



Перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте

Лapidус Борис Моисеевич

Доктор экономических наук, профессор
председатель Международного совета по железнодорожным исследованиям (IRRB),
председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»

Фрейдзон Александра Яковлевна

Кандидат химических наук,
Старший научный сотрудник Центра Фотохимии РАН

30.08.2019

Мировые тренды и перспективы использования электроподвижного состава на топливных элементах

Мировые тренды коммерческого использования ТЭ на транспорте базируются на уникальных свойствах ТЭ:

- ✓ экологичности,
- ✓ высокой эффективности без использования электрических сетей

Разработка собственного электроподвижного состава на ТЭ в РЖД РФ перспективно для применения в густонаселенных районах для экономии на электрификации железнодорожных линий и для сокращения «углеродного» влияния железнодорожного транспорта на экологию

Водород – чистый и безопасный энергоноситель

Водород является чистым, безопасным и универсальным энергоносителем

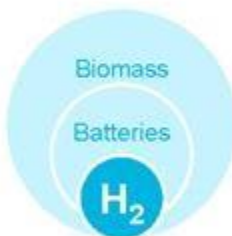
Может быть обеспечена его транспортировка на дальние расстояния, что позволит распределить энергию между странами



Производство чистой энергии и/или тепла для транспортных нужд и стационарных областей применения



Его производство возможно без выбросов CO₂ посредством электролиза или парового риформинга метана (SMR) + технология по сбору и хранению углерода (CCS)



Имеет высокую удельную энергию, что делает возможным его длительное хранение



Требуется в качестве исходного сырья в промышленности при переработке собранного CO₂

Водород – эффективное топливо

Ключевые показатели водорода

- ◆ Наибольшая массовая плотность энергии по сравнению с обычными видами топлива (коэффициент 2,4-2,7)
- ◆ Наименьшая объемная плотность энергии -> необходимость сжатия (35 или 70 МПа) или сжижения ($T_{\text{сжиж}} = -253^{\circ}\text{C}$)
- ◆ Не загрязняет окружающую среду, не токсичен

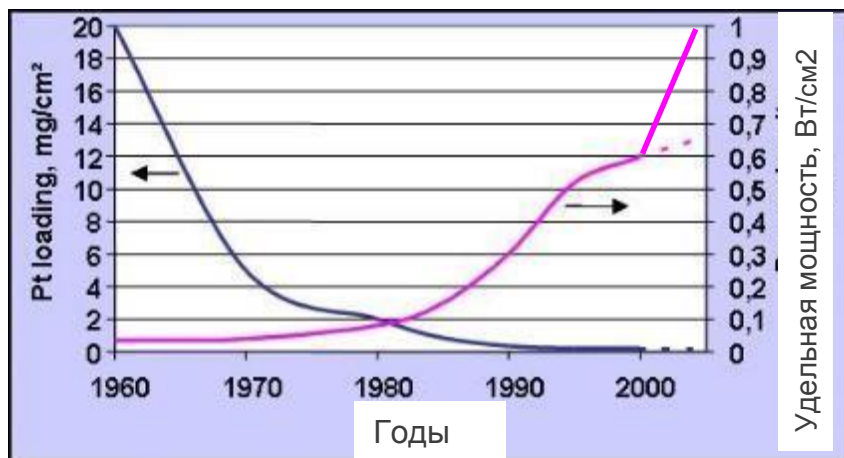
	Ед.изм.	Водород	Метан	Бензин	Дизтоп-ливо	Метанол
Плотность	кг/м3	0,0898	0,71	702	855	799
Низшая теплота сгорания (LHV) по массе	МДж/кг	120	50.4	42.7	41.9	19.9
Низшая теплота сгорания (LHV) по объему	МДж/м3	10.8	36.1	31 200	36 500	18 000

Shell, 2017

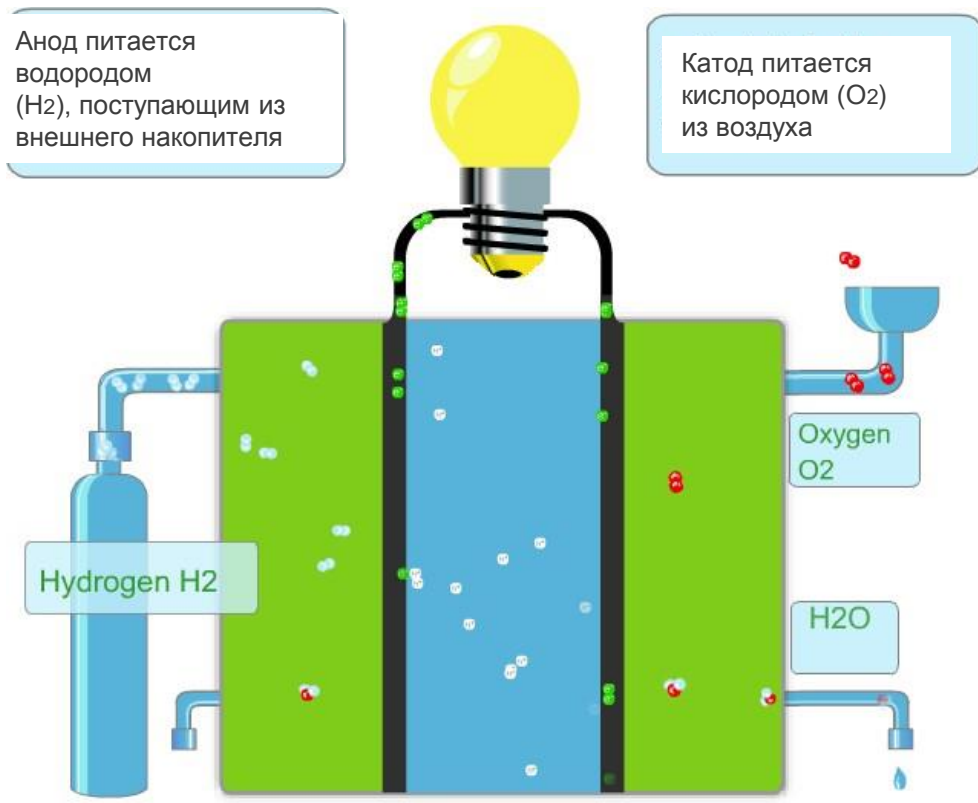
Как это работает?

Использование батареи с протоно-обменным мембранным электролизом преобразует химическую энергию водорода в электричество

- Окисление водорода
 $2 \text{H}_2 \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
- Восстановление кислорода
 $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- Реакция
 $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$



2017: 0.3 мг/см² и 1Вт/см²

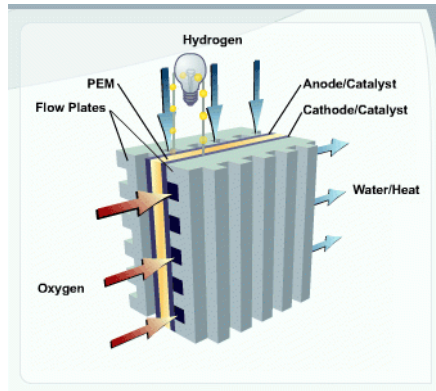


Работа батареи

Устройство топливного элемента

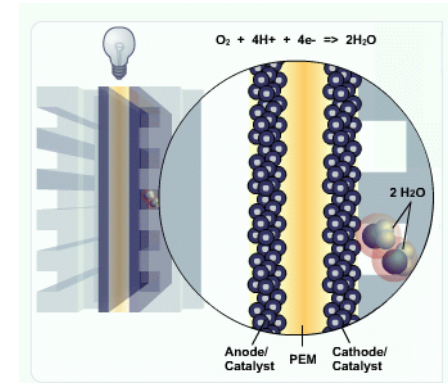
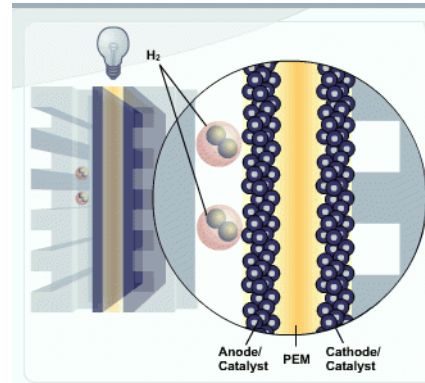
Топливный элемент – устройство для получения электричества из водорода (или богатого водородом топлива) и кислорода без горения и преобразования тепловой энергии

- Отличаются высокой энергоэффективностью и экологичностью, поскольку на выходе образуется только вода
- Работают пока поступает топливо (водород) и кислород и не требуют зарядки от электрических сетей или источников



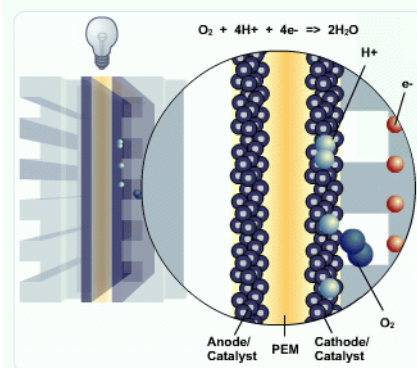
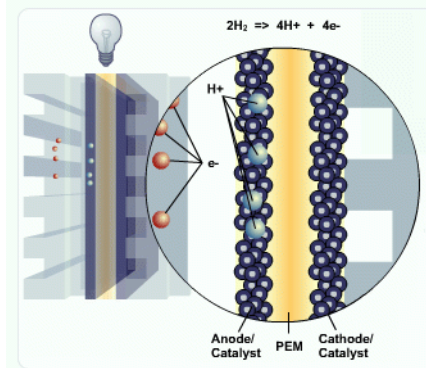
Проточные пластины:
подводят водород и кислород

Электроды



Мембранный процесс на аноде

Мембранный процесс на катоде

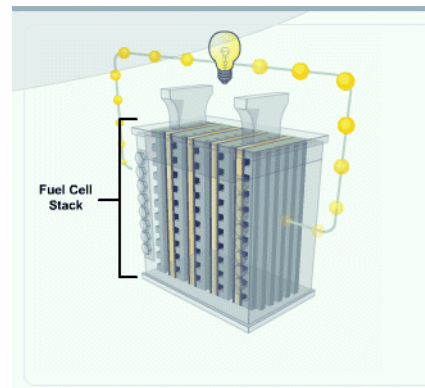


Протонообменная мембрана: пропускает протоны от анода к катоду, тогда как электроны идут через внешнюю цепь, давая электрический ток

Анод: для расщепления молекул водорода на атомы и расщепления атомов водорода на протоны и электроны

Катод: для присоединения протонов и электронов к молекулам кислорода

Батарея топливных элементов



- Один топливный элемент маломощный: дает напряжение меньше 1 В.
- Для получения достаточного напряжения и мощности объединяют в батареи до нескольких сотен элементов

Преимущества систем на ТЭ



- Удельная энергоемкость систем на основе ТЭ многократно превышает энергоемкость ЛЮБЫХ аккумуляторных батарей. Данное преимущество позволяет сократить вес подсистемы энергообеспечения в 1,5-5 раз
- Возможность длительного хранения. Высокотемпературные твердо-оксидные топливные элементы и системы электропитания на их основе имеют гамма-процентный срок сохраняемости при ГАММА = 95 % не менее 15 лет
- Простота конструкции. Отсутствие движущихся и трущихся частей, систем смазки. Возможность эксплуатации в необслуживаемом режиме
- Емкость и мощность систем разделены, что позволяет гибко масштабировать тот или другой параметр отдельно, в зависимости от целевого назначения системы, и тем самым обеспечить формирование широкого типо-ряда ЭХГ как по мощности, так и по энергоемкости. Высокий унификационный потенциал
- Энергоемкость не зависит от температуры окружающей среды
- Слабовыраженный тепловой след по сравнению с ДВС и низкий уровень шума
- Отсутствие саморазряда и «эффекта памяти». Нет необходимости в превентивной замене
- Экологичность

Предпосылки внедрения подвижного состава на ТЭ для железнодорожного транспорта

Мотивация и технологические возможности для неэлектрифицированных железнодорожных перевозок без CO₂



41,8 тыс. км (48,8%) Российских железных дорог не электрифицирована. На сети работают более 6422 дизельных локомотива

Поезда и маневровая работа без выбросов для линий без контактной сети



Повышение цен на дизель и тяговый ток в среднесрочной и долгосрочной перспективе

Альтернатива ископаемому топливу



Законодательство и ожидания потребителей в отношении **качества воздуха** и снижения **уровня шума**

Сокращение выбросов и шума



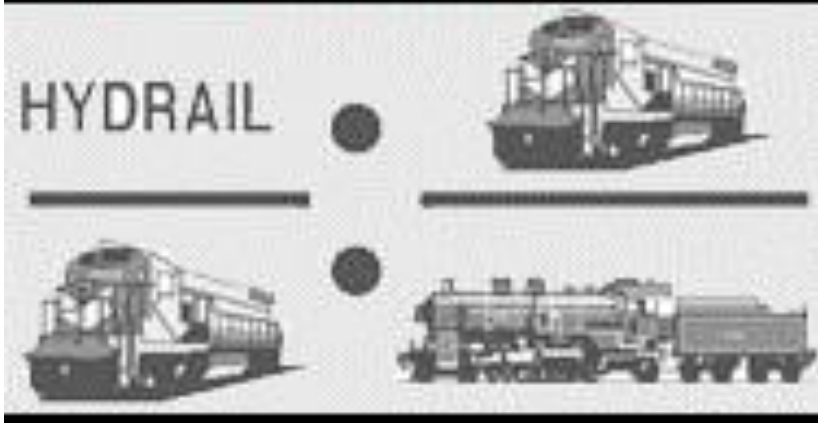
Своевременная реакция на развивающиеся в мире и стране тенденции о запрете дизельного топлива

Закрепление лидирующих позиций железнодорожного транспорта

Перспектива использования водорода в железнодорожной отрасли

Проект HYDRAIL

Водород приходит на смену
дизельному топливу

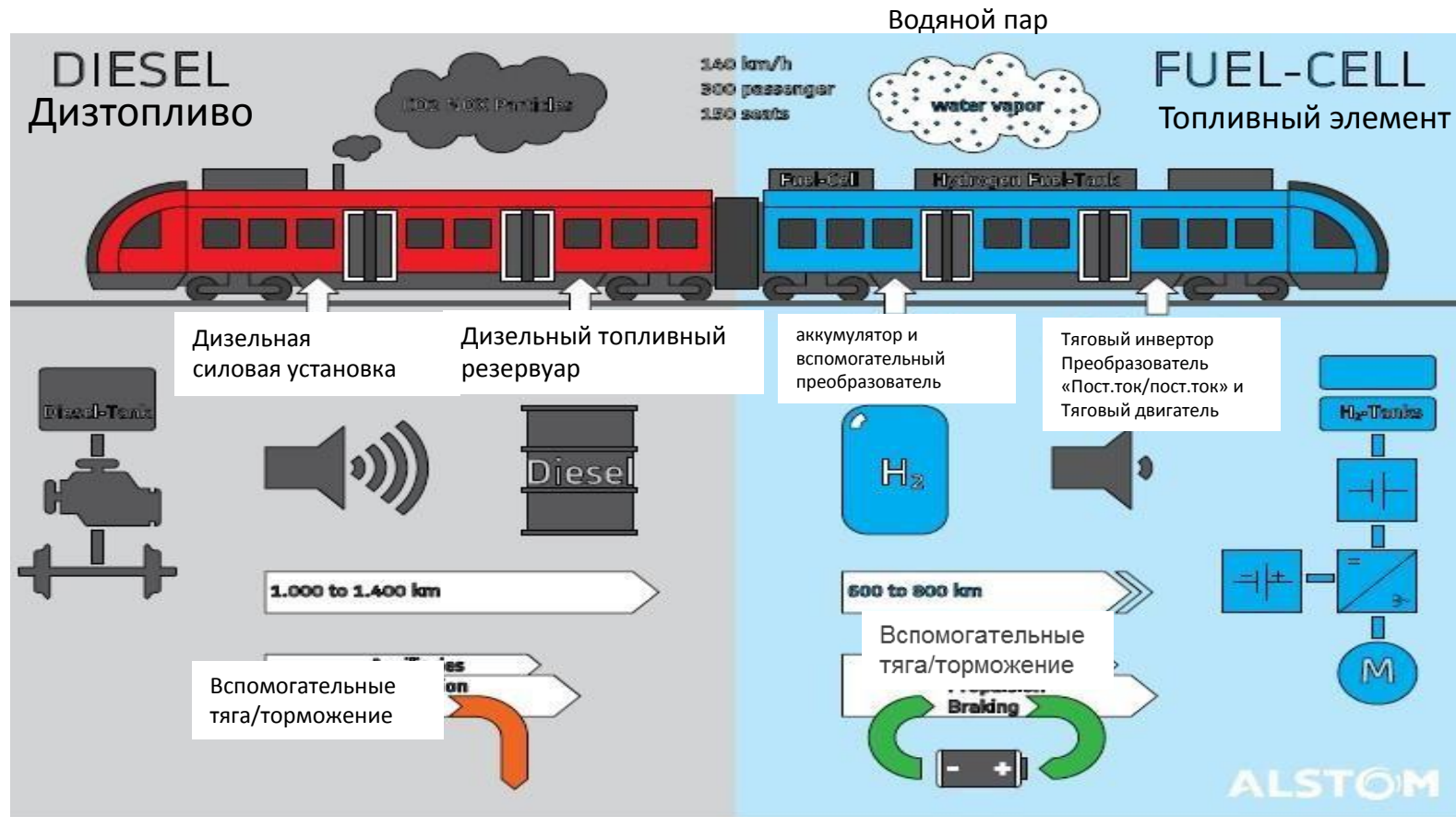


Как в свое время дизельное топливо
пришло на смену пару



Перспектива использования водорода в железнодорожной отрасли

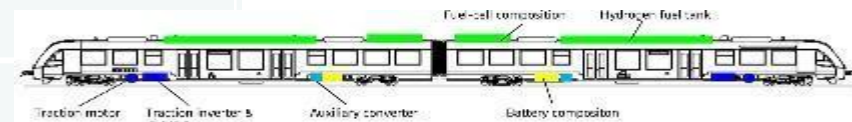
Пример решения проблемы снижения выбросов CO₂ для региональных линий (Coradia iLint)



Перспектива использования водорода в железнодорожной отрасли

Пример решения проблемы снижения выбросов CO₂ для региональных линий (Coradia ilint)

Параметр	Тип	LINT 54	LINT 41 (EVB)
Силовая установка	Дизель	Топливный элемент	Дизель
Макс. скорость	140 км/ч	140 км/ч	120 км/ч
Мощность двигателя	2 x 390 кВт 3 x 390 кВт	2 x 200 кВт	2 x 315 кВт
Бортовая мощность для тяговых и вспомогательных систем	780 кВт 2 x 390 кВт	850 кВт 2 x 200 кВт Топливный элемент + 2 x 225 кВт Максимум батареи: 1.300 кВт	630 кВт 2 x 315 кВт
Пассажировместимость	327	327	232
I. Сидячих мест	138 - 180	138	116-118
I. В положении стоя: 4 пасс./м ²	149 - 189	189	114
Объем водородного резервуара	2 x 800 л	178 кг	2 x 800 л
Дальность следования	ок. 1,600км	ок. 600-800 км*	ок. 1,600 км



* Из материалов профессора, д.т.н. Марка Антони (МСЖД)

Перспектива использования водорода в железнодорожной отрасли

Многообразие направлений деятельности с начала 90-х годов



Горнорудный локомотив (ЮАР, 2012)



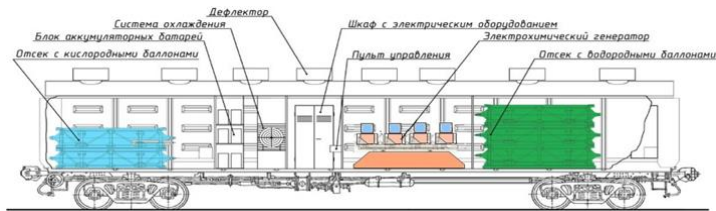
Трамвай (Испания, 2011)



Трамвай Quingdao (Китай, 2015)



Маневровый локомотив „Green Goat“, (Колорадо, 2009)



Энергетическая установка на ТЭ (Россия, РЖД, 2013)



Пригородный пассажирский поезд (Япония, 2006)



Маневровый локомотив (США)



Поезд на водороде (Германия, 2018)



Поезд на водороде (Великобритания, 2019)

Гибридная схема для эффективной утилизации энергии



Гибридная схема позволяет применять относительно маломощные ТЭ

ISO TC197 – Водородные технологии

Стандартизация в области систем и устройств для
производства, хранения, транспортировки,
измерения и использования водорода



Опубликовано
стандартов ИСО:

18

published ISO standards *
under the direct responsibility
of ISO/TC 197

Стандарты ИСО
в стадии разработки:

12

ISO standards under
development *
under the direct responsibility
of ISO/TC 197

Под прямой ответственностью ISO/TC 197

* number includes updates

20

Participating members

членов-участников

13

Observing members

членов-наблюдателей

**Российские научные
группы, ведущие
разработки в области ТЭ**

Центр компетенций по технологиям новых и мобильных источников энергии при Институте Проблем химической физики РАН





Индустриальные партнеры:

- ООО «Инэнерджи»
- ООО «Электротранспортные технологии»
- ООО «Научно-производственное объединение «Ижевские беспилотные системы»
- АО «Сарапульский радиозавод»
- ООО «НПК Морсвязьавтоматика»
- ООО «Конструкторское бюро Вуля»
- ООО «Интеллектуальные силовые системы»
- ПАО ОАК
- ПАО Камаз
- ЦИАМ им. П.И. Баранова
- ООО «Литеко»

Партнеры по научным исследованиям и образованию:

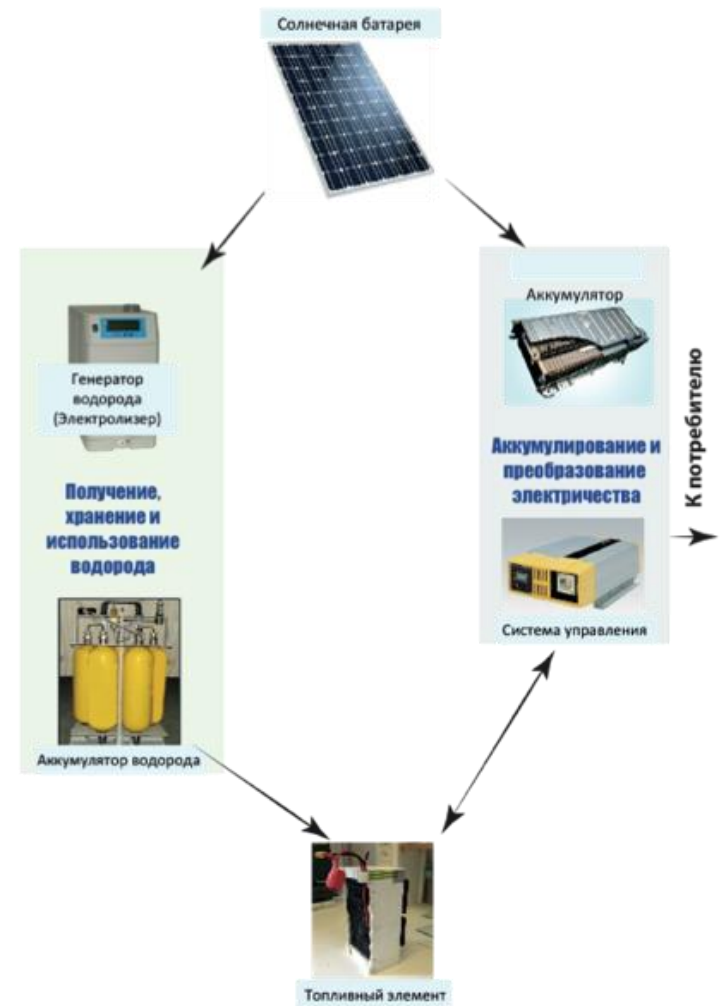
- Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
- Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»
- Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
- Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
- Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева
- Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Перечень проектов, выполняемых Центром

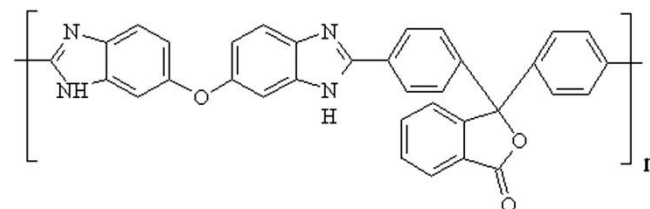
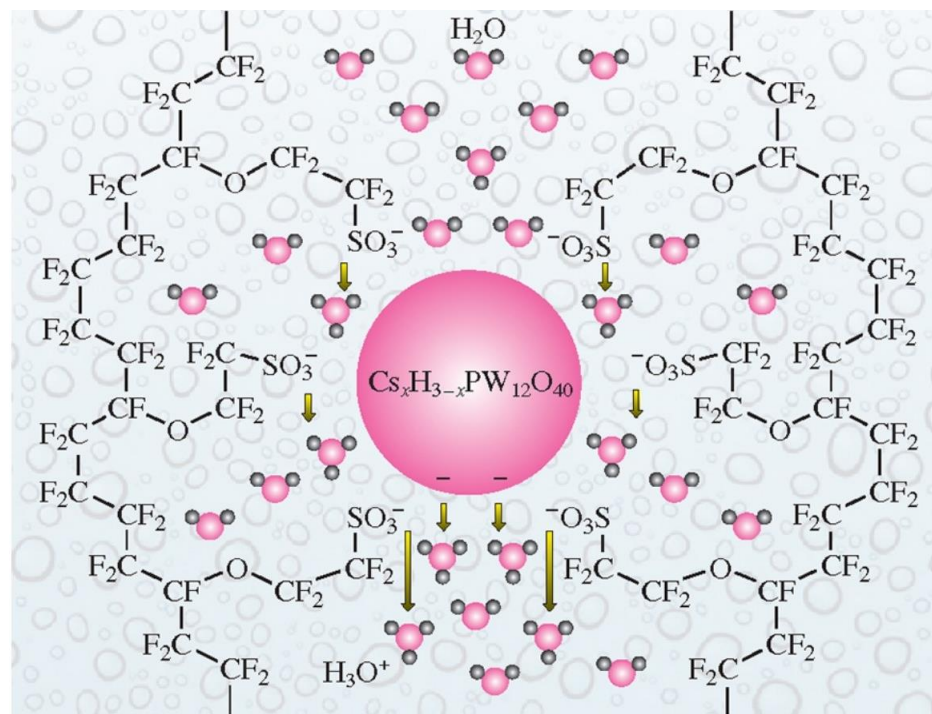
№	Проект	Ответственный участник консорциума
1	Высокоёмкие катодные материалы Li-ионных аккумуляторов на основе слоистых оксидов	Сколтех
2	Разработка высоковольтных материалов и электролитов для литий-ионных аккумуляторов	МГУ
3	Пост-литий-ионные аккумуляторы (натрий-ионные и калий-ионные)	МГУ, Сколтех
4	Разработка способов получения наноразмерного кремния и создание высокочастотных материалов отрицательного электрода для литиевых аккумуляторов	ИПХФ РАН
5	<u>Разработка мобильного электрохимического генератора на топливных элементах с применением водородного топлива</u>	ИПХФ РАН, ООО «Инэнерджи»
6	<u>Разработка функциональных материалов для получения водорода из неорганических топлив</u>	ИПХФ РАН
7	Разработка электрокатализаторов прямого окисления спиртов	ИПХФ РАН
8	Разработка неорганических электролитов для среднетемпературных топливных элементов до +250°C	ИПХФ РАН
9	Разработка микробных и биотопливных элементов	ИПХФ РАН
10	<u>Разработка новых проточных аккумуляторов повышенной мощности</u>	Сколтех, ИПХФ РАН
11	Разработка новых материалов для фотовольтаических преобразователей с высоким КПД	ФТИ им. Иоффе РАН ИПХФ РАН
12	<u>Создание ходовых макетов транспортных средств с электрической пропульсивной установкой с электрохимическим источником тока в составе источника генерации энергии</u>	ООО «ЭТТ» ИПХФ РАН (СКБ)
13	<u>Создание полностью электрической летательной платформы самолетного типа и беспилотного летательного аппарата сельско- и лесохозяйственного назначения на его основе</u>	ООО «Инэнерджи» ИПХФ РАН (СКБ)

Основные разработки Центра в области ТЭ

- Разработаны высокоэффективные модульные системы электропитания мощностью 1 - 10 кВт на основе топливных элементов в сочетании с дополнительными устройствами хранения электроэнергии и генерации водорода.
- Созданы резервные источники питания и полностью автономные системы электроснабжения на основе топливных элементов, в том числе в комбинации с возобновляемыми источниками электропитания.
- Работоспособность при температурах от -50 до +60 °C
- Разработаны аккумуляторные батареи для электротранспортных средств с энергоемкостью 15-35 кВт*ч

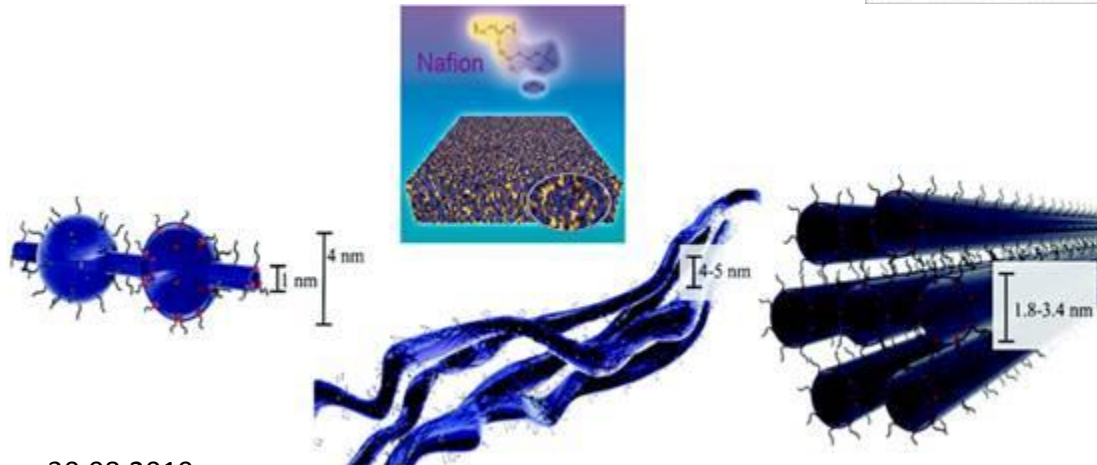
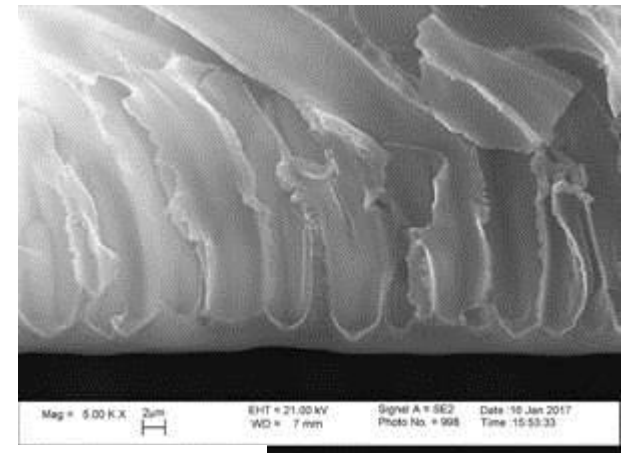
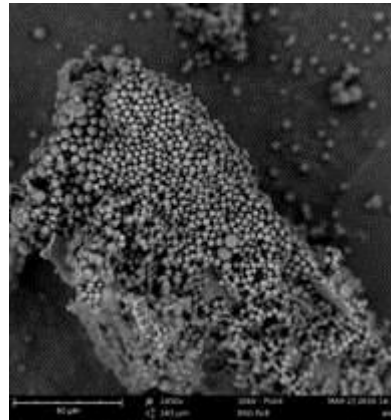


- Получение и исследование перфторсульфонатных мембран, модифицированных неорганическими наночастицами
- Исследование химических реакций, протекающих на мембранных катализаторах различной природы
- Создание новых композитных мембранно-каталитических систем и исследование их каталитических и мембранно-сепарационных свойств



**Лаборатория полиэлектролитов и биополимеров
Химического факультета МГУ**

- Разработка полимерных материалов для электрохромических устройств хранения и преобразования энергии
- Модификация мембран нановолокнами и нанотрубками



Разработка действующего образца железнодорожной энергетической установки на топливных элементах для электропитания путевой техники. Разработка проекта гибридного локомотива на топливных элементах

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ И ИССЛЕДОВАНИЙ

- Технико-экономическая оценка эффективности применения магистральных гибридных локомотивов. Компонировочные решения, использование природного газа в качестве моторного топлива;
- Создание макетных образцов локомотивов на топливных элементах;
- Проведение исследований в целях:
 - разработки технических требований к топливным элементам для локомотивов;
 - разработки нормативной базы для обеспечения безопасной эксплуатации технических средств на основе водородной энергетики;
 - отработки технологий экипировки и транспортировки водорода.
 - оценки потребности в силе тяги и мощности маневровых локомотивов, разработка типажа маневровых локомотивов;
 - Определение области применения водородной энергетики в хозяйствах ОАО «РЖД»

Выводы

- **Водород, как чистый, безопасный и универсальный энергоноситель**, является частью экологического перехода и играет ключевую роль в создании возобновляемой энергосистемы и декарбонизации конечных областей применения. Водород – **единственный энергоноситель с нулевой эмиссией CO₂**.
- Водородные технологии достаточно развиты и имеют значительный потенциал во всех сферах применения, в частности, там, где необходимы **высокая полезная нагрузка, высокая автономия и гибкость**.
- **H₂ & топливные элементы сегодня существуют!** Сегодня наблюдается международный импульс во всем мире с твердой позицией в Азии (Японии, Республике Корея, КНР) и Европе (Франции, Германии, Великобритании, Испании) в тесном сотрудничестве Промышленности (Водородная Европейская Индустрия) и Исследований (Европейские исследования в области водородных технологий).
- Создание рельсового электроподвижного состава на топливных элементах – мировой тренд транспортных инноваций
- В РФ присутствуют все необходимые технологии для создания прототипа электровоза на ТЭ.
- Научно-технологические компетенции разбросаны по различным научным центрам.
- Промышленное производство компонентов в РФ практически отсутствует, но может быть организовано при наличии рынка спроса
- Требуется единый заказчик и научный интегратор проекта создания электроподвижного состава на ТЭ



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!