

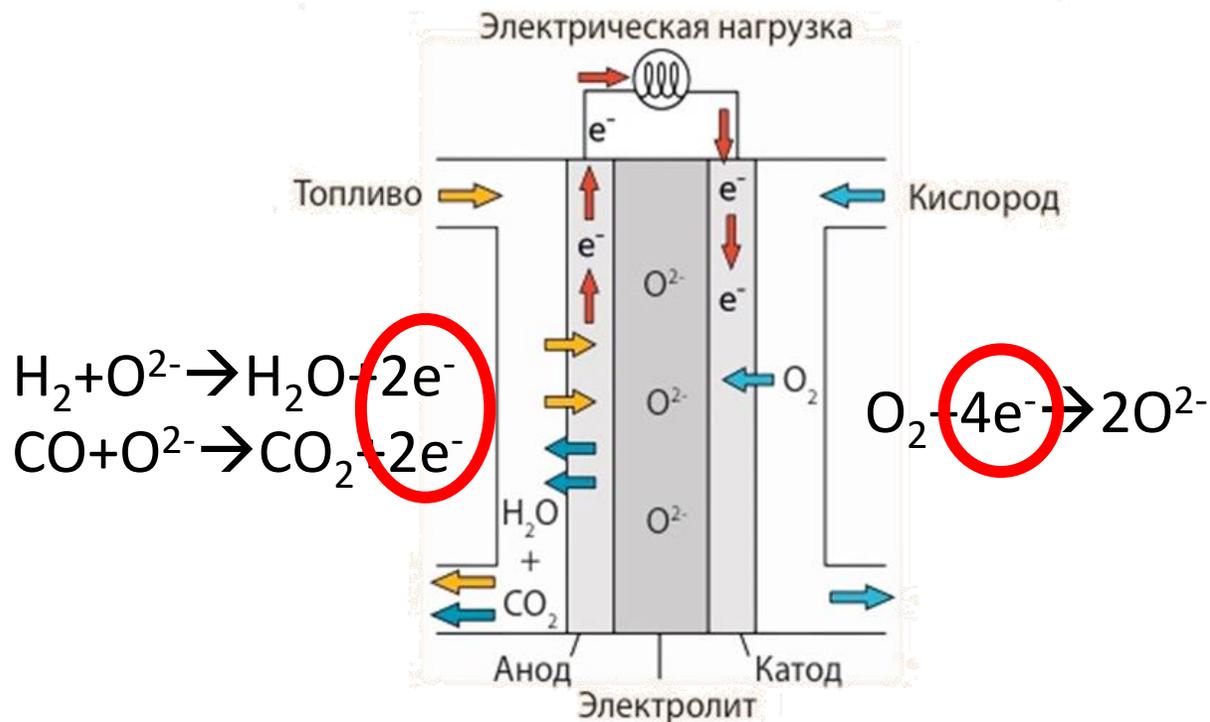
# ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ИФТТ РАН



ДМИТРИЙ АГАРКОВ, С.И. БРЕДИХИН

# 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 отдельно подводимых к электродам, непосредственно превращается в электрическую



Принцип работы топливного элемента

## Достоинства топливных элементов:

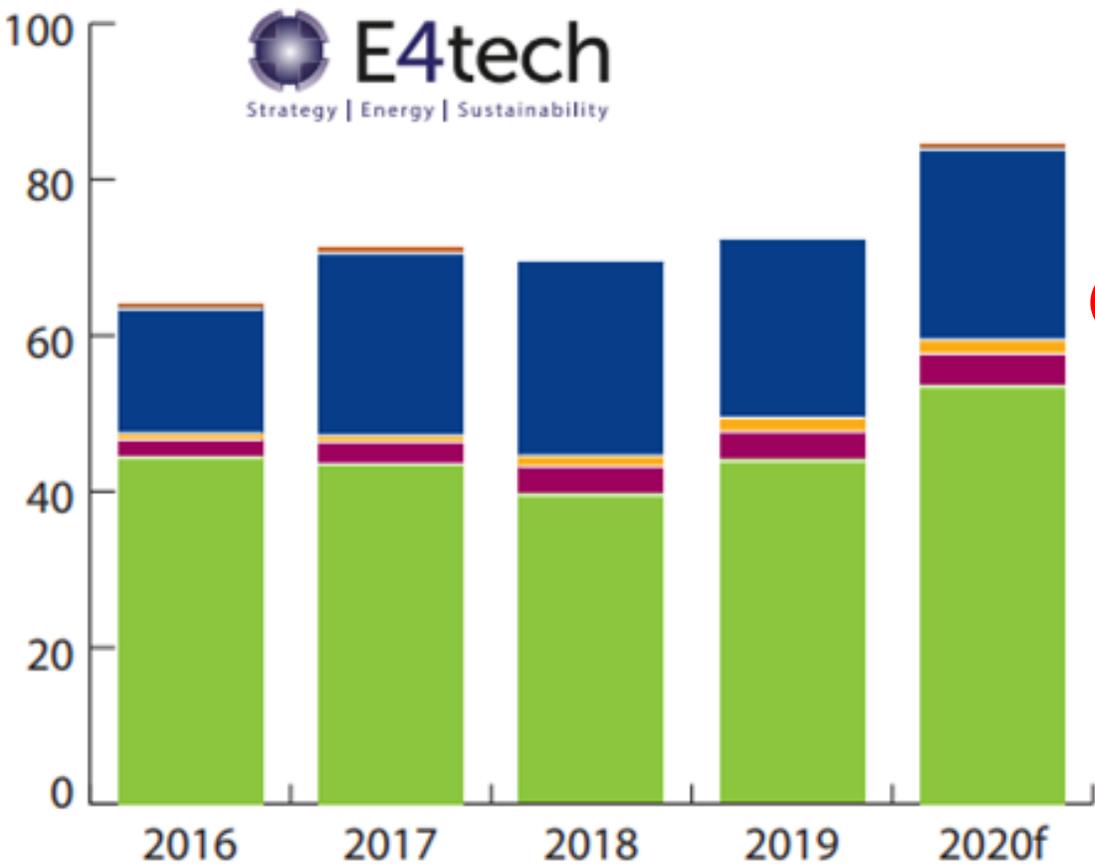
- высокий КПД;
- простота конструкции и обслуживания, малые вибрации и шум;
- отсутствие вредных выбросов в атмосферу (при использовании водорода)
- при использовании углеводородных топлив выбросы  $NO_x$  в 100 раз и CO в 200 раз меньше чем у энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания (экологический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



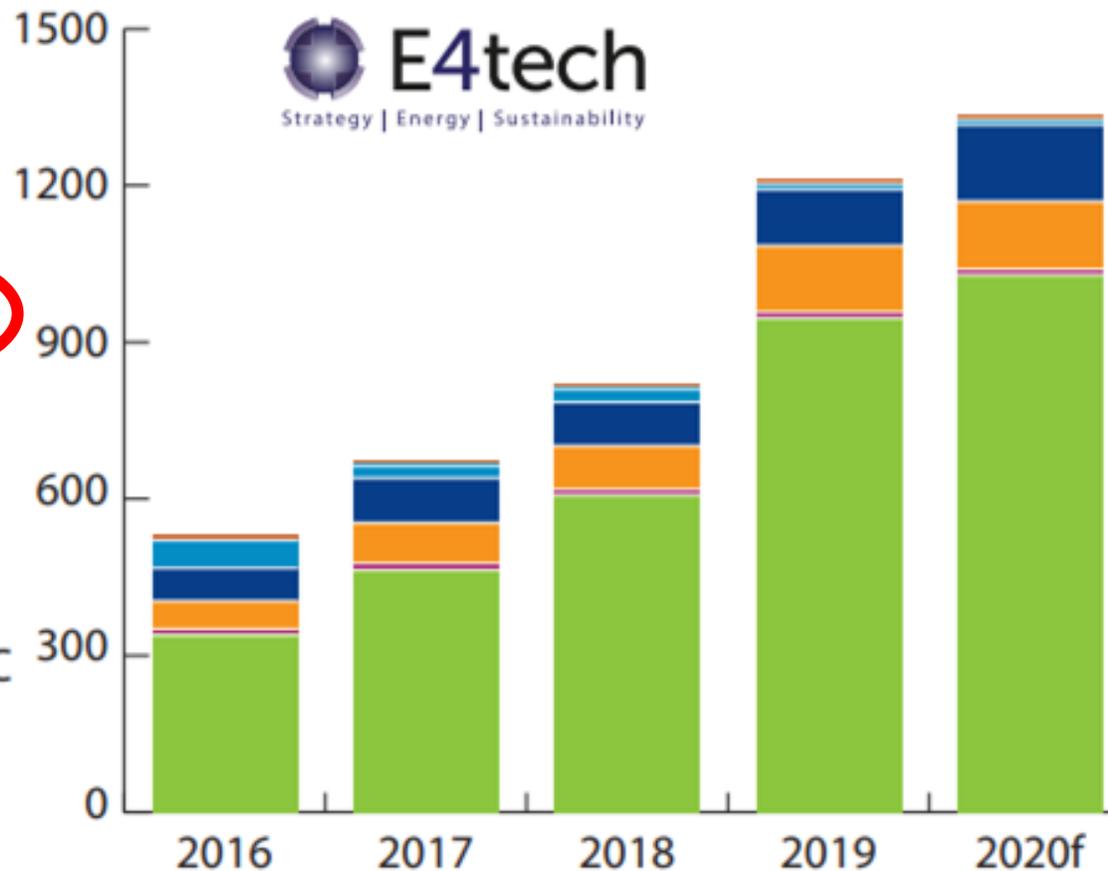
# РЫНОК ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАЗРЕЗЕ ТИПОВ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Среди поставок как в штуках, так и по мощности лидируют твердополимерные (ТПТЭ, PEM, PEMFC) и твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ, SOFC):

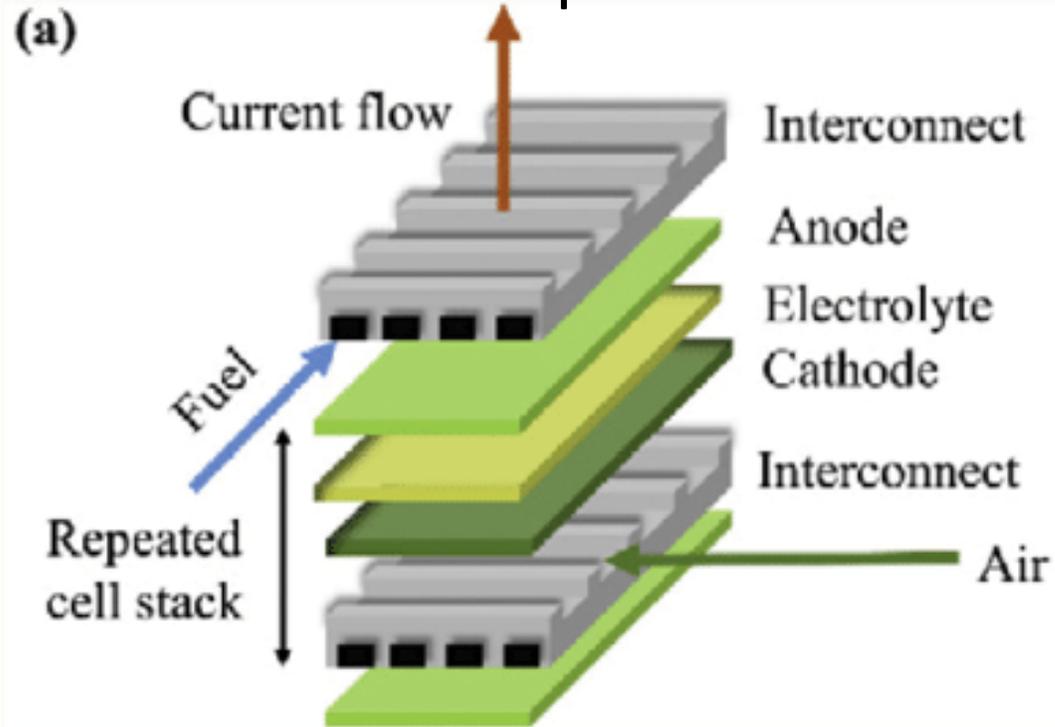
Shipments by fuel cell type 2016 - 2020 (1,000 units)



Megawatts by fuel cell type 2016 - 2020

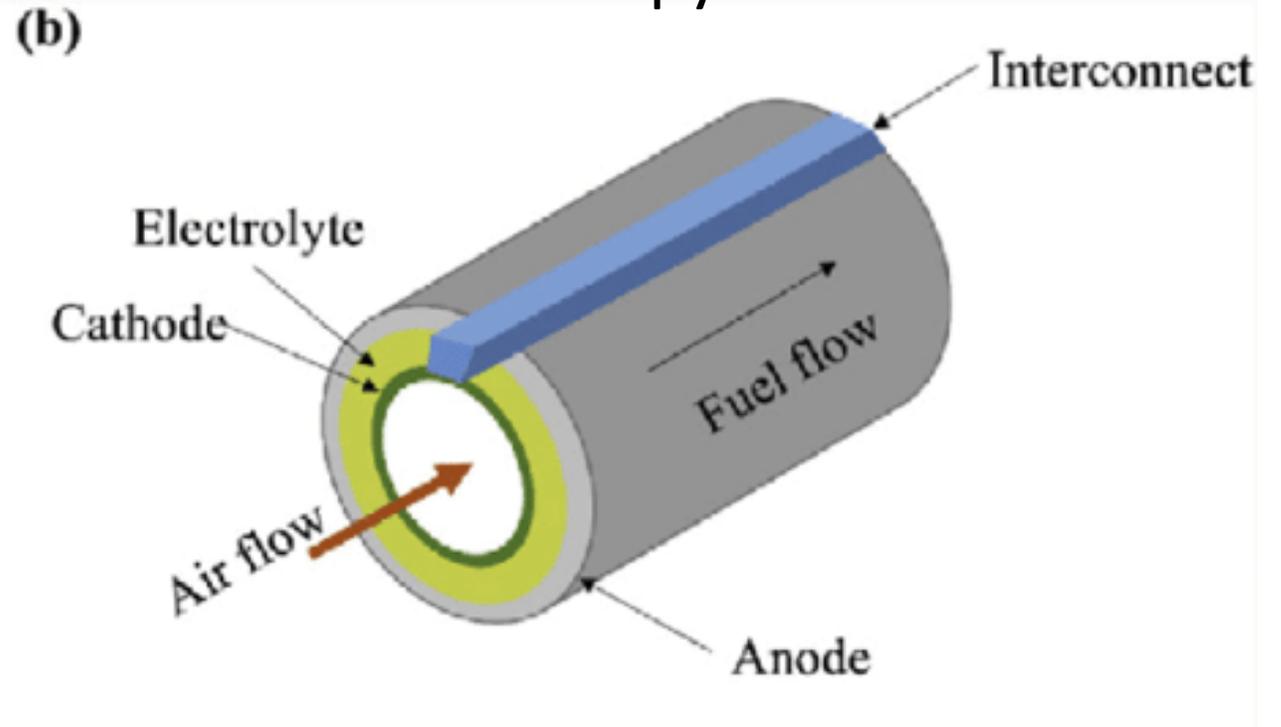


## Планарная



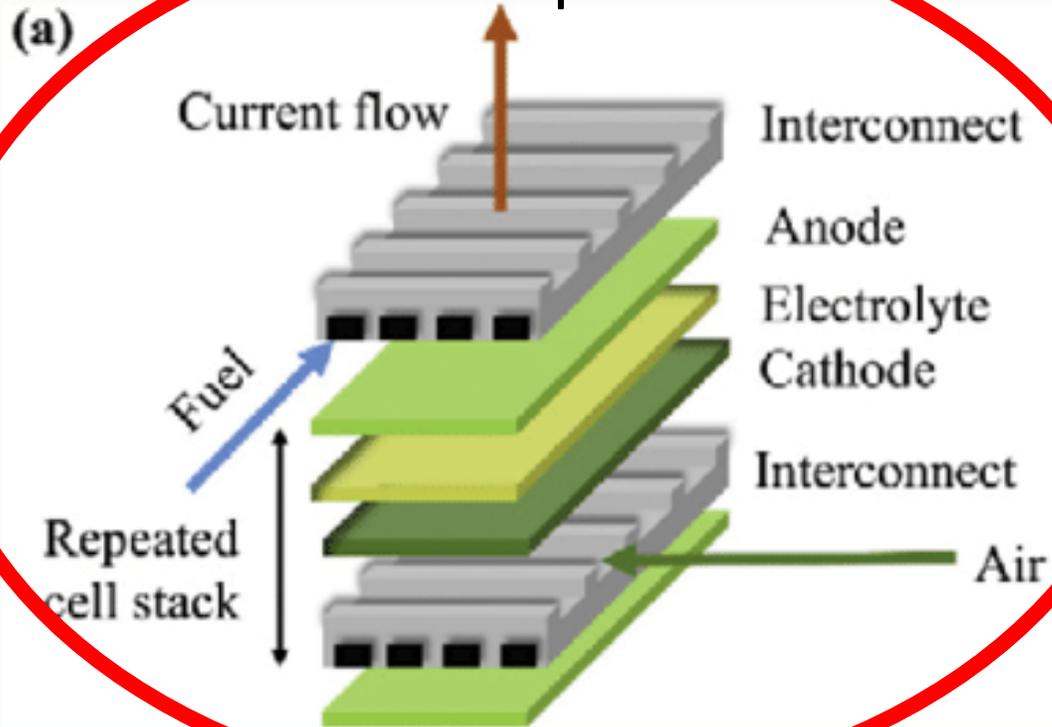
- + технологичные методы изготовления подложки
- + технологичные методы нанесения электродов
- + простая система токосъема
- меньшая механическая прочность
- меньшая стабильность при термоциклировании

## Трубчатая



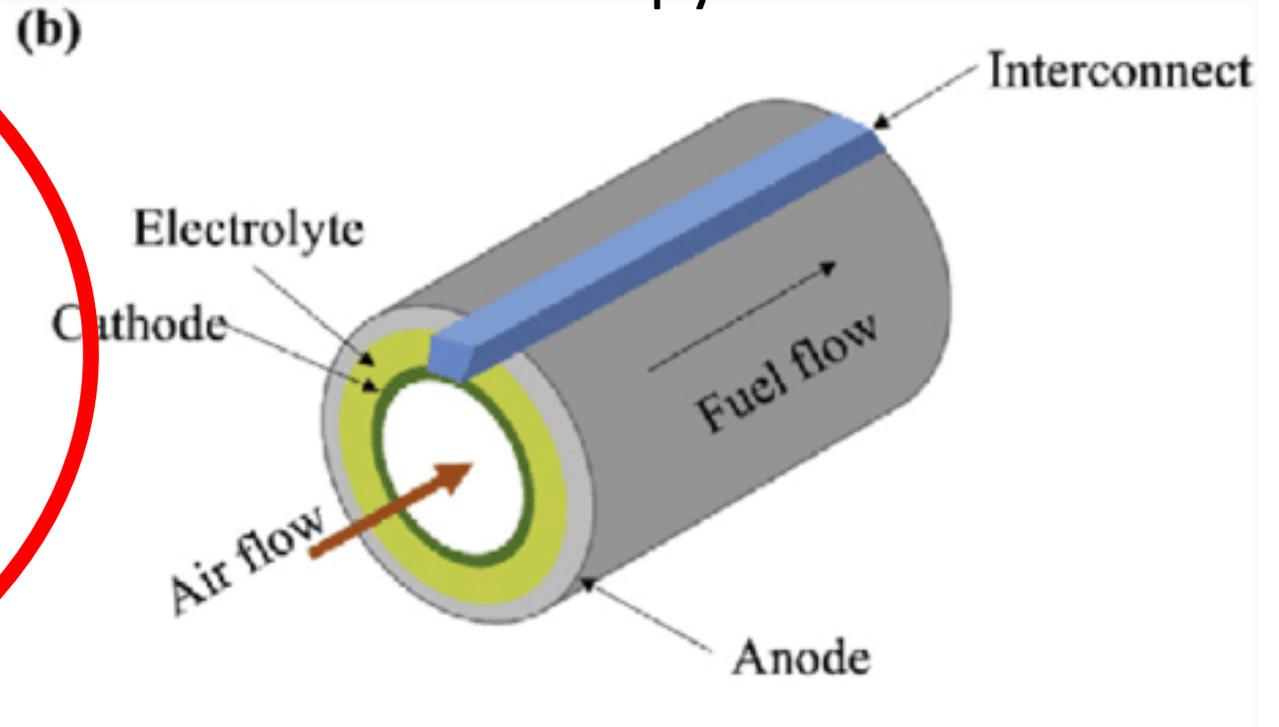
- + механическая прочность
- + возможна большая объемная плотность мощности
- сложные методики нанесения внутреннего электрода
- сложность токосъема, особенно с внутреннего электрода

## Планарная



- + технологичные методы изготовления подложки
- + технологичные методы нанесения электродов
- + простая система токосъема
- меньшая механическая прочность
- меньшая стабильность при термоциклировании

## Трубчатая



- + механическая прочность
- + возможна большая объемная плотность мощности
- сложные методики нанесения внутреннего электрода
- сложность токосъема, особенно с внутреннего электрода

# Классификация ТОТЭ по типу поддерживающего элемента

- + простота изготовления
- + надежность

- высокая температура
- низкая мощность

(a)



(b)



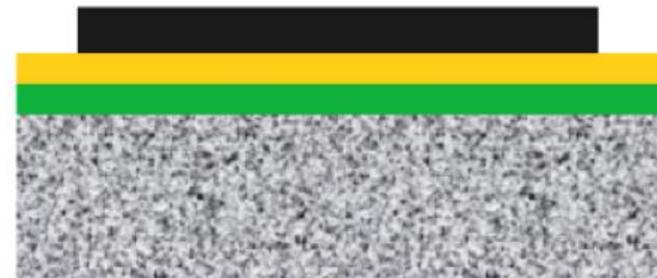
- + ниже температура
- + выше мощность

- тонкопленочный электролит

(c)



(d)



- тонкопленочный электролит
- сложность формирования

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

- тонкопленочный электролит



# Классификация ТОТЭ по типу поддерживающего элемента

- + простота изготовления
- + надежность

- высокая температура
- низкая мощность

(a)



(b)



(c)



(d)



- + ниже температура
- + выше мощность

- тонкопленочный электролит

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

- тонкопленочный электролит

- тонкопленочный электролит
- сложность формирования



# РАБОТЫ ПО ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

- + простота изготовления
- + надежность

- высокая температура
- низкая мощность

(a)



(b)



- + ниже температура
- + выше мощность

- тонкопленочный электролит

(c)



(d)



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

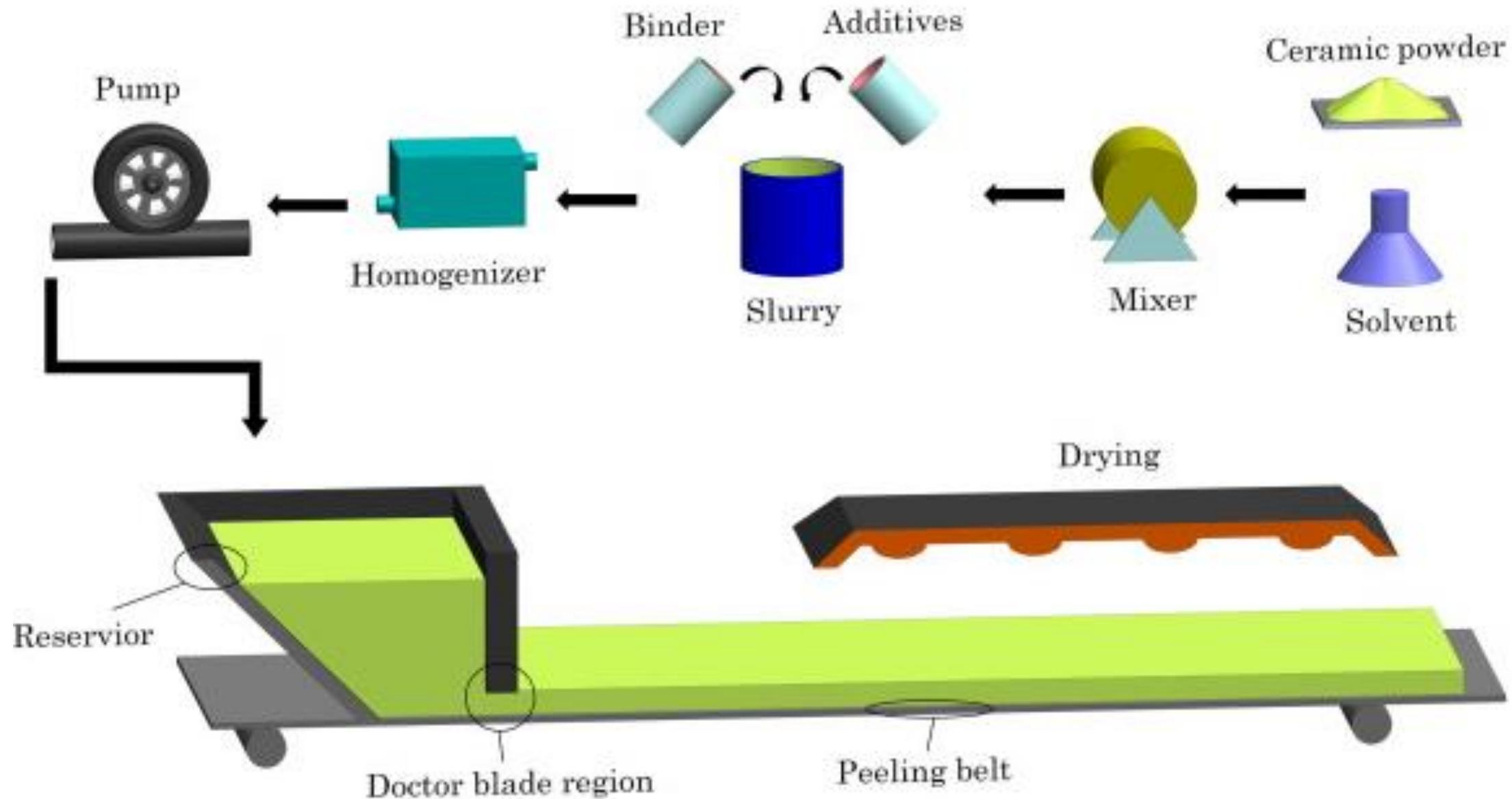
- тонкопленочный электролит
- сложность формирования



- тонкопленочный электролит



# ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ НА ДВИЖУЩУЮСЯ ЛЕНТУ



# ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕМБРАН АНИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ



# ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕМБРАН АНИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФТТ РАН

  
А.А. Левченко  
«12» мая 2022 г.  


УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»

  
К.И. Мартынов  
«12» мая 2022 г.  


## ПЛАСТИНЫ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

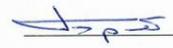
Технические условия

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.

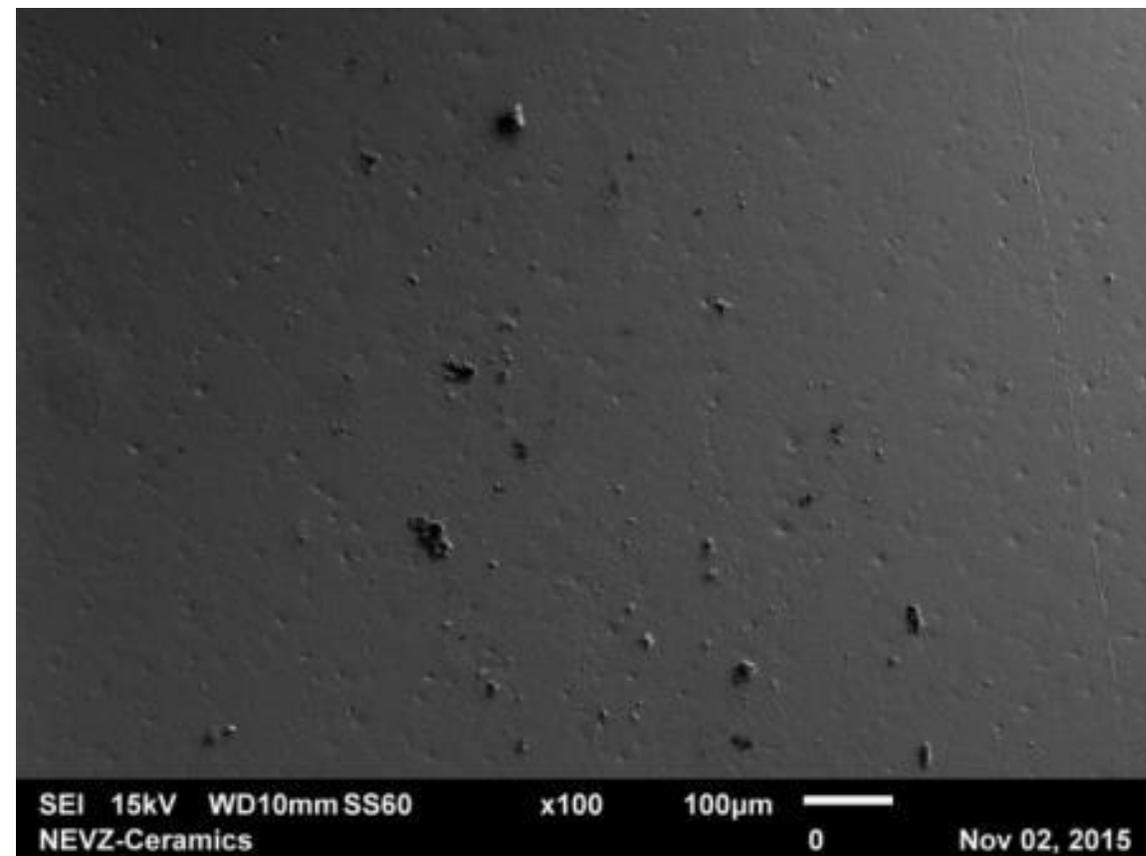
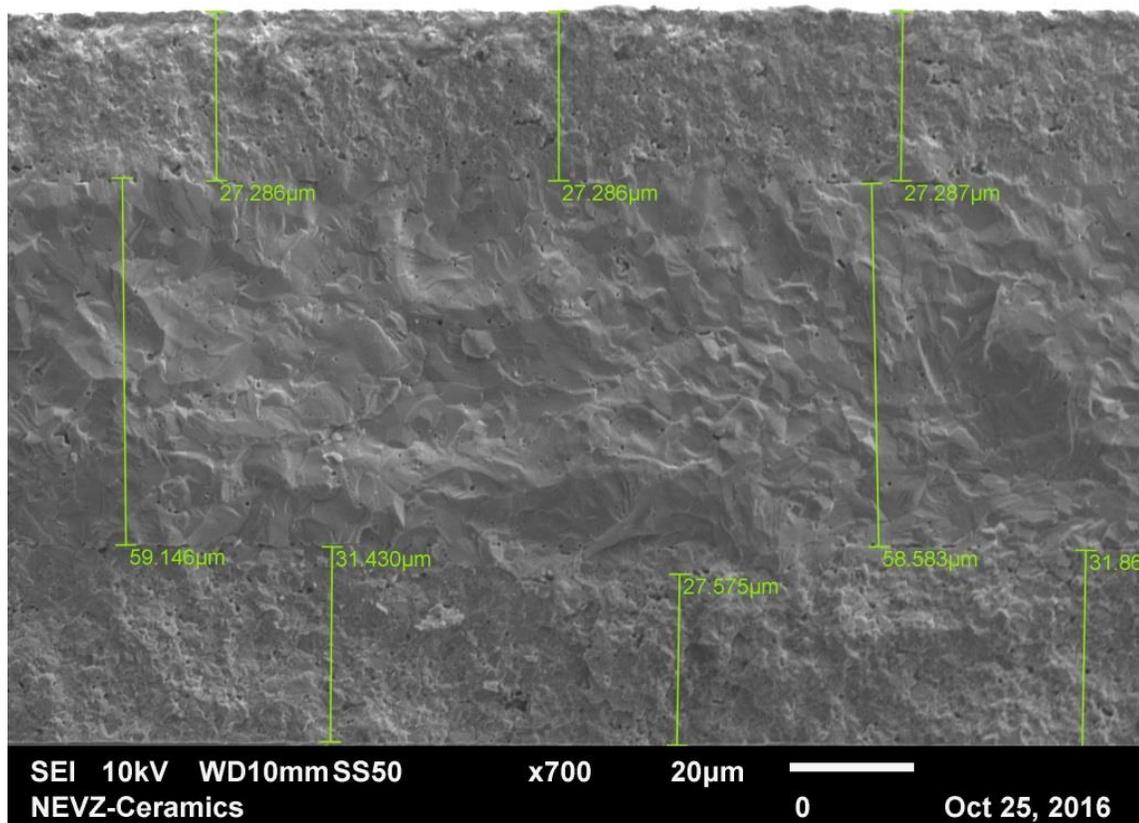
СОГЛАСОВАНО

Технический директор  
АО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»

  
А.В. Татарский  
«13» мая 2022 г.



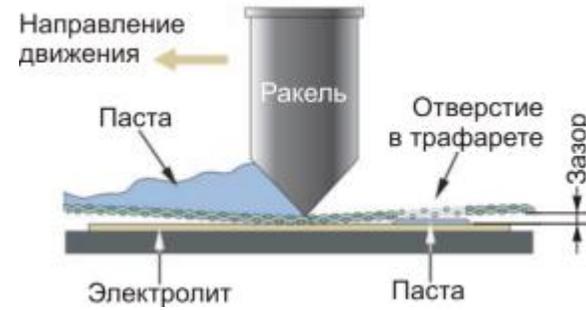
# ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕМБРАН АНИОННЫХ ПРОВОДНИКОВ



- 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

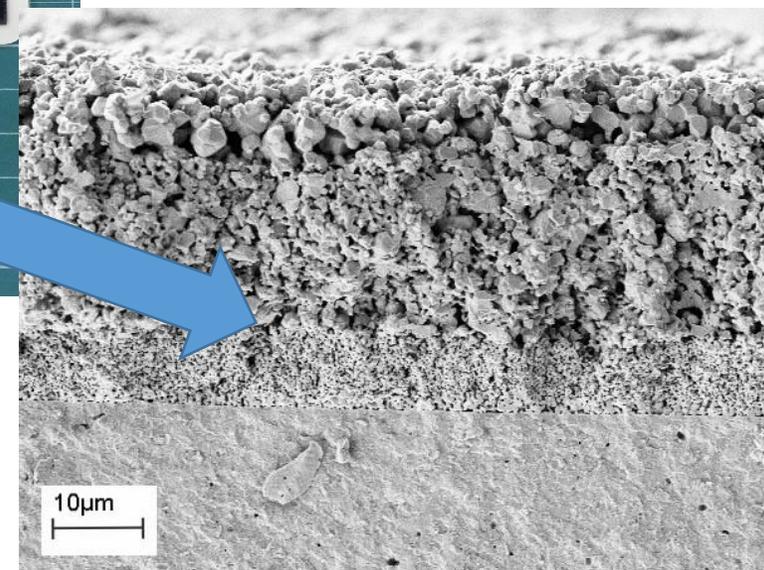
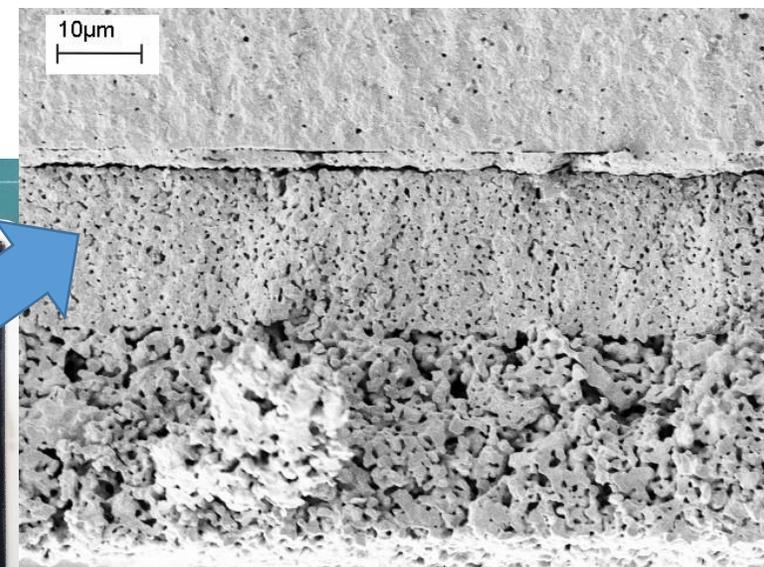
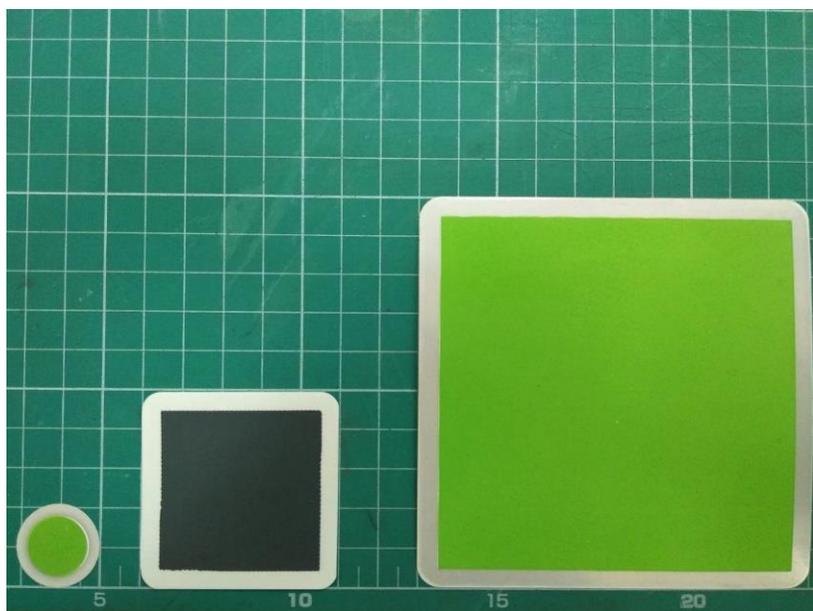
VT отжиг





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

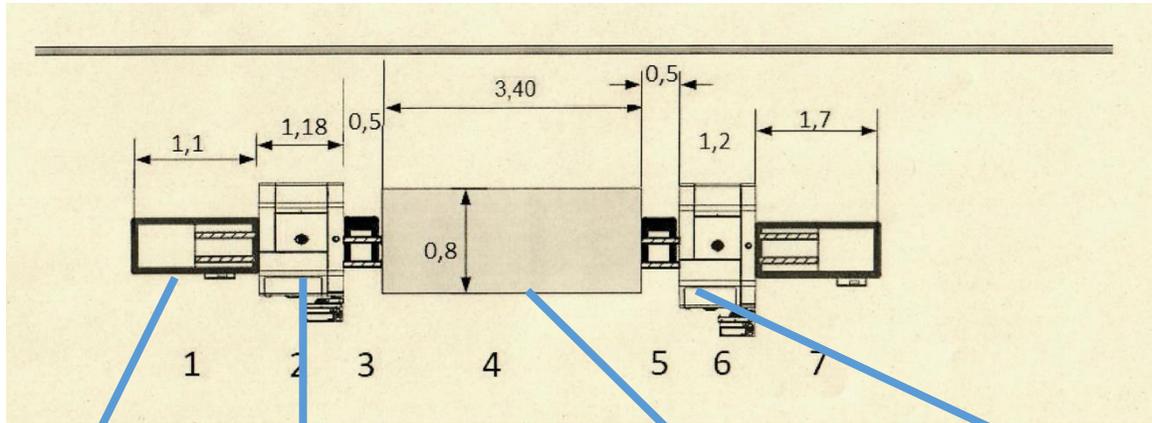
# Многослойные электроды ТОТЭ



# Многослойные электроды ТОТЭ



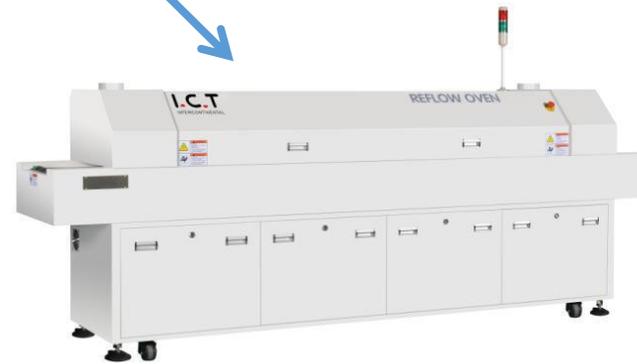
# ПРОЕКТ ЛИНИИ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ВЫПУСКА МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ ТОТЭ



Внешний вид магазинного загрузчика HY-460LD (Hayawin)



Внешний вид принтера трафаретного GKG G9



Внешний вид печи оплавления I.C.T.-S6D

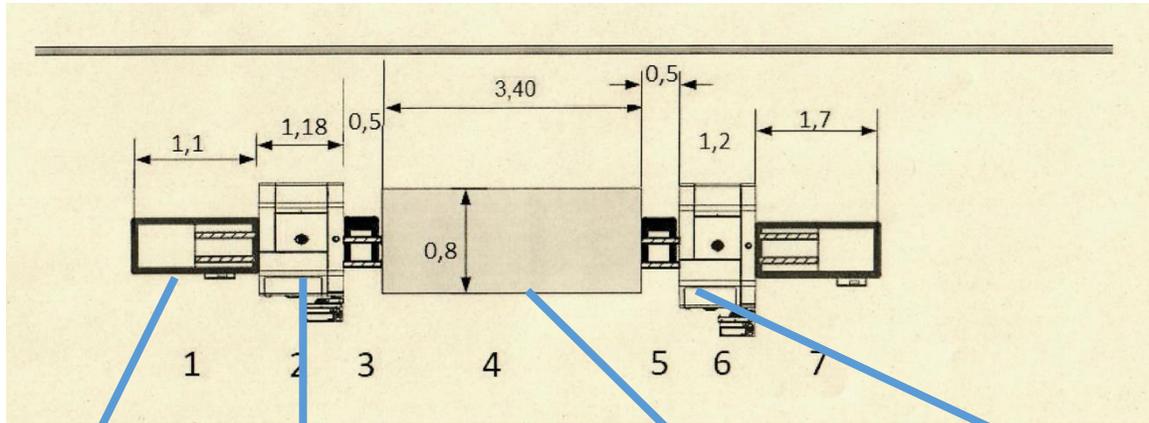


Общий вид системы 3D автоматической оптической инспекции Jutze

ПРОРАБОТКА ВЫПОЛНЕНА ПО ЗАКАЗУ АО «ОДК»



# ПРОЕКТ ЛИНИИ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ВЫПУСКА МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ ТОТЭ



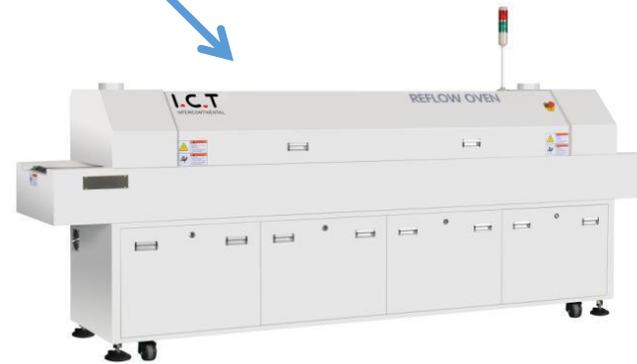
Разработка оборудования  
Завод специального машиностроения  
**ООО «Техно-центр»**  
создан в 1994 году на базе государственного  
предприятия КБ «Гюйс» от 7 Главного  
Управления Министерства электронной  
промышленности СССР.



Внешний вид магазинного  
загрузчика HY-460LD (Hayawin)



Внешний вид принтера трафаретного  
GKG G9



Внешний вид печи оплавления I.C.T.-S6D



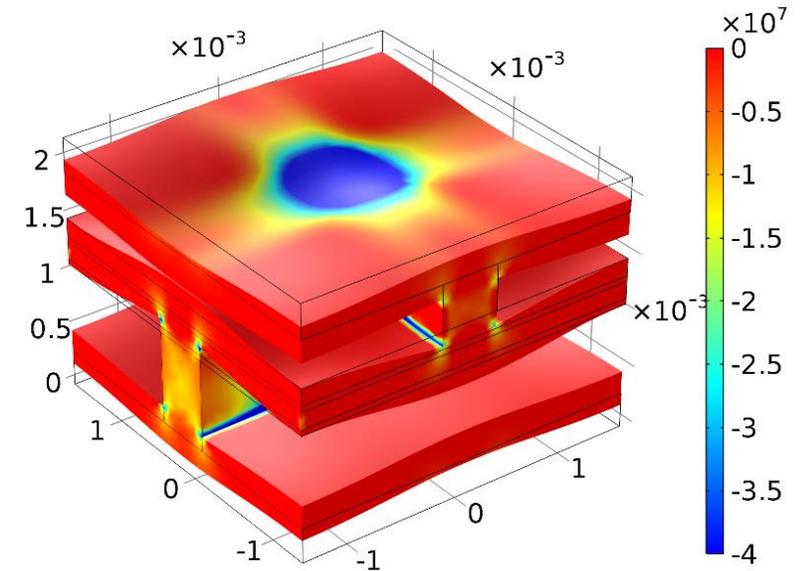
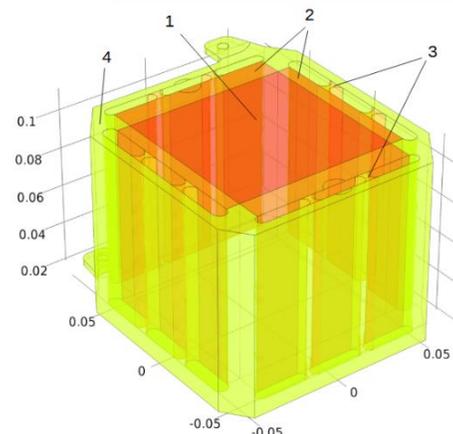
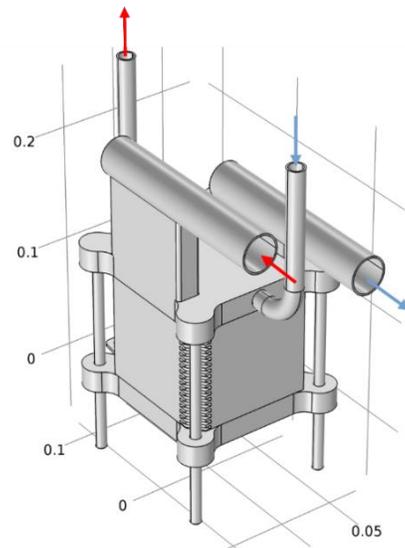
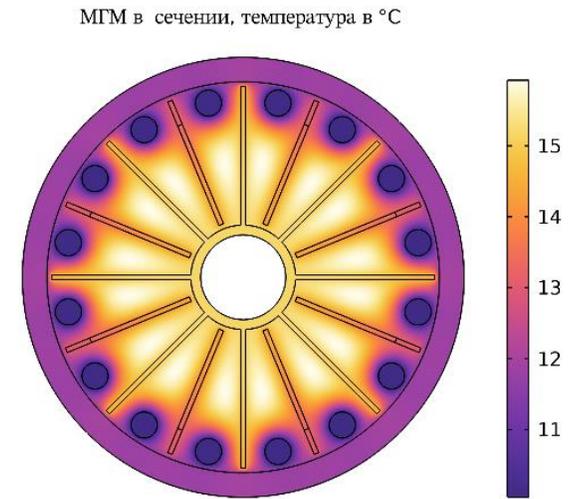
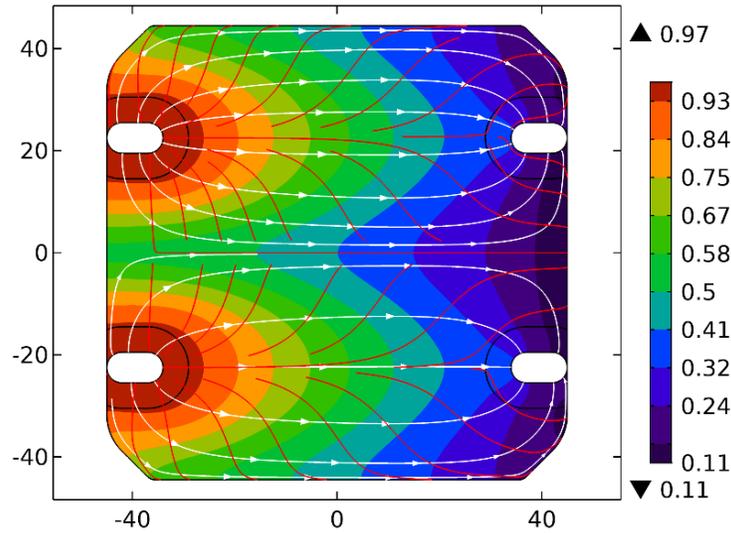
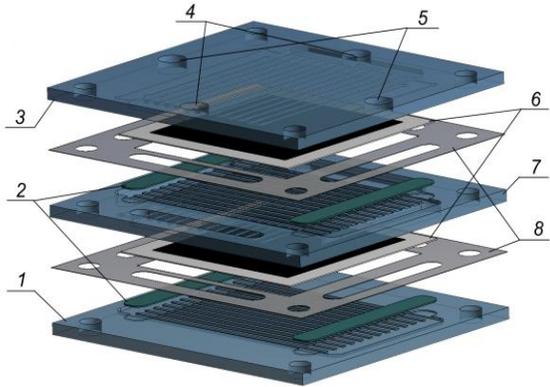
Общий вид системы 3D автоматической  
оптической инспекции Jutze

ПРОРАБОТКА ВЫПОЛНЕНА ПО ЗАКАЗУ АО «ОДК»



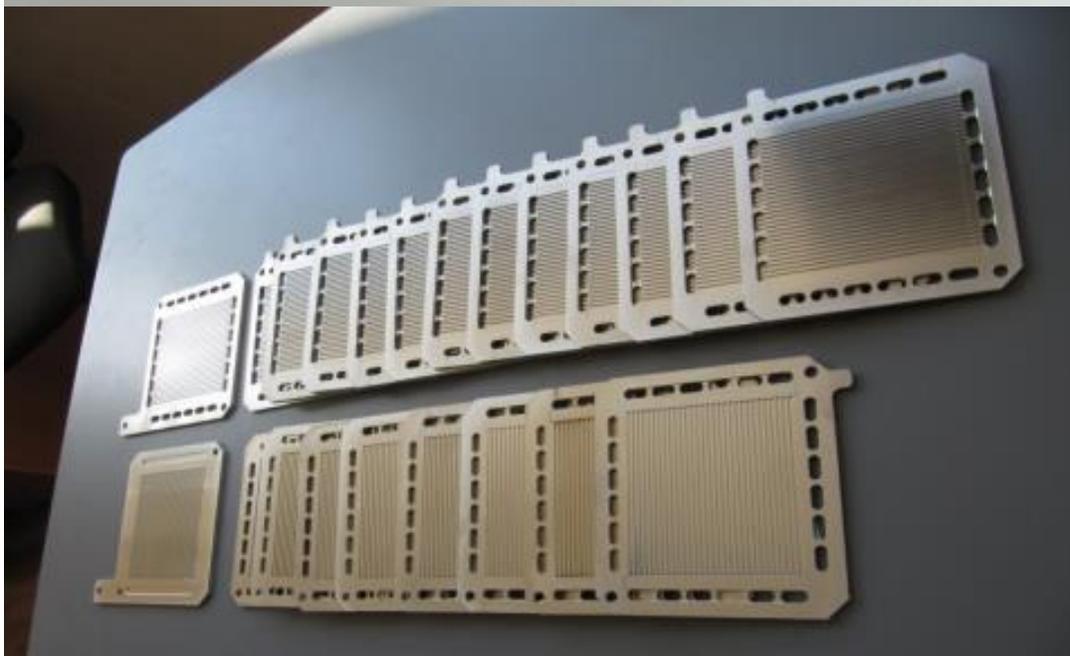
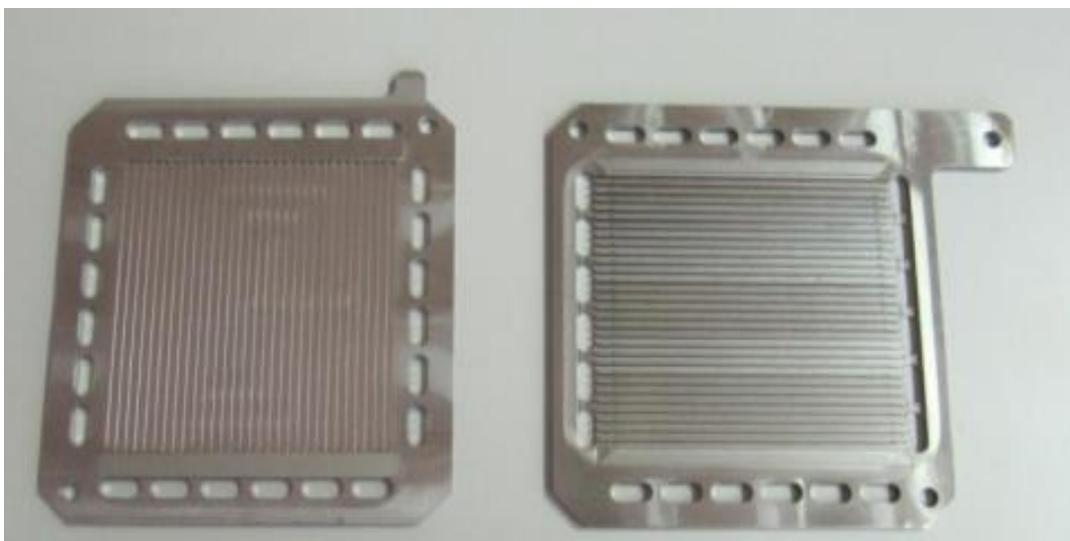
# МОДЕЛИРОВАНИЕ БАТАРЕЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

- Температурные распределения
- Диффузионный транспорт
- Электрохимические реакции
- Газодинамика
- Механические напряжения



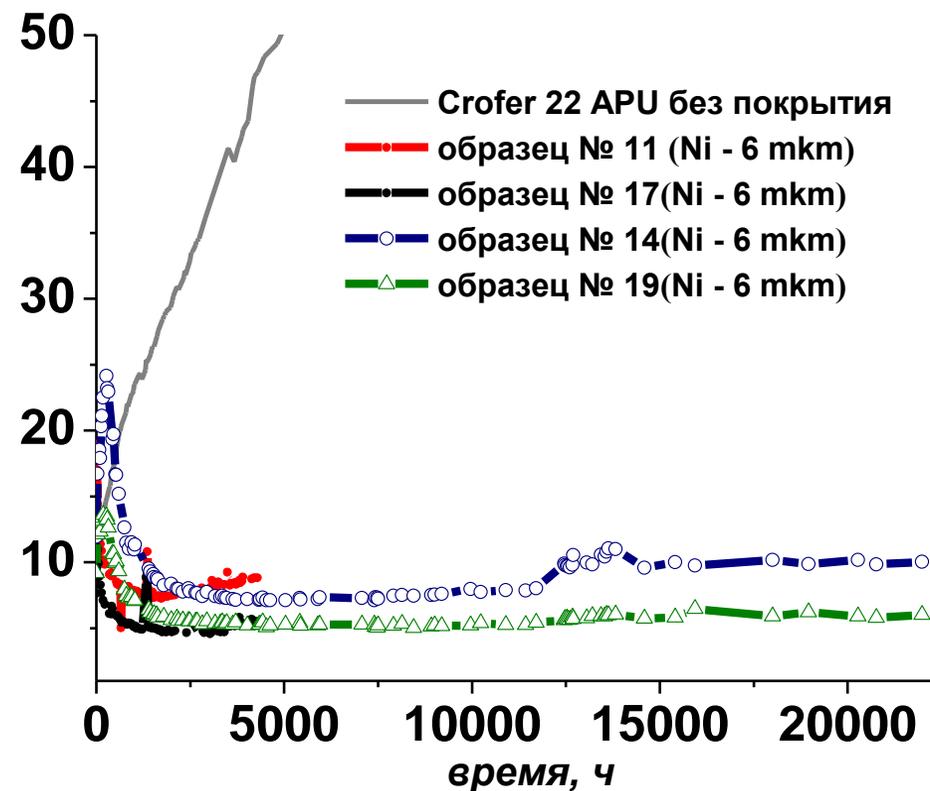
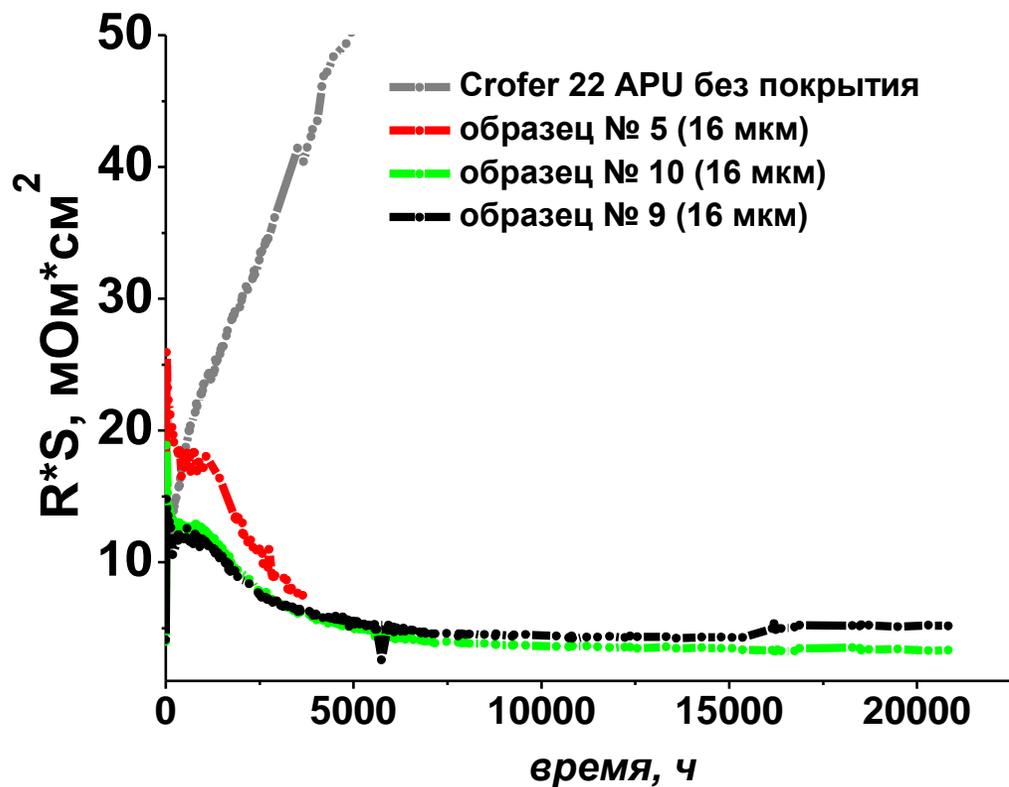


# НАНЕСЕНИЕ ПРОВОДЯЩИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ



# ВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Поведение электросопротивления перехода «La<sub>0,8</sub>Sr<sub>0,2</sub>MnO<sub>3</sub> катод–Crofer 22 APU» без покрытия и с защитными Ni покрытиями толщиной 6 и 16 мкм в зависимости от времени испытаний.



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



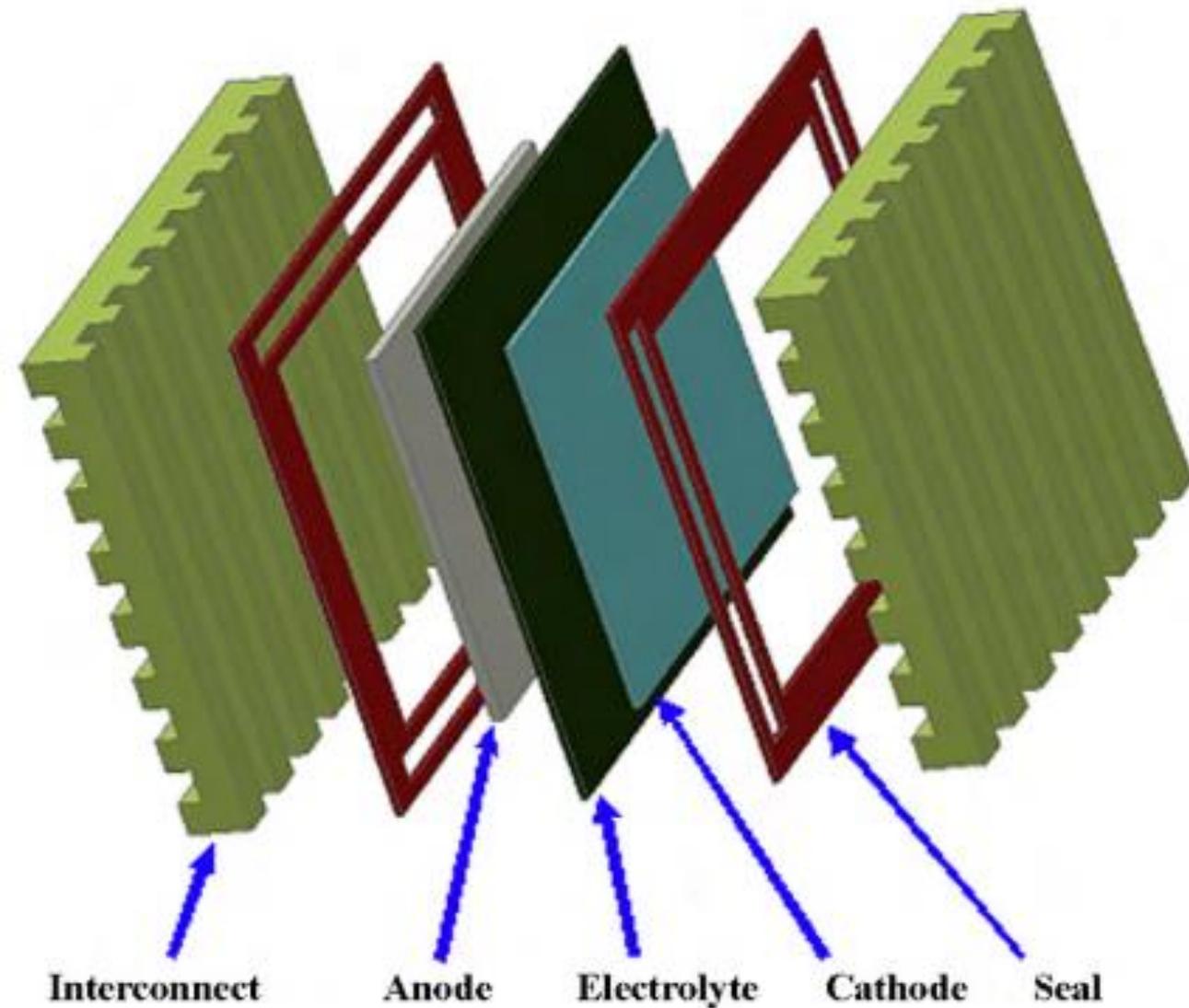
# РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

## Проблема:

Отсутствует Российская сталь для производства токовых коллекторов и элементов корпуса батарей ТОТЭ

АО «НПО «ЦНИИТМАШ» в рамках договора НИОКР с ИФТТ РАН «Разработка технологии получения катаных полос из нержавеющей стали типа Crofer22 APU» разработана технология, изготовлены и переданы в ИФТТ РАН катанные полосы стали аналога Crofer22 APU



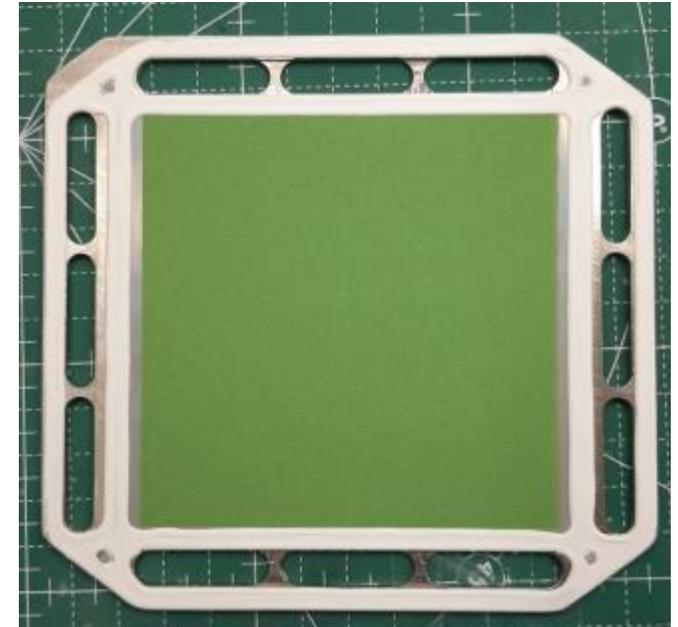
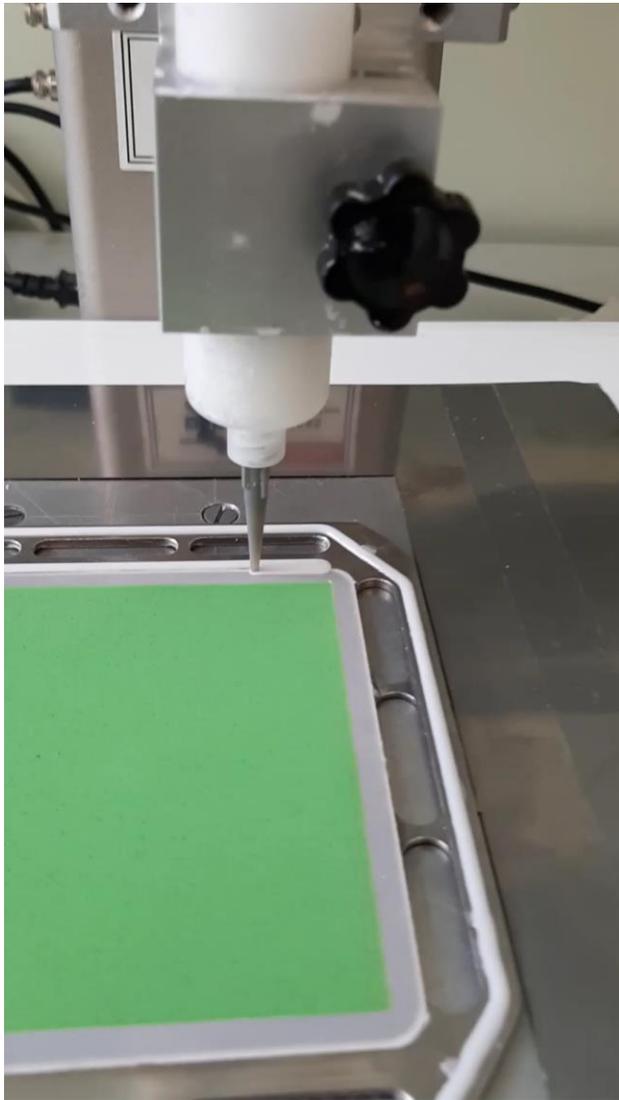


## Требования:

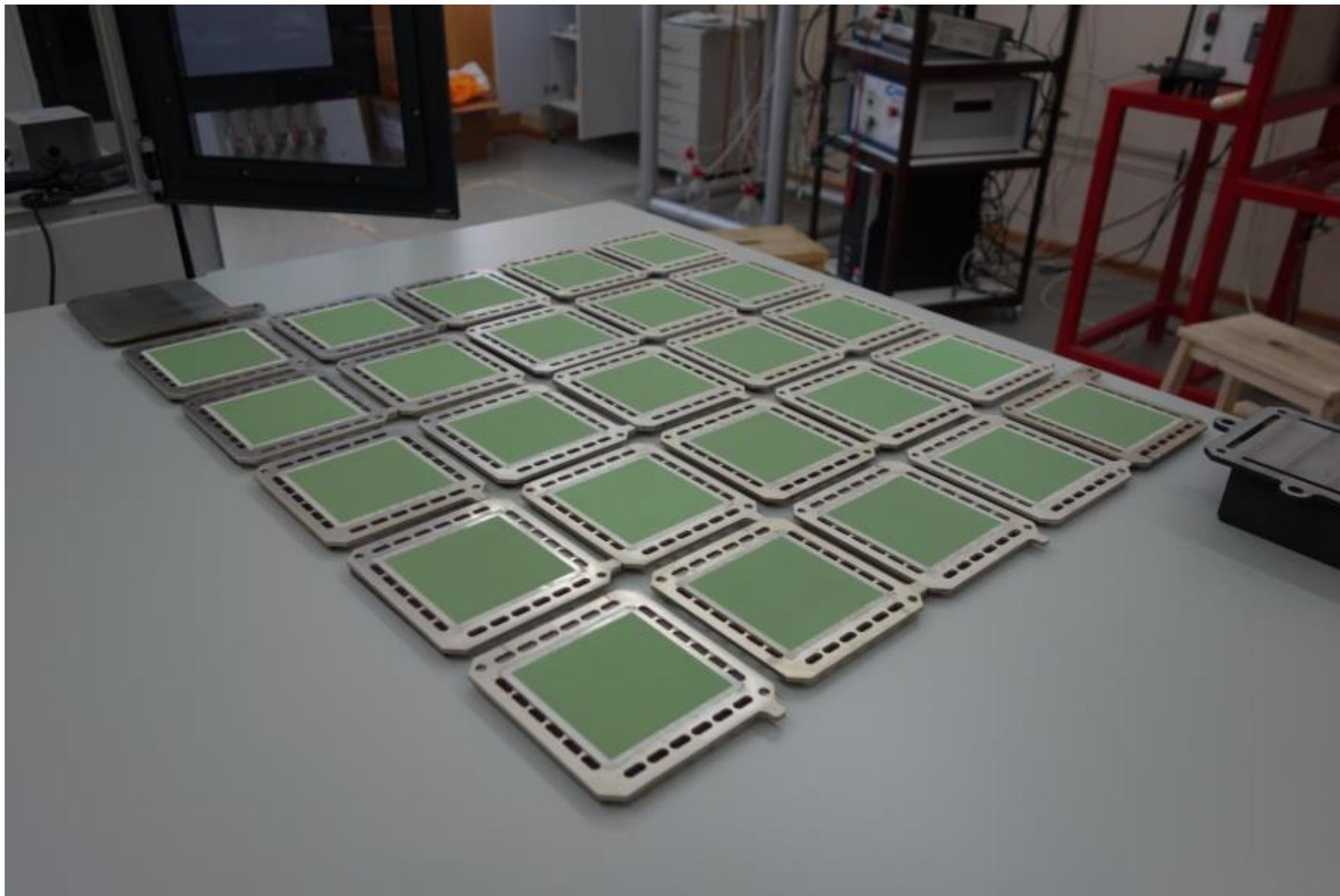
- Термомеханическая совместимость с другими материалами ТОТЭ/ТОЭЛЭ
- Подходящие температуры размягчения, стеклования и кристаллизации
- Адгезия к жаропрочной стали и материалу электролита
- Химическая стабильность при повышенной температуре и влажности
- Низкая электронная проводимость



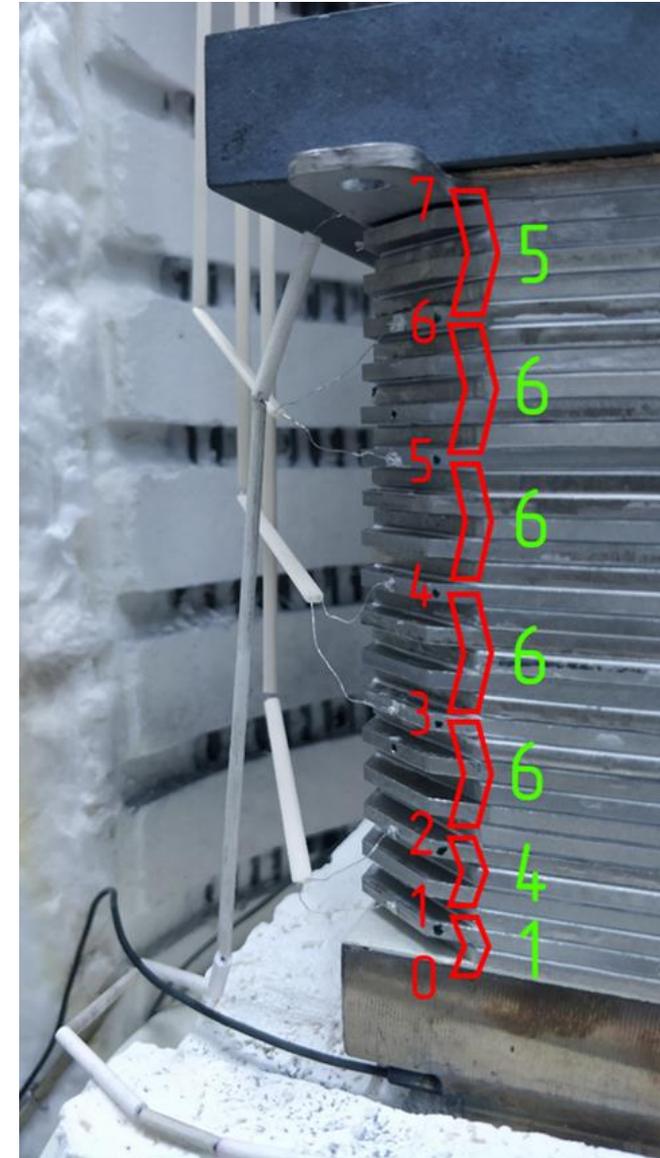
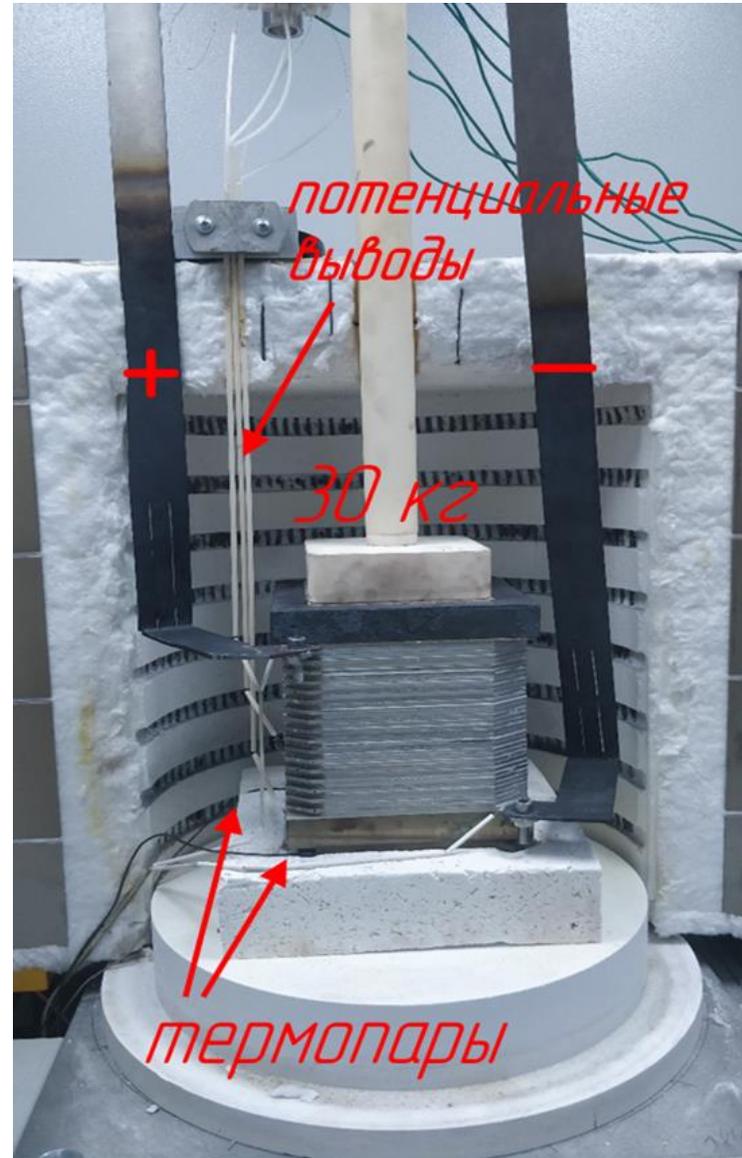
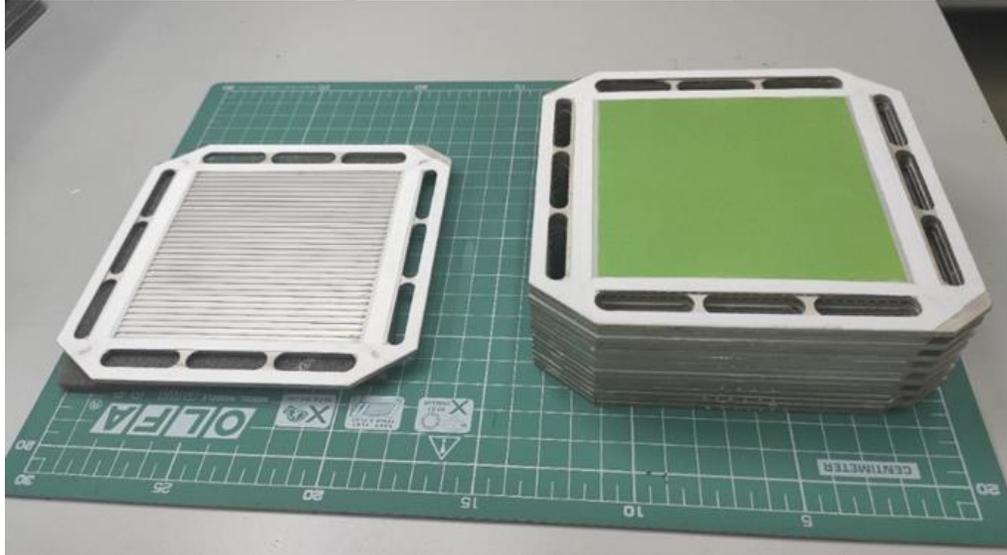
# СТЕКЛОГЕРМЕТИКИ – НАНЕСЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ РОБОТА ДОЗАТОРА



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



# СБОРКА БАТАРЕЙ ТОТЭ мощностью 700 Вт



# КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА МОДУЛЯ ЭУ НА ТОТЭ



Батарея ТОТЭ с поддерживающим электролитом мощностью 450-700 Вт



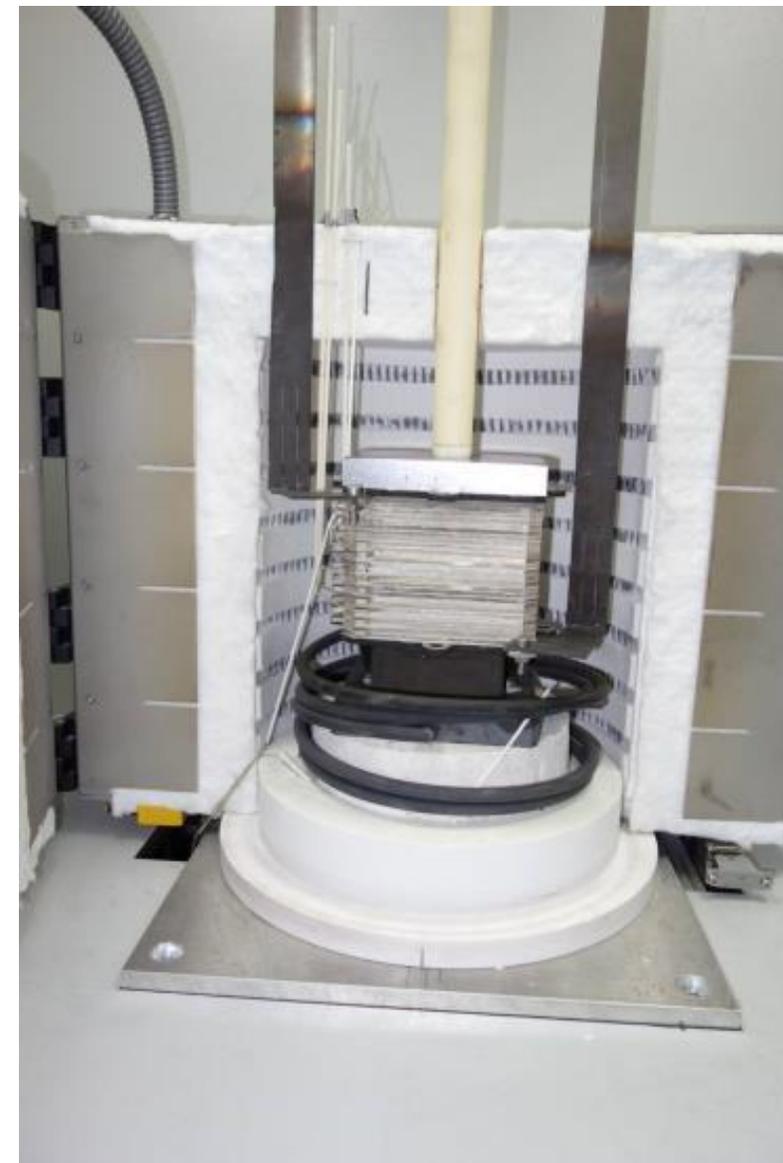
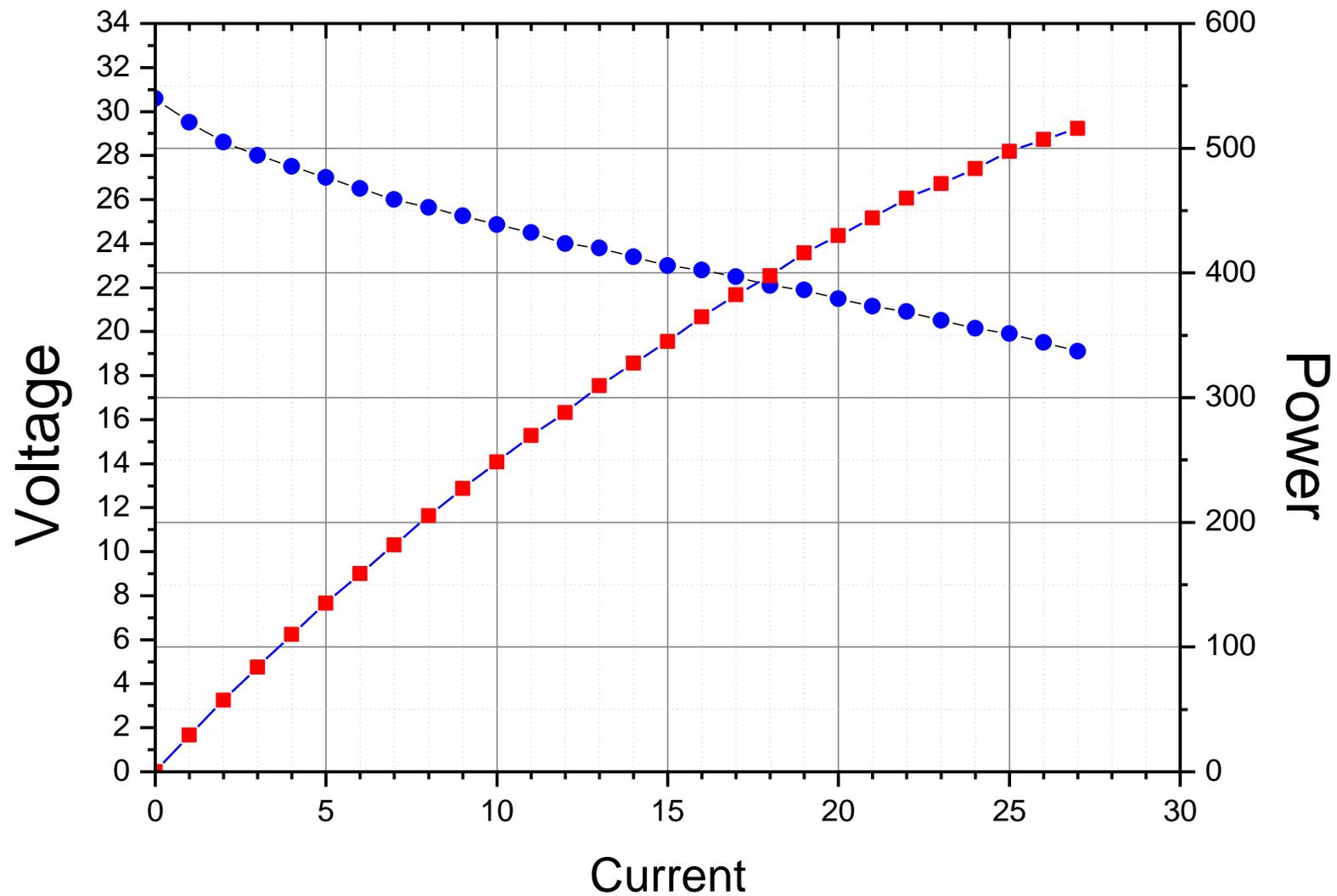
Испытательный стенд FuelCon Evaluator C-1000 для электрохимических испытаний



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

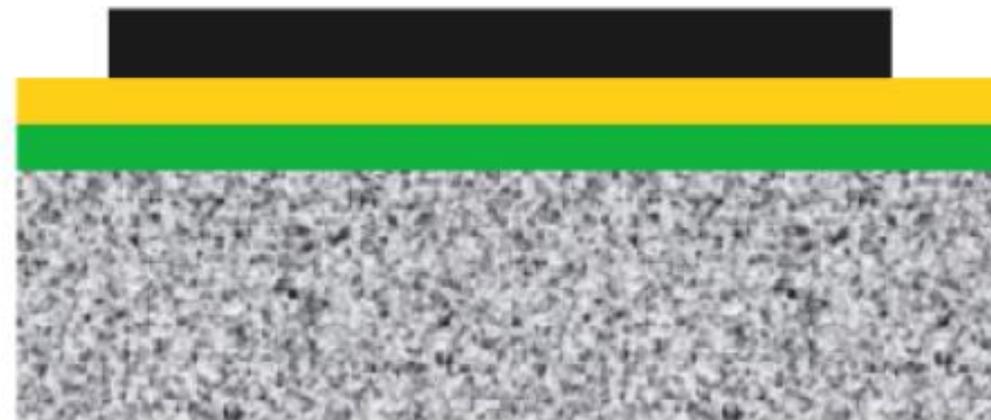
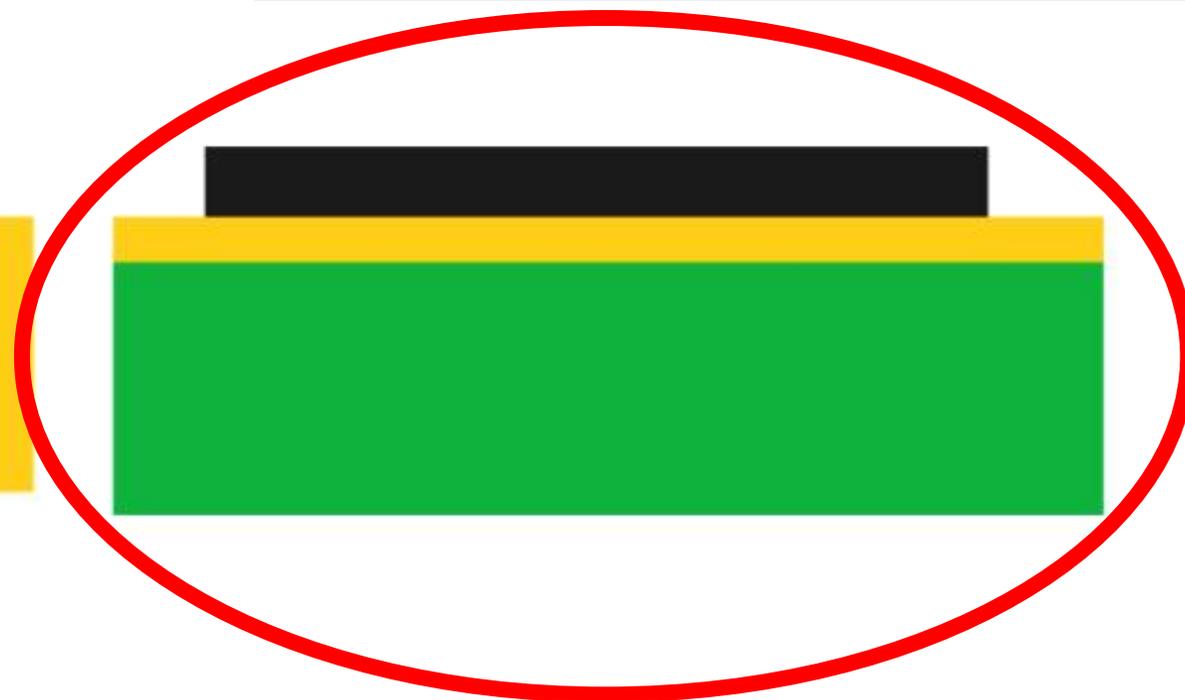


# БАТАРЕИ МОЩНОСТЬЮ 500-600 Вт

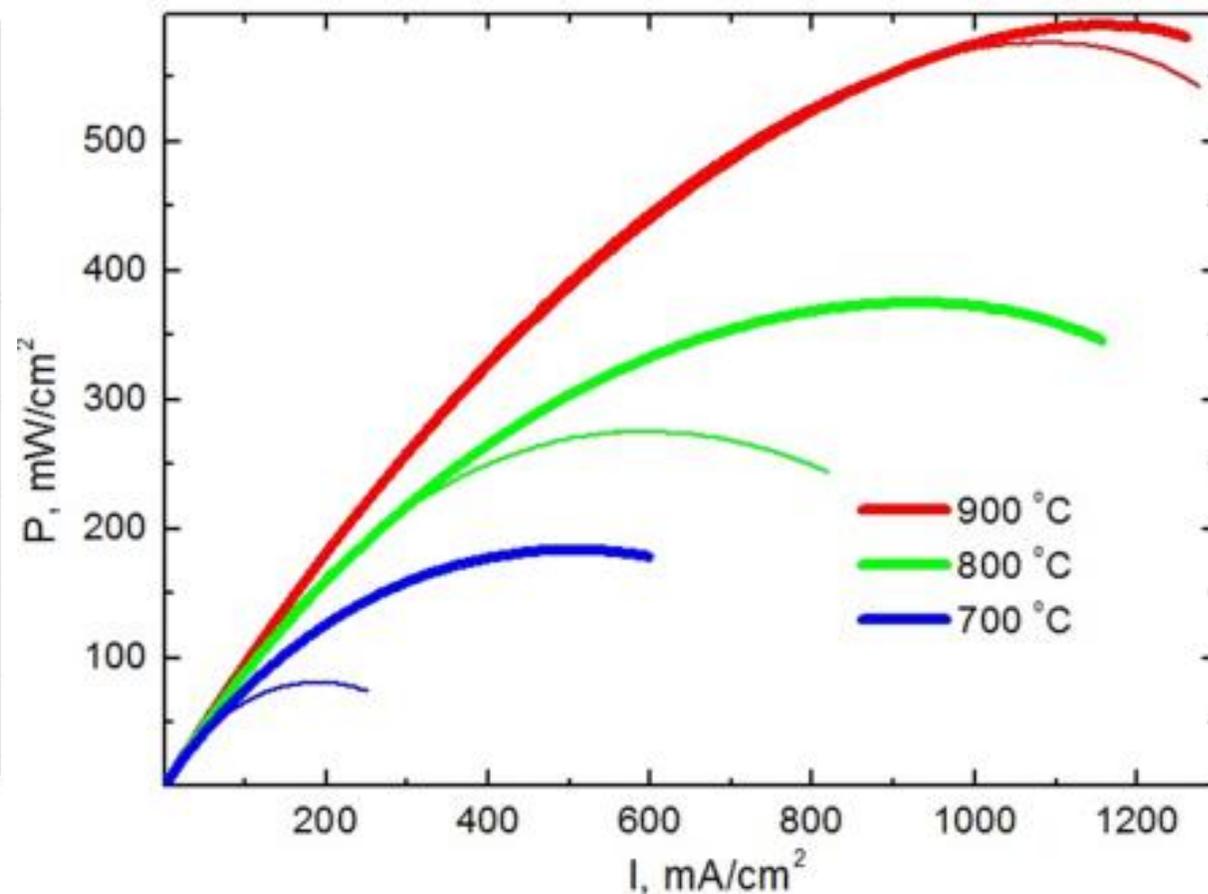
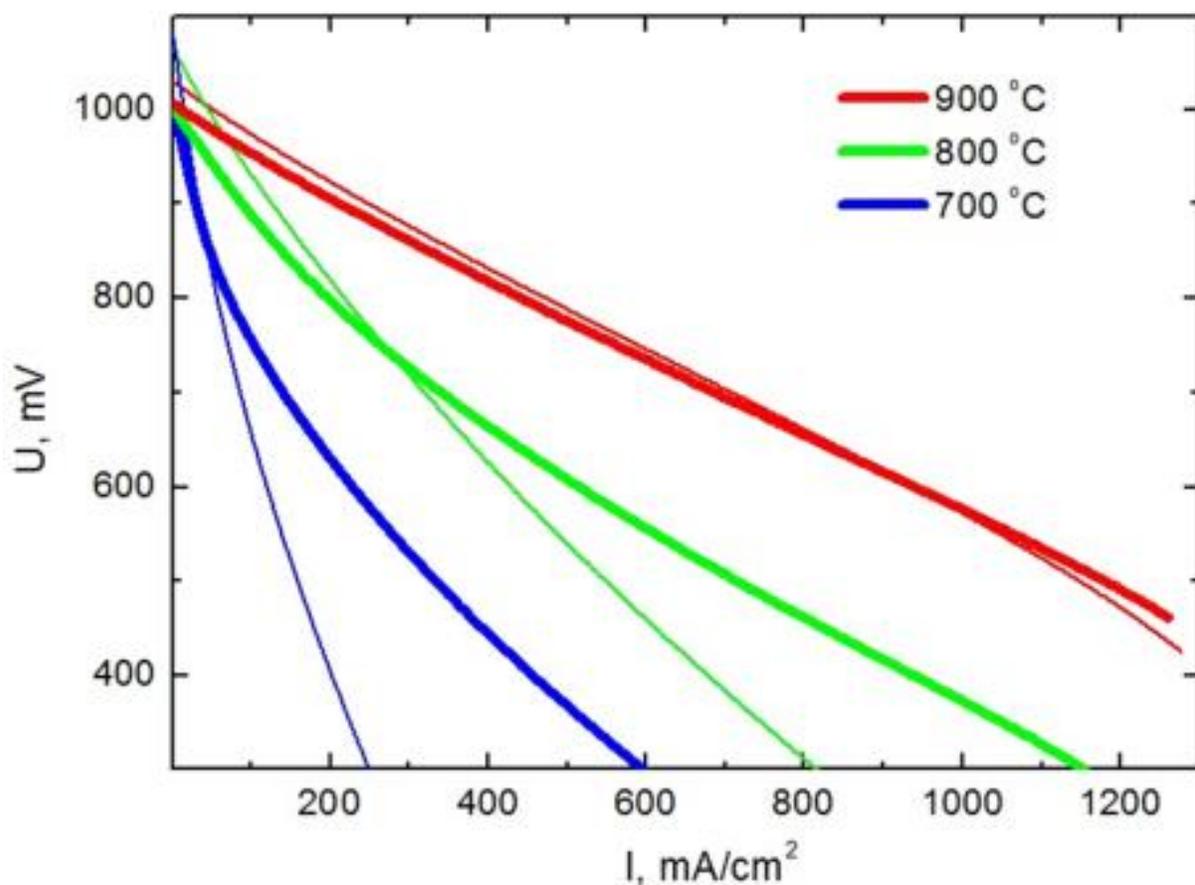


Вольтамперные и мощностные характеристики батареи ТОТЭ мощностью 500 Вт





# СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАНАРНЫХ ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ И АНОДОМ

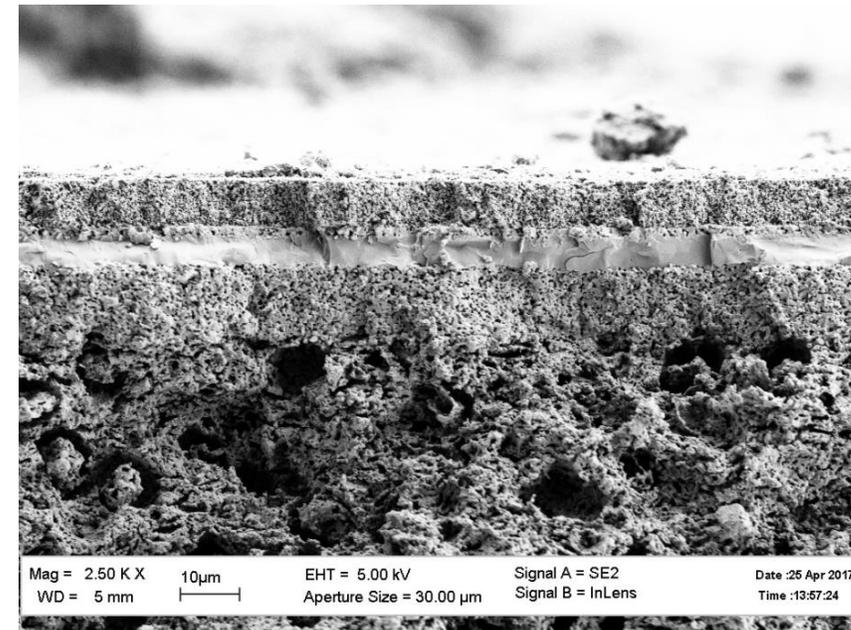
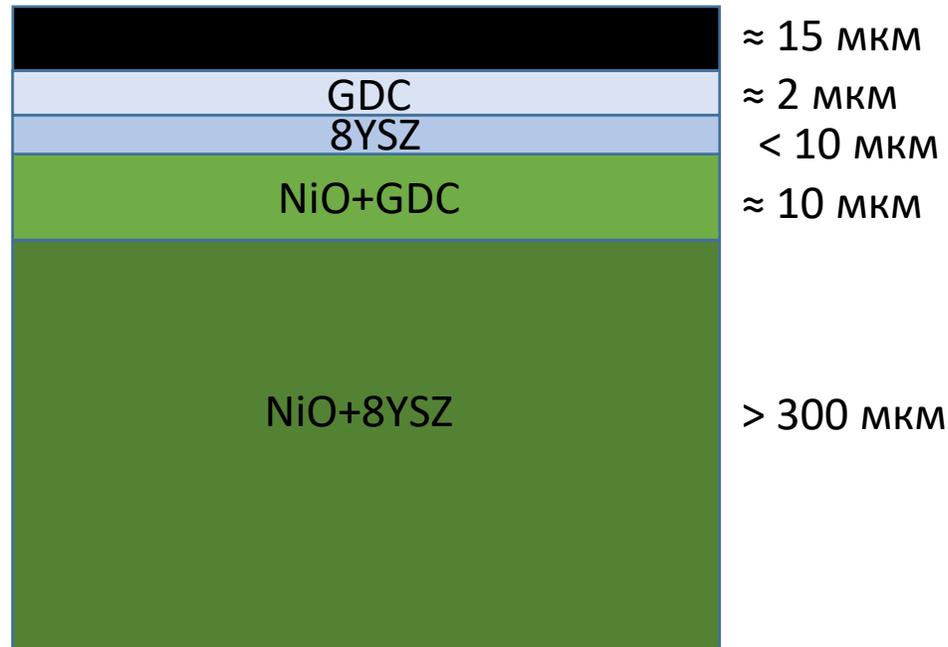


ТОТЭ с поддерживающим анодом демонстрируют существенно лучшие характеристики, чем ТОТЭ с поддерживающим электролитом, особенно в среднетемпературной области

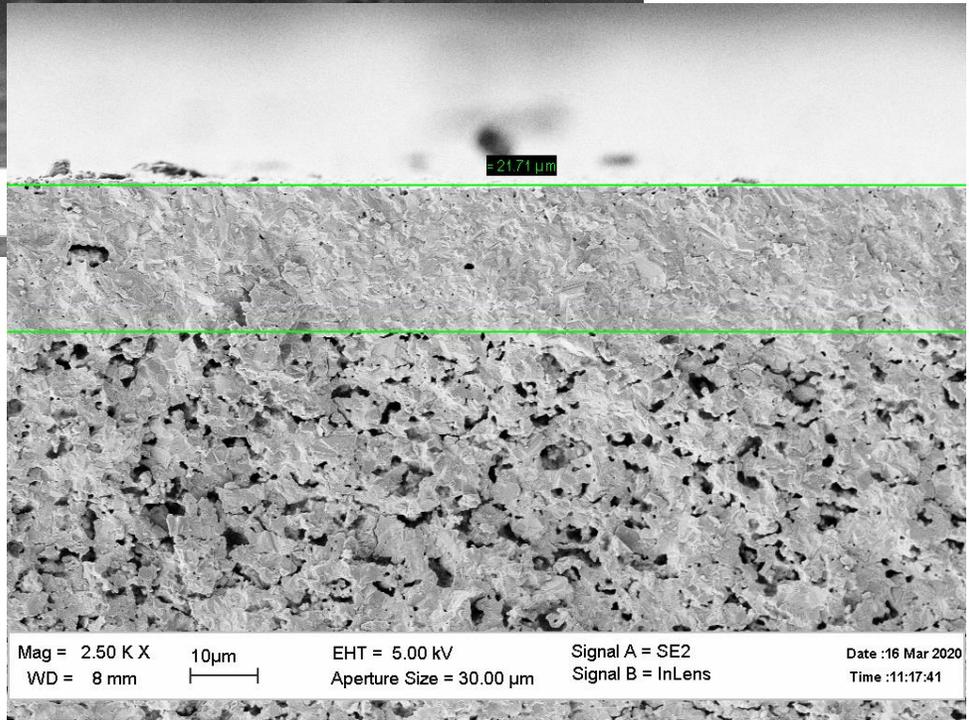
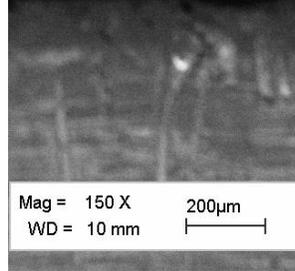
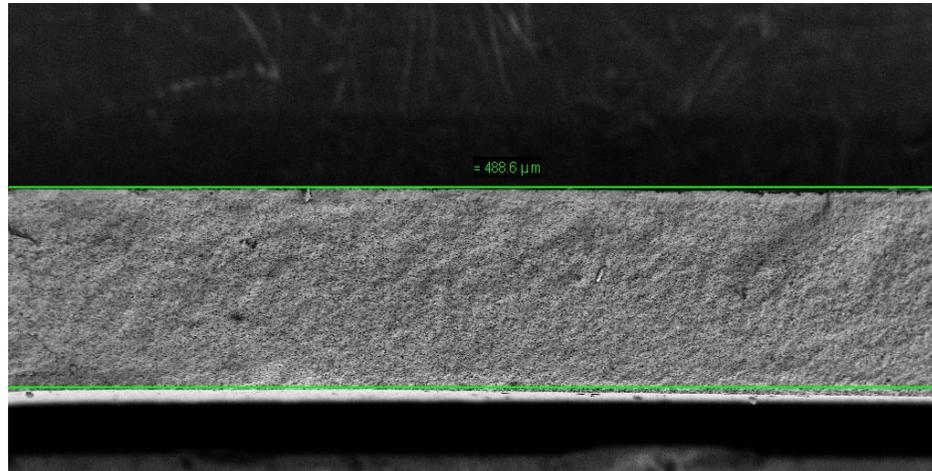
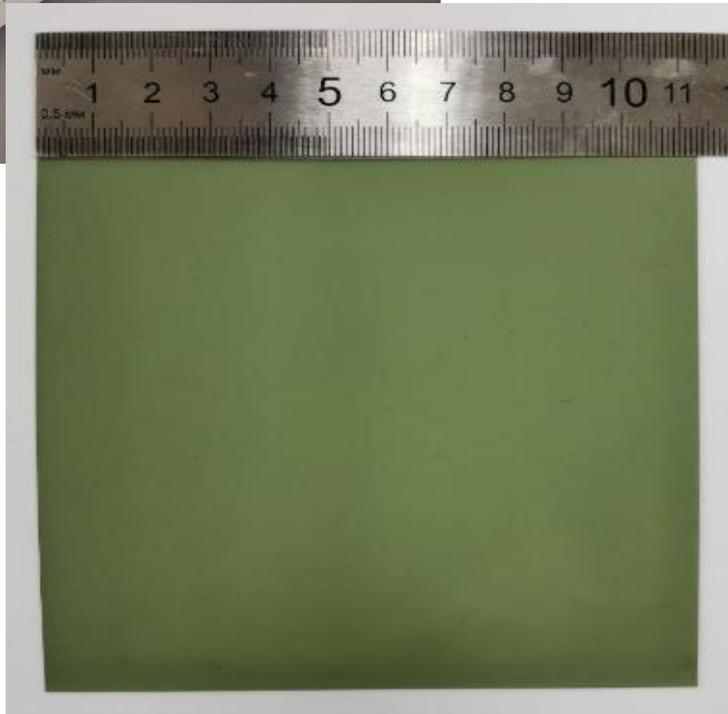


Научно-исследовательские по разработке двухслойных несущих анодных подложек проводятся работы коллективом организаций:

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



# РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ ПОДЛОЖКИ



# РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

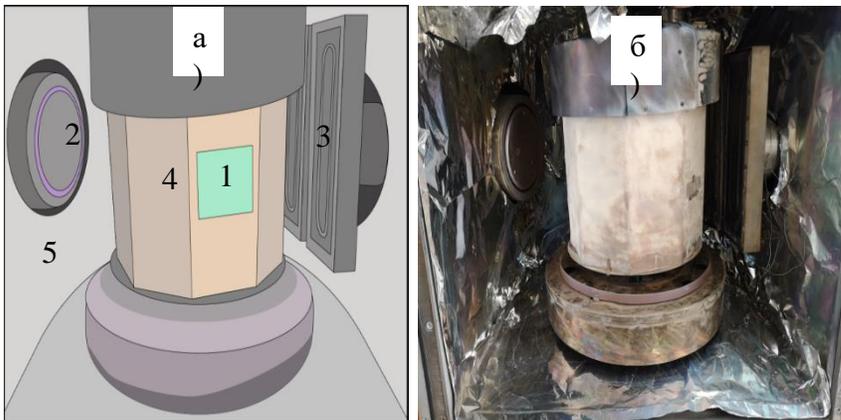
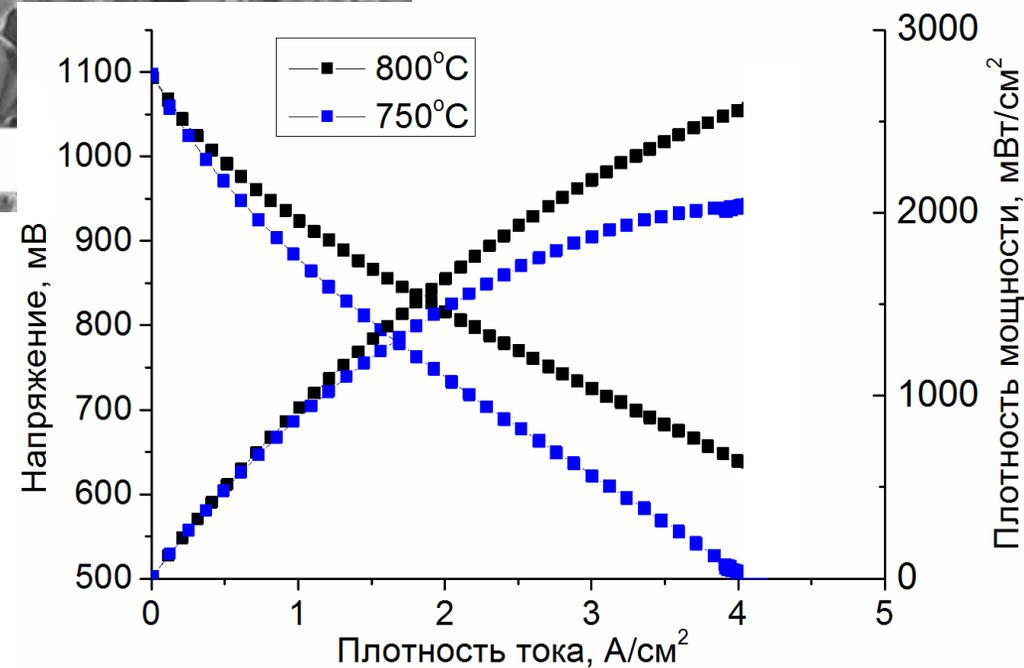
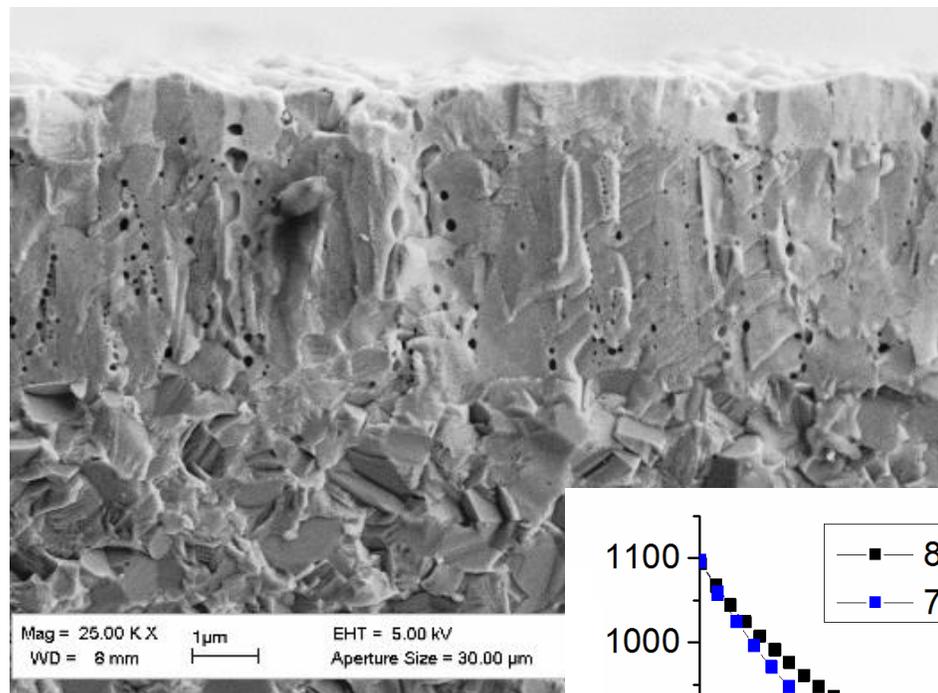
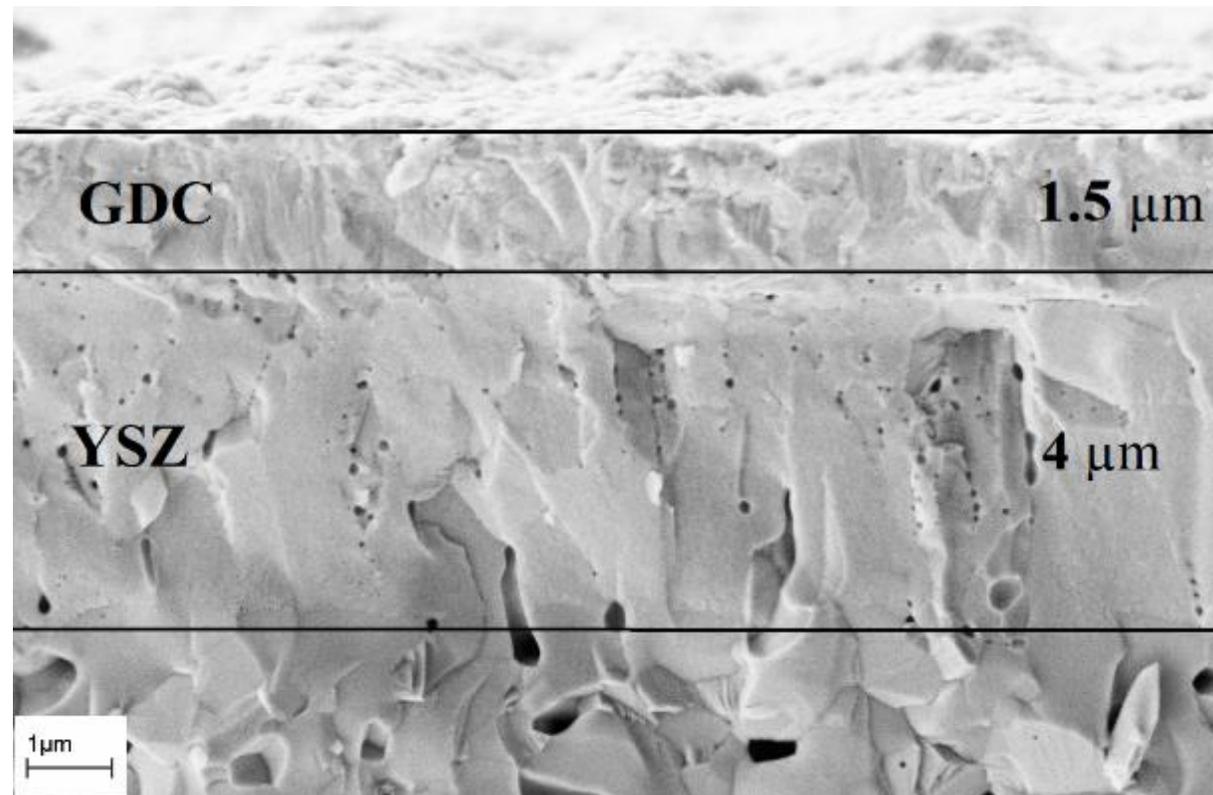
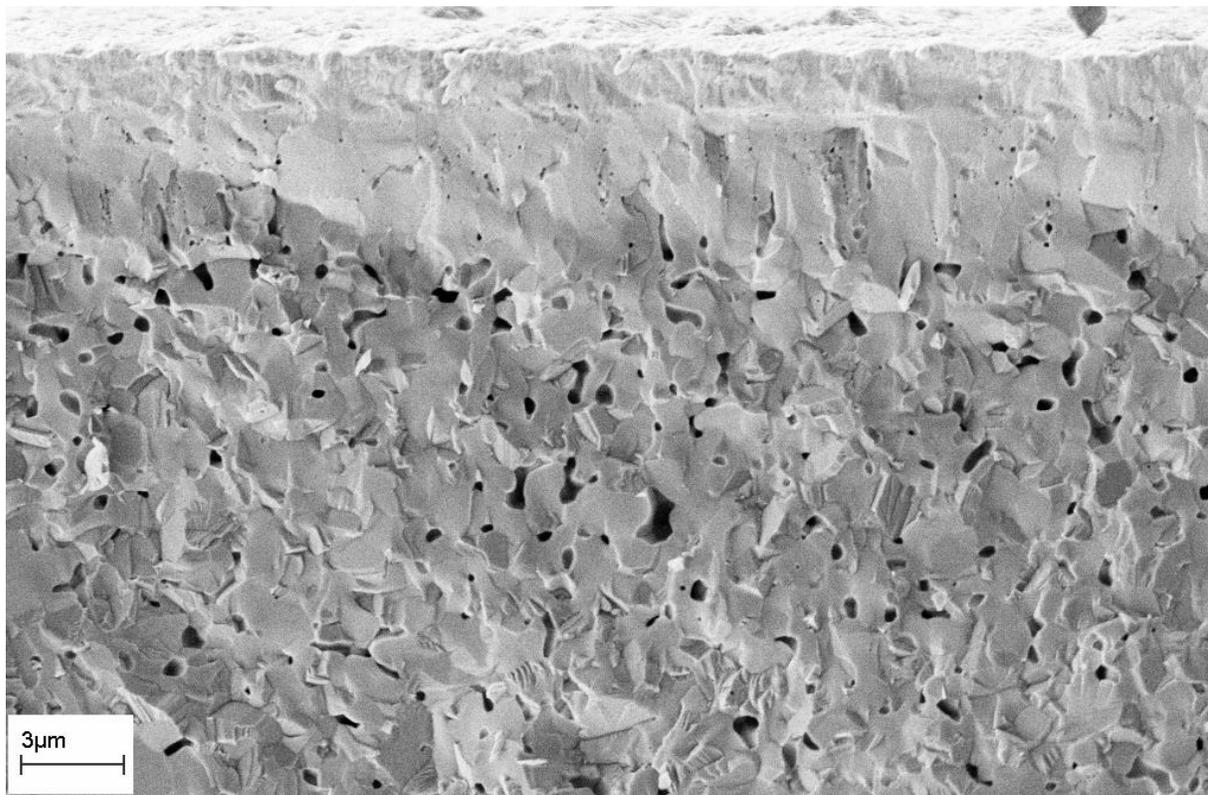


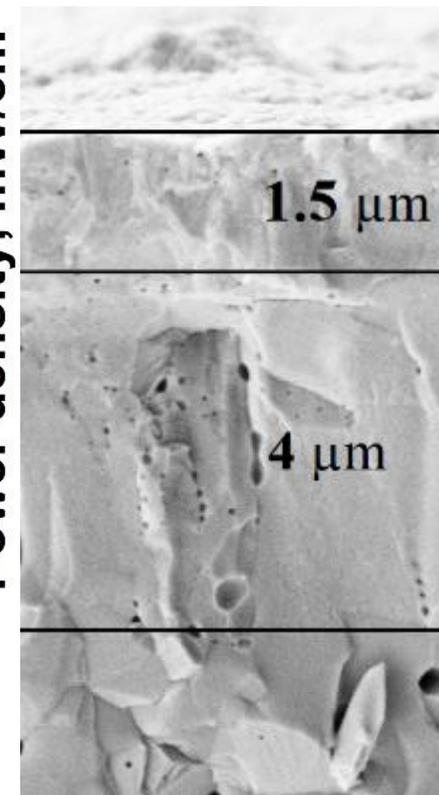
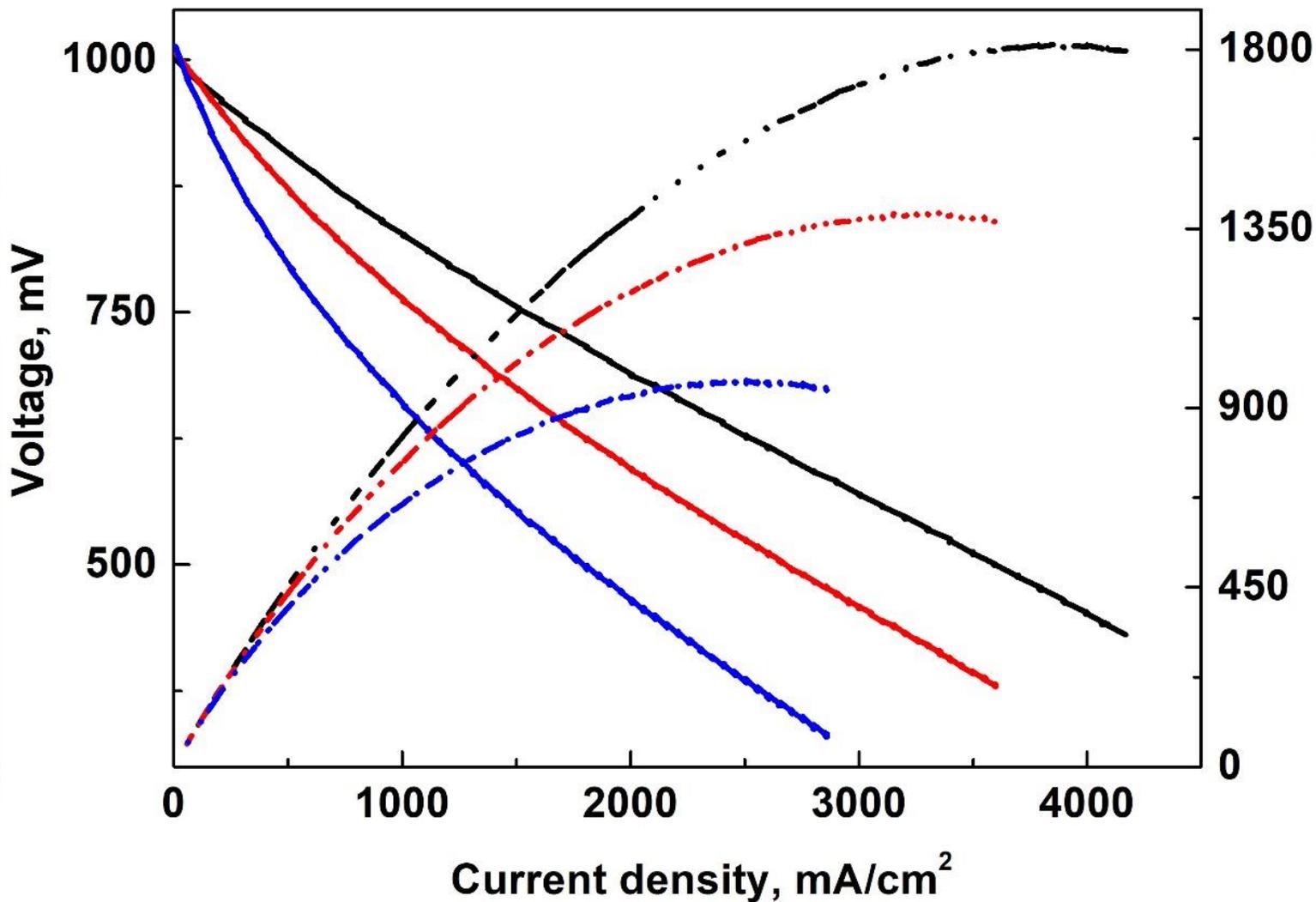
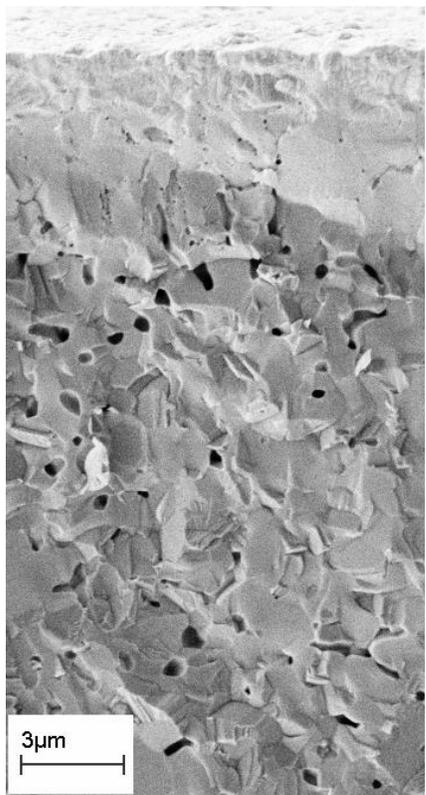
Схема (а) и фото (б) вакуумной установки для дуального магнетронного осаждения слоев 8YSZ и GDC: 1 – анодная подложка, 2 – источник ионов, 3 – дуальная MPC, 4 – вращающийся барабан, 5 – вакуумная камера



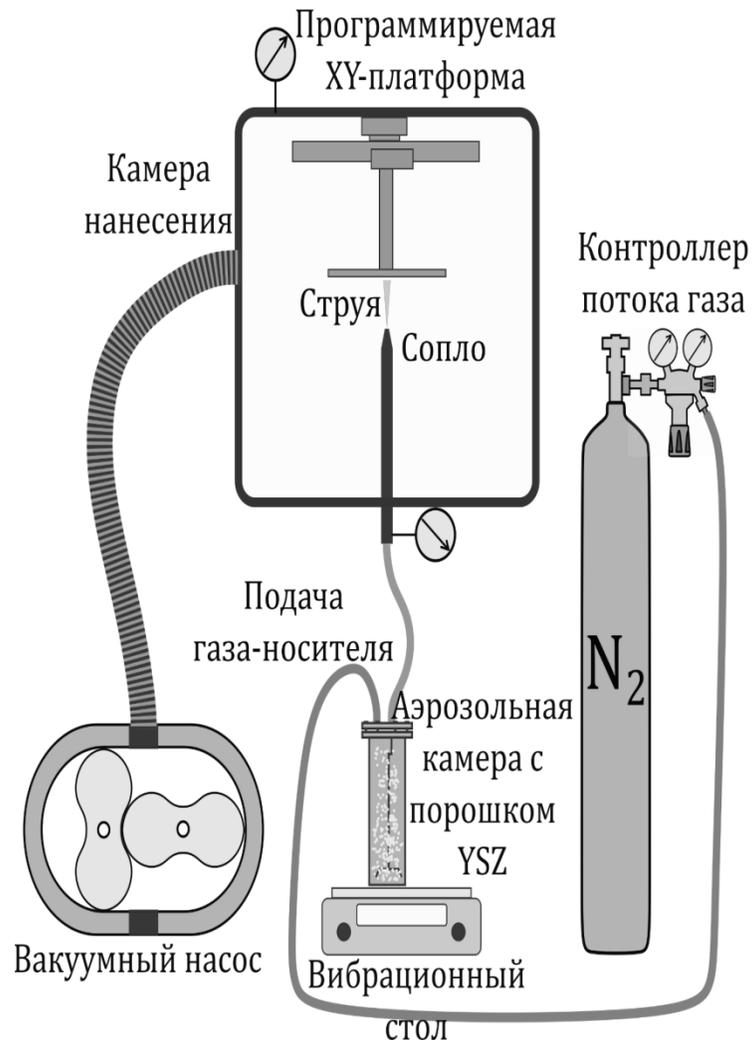
# РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА



# РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА



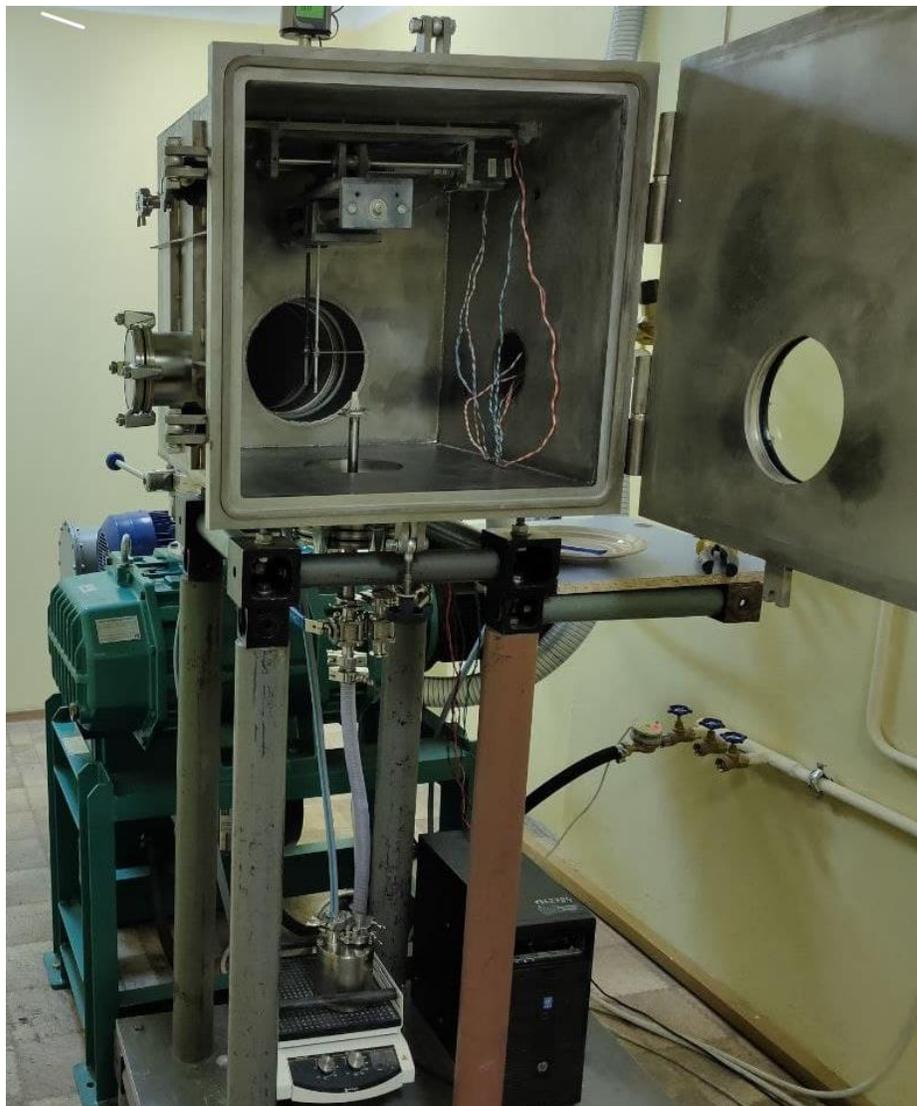
# РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА



- + 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

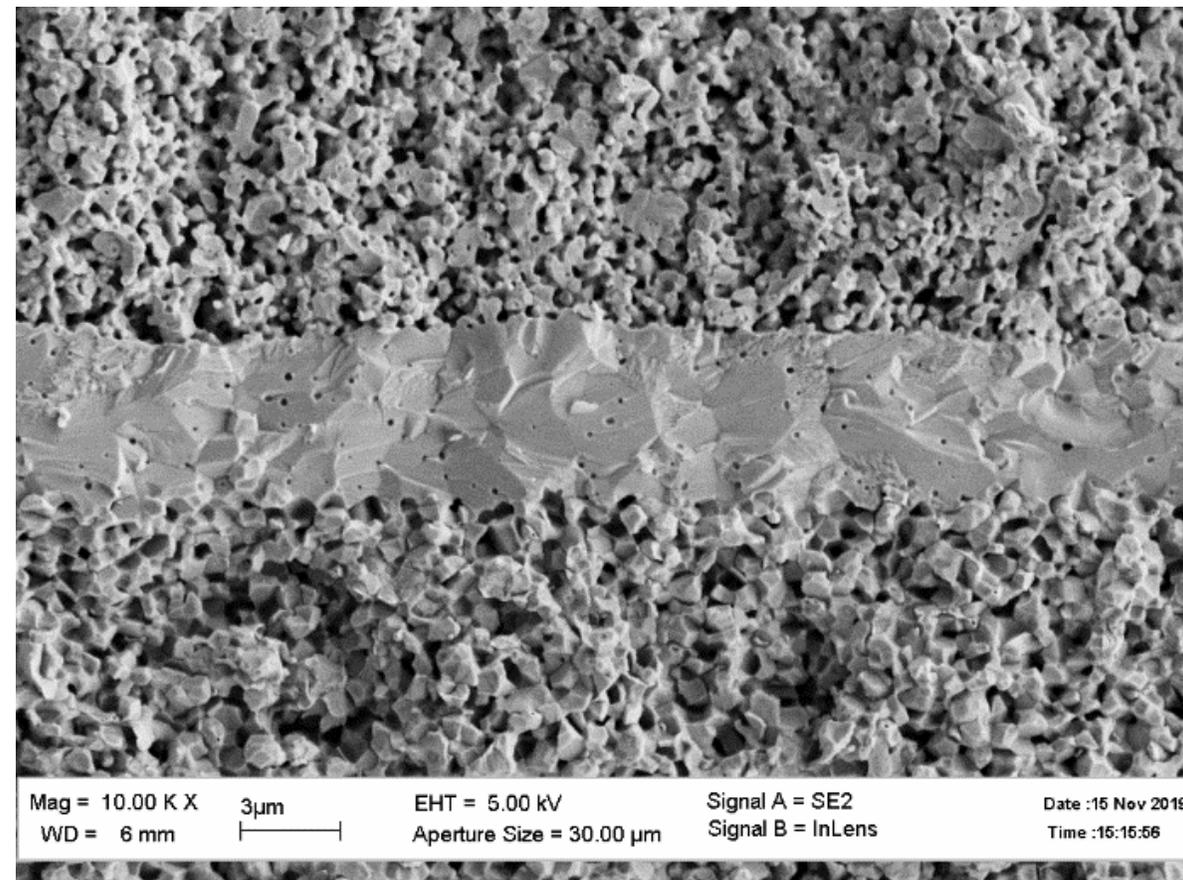
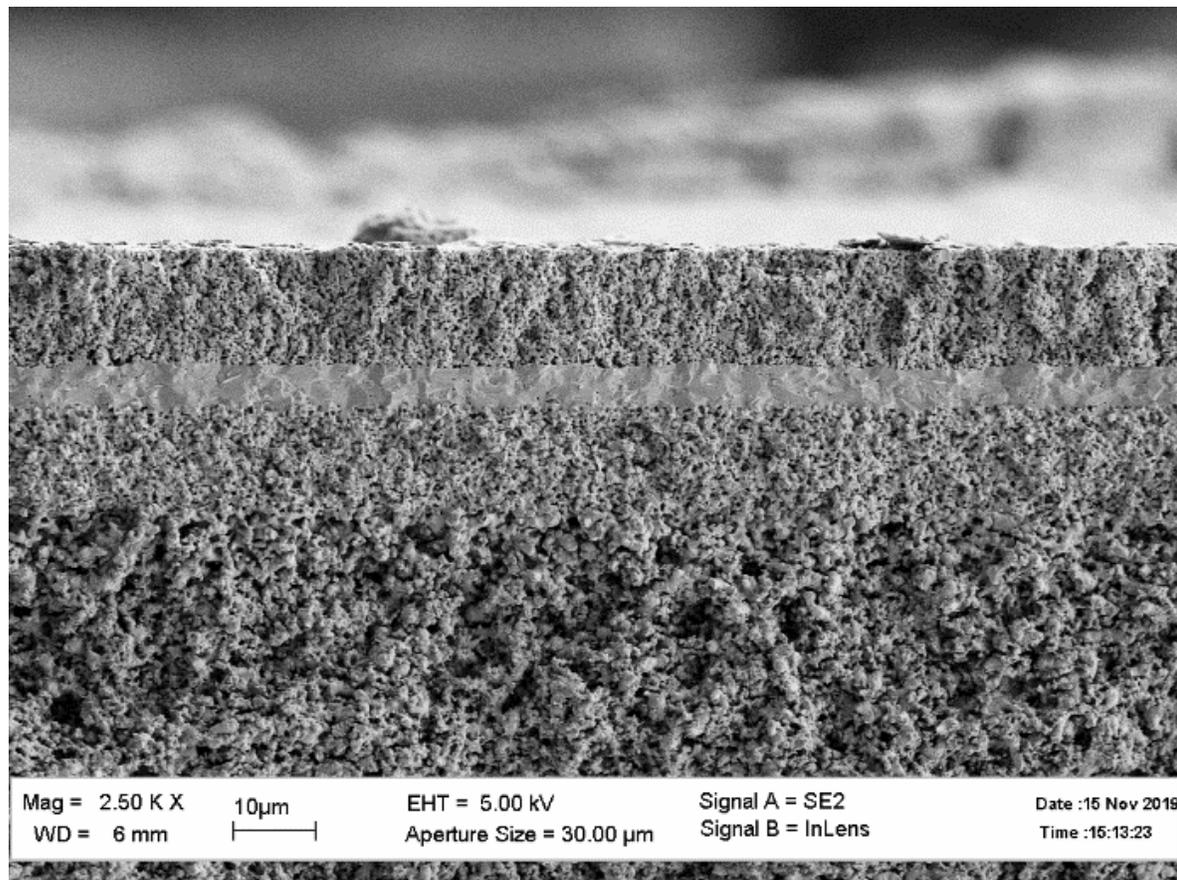


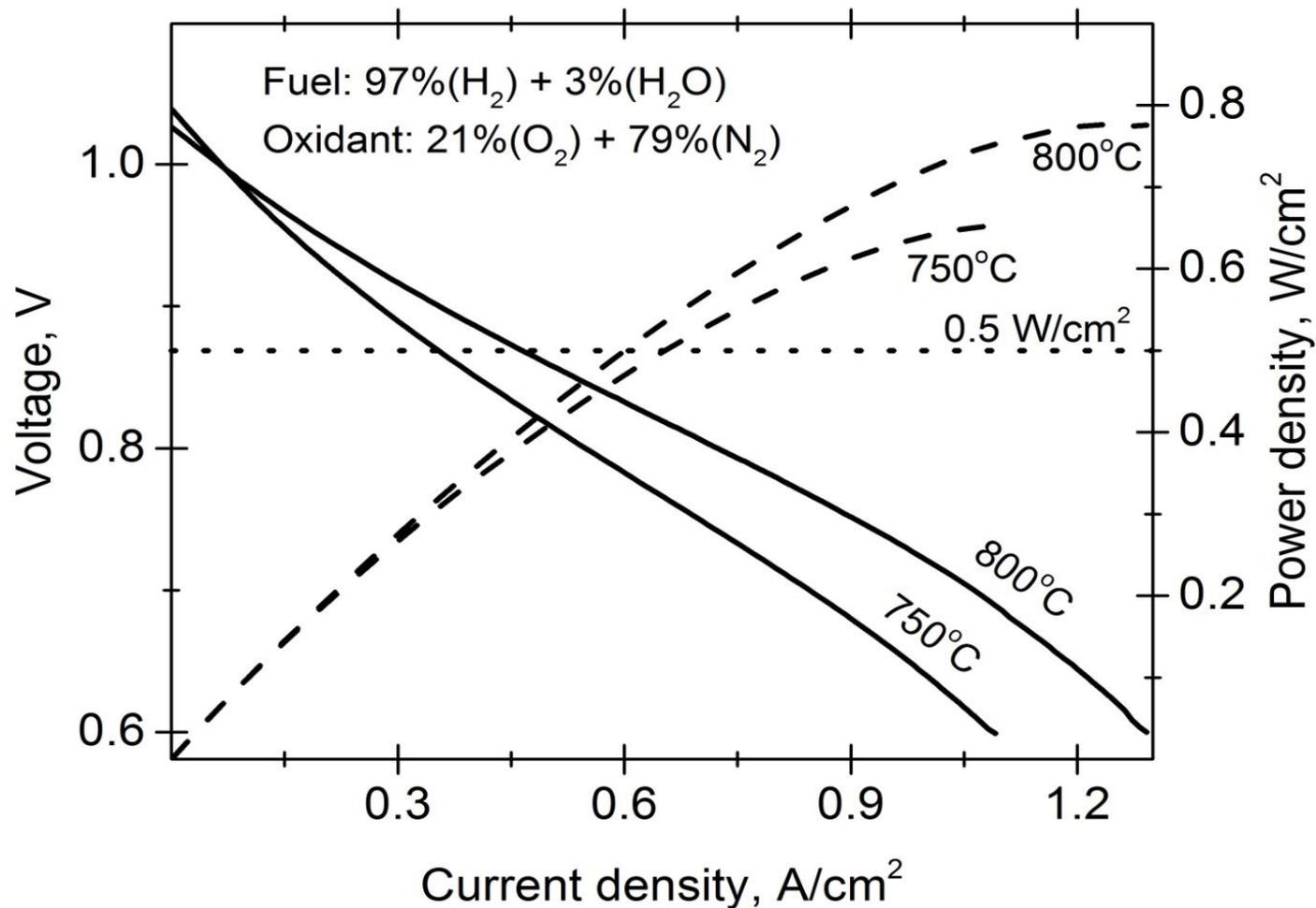
# РАЗРАБОТКА ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ – НАНЕСЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА



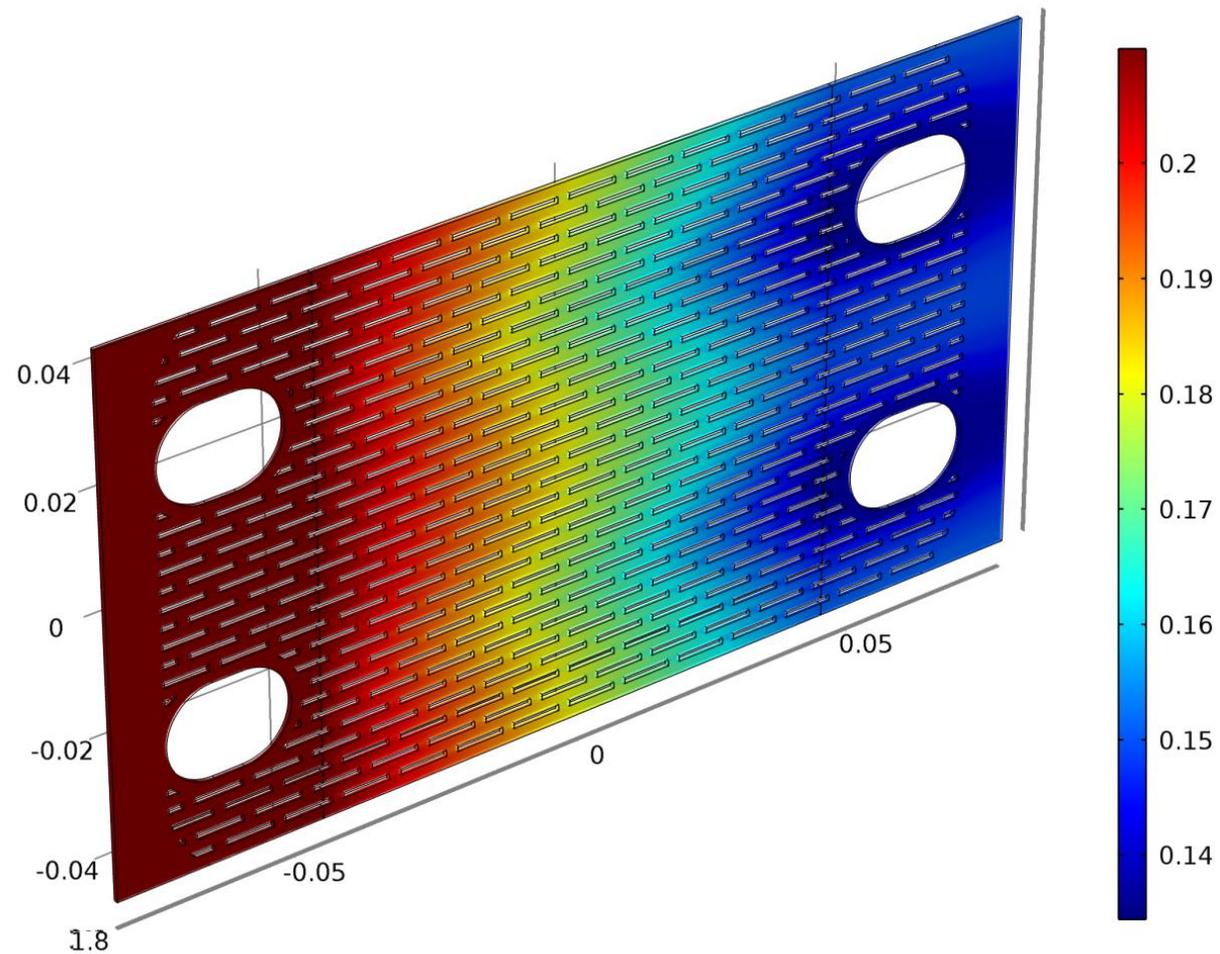
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР – ООО «БИРЮЧ» (ГРУППА КОМПАНИЙ «ЭФКО»)



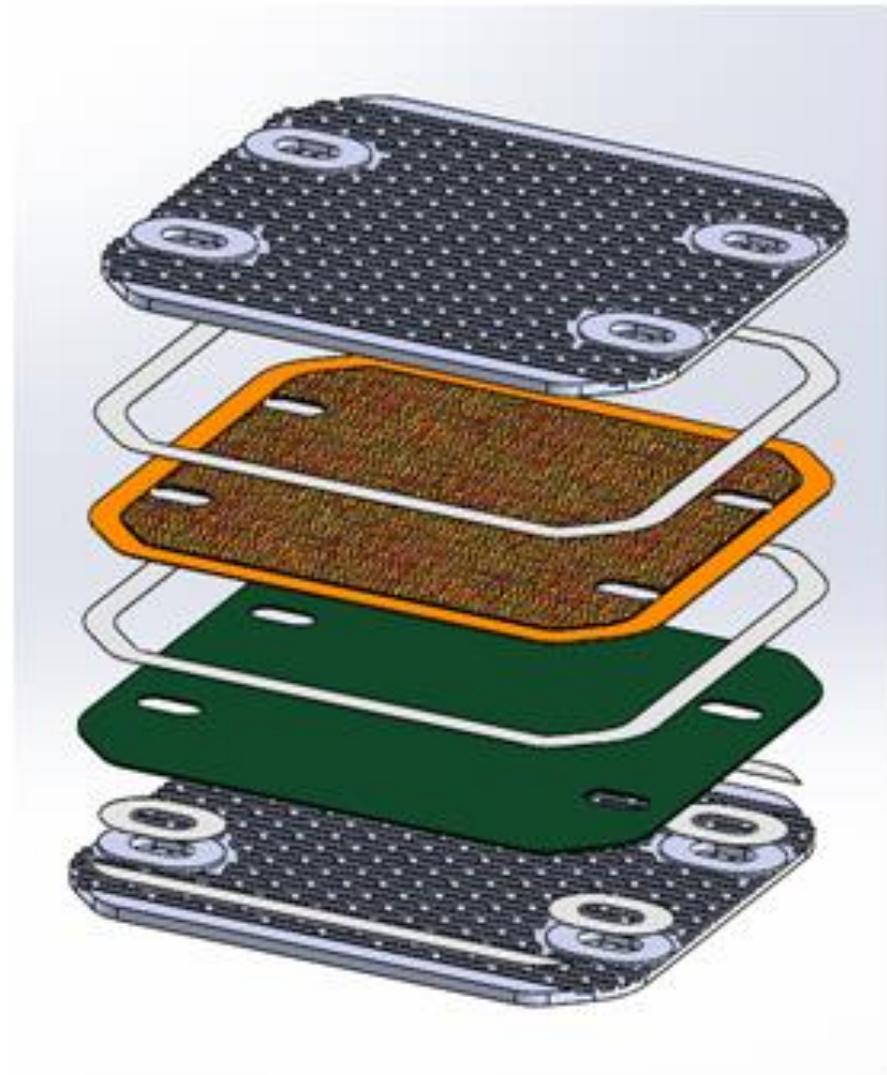
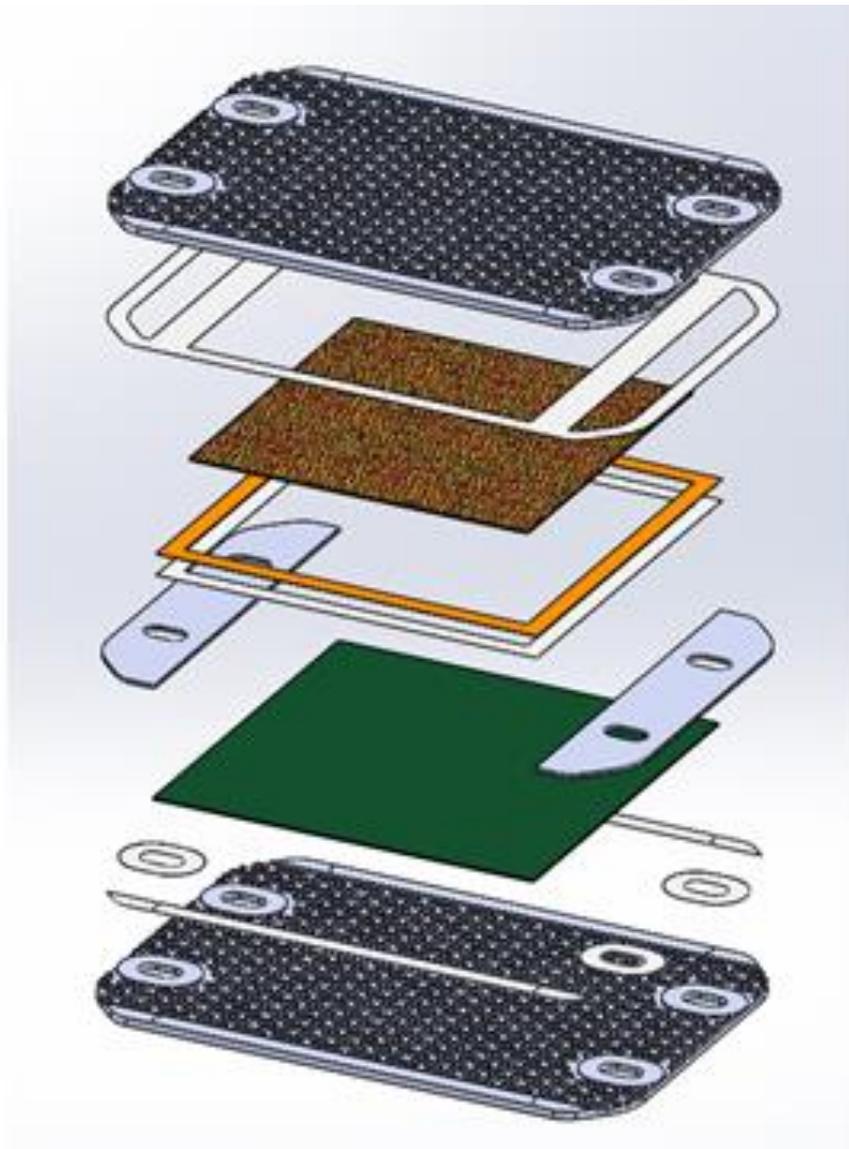




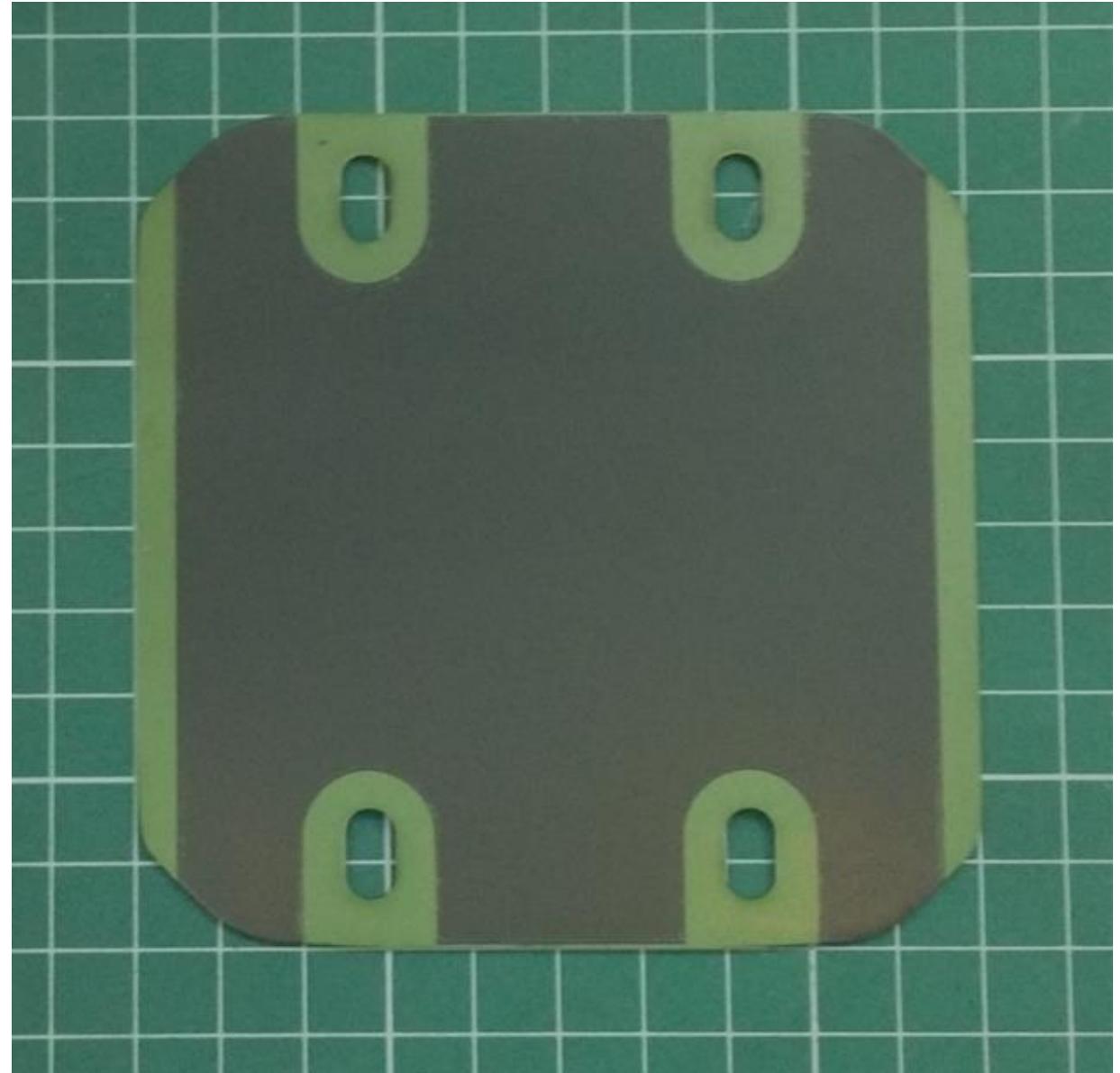
Вольт-амперные и мощностные характеристики ТОТЭ анод-поддерживающей конструкции с тонкопленочным электролитом и защитным GDC подслоем, изготовленными методом холодного аэрозольного осаждения в вакууме, и LSC катодом, изготовленными методом трафаретной печати, полученные при 750 и 800 °С.



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



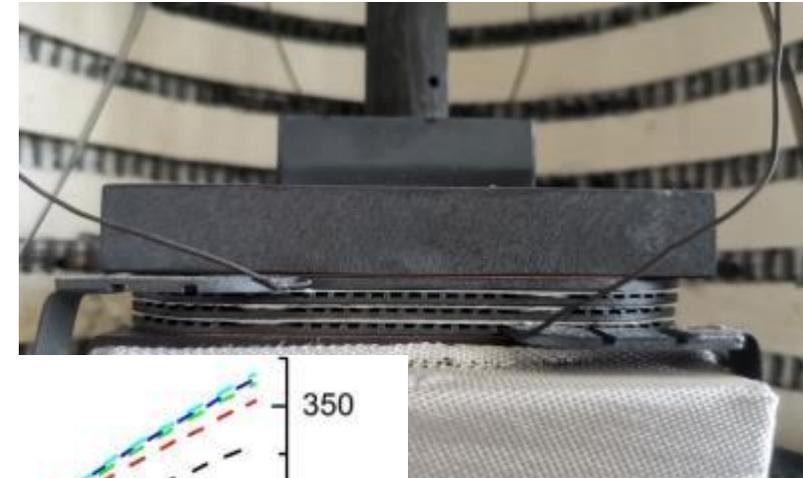
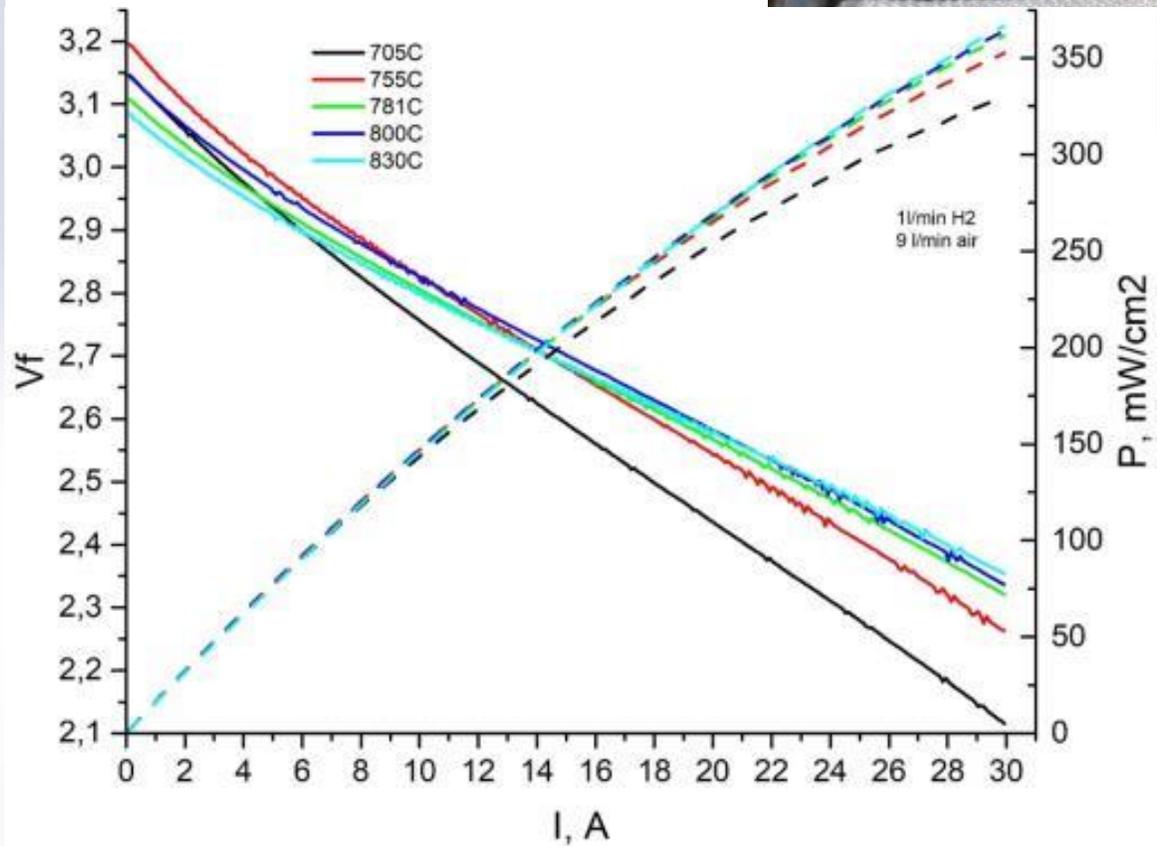
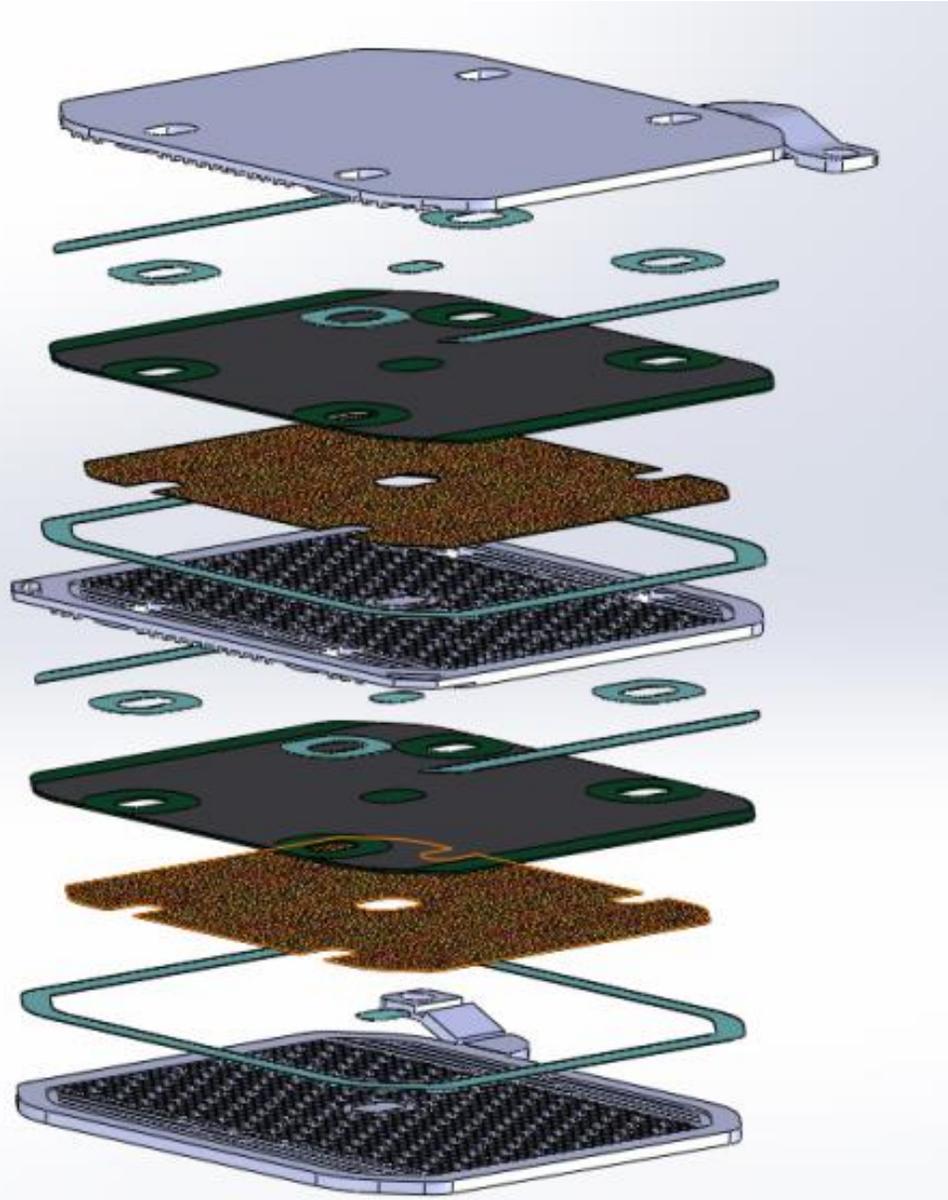
# ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СБОРОК ТОТЭ с ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ АНОДОМ

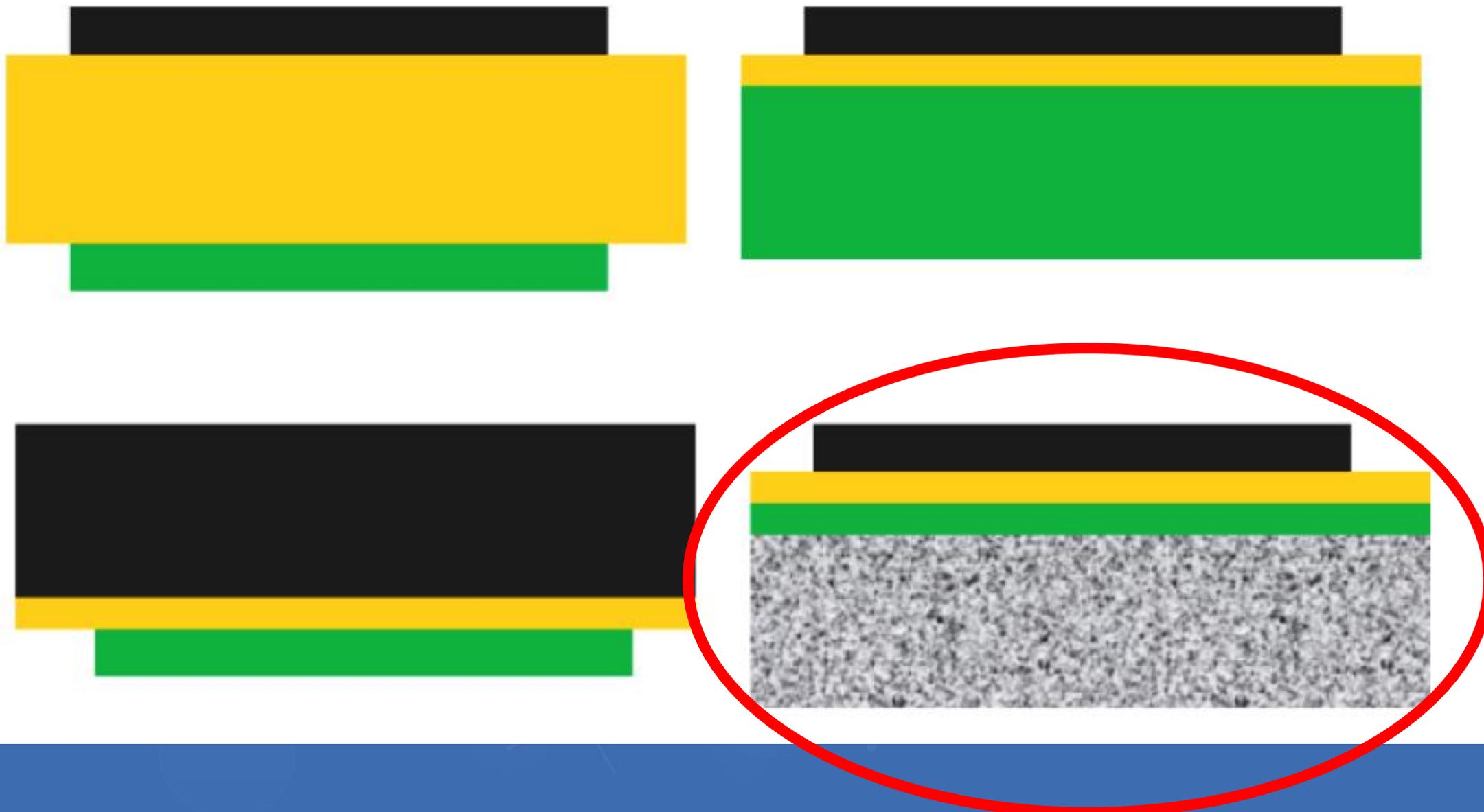


ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР – ООО «БИРЮЧ» (ГРУППА КОМПАНИЙ «ЭФКО»)

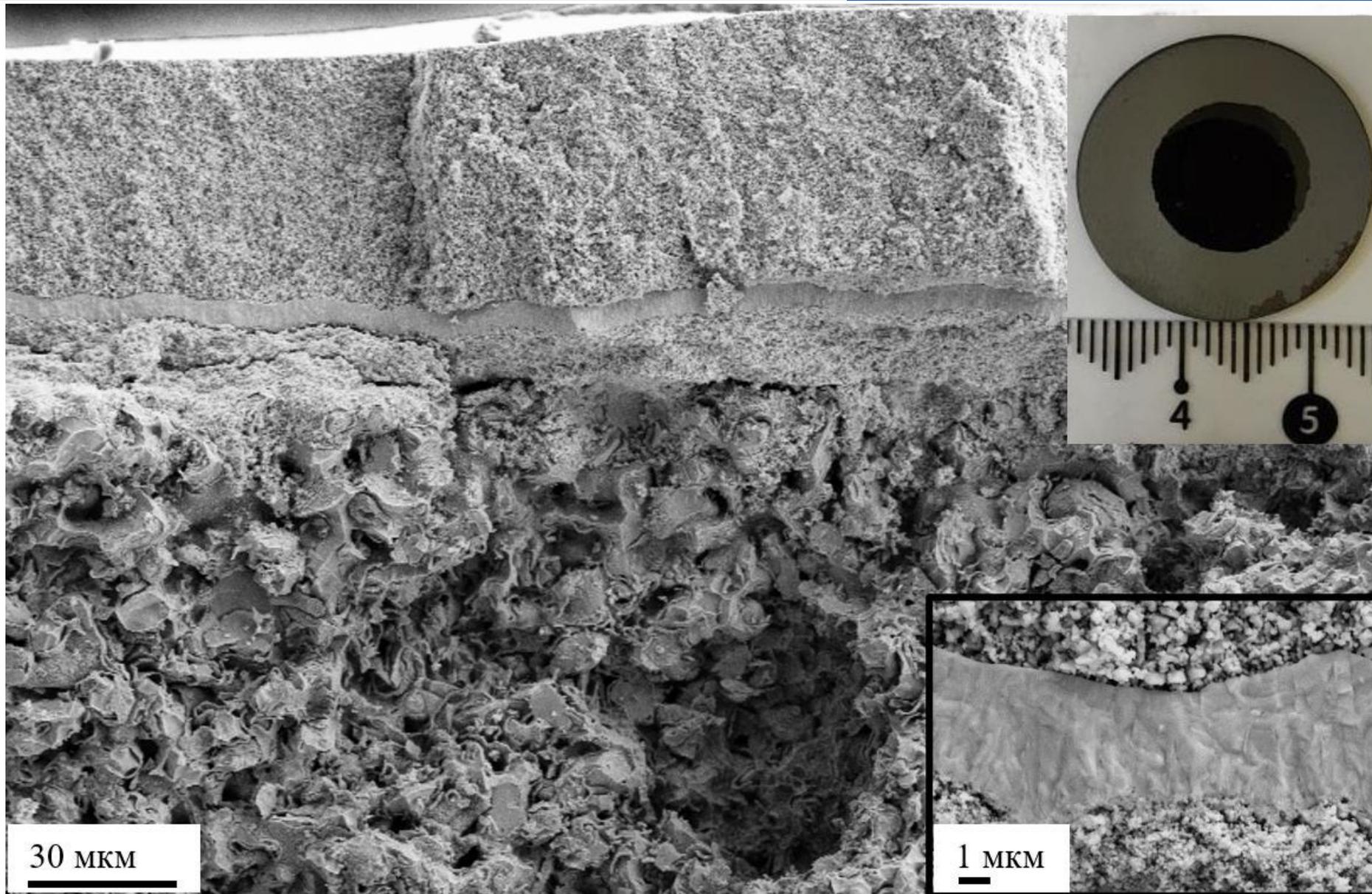


# БАТАРЕИ ТОТЭ НА НЕСУЩЕМ АНОДЕ С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ





# РАБОТЫ ПО ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКОЙ

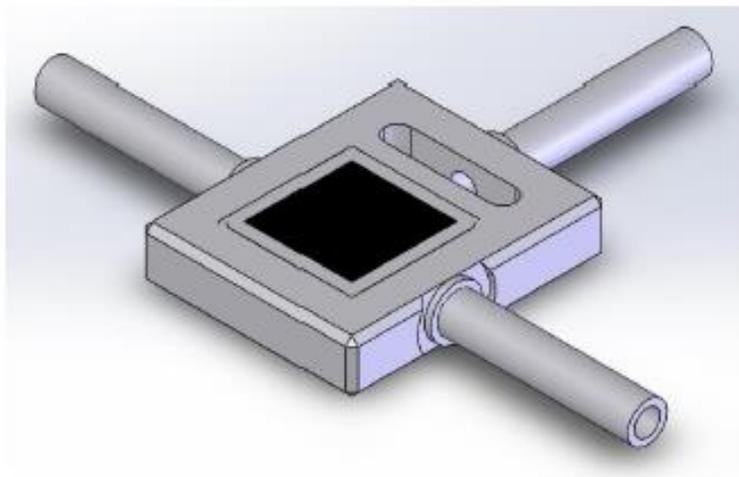


ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР – ООО «БИРЮЧ» (ГРУППА КОМПАНИЙ «ЭФКО»)

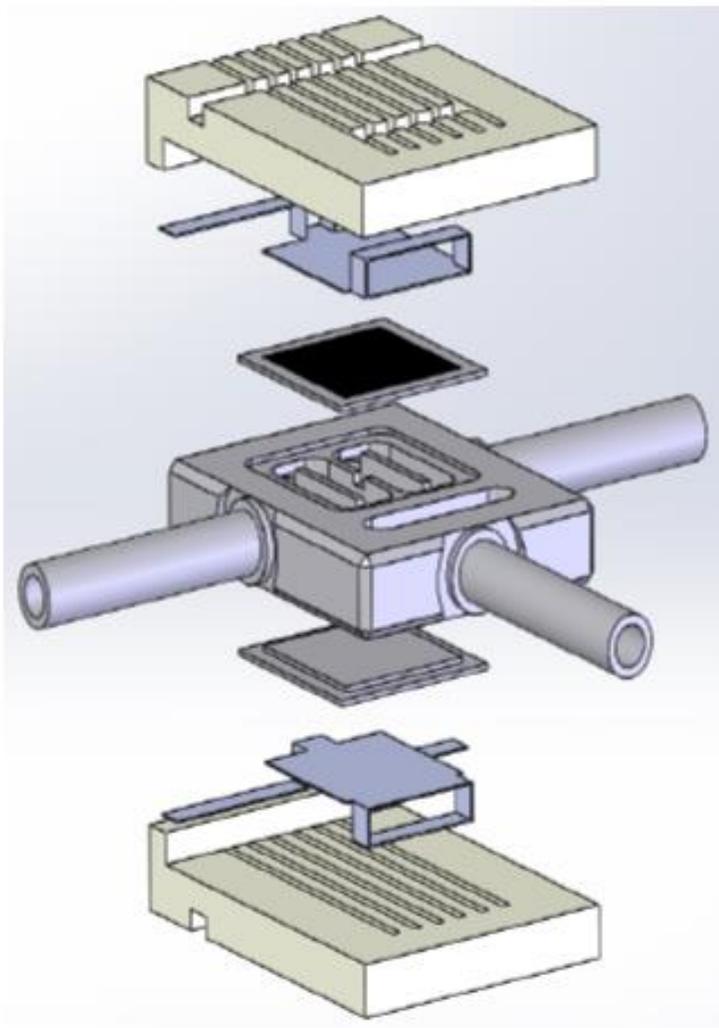


# РАБОТЫ ПО ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКОЙ

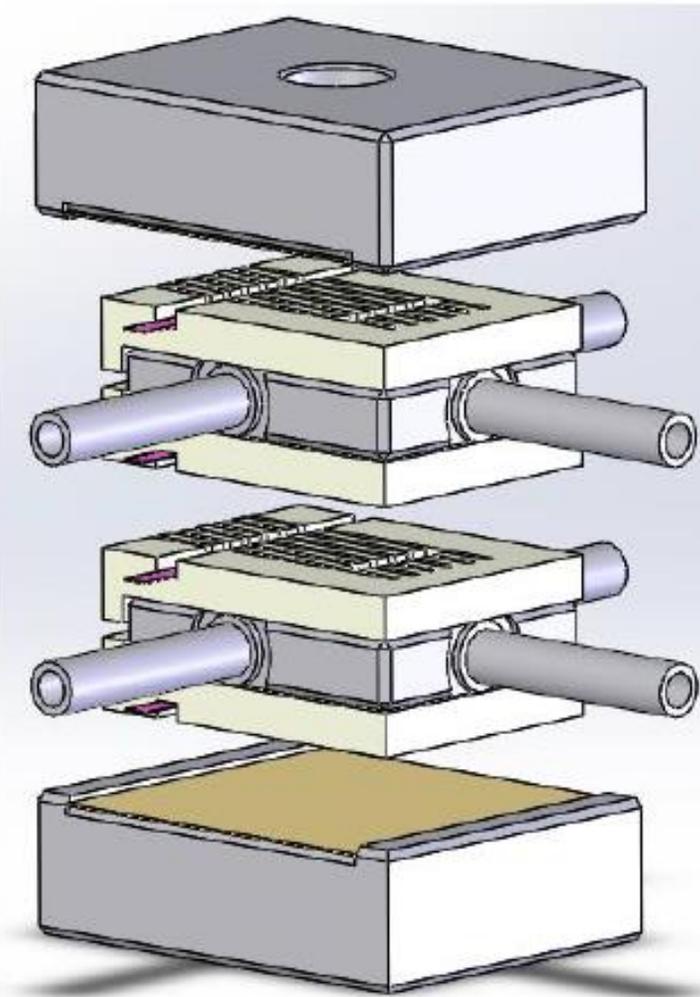
Монополярная пластина



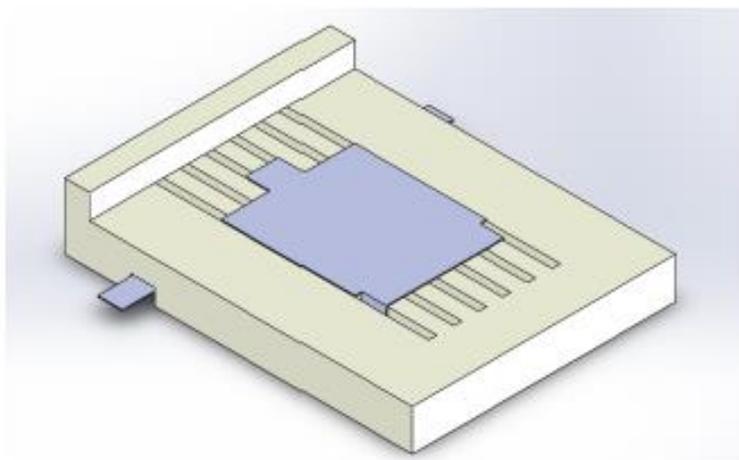
Повторяемый блок

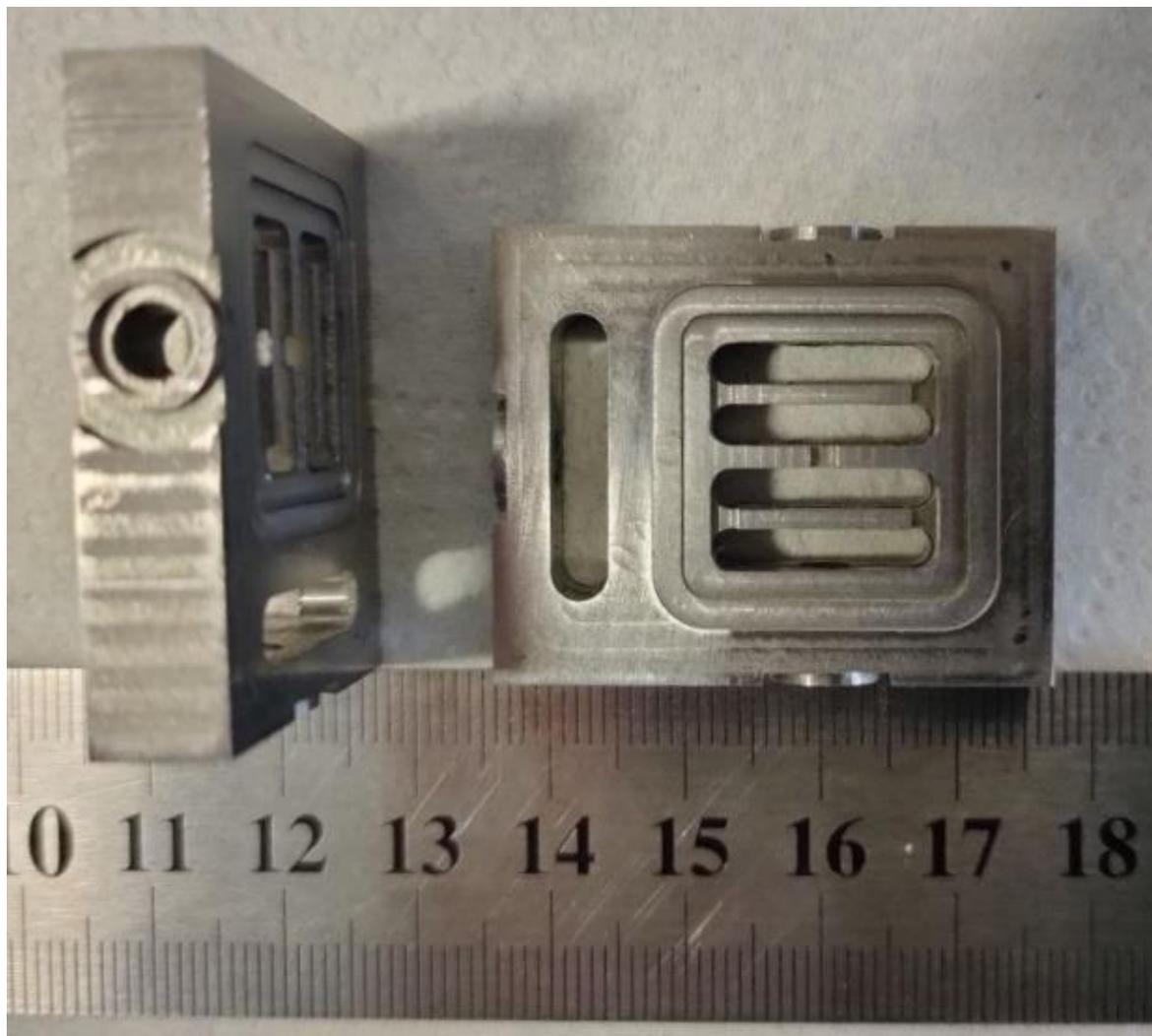


Сборка из 4 МПТОТЭ

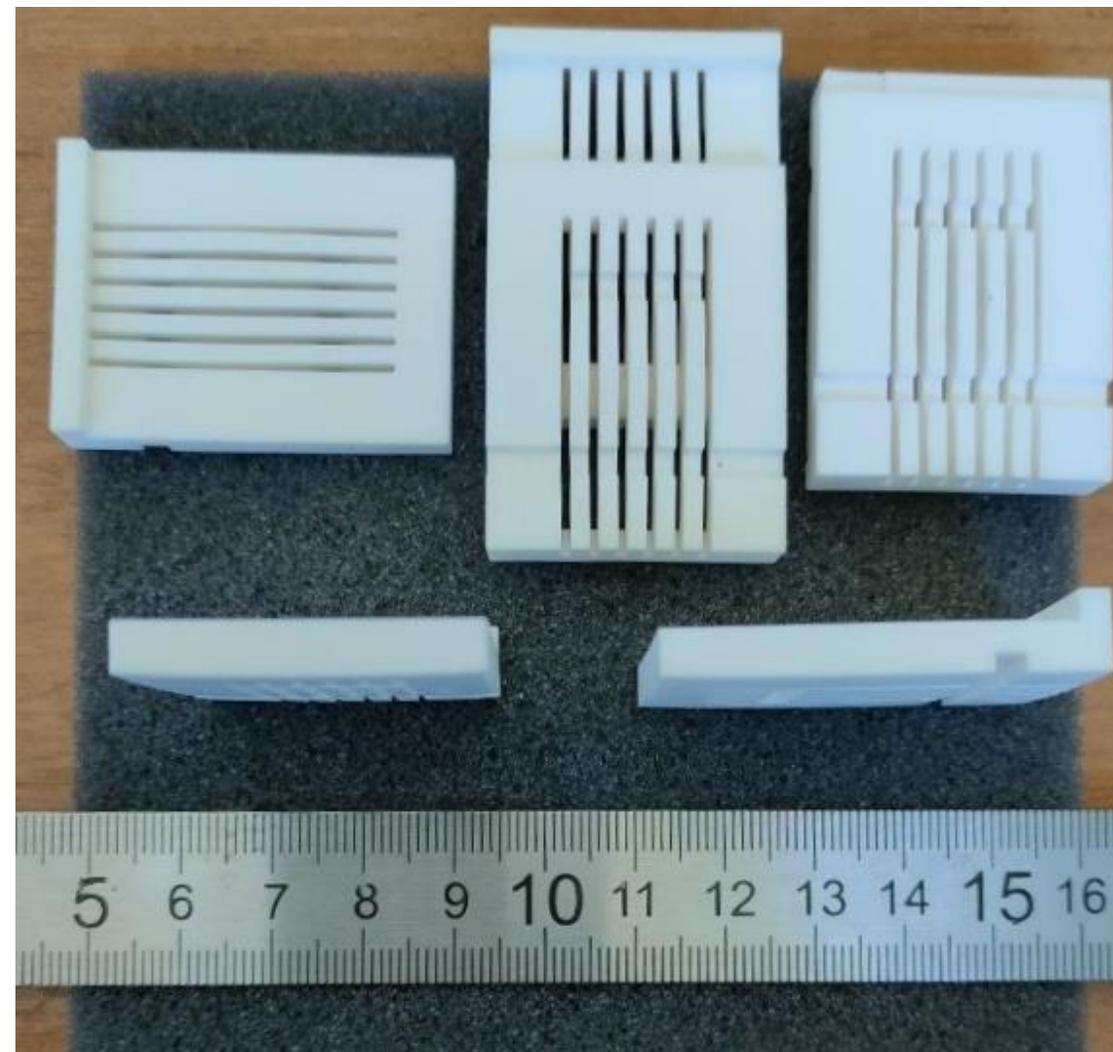


Керамический разделитель



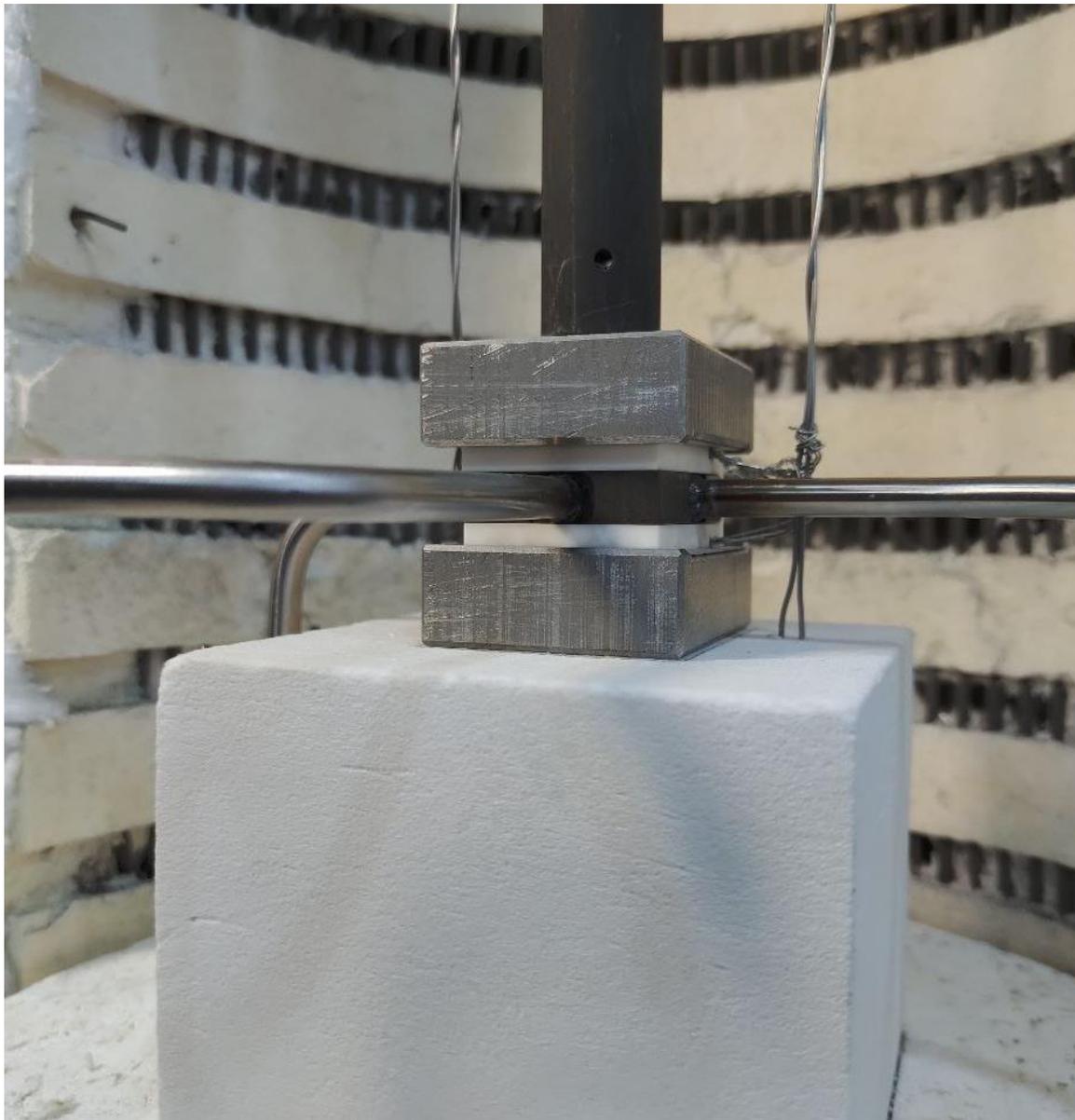


Монополярная пластина



Керамический разделитель

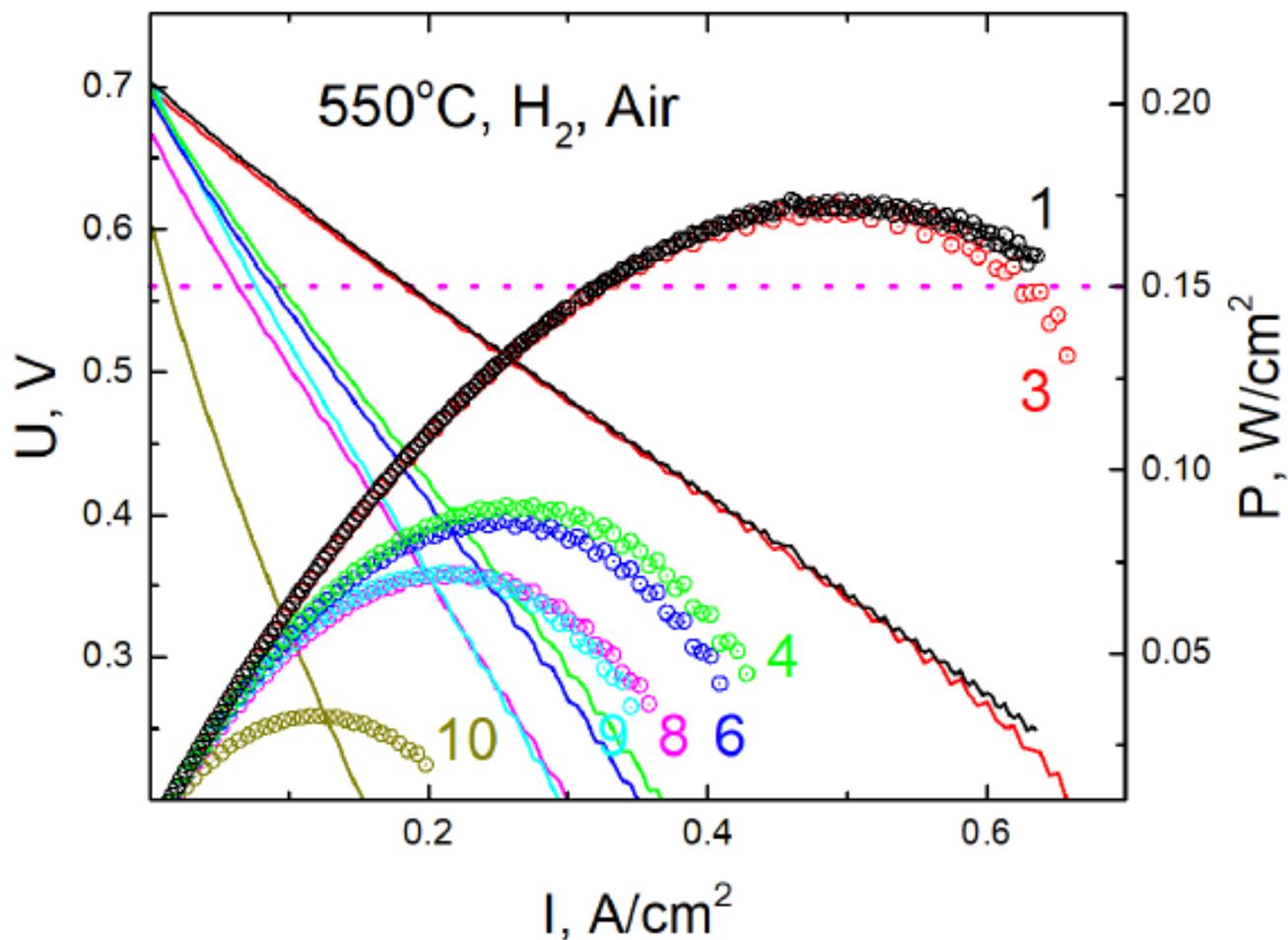
# РАБОТЫ ПО ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКОЙ



ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР – ООО «БИРЮЧ» (ГРУППА КОМПАНИЙ «ЭФКО»)



# РАБОТЫ ПО ТОТЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКОЙ



ВАХ и мощностные зависимости сборки из 2 МПТОТЭ, измеренные после последовательных циклов нагрева

№ цикла	Минимальная T, °C	Максимальная T, °C	Скорость нагрева, °C/час	Максимальная мощность при 550°C, мВт/см <sup>2</sup>
1	550	950	30	174
2	200	550	40	173
3	200	550	150	174
4	RT	550	300	90
5	RT	550	500	91
6	RT	550	500	86
7	RT	550	500	73
8	RT	550	500	73
9	RT	550	500	73
10	RT	550	500	34



# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ

Электролит-  
поддерживающая  
конструкция



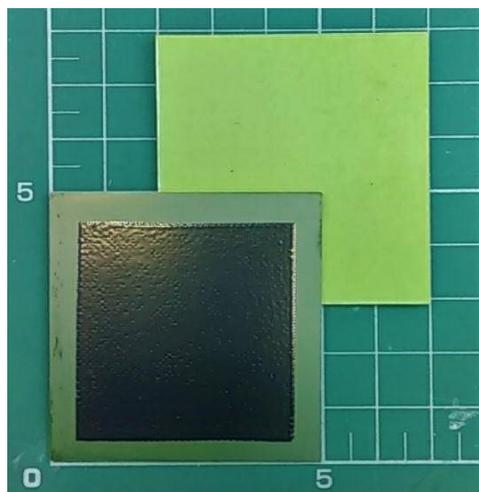
Толщина: 150 – 250 мкм



Анод-поддерживающая  
конструкция



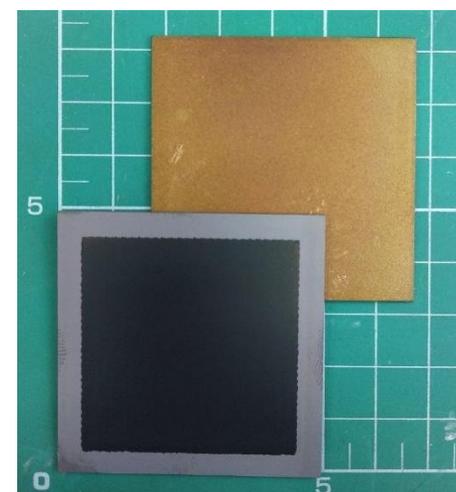
Толщина: 300 – 1000 мкм



Металл-поддерживающая  
конструкция



Толщина: 500 – 2000 мкм



# РАБОТЫ ПО ТОЭЛЭ С ПОДДЕРЖИВАЮЩИМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ – ГЕНЕРАЦИЯ ВОДОРОДА

- + 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
- сложность формирования

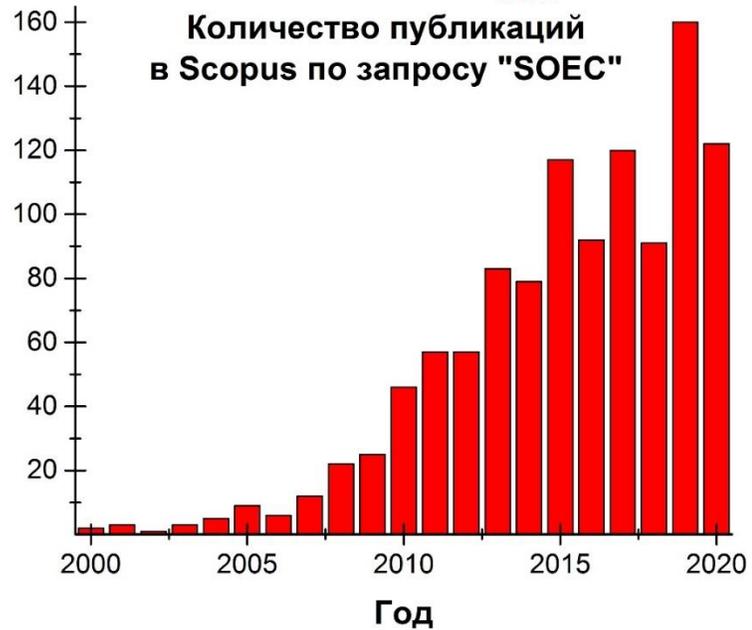
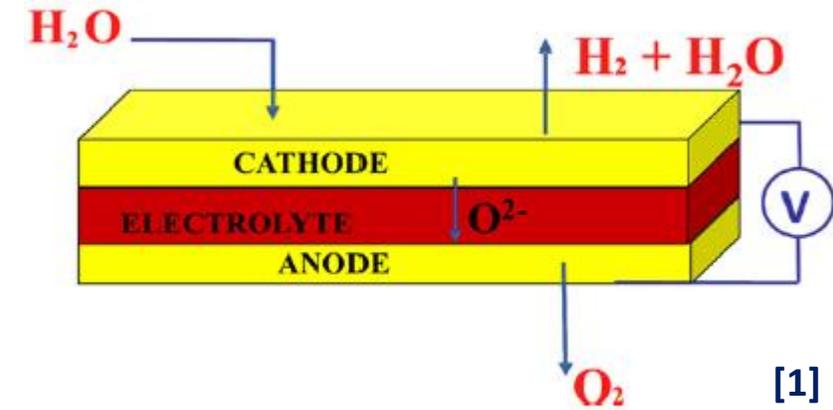


- тонкопленочный электролит

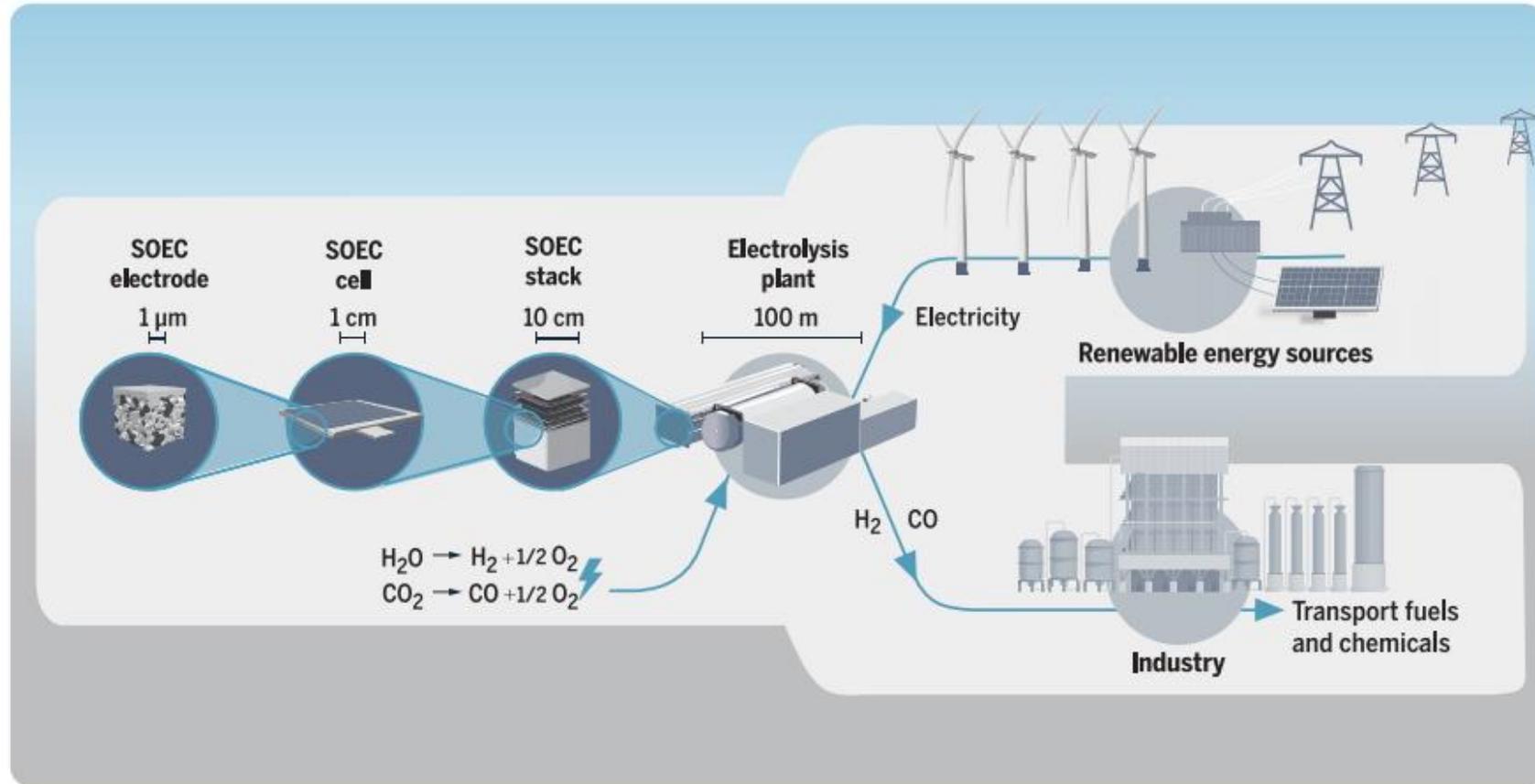


# ТВЕРДОКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

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]:



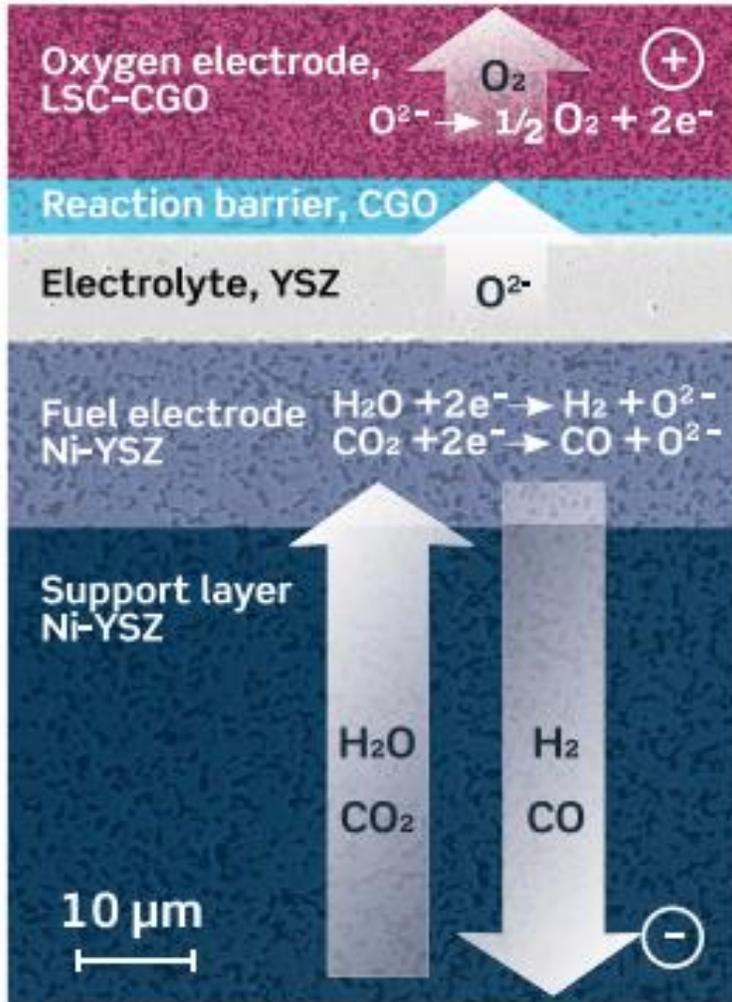
1. M.A. Laguna-Bercero, Journal of Power Sources 203 (2012) 4– 16

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

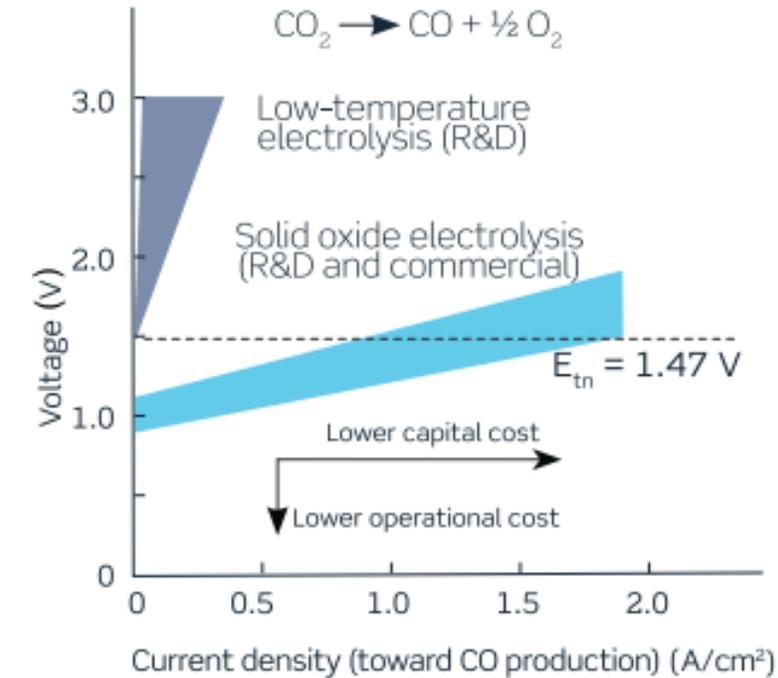
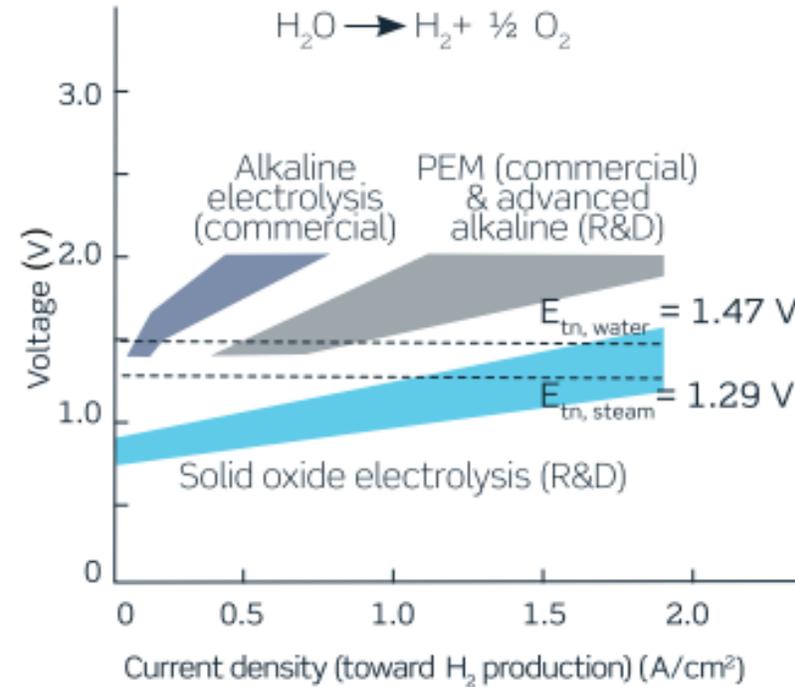


# ТВЕРДОКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

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 кВт·ч/ $nm^3_{H_2}$ , против 5-6 для PEM и 6-7 для АЕС, соответственно

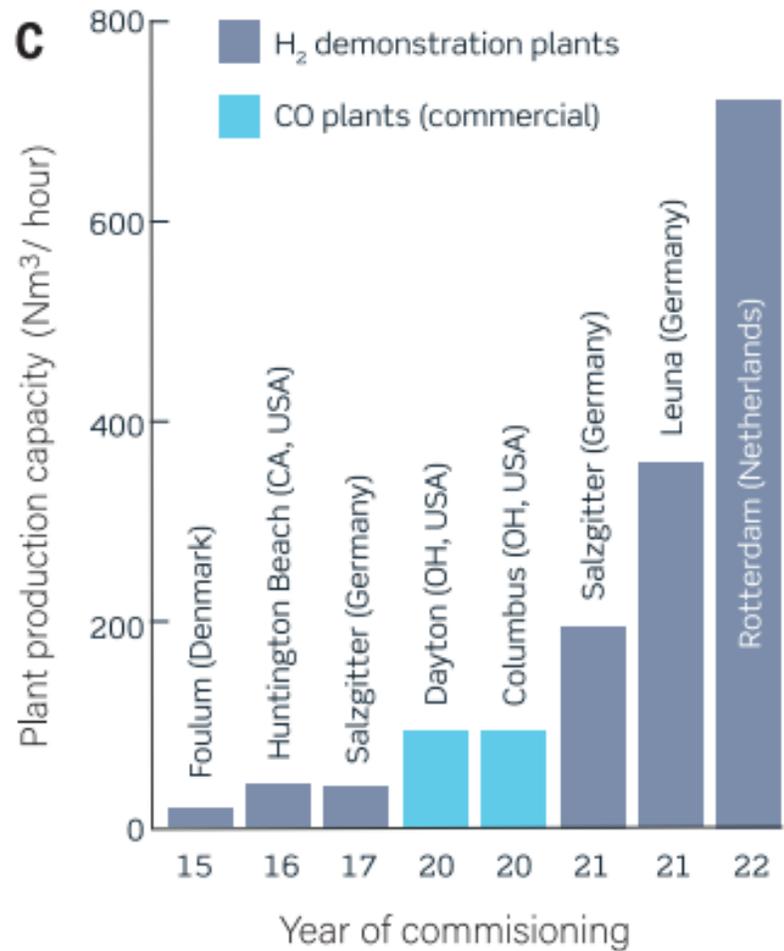
A. Hauch et al., Science 370, eaba6118 (2020)



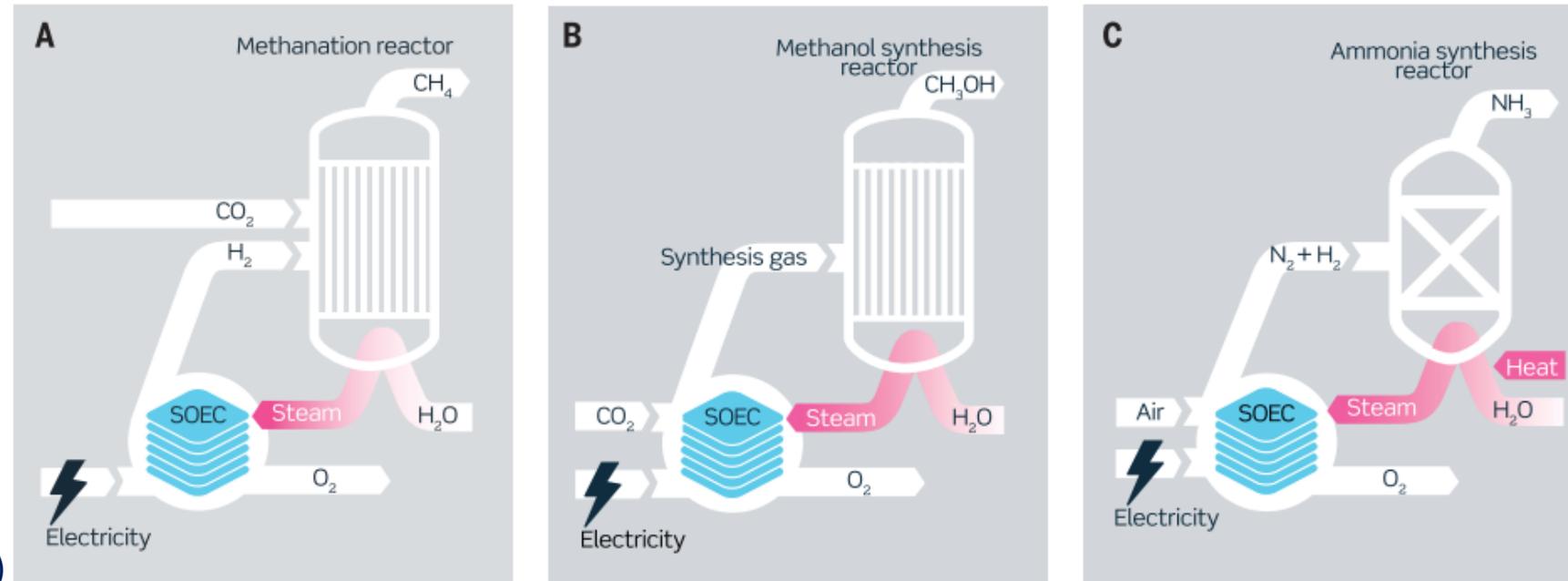
# ТВЕРДОКСИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

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

Экономические оценки стоимости систем на ТОЭЭ:  
**2000 евро/кВт**  
 1000 евро/кВт к 2030  
 530 евро/кВт к 2050



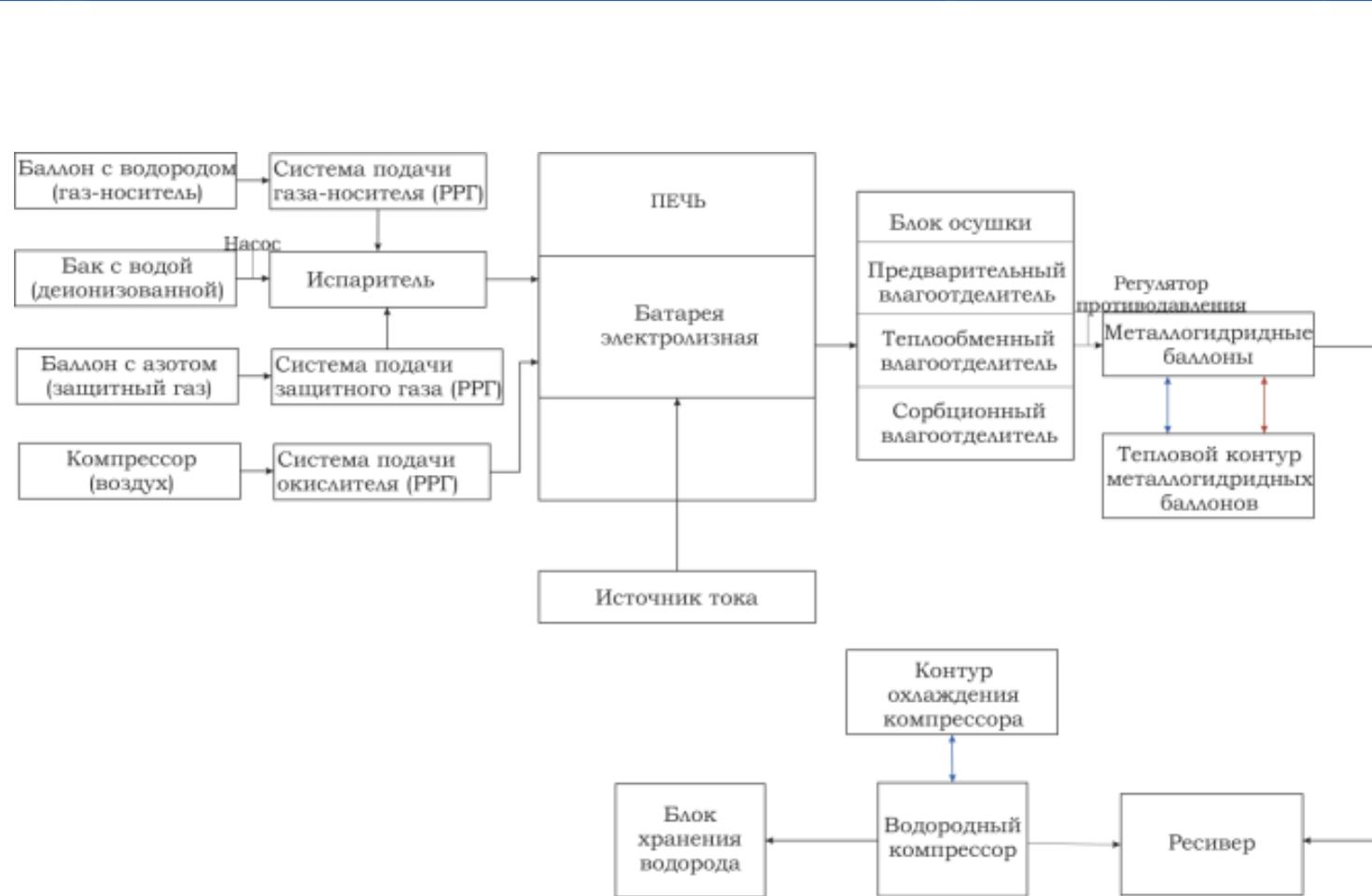
Отдельно следует отменить возможность построения систем по производству метана (CH<sub>4</sub>), метанола (CH<sub>3</sub>OH) и аммиака (NH<sub>3</sub>) на основе ТОЭЭ:



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



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





# МАКЕТ СТЕНДА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ БАТАРЕЙ ТООЭЛЭ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 0,3 НМ<sup>3</sup>/Ч



# ТВЕРДОКИСНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ТОЭЭ) – SOLID OXIDE ELECTROLYSIS CELL (SOEC)

Номер	Температура по стеку, °С	Расход водорода, л/мин	Расход воды, мл/мин	Ток, А	Напряжение, В	Производительность по H <sub>2</sub> , мл/мин	Фарадеевская эффективность, %	Удельные энергозатраты на генерацию, кВт*ч/м <sup>3</sup>	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



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

Номер	Температура по стеку, °С	Расход водорода, л/мин	Расход воды, мл/мин	Ток, А	Напряжение, В	Производительность по Н <sub>2</sub> , мл/мин	Фарадеевская эффективность, %	Удельные энергозатраты на генерацию, кВт*ч/м <sup>3</sup>	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



**РАБОТА ВЫПОЛНЕНА ЗА СЧЕТ СРЕДСТВ  
ГРАНТА РНФ 17-79-30071П**

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

## Q & A

ДМИТРИЙ АГАРКОВ

AGARKOV@ISSP.AC.RU

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