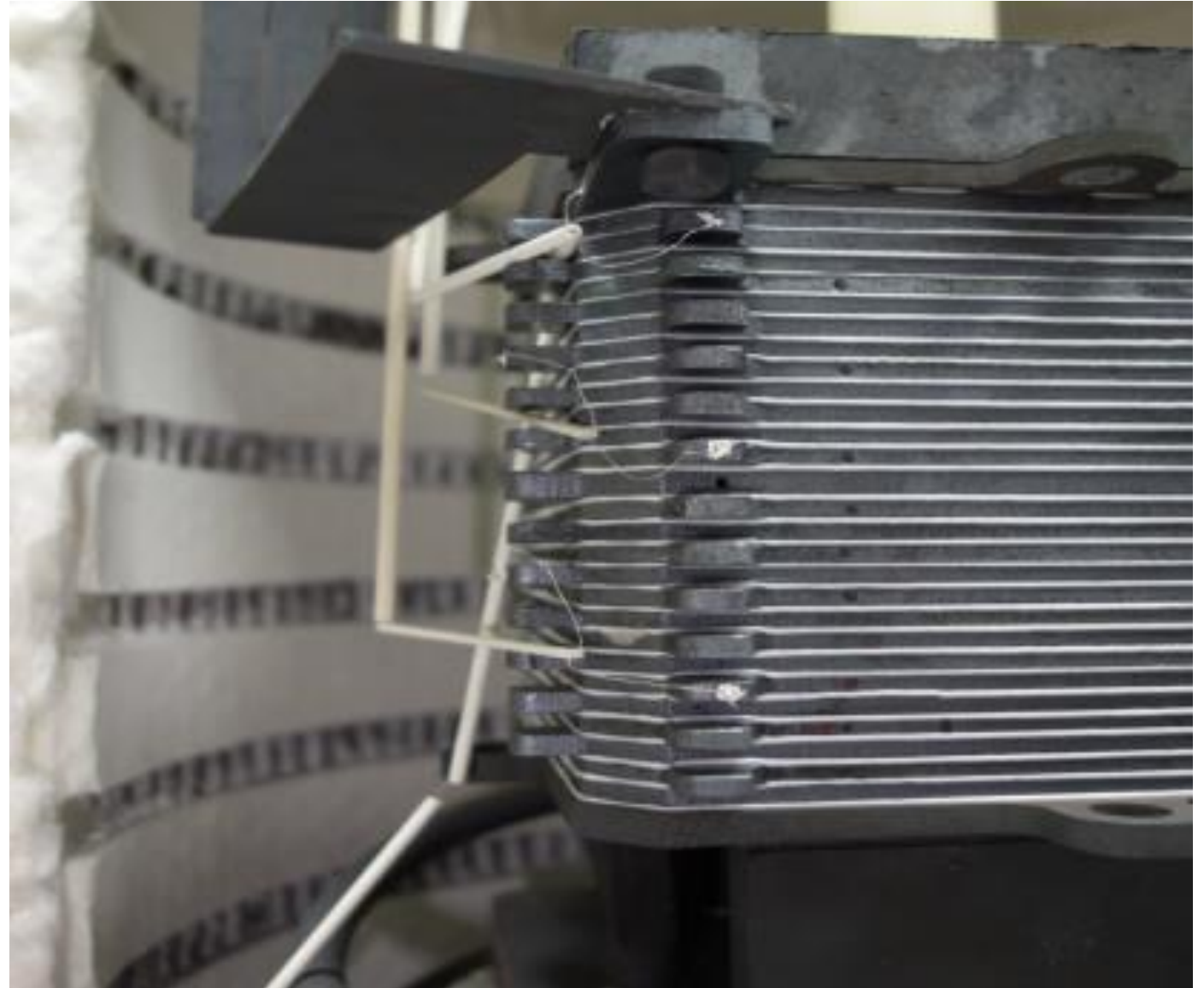
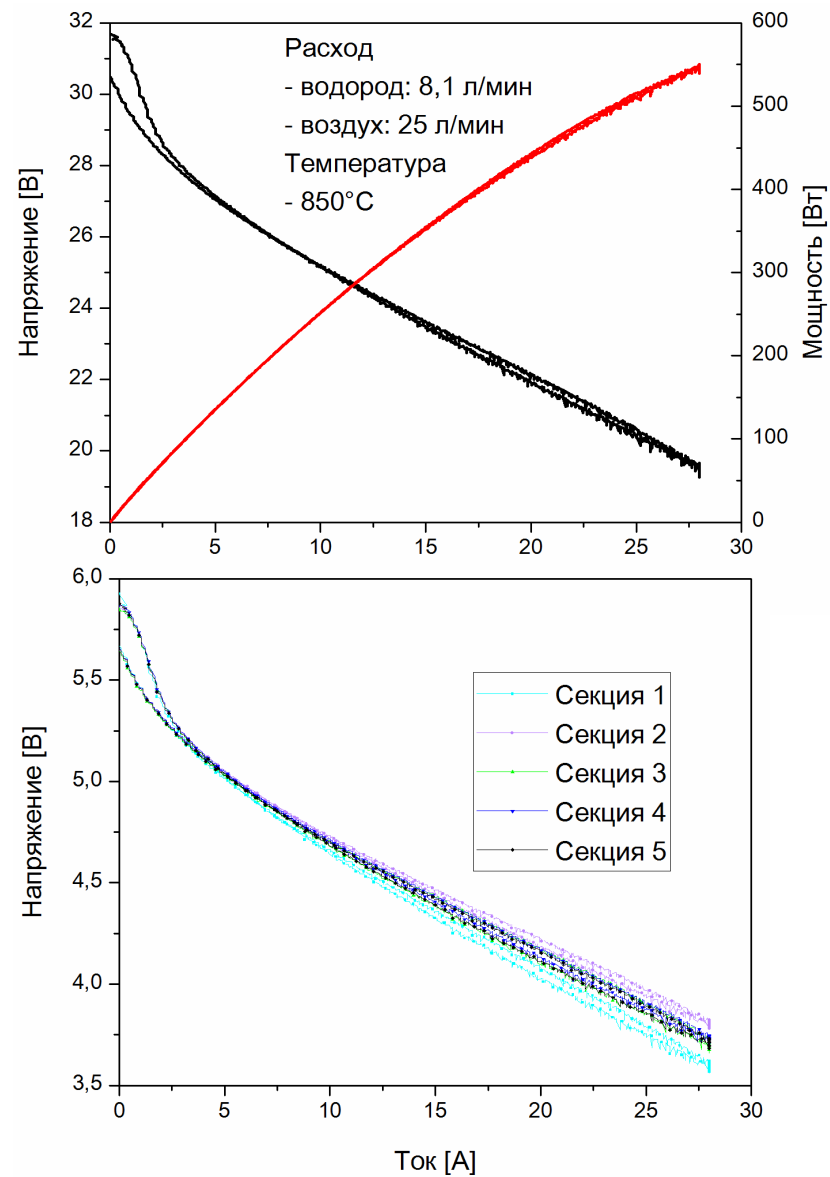


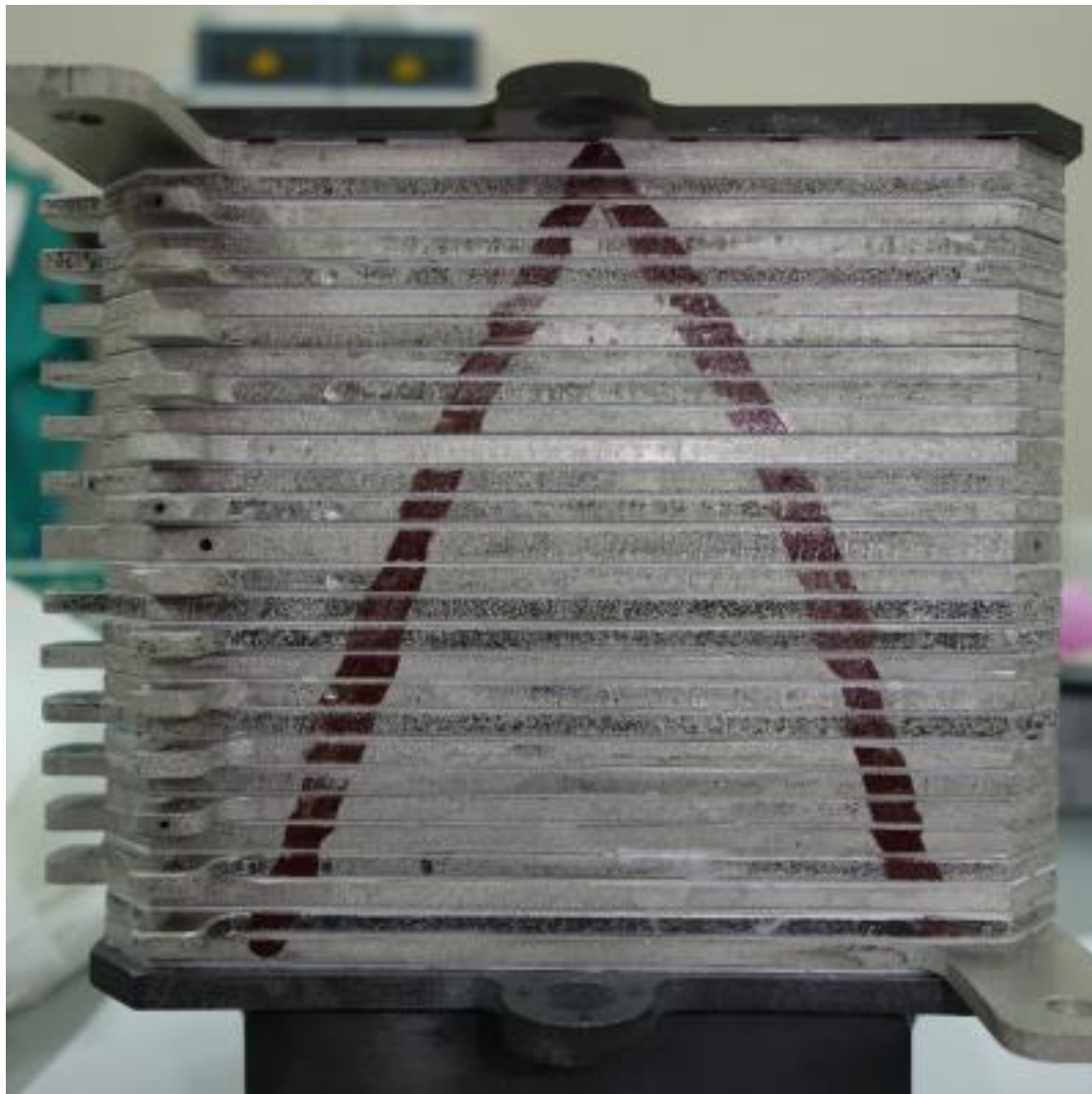
БАТАРЕИ МОЩНОСТЬЮ 500-600 Вт



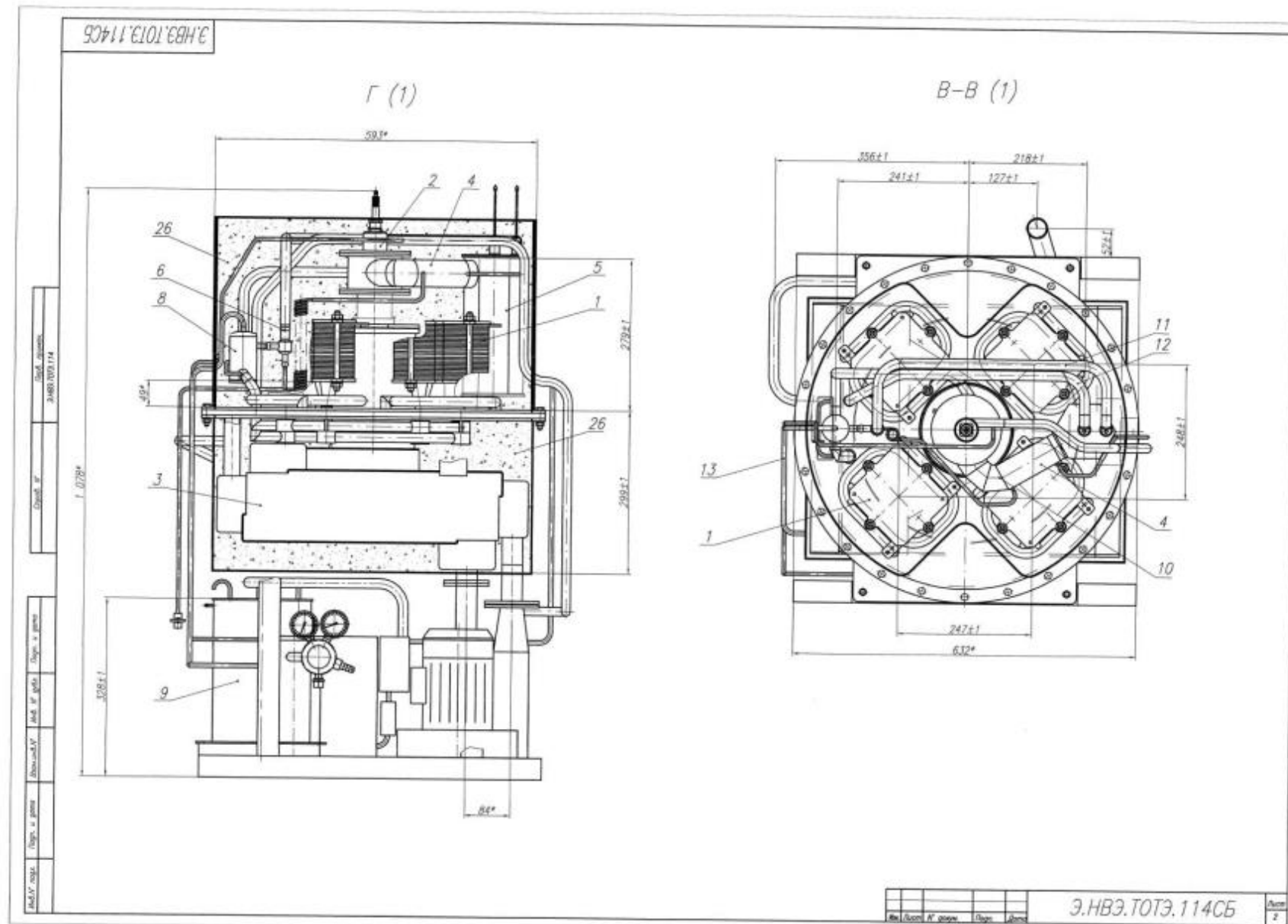
Вольтамперные и мощностные характеристики батареи ТОТЭ мощностью 500 Вт

СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО ВЫСОТЕ БАТАРЕИ





ЭКД НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 2 кВт



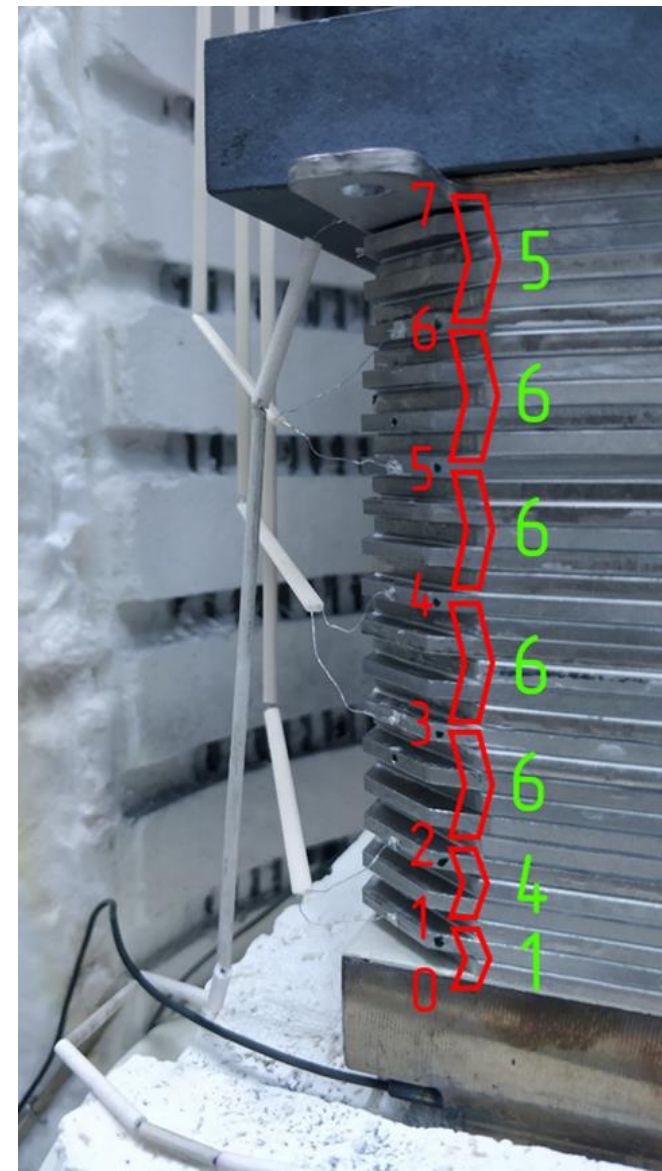
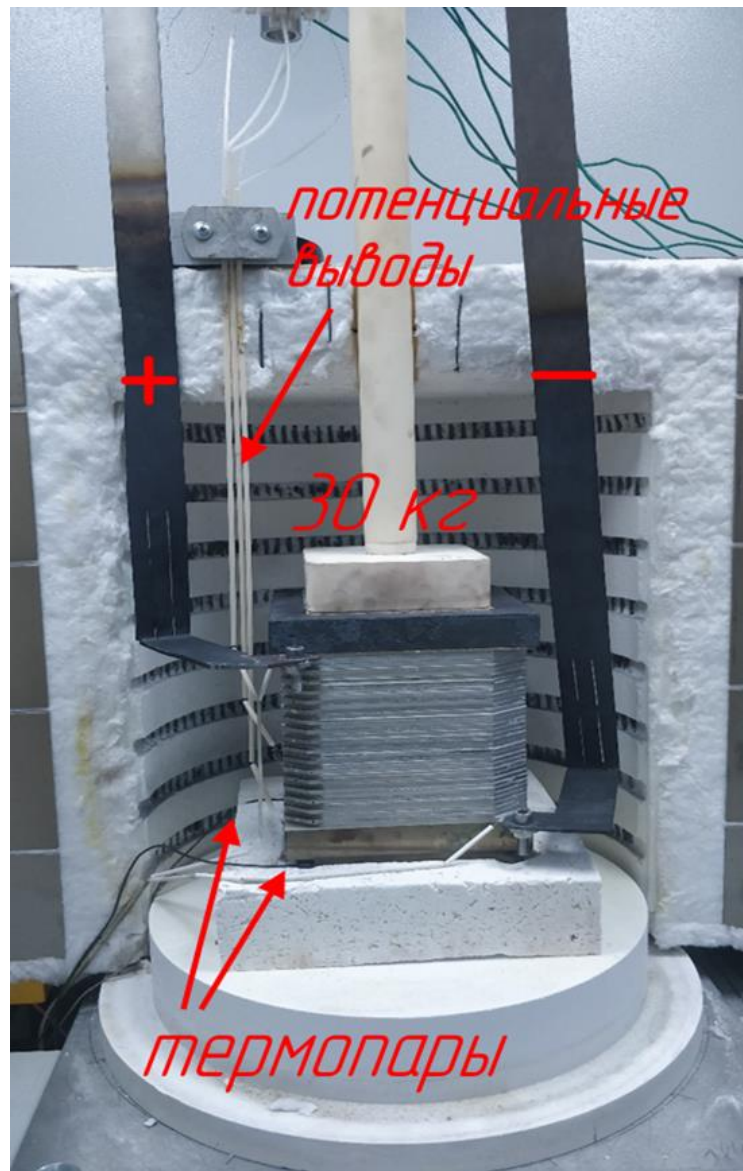
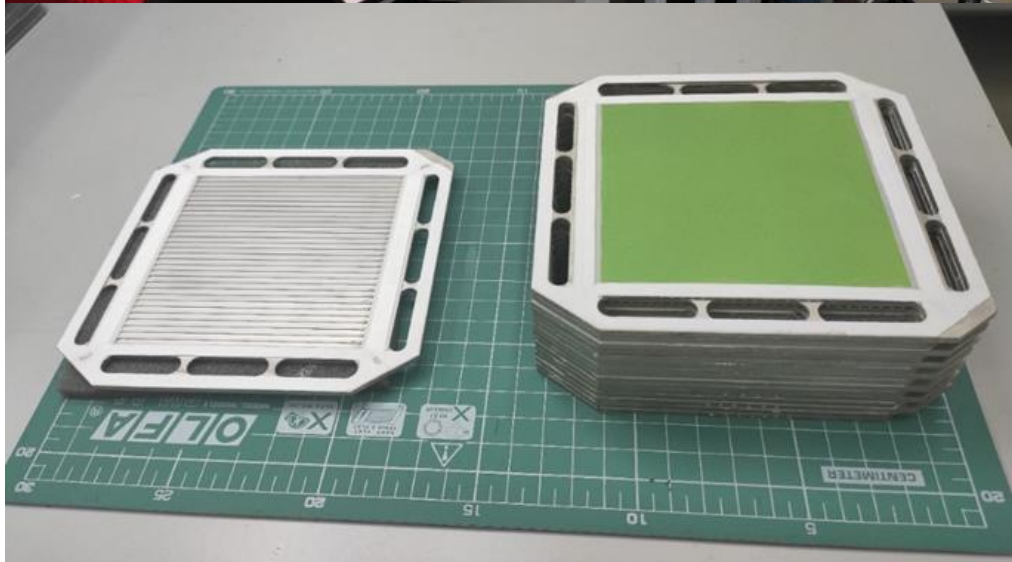
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 2 кВт



КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА МОДУЛЯ ЭУ НА ТОТЭ

Показатель	единица	значение
Топливо	-	Природный газ (ПГ, газообразный компримированный) по ГОСТ 5542-2014 при давлении 0.1-0.05 МПа
Номинальная мощность (по электрической энергии)	кВт	2.75 _{-0.25}
Минимальная мощность (по электрической энергии)	кВт	1.5 _{-0.1}
Суммарная мощность (электроэнергия + тепло)	кВт	до 5
Напряжение сети	В	48 ±5%
Электрический КПД	%	>30
Время пуска и останова	ч	<10
Время перехода из номинальной мощности в минимальную	минут	<20
Количество генерируемой дистиллированной воды	л/ч	0.7-1.0

СБОРКА БАТАРЕЙ ТОТЭ мощностью 700 Вт



КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА МОДУЛЯ ЭУ НА ТОТЭ



Батарея ТОТЭ с поддерживающим электролитом мощностью 450-700 Вт



Испытательный стенд FuelCon Evaluator C-1000 для электрохимических испытаний



Проточный газовый анализатор Бонэр-ВТ (на базе комплектующих Siemens)

КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА МОДУЛЯ ЭУ НА ТОТЭ

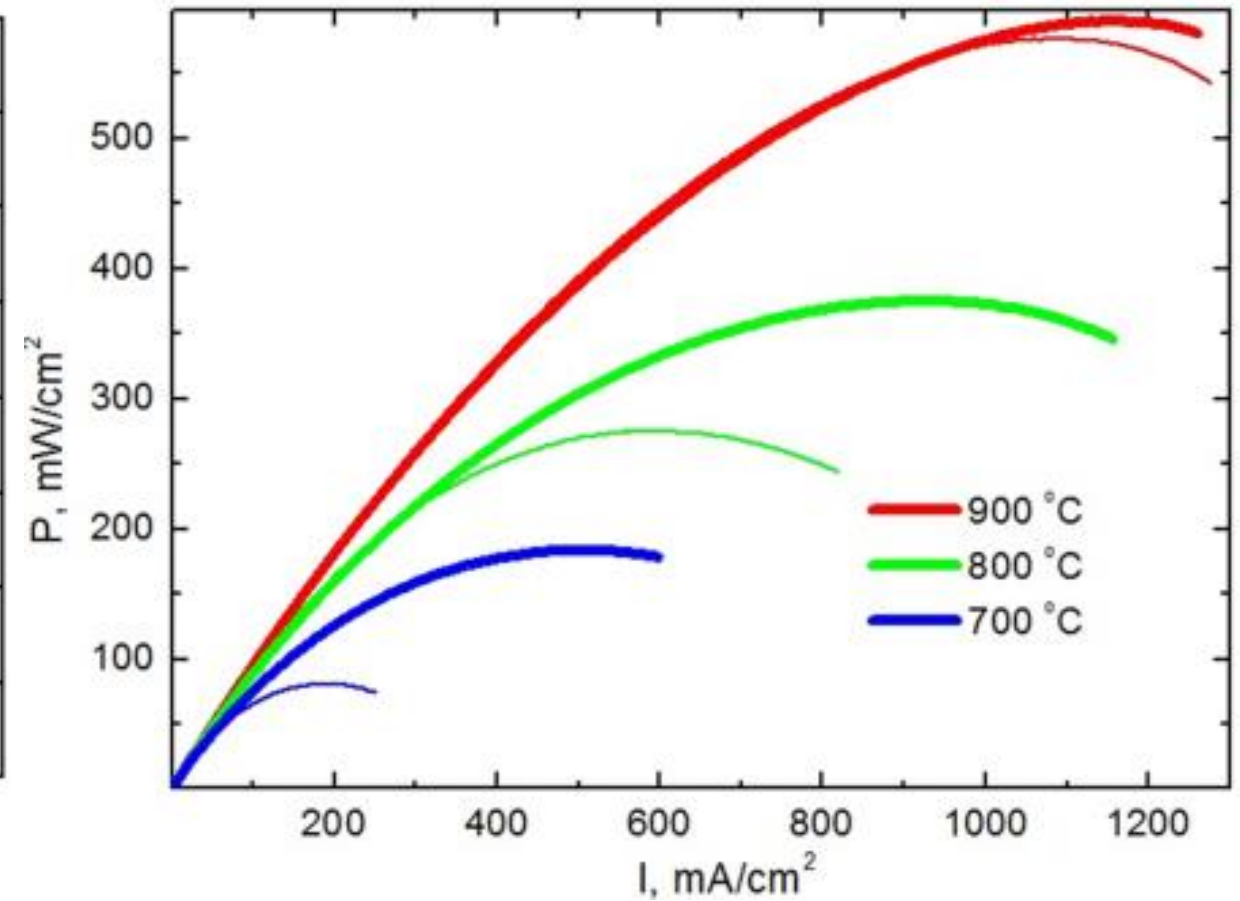
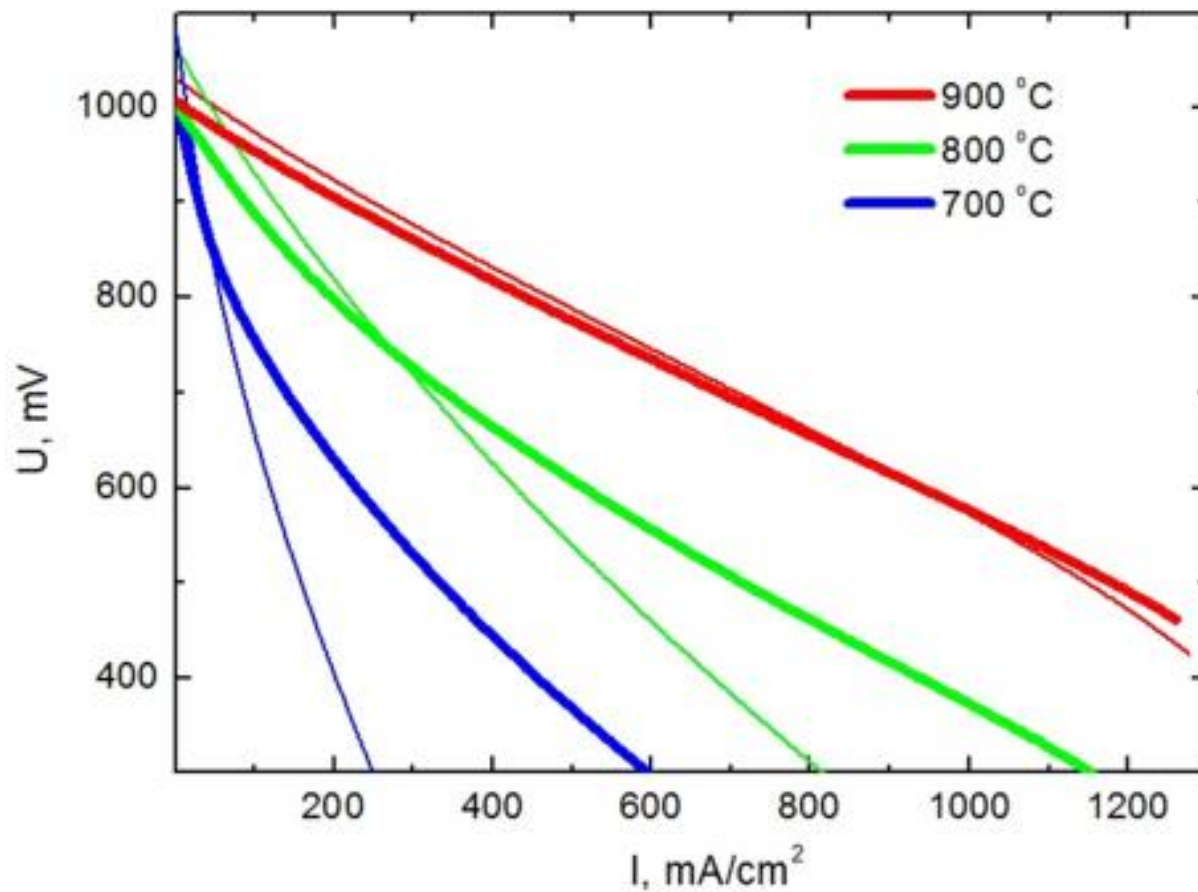


Ключевые характеристики макета модуля ЭУ на ТОТЭ





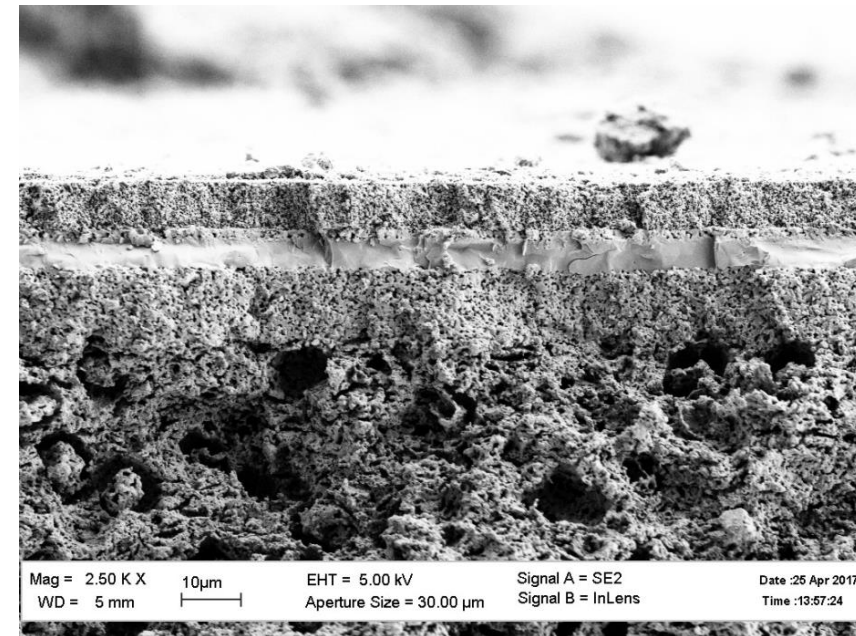
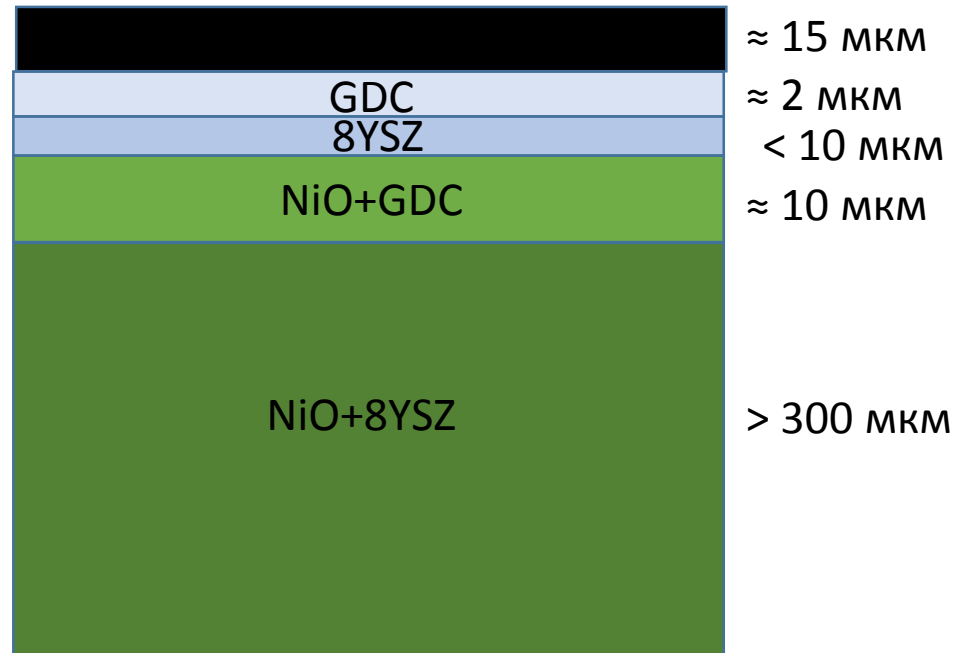
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАНАРНЫХ ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ И АНОДОМ



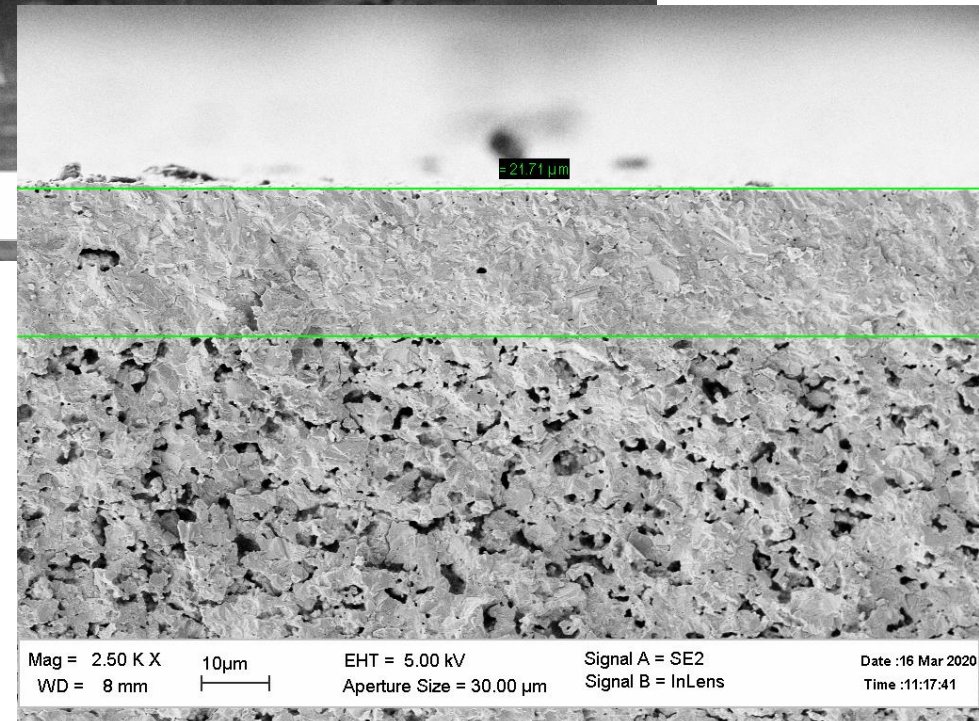
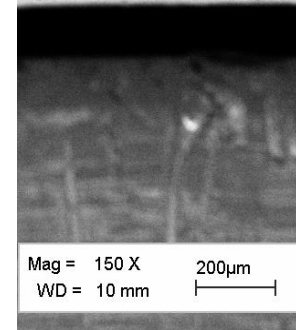
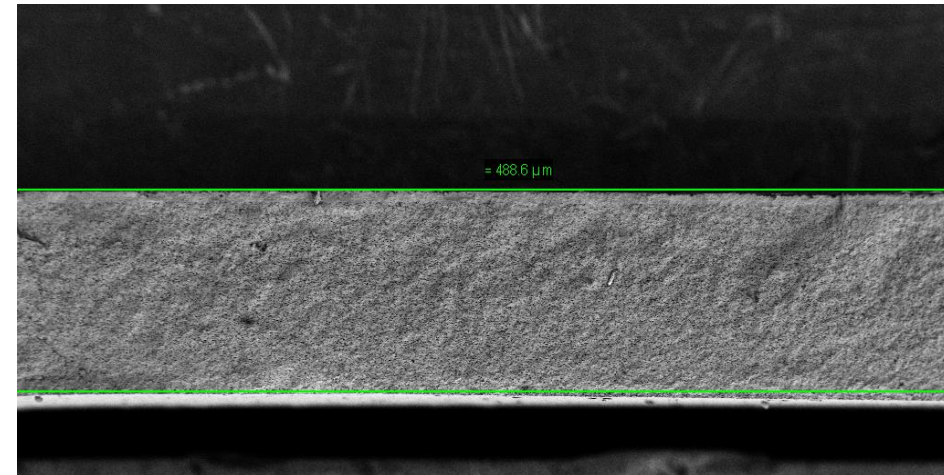
ТОТЭ с поддерживающим анодом демонстрируют существенно лучшие характеристики, чем ТОТЭ с поддерживающим электролитом, особенно в среднетемпературной области

Научно-исследовательские по разработке двухслойных несущих анодных подложек проводятся работы коллективов:

1. ИФТТ РАН
2. АО «НЭВЗ-Керамикс»
3. Институт сильноточной электроники СО РАН
4. МФТИ



РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ ПОДЛОЖКИ



РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

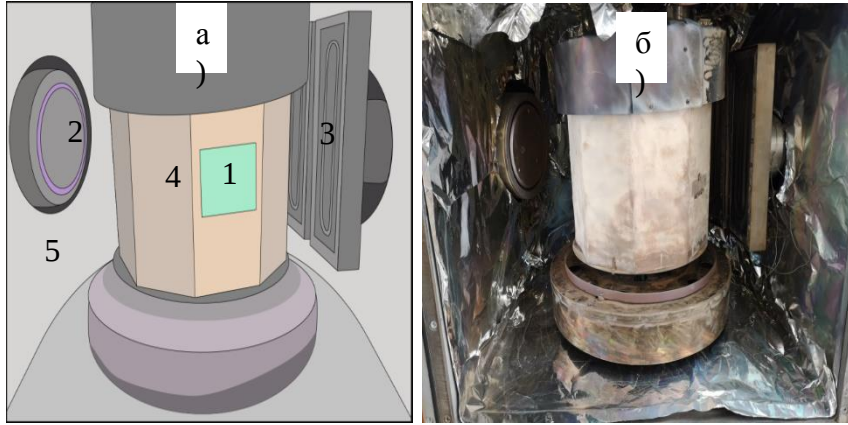
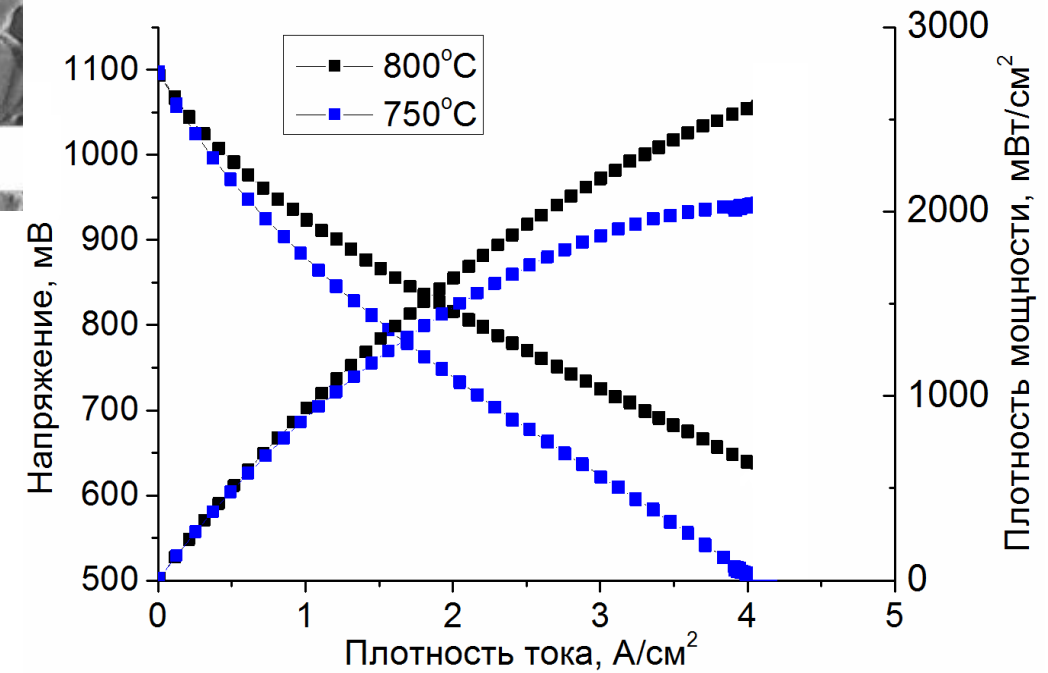
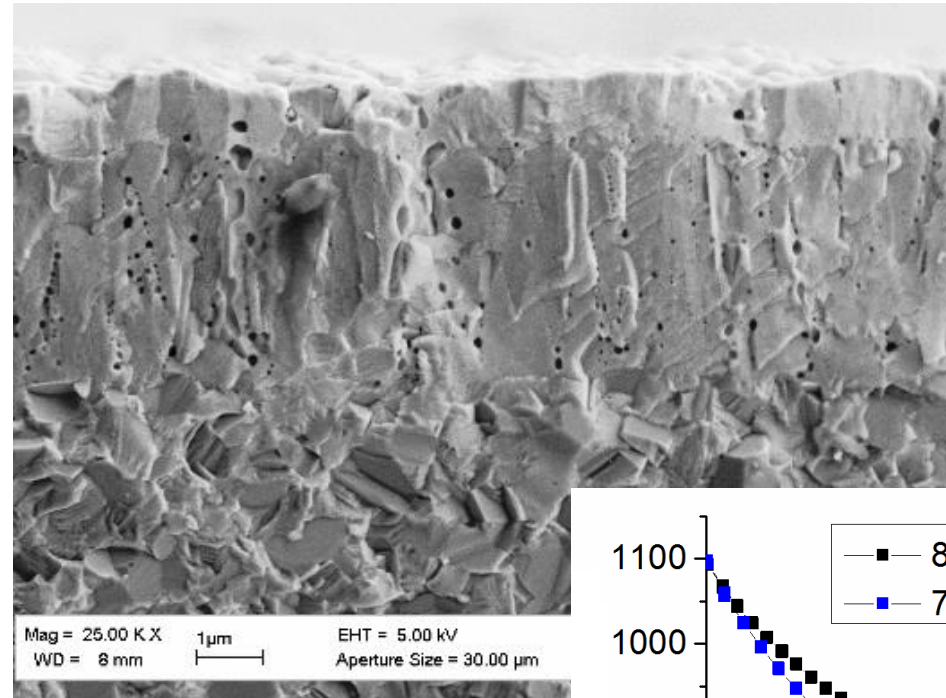
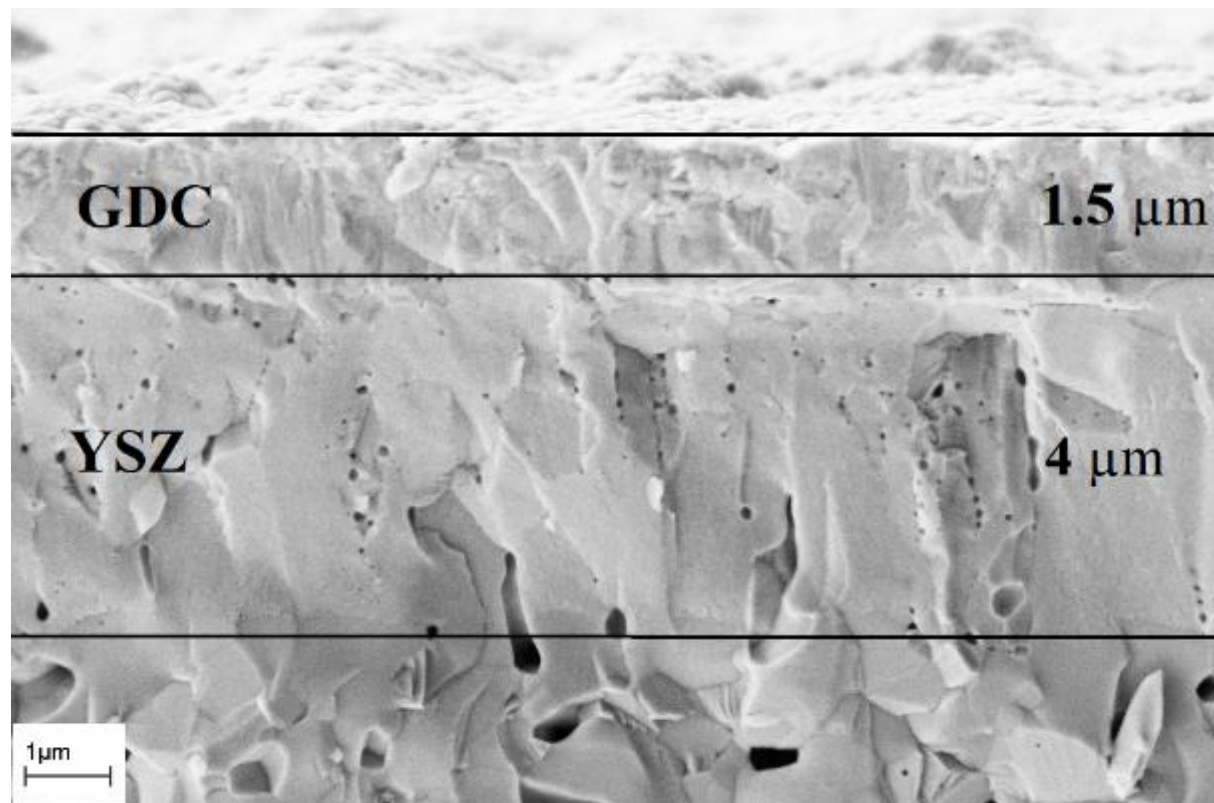
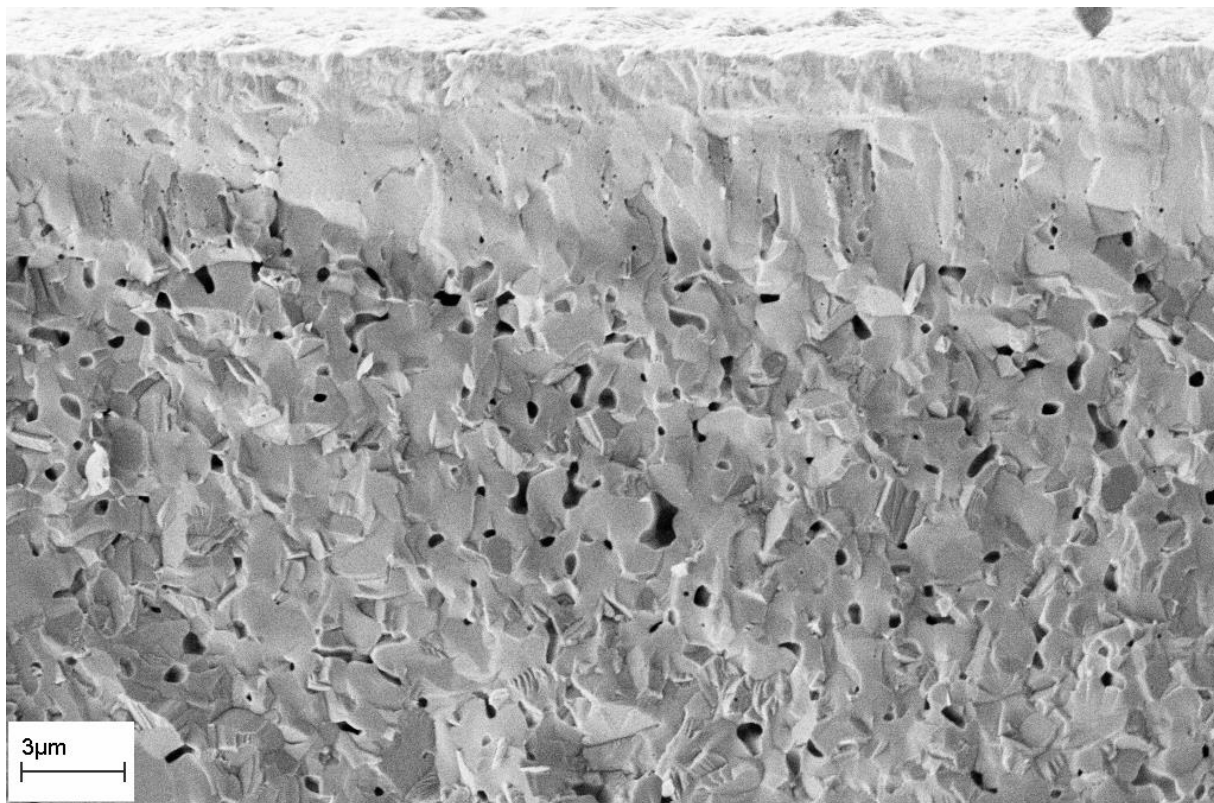
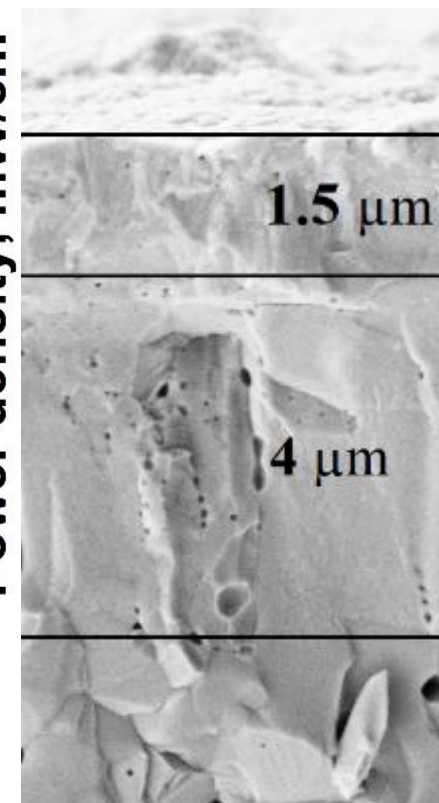
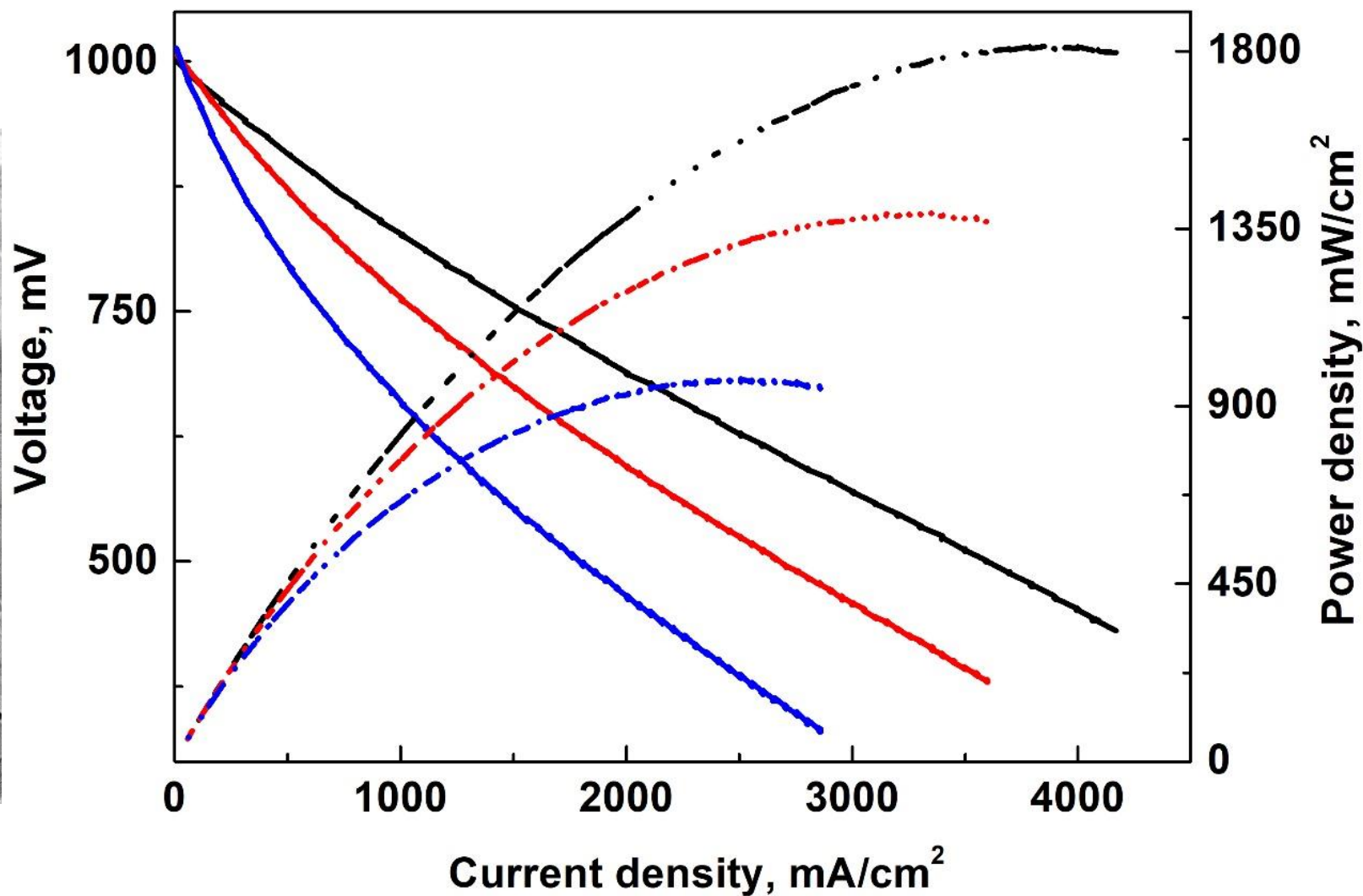
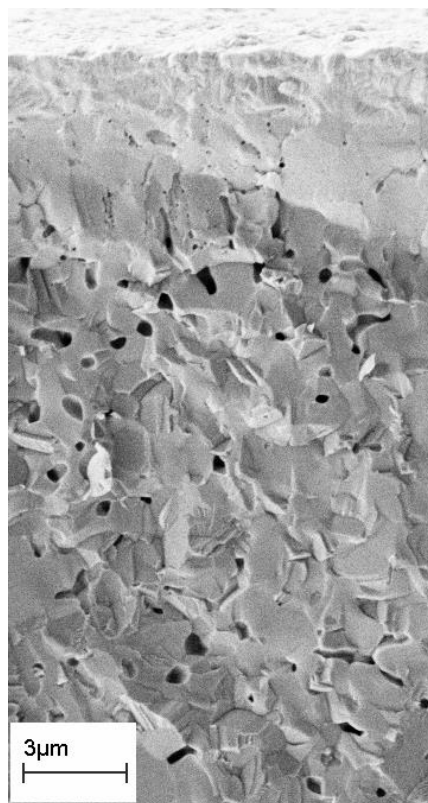


Схема (а) и фото (б) вакуумной установки для дуального магнетронного осаждения слоев 8YSZ и GDC: 1 – анодная подложка, 2 – источник ионов, 3 – дуальная MPC, 4 – вращающийся барабан, 5 – вакуумная камера

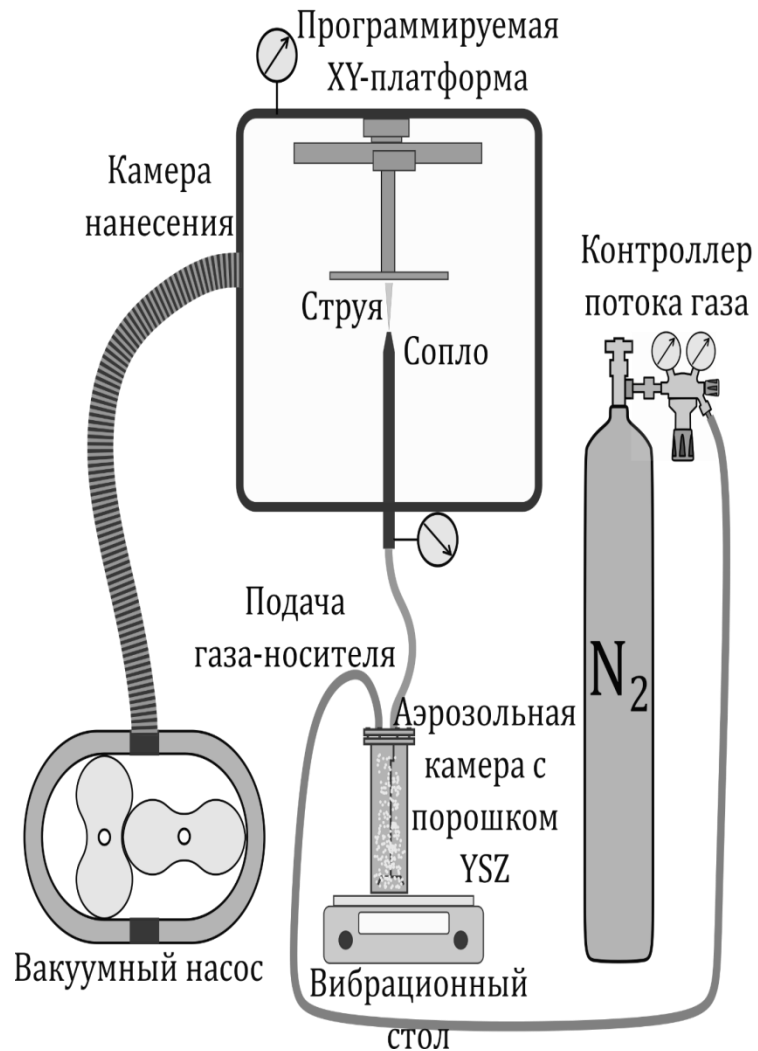


РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА





РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА



- + Толщина наносимого слоя 1-100 мкм
- + Возможность нанесения композитов
- + Высокая плотность зеленого слоя
- + Возможность получения пористых слоев
- + Комнатные температуры (возможность работы с легкоокисляемыми материалами)
- + Высокая производительность
- + Низкие температуры для полной консолидации слоев
- Высокая чувствительность к параметрам нанесения
- Высокая стоимость оборудования при масштабировании

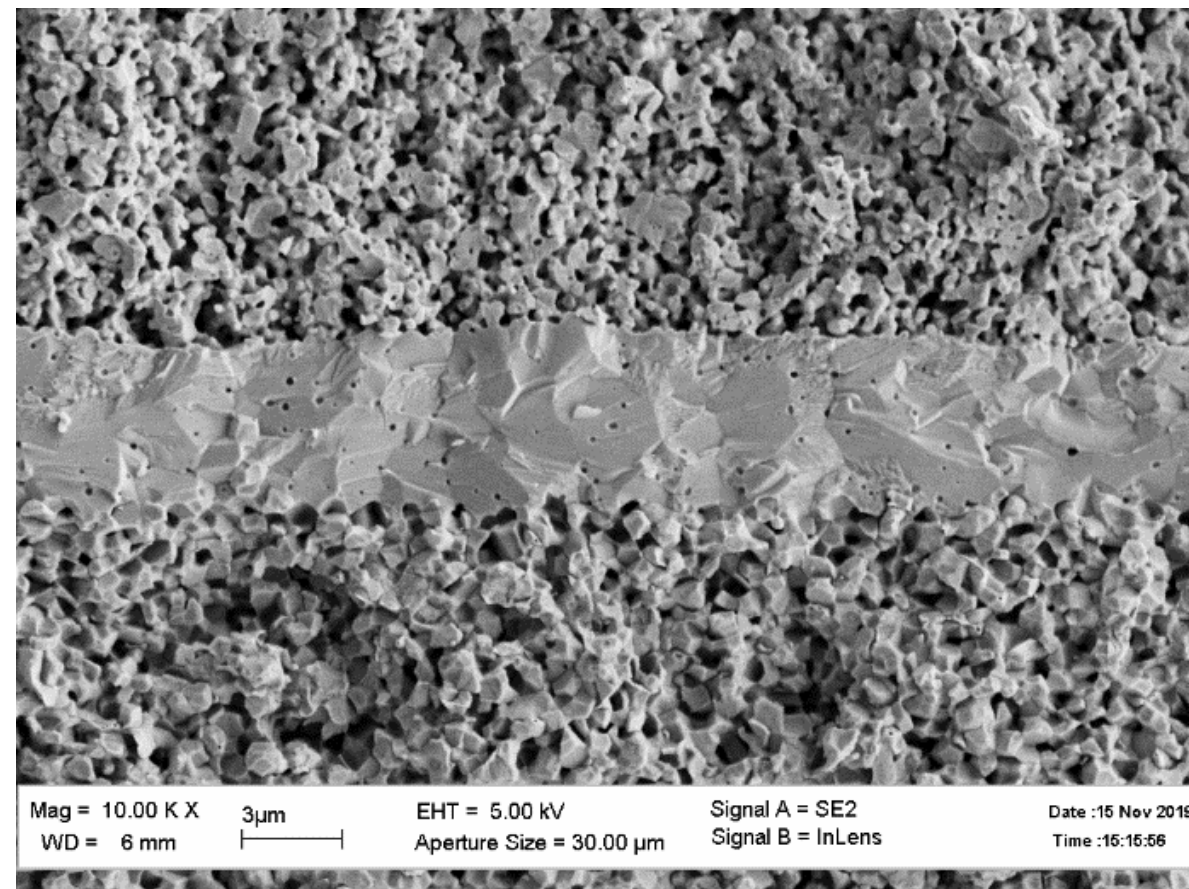
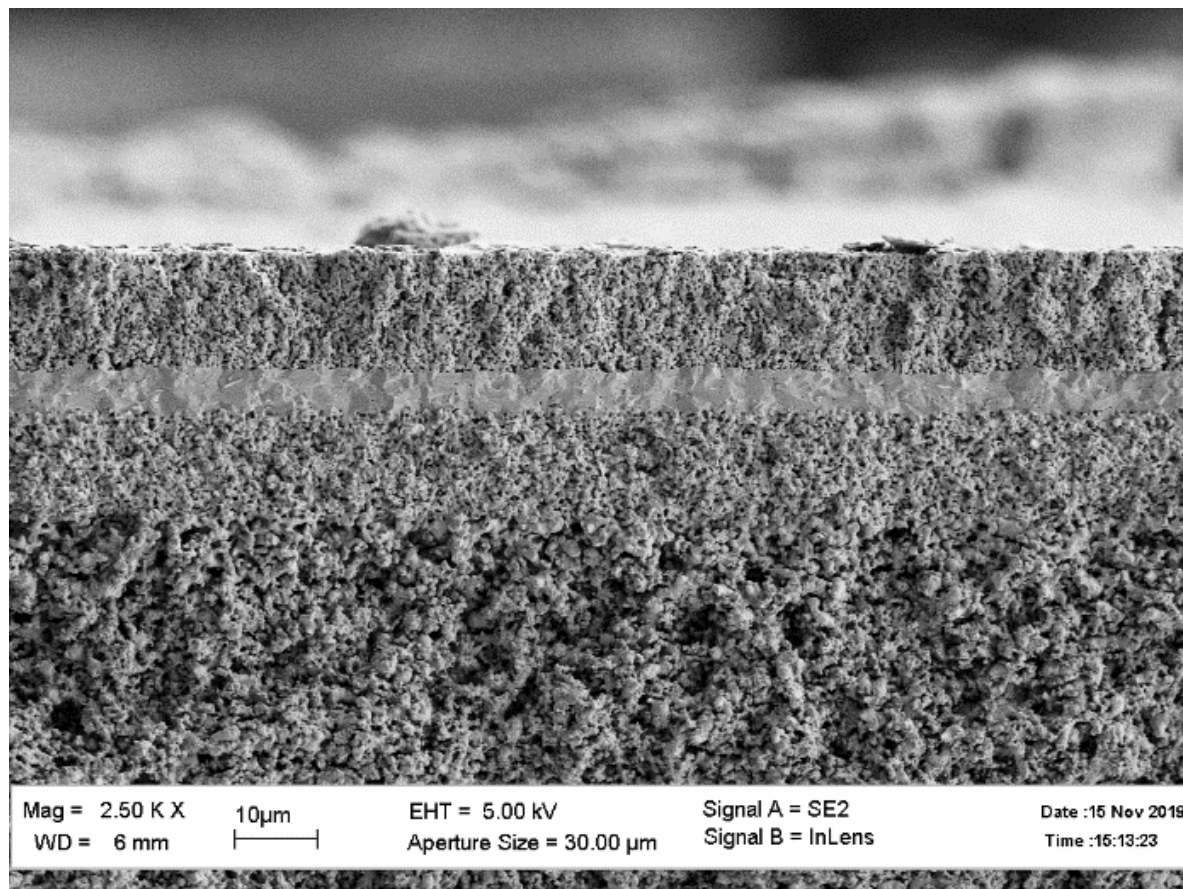
РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

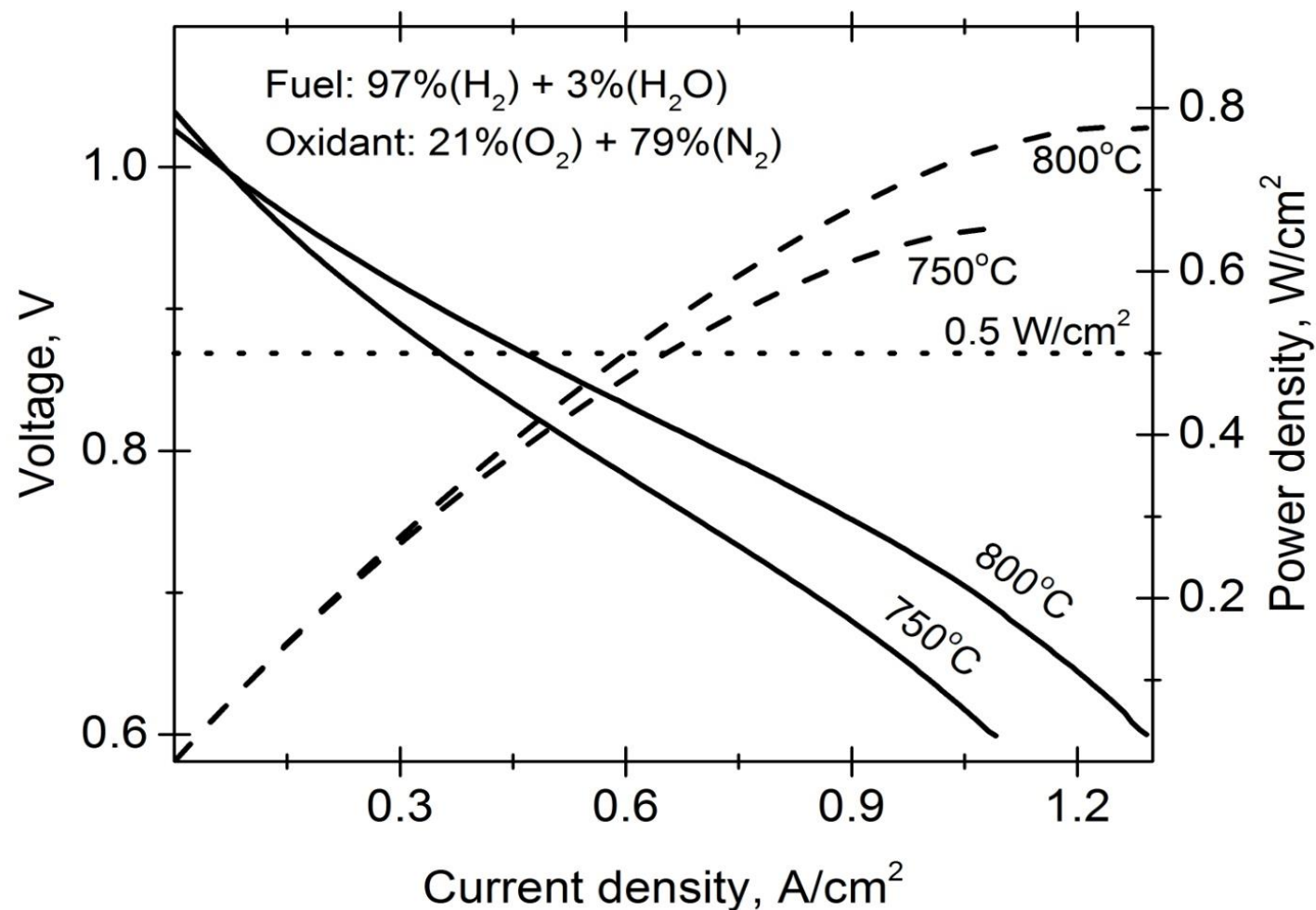


ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР – ЗАО «ИЦ «Бирюч» (группа компаний «ЭФКО»)

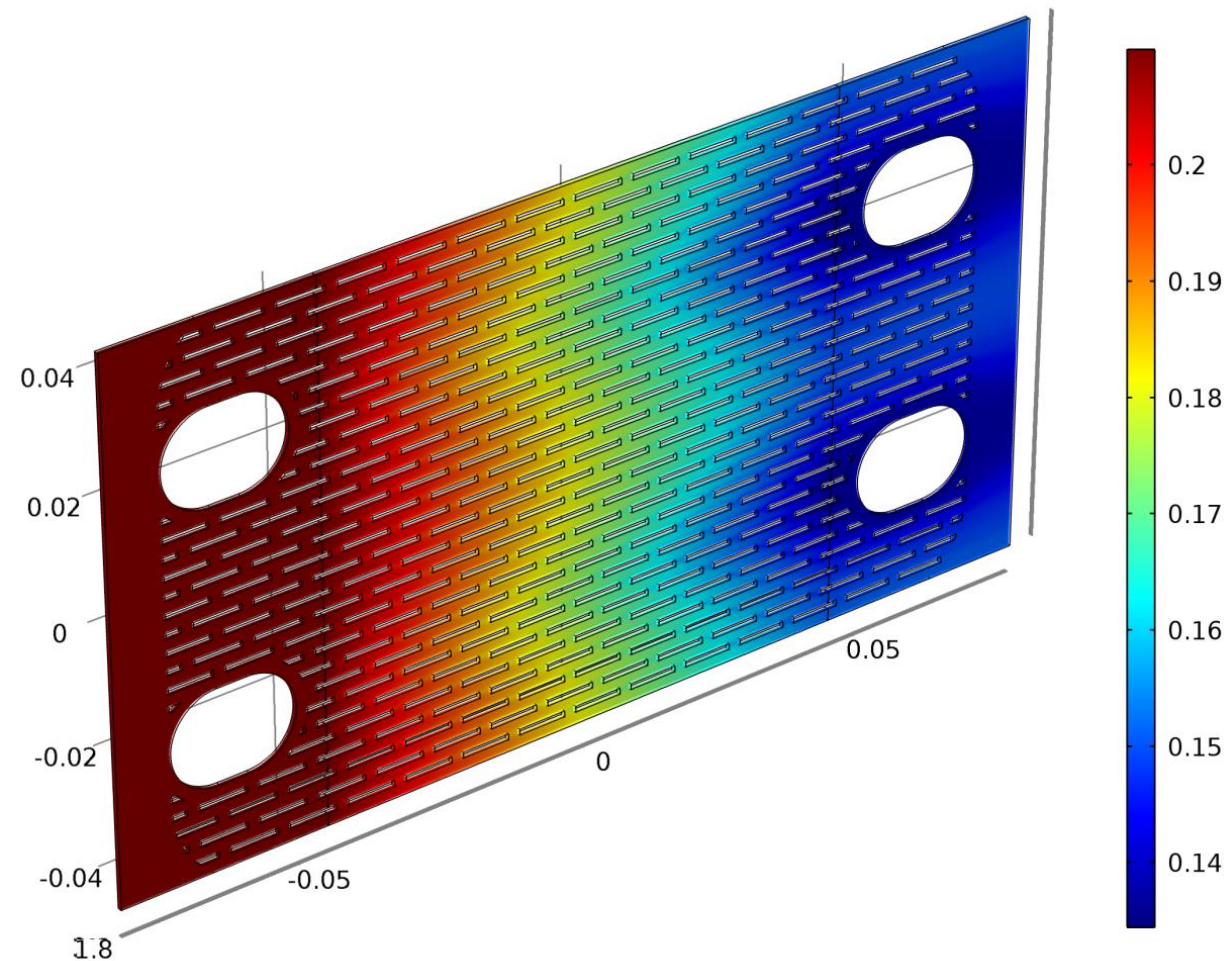


РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

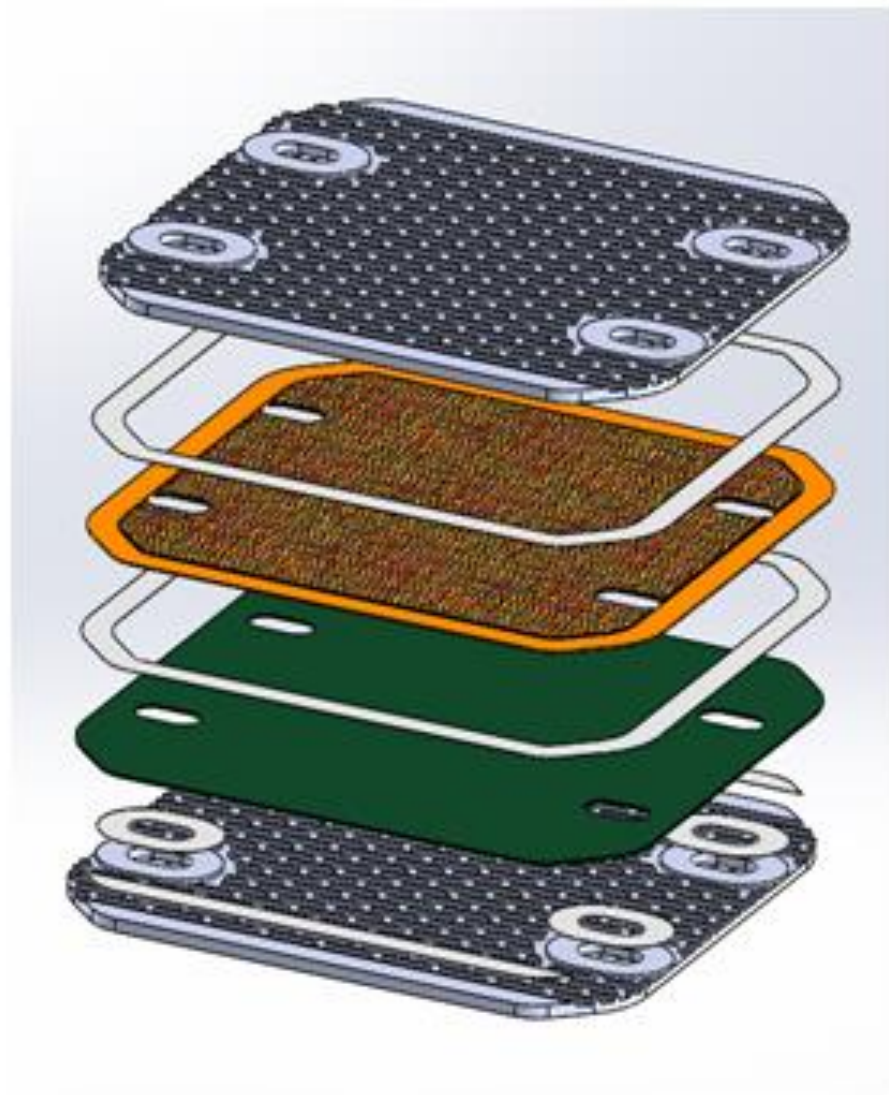
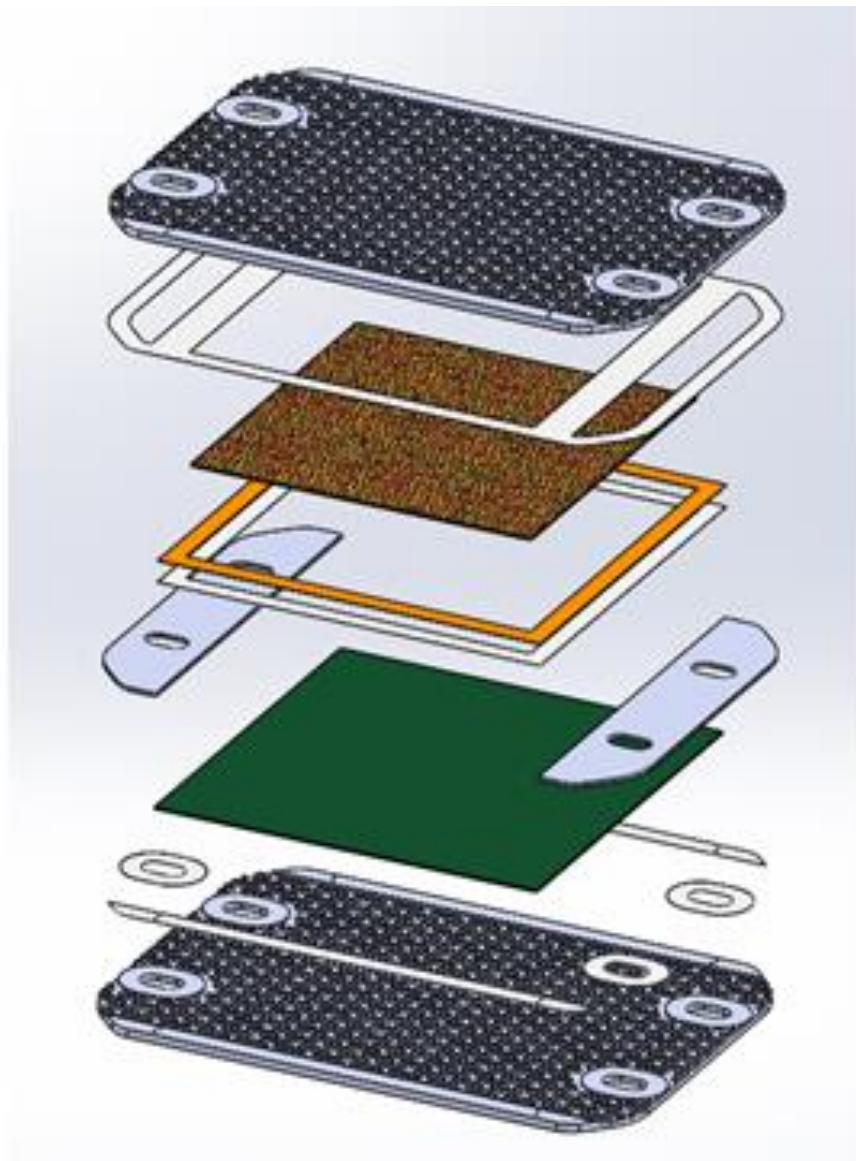


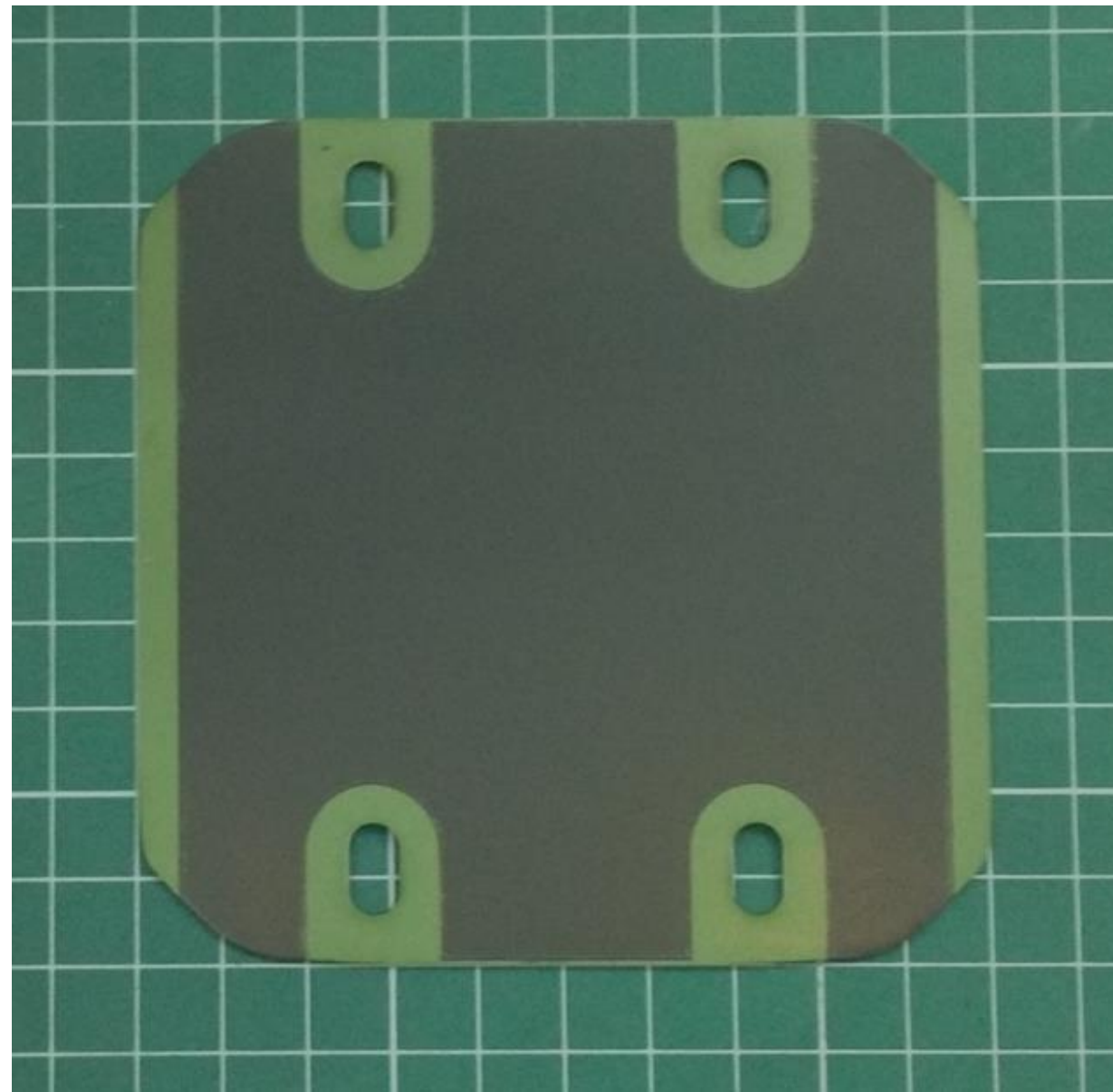


Вольт-амперные и мощностные характеристики ТОТЭ анод-поддерживающей конструкции с тонкопленочным электролитом и защитным GDC подслоем, изготовленными методом холодного аэрозольного осаждения в вакууме, и LSC катодом, изготовленными методом трафаретной печати, полученные при 750 и 800 °С.

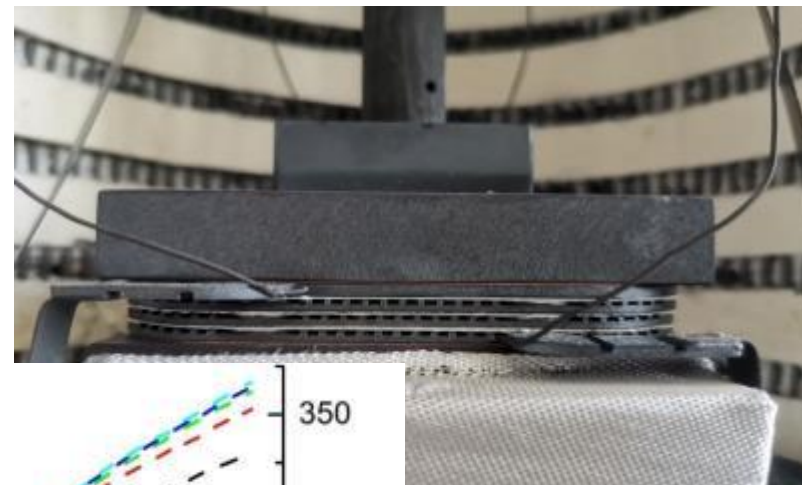
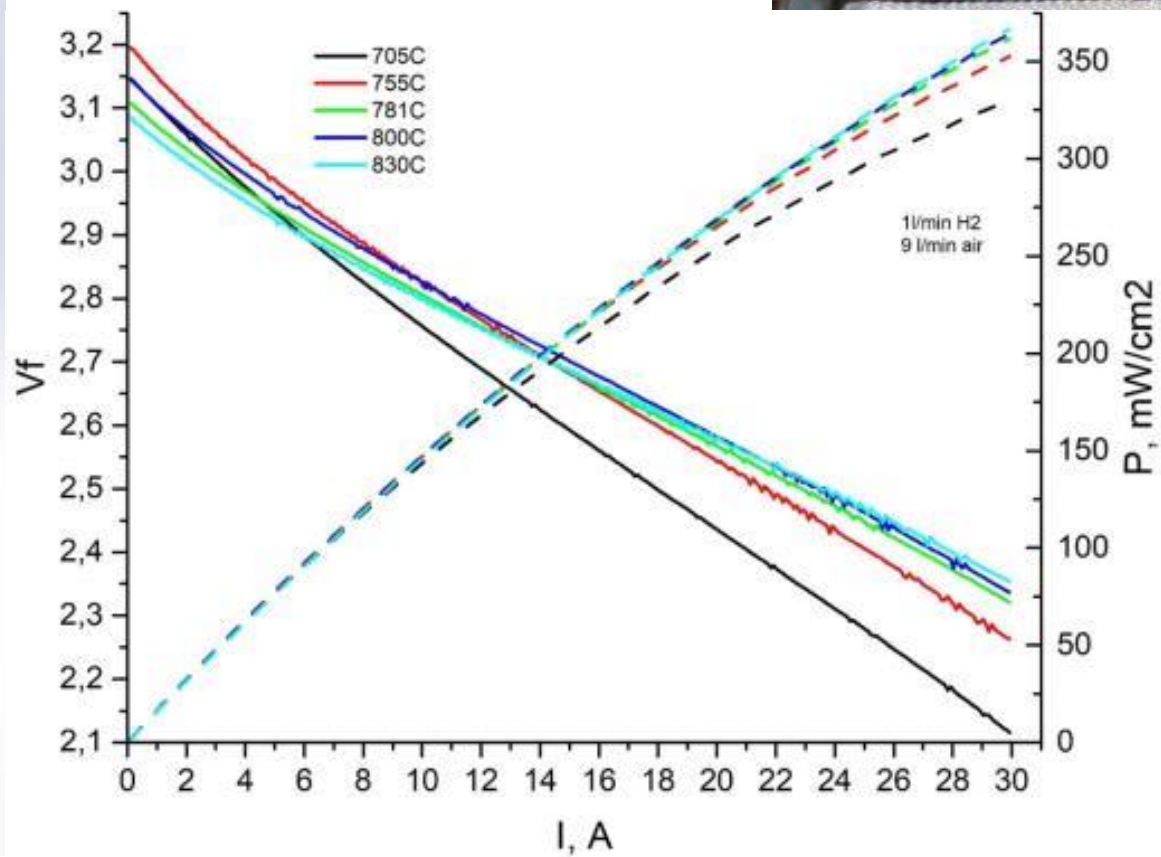
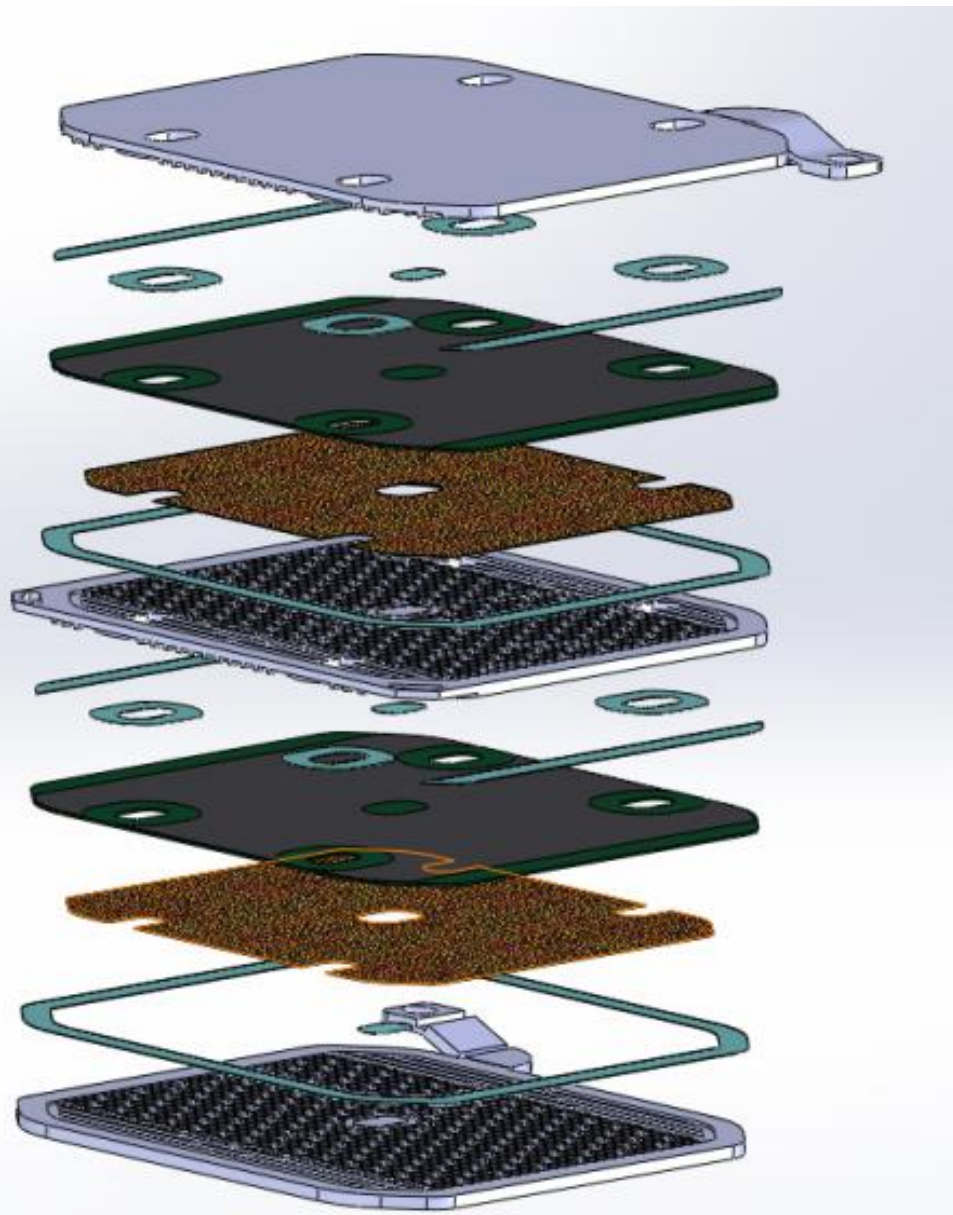


Доля кислорода в воздушной смеси со стороны катодного токосъема (поток 2 нл/мин на МЭБ)





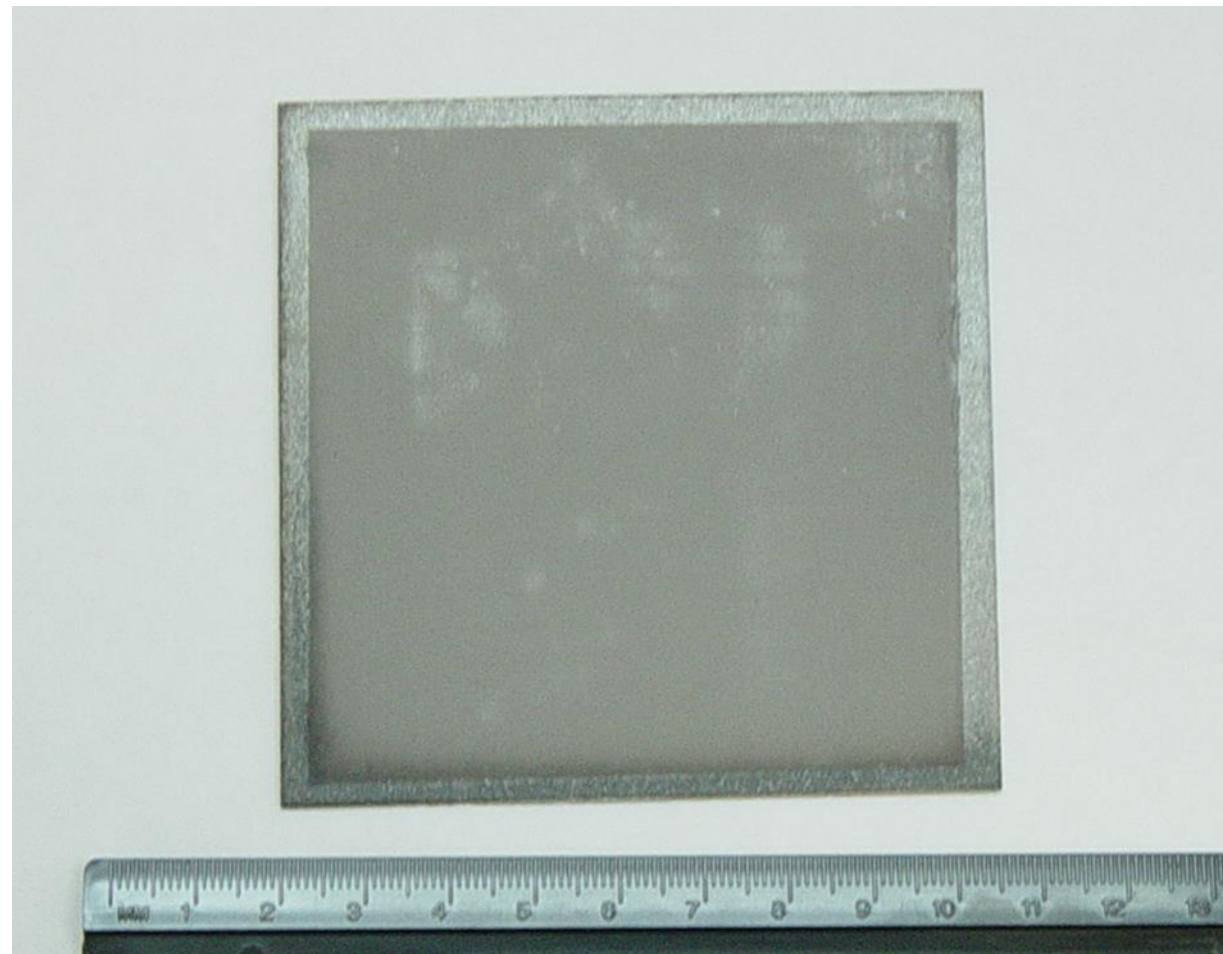
БАТАРЕИ ТОТЭ НА НЕСУЩЕМ АНОДЕ С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ



ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР – ЗАО «ИЦ «Бирюч» (группа компаний «ЭФКО»)

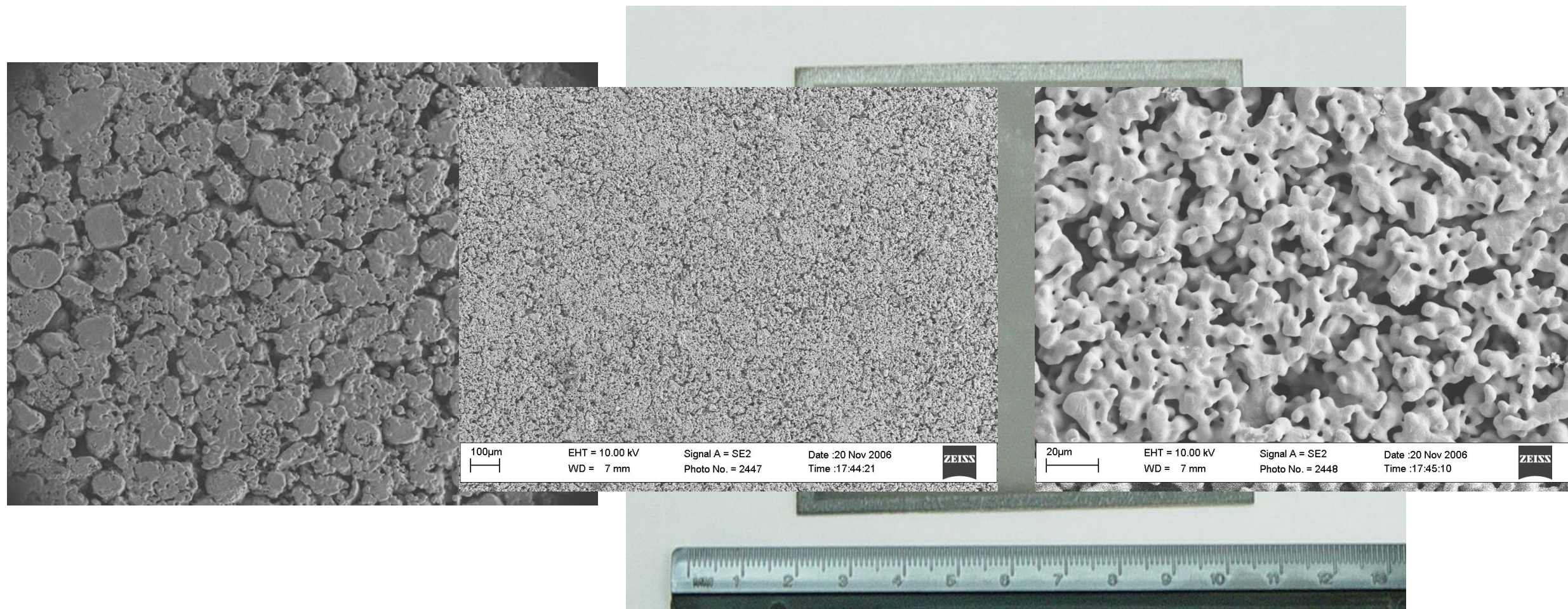






АО «Полемо» (г. Тула)

Выксунский металлургический завод (г. Выкса, Нижегородская обл.)



АО «Полемо» (г. Тула)

Выксунский металлургический завод (г. Выкса, Нижегородская обл.)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ

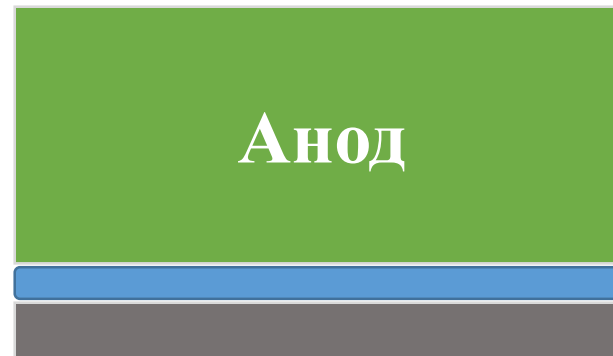
Электролит-
поддерживающая
конструкция



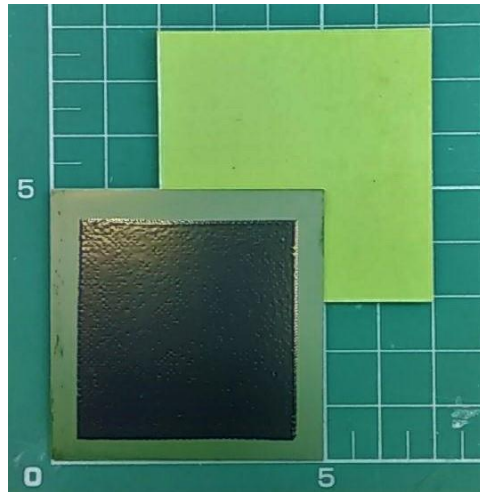
Толщина: 150 – 250 мкм



Анод-поддерживающая
конструкция



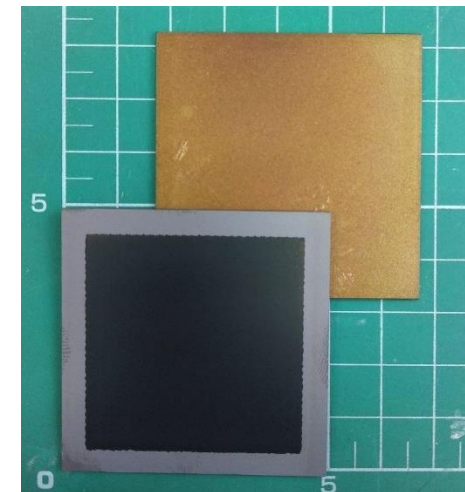
Толщина: 300 – 1000 мкм



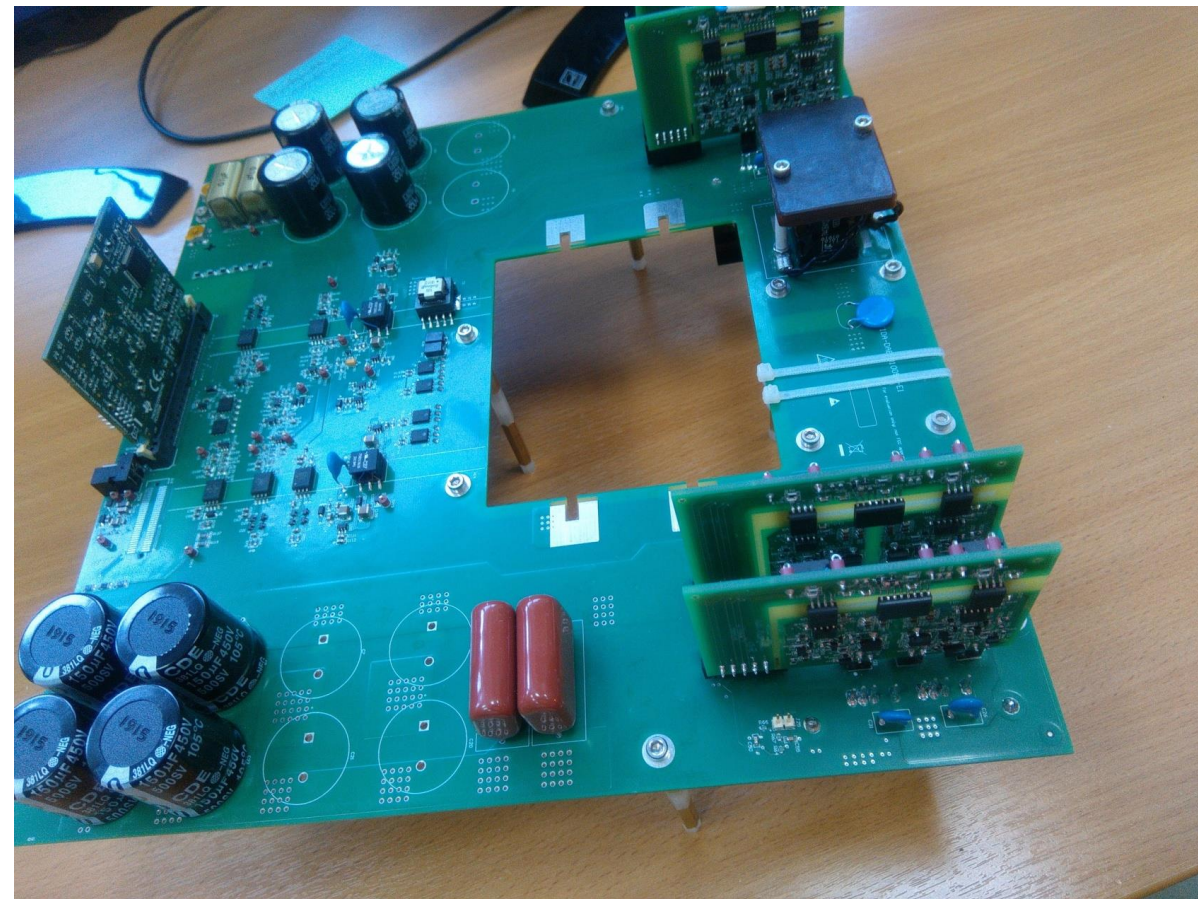
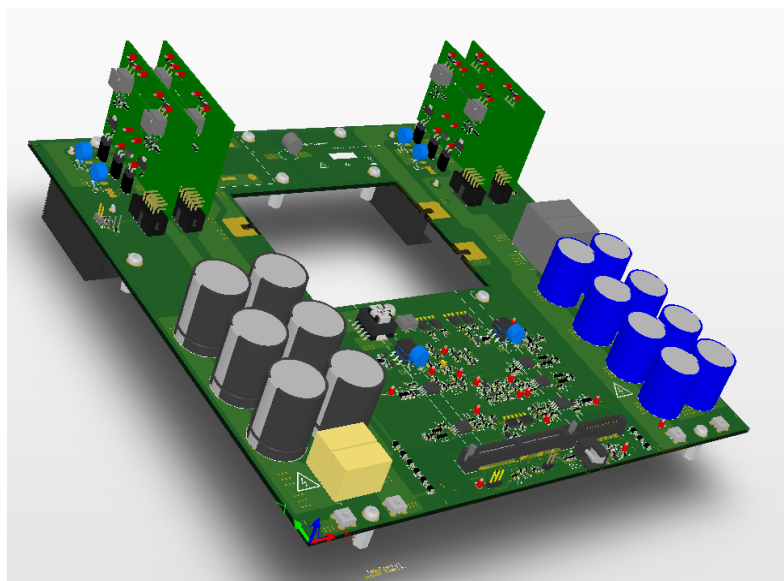
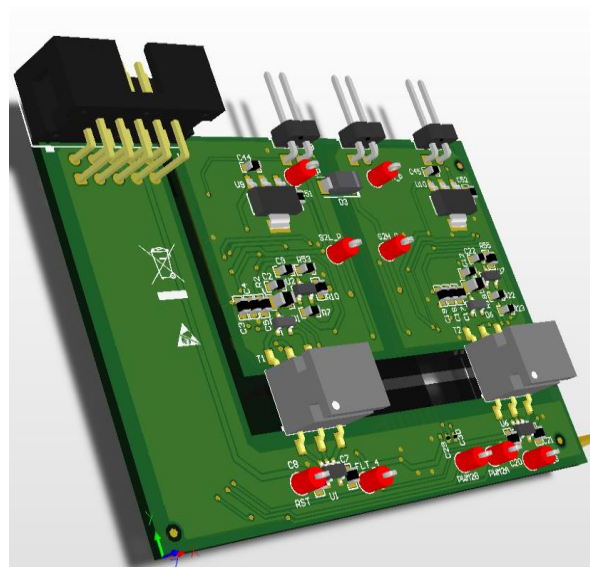
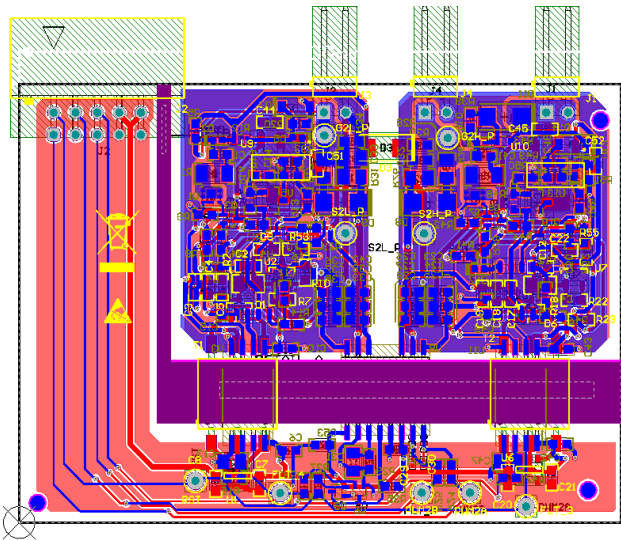
Металл-поддерживающая
конструкция

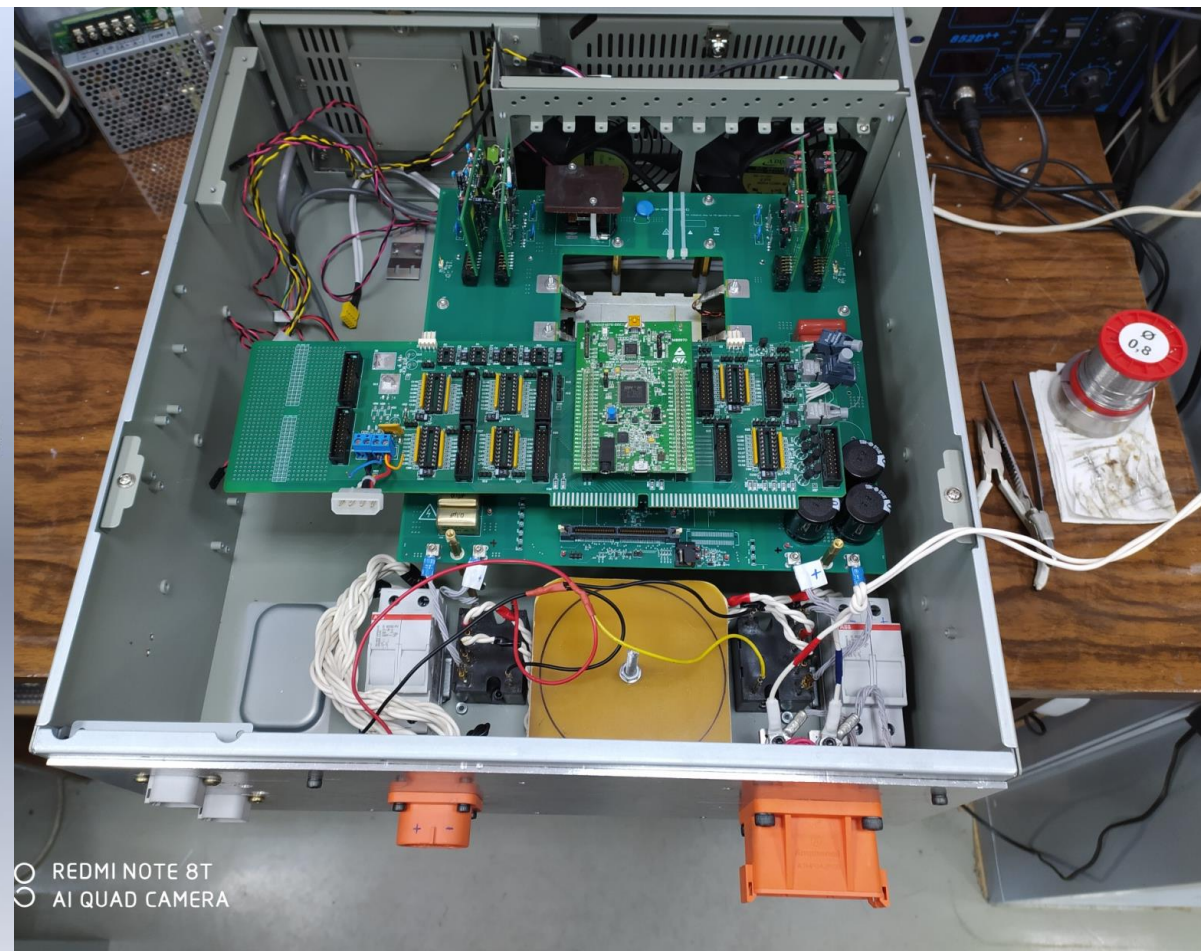
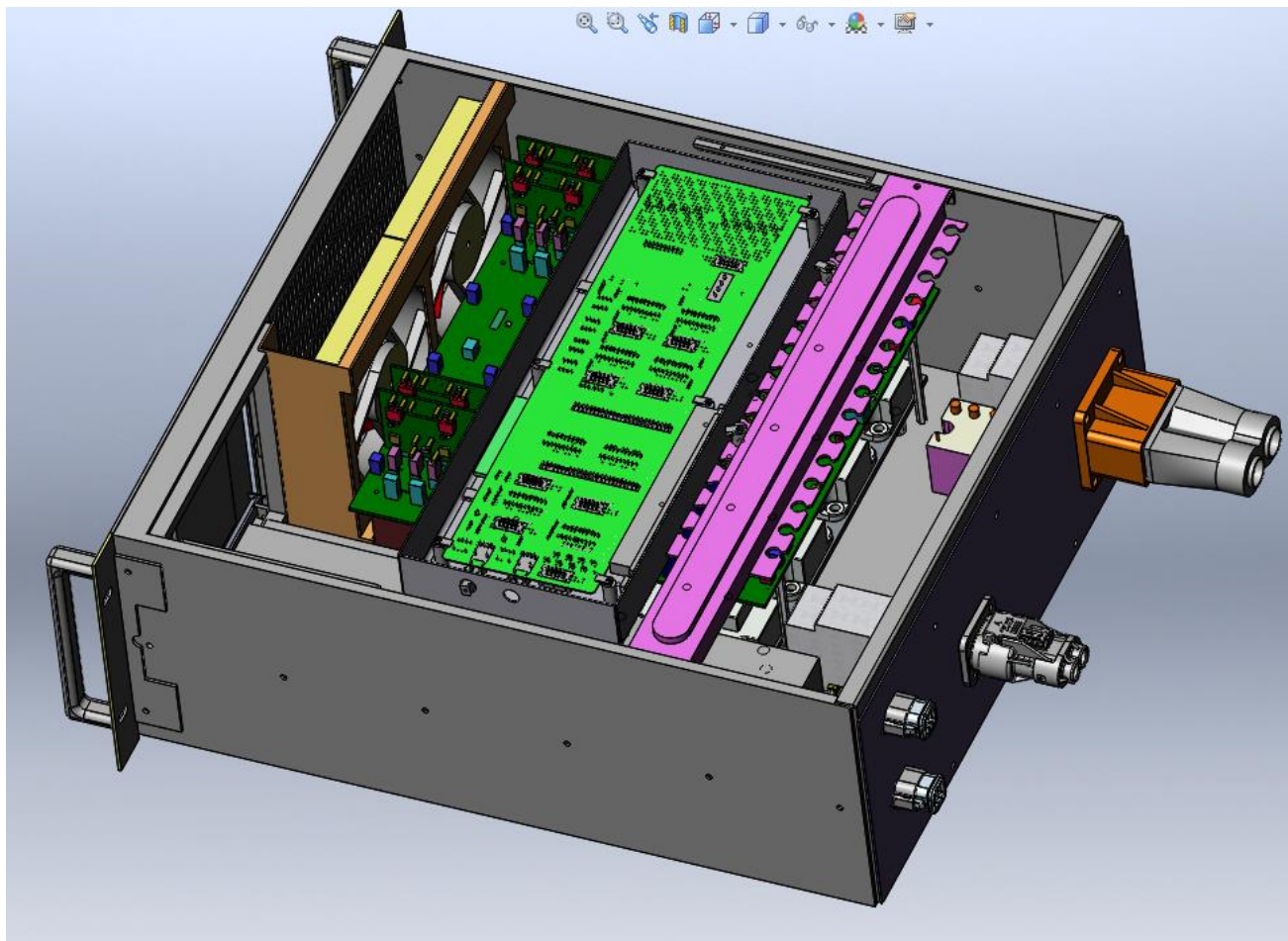


Толщина: 500 – 2000 мкм



РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

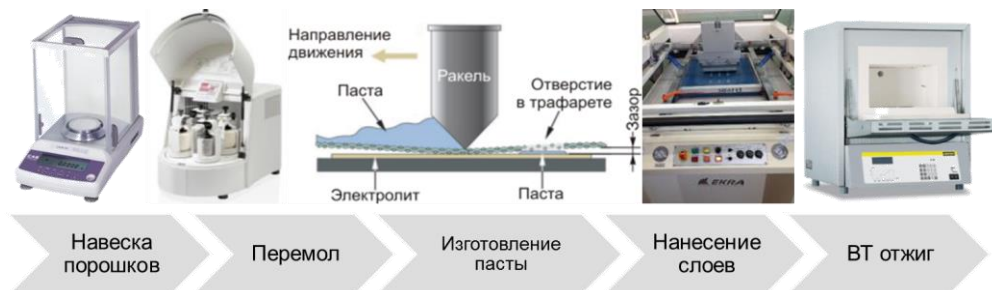




ЗАДЕЛ В ОБЛАСТЬ ЕДИНИЧНЫХ ТОТЭ

Уровень единичных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ):

Технологический путь изготовления МЭБ:



Мембраны анионного проводника:



МЭБы:

Ni
Ni/10Sc1CeSZ=60/40
Ni/GDC=50/50
GDC
6ScSZ
10Sc1YSZ
6ScSZ
GDC
LSM/GDC=40/60
LSM



Научно-технологический задел:

- определены оптимальные **составы ионных проводников** для изготовления мембраны анионного проводника;
- разработана и запатентована **трехслойная конструкция мембран** анионного проводника, позволяющая получать гибкие механически прочные мембраны с высокой анионной проводимостью;
- разработана **конструкция многослойных электродов** с градиентным составом и микроструктурой: трехслойный катод и четырехслойный анод;
- оптимизирован **температурный режим** формирования многослойных электродов за один высокотемпературный отжиг.

Результат: ТОТЭ размером 100x100 мм, мощность 20-25 Вт

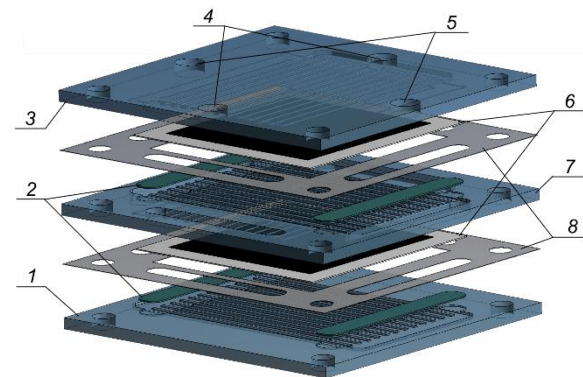
Направления дальнейшего развития:

- увеличение размера мембраны до 120x120 мм и далее: при незначительном увеличении размера квадратично растет площадь;
- дальнейшая оптимизация состава и микроструктуры многослойных электродов и режима высокотемпературной обработки;
- оптимизация ресурсных характеристик.

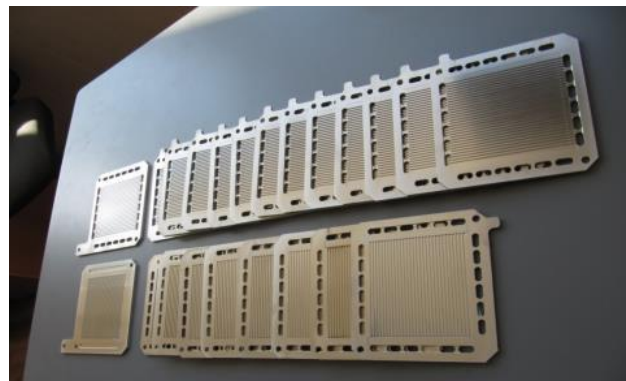
ЗАДЕЛ В ОБЛАСТИ БАТАРЕЙ ТОТЭ

Уровень батарей ТОТЭ

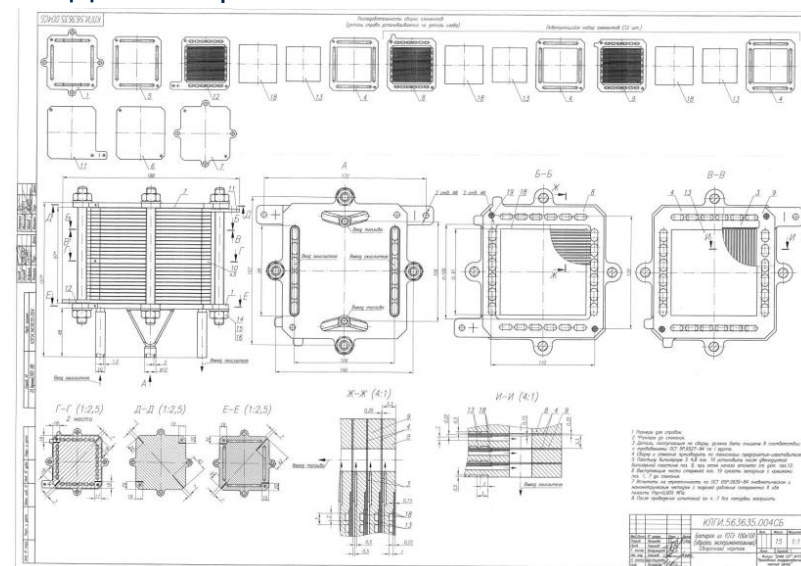
Конструкция батареи:



Биполярные токовые коллекторы с защитным покрытием:



ЭКД на батарею ТОТЭ:



Батарея ТОТЭ:



Научно-технологический задел:

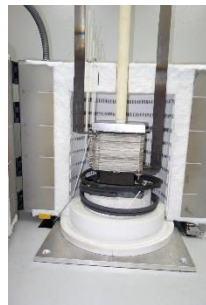
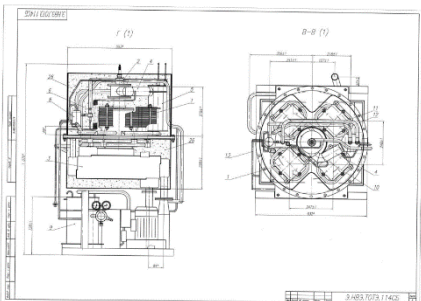
- проведено компьютерное моделирование полей распределения газовых потоков, температур и токов;
- разработана и запатентована конструкция биполярных и концевых токовых коллекторов;
- разработана эскизная конструкторская документация на батарею;
- отработана технология нанесения проводящих защитных покрытий;
- проведены ресурсные испытания проводящих защитных покрытий;
- собраны и испытаны 6 батарей мощностью 500-600 Вт.
- проведены исследования с целью разработки отечественных герметизирующих стекол.

Результат: батарея ТОТЭ мощностью 500-600 Вт

Направления дальнейшего развития:

- дальнейшая оптимизация конструкции по результатам компьютерного моделирования;
- переход от фрезерования к электроэрозионной обработке с целью снижения времени и стоимости обработки;
- оптимизация ресурсных характеристик батарей;
- разработка отечественного герметика;
- переход на отечественные ферритные нержавеющие стали;
- снижение толщины коллекторов для оптимизации массы батарей.

Уровень энергетической установки (ЭУ)



Экспериментальные образцы энергетических установок (ЭУ) киловаттного класса:



Научно-технологический задел

Совместно с КГНЦ (ЦНИИ СЭТ):

- разработана ЭКД на экспериментальный образец энергетической установки мощностью 2 кВт;
- батарей, вошедшие в состав ЭУ прошли испытания в автоматизированном стенде;
- собран и испытан экспериментальный образец ЭУ мощностью 2 кВт, работающий на природном газе.

По заказу МФТИ совместно с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»:

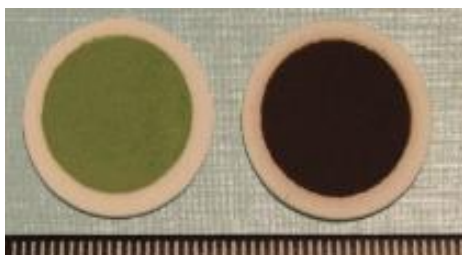
- разработана ЭКД на экспериментальный образец энергетической установки мощностью около 3 кВт;
- собран и испытан экспериментальный образец ЭУ контейнерного исполнения, работающий на природном газе.

Результат: экспериментальный образец ЭУ (2 кВт)

Направления дальнейшего развития:

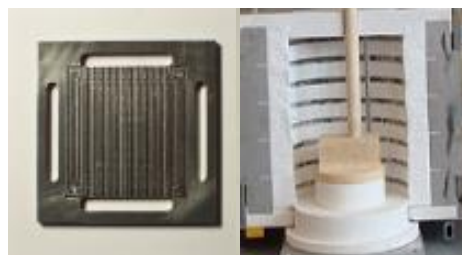
- оптимизация компоновки энергетической установки;
- разработка ЭКД и рабочей конструкторской документации (РКД);
- разработка и изготовление отечественного риформера углеводородных видов топлива (совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров);
- разработка АСУ и системы выдачи мощности;
- изготовления экспериментальных и опытных образцов ЭУ.

НАУЧНЫЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЗАДЕЛ В ОБЛАСТИ ТОТЭ



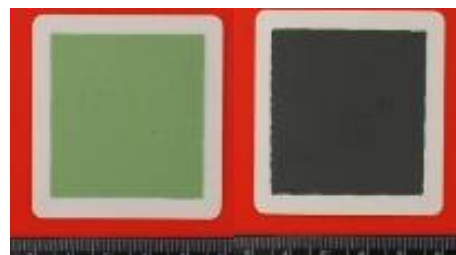
2003-2008

- Первый button cell
- Создан первый стенд для ТОТЭ
- Поиск новых электродных материалов



2012

- Стенд для МЭБ 50x50 мм
- Первые биполярные пластины



2014

- Электродные клеи
- Испытательный стенд до 100 Вт
- МЭБ 50x50 мм на эл-те 150 мкм



2016-2018

- Создана батарея 500 Вт
- Испытания сборок на углеводородном топливе
- Экспериментальный образец мощностью 2 кВт



- Технология защитных покрытий
- Ресурсные испытания 25 тыс. ч без деградации

2009-2011



- Группа компьютерного моделирования
- МЭБ 50x50 мм на электролите 250 мкм

2013



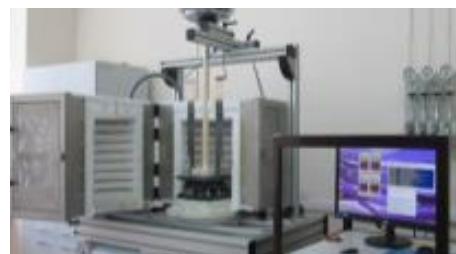
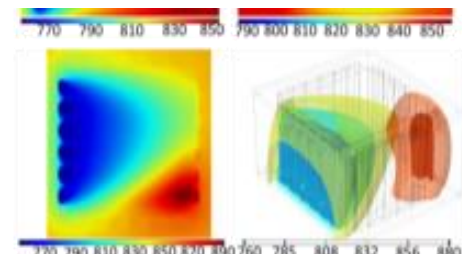
- Создана батарея 50 Вт
- Испытательный стенд до 500 Вт
- МЭБ 100x100 мм

2015



- Доработка энергоустановки
- Разработка отраслевых решений
- Мелкосерийное производство

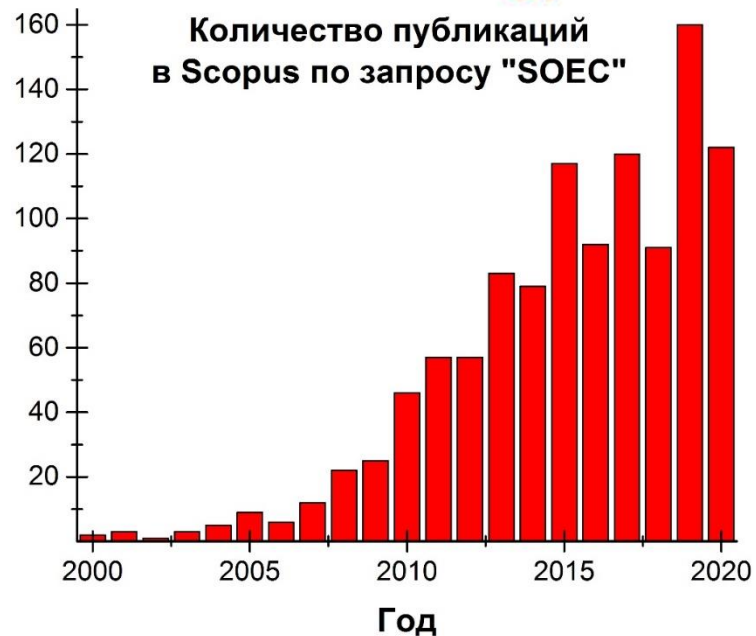
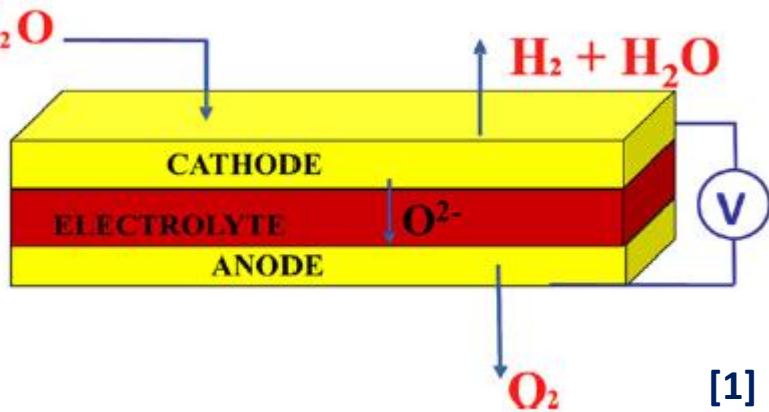
2019-2021 и далее



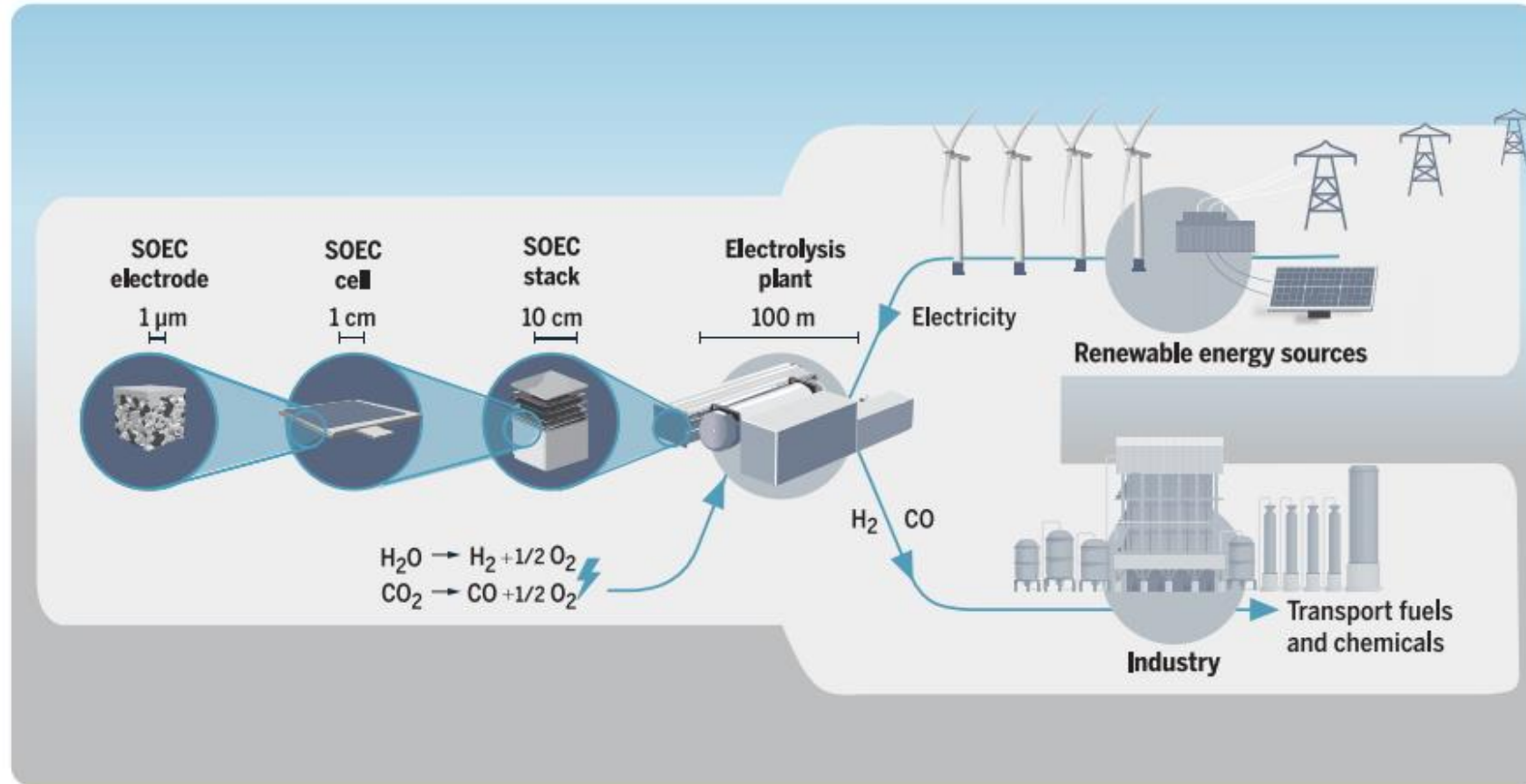
За 17 лет пройден путь от поисковых исследований до эксперимент. образцов киловаттного класса

ТВЕРДОКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

Принцип работы ТОЭЭ в режиме производства водорода – ТОЭЭ, SOEC



Принцип применения электролизера на базе ТОЭЭ для производства водорода (H_2) и монооксида углерода (CO) для различных промышленных применений из электроэнергии [2]:



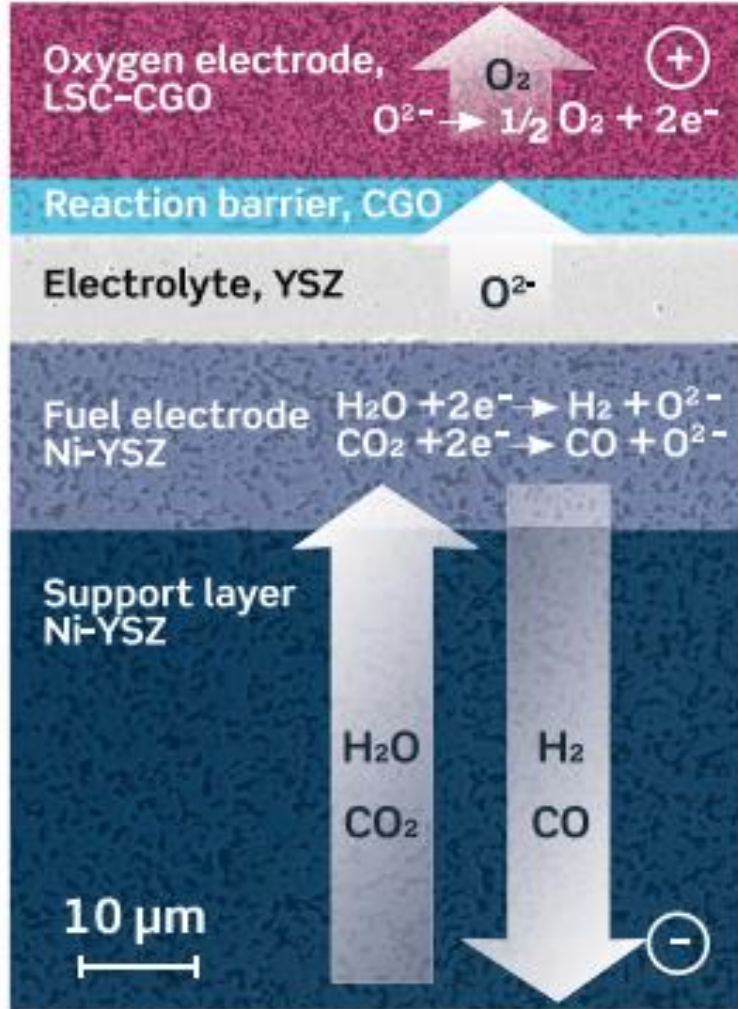
1. M.A. Laguna-Bercero, Journal of Power Sources 203 (2012) 4– 16

2. A. Hauch et al., Science 370, eaba6118 (2020)

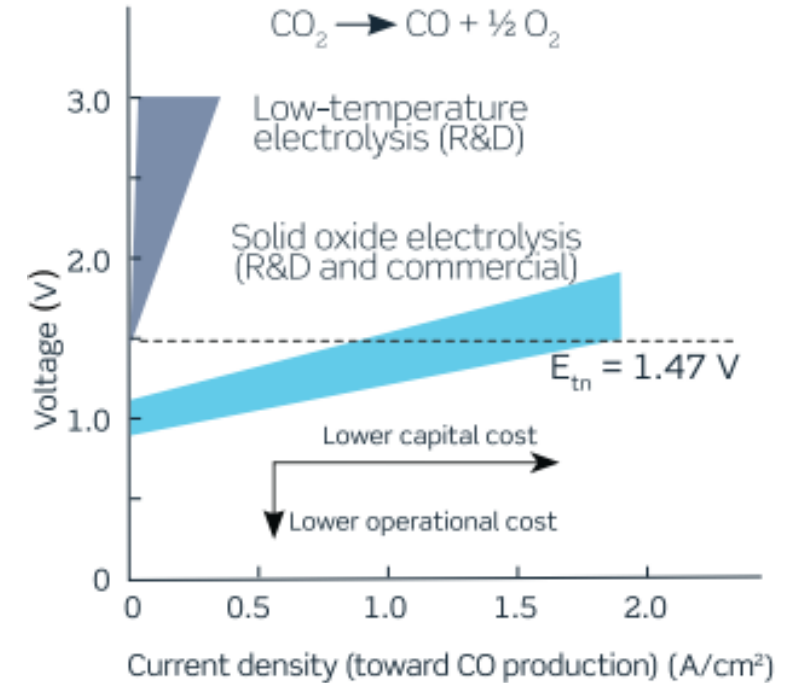
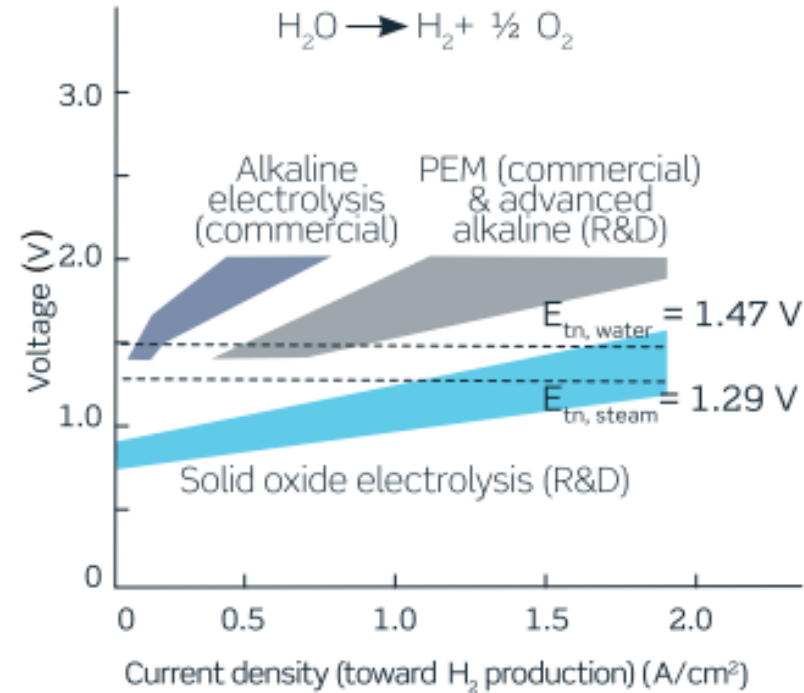


ТВЕРДООКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

Конструкция ТОЭЭ на традиционных материалах и протекающие процессы



Сравнение эффективности по пр-ву H_2 и CO для различных электролизных технологий: щелочные (alkaline), полимерные (PEM) и твердооксидные (SOEC)



Таким образом, в настоящий момент технология производства водорода на базе твердооксидных электролизных элементов является наиболее энергетически эффективной.

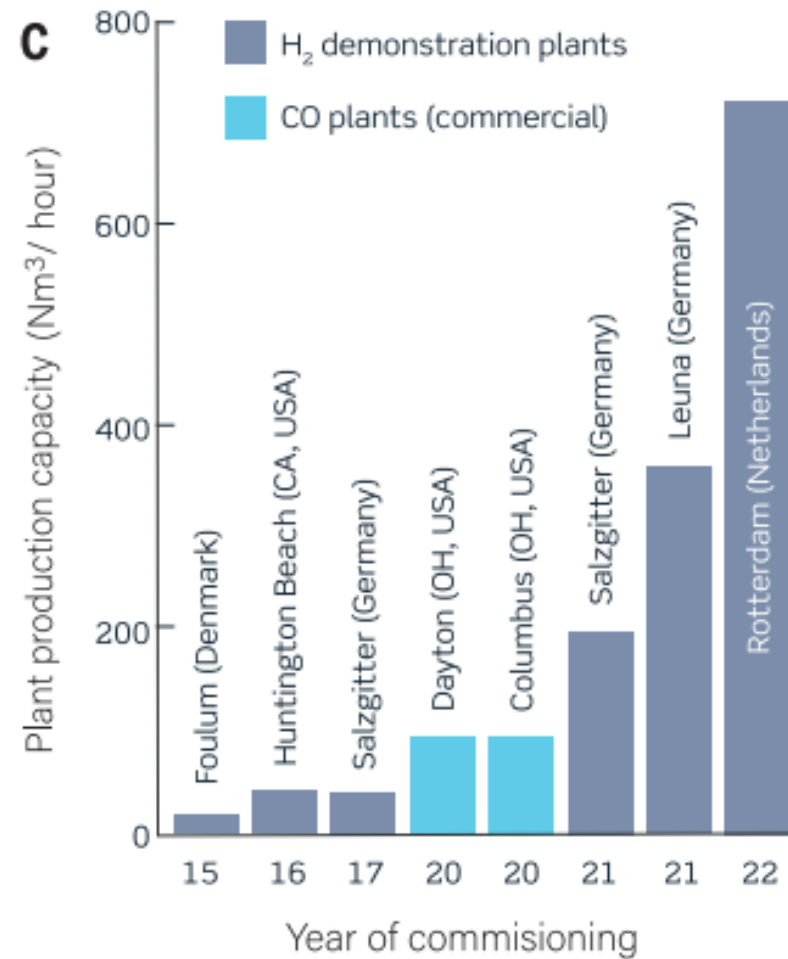
Потребление энергии составляет около $3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3_{H_2}$

A. Hauch et al., Science 370, eaba6118 (2020)



ТВЕРДООКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

Построенные с 2015 года и планируемые к постройке к 2022 году системы на ТОЭЭ:



A. Hauch et al., Science 370, eaba6118 (2020)

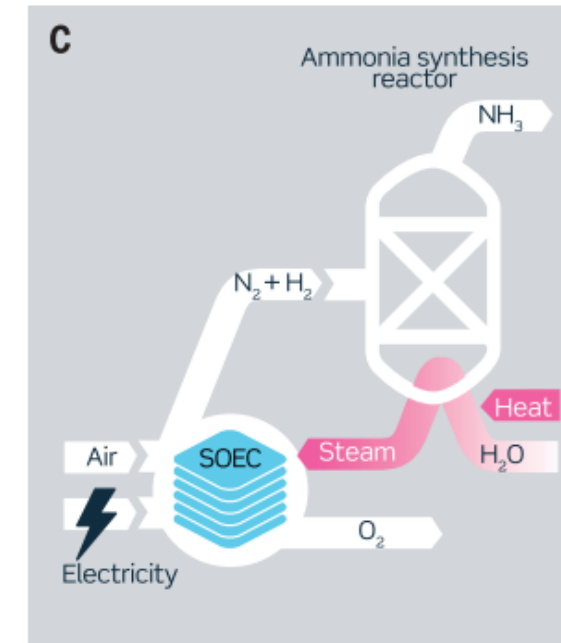
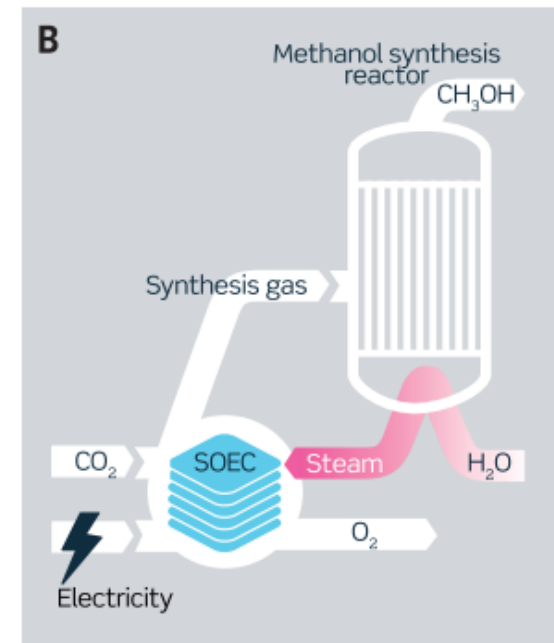
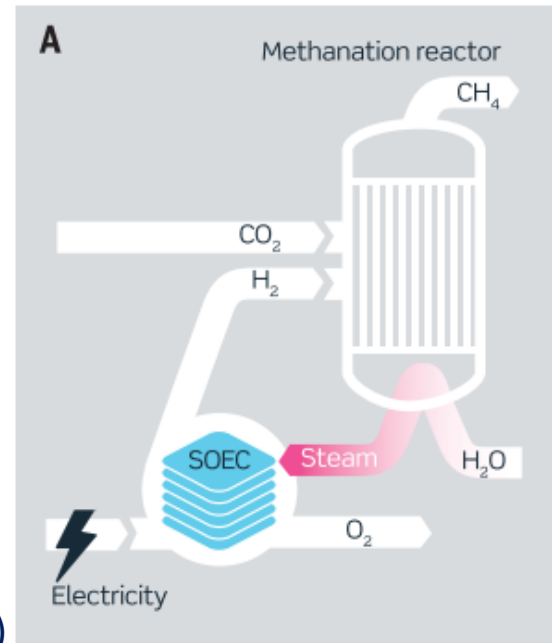
Экономические оценки стоимости систем на ТОЭЭ:

2000 евро/кВт

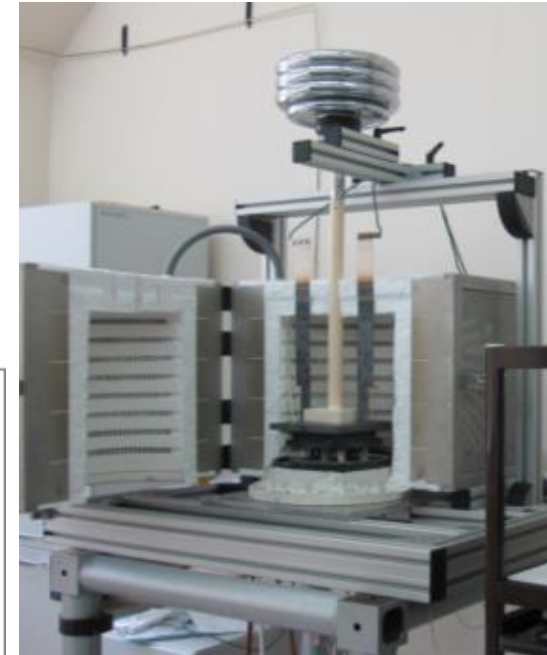
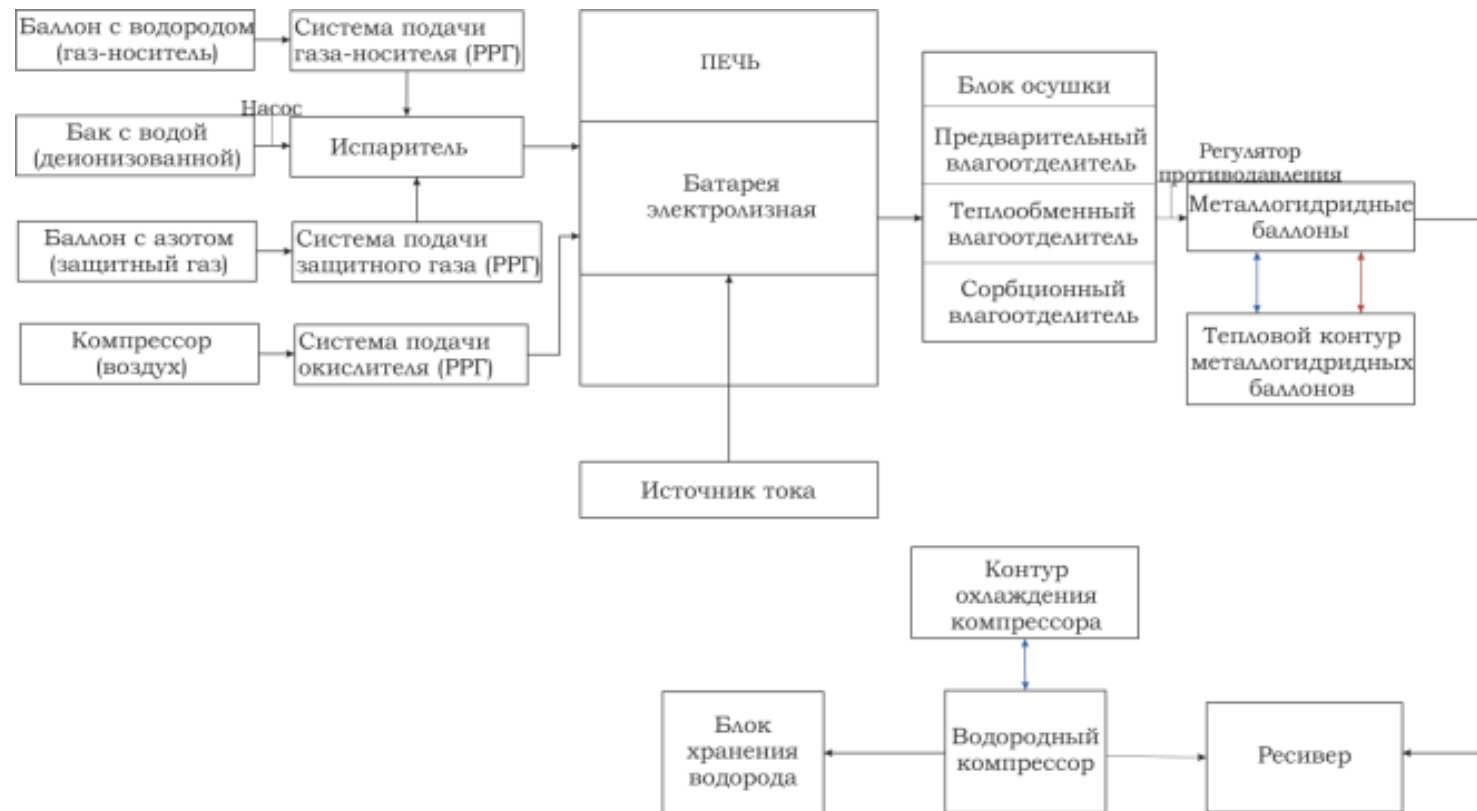
1000 евро/кВт к 2030

530 евро/кВт к 2050

Отдельно следует отметить возможность построения систем по производству метана (CH₄), метанола (CH₃OH) и аммиака (NH₃) на основе ТОЭЭ:



ТВЕРДООКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)



ТВЕРДООКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

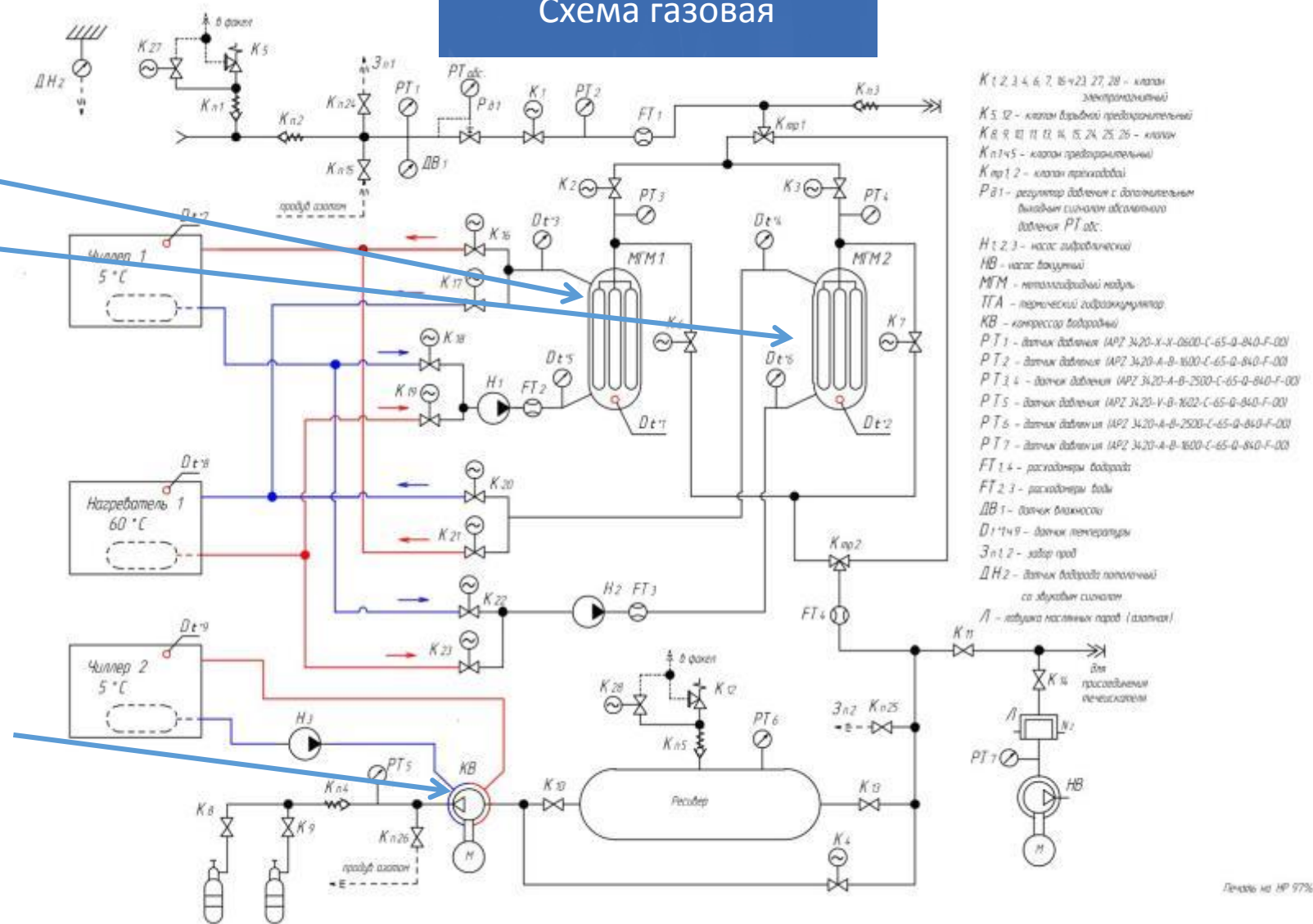
Номер	Температура по стеку, °C	Расход водорода, л/мин	Расход воды, мл/мин	Ток, А	Напряжение, В	Производительность по H ₂ , мл/мин	Фарадеевская эффективность, %	Удельные энергозатраты на генерацию, кВт*ч/м ³	Чистота водорода*, % об.
1	843	1	2	0	4.25	-	-	-	99,91
2	842	1	2	5	4.66	97,2	59,1	3,77	99,93
3	843	1	2	10	5.03	255,5	73,6	3,27	99,73
4	842	1	2	15	5.55	436,9	84,3	3,15	99,96
5	841	1	2	20	5.7	641,3	92,0	2,96	99,96
6	842	1	2	25	6.41	832,3	95,5	3,21	99,96



ТВЕРДООКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)



Схема газовая



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Q & A

ДМИТРИЙ АГАРКОВ

AGARKOV@ISSP.AC.RU, AGARKOV.DA@MIPT.RU

+7(916)758-49-30 (+TELEGRAM, WHATSAPP, VIBER)