

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАУК
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА РАН
РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.В. ПЛЕХАНОВА
МИРЭА-РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ООО «ИННОВАЦИОННАЯ КОМПАНИЯ МЕВОДЭНА»

НОВЫЕ МЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХЧИСТОГО ВОДОРОДА И ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

И.Ш Сайфуллин, д-р химических наук, профессор,
президент Международной академии технологических наук

Казань

Апрель 2021

Цели Международной Академии технологических наук

- Содействие развитию и внедрению новых наукоёмких экологически чистых технологий
- Поиск, отбор и ранжирование уникальных научно-технологических стартапов и проектов
- Содействие в трансформации объектов интеллектуальной собственности в современные технологии и продукцию



Ключевые компетенции ОО «Международная академия технологических наук»

- знания перспективных и прогнозируемых производственных технологий в области использования природных ресурсов и энергетики;
- знания важнейших результатов в области охраны окружающей среды;
- знания важнейших результатов в области транспорта;
- знания перспективных технологий в области переработки углеводородных систем;
- знания в области прикладного термодинамического анализа, кинетического и математического моделирования процессов нефтегазохимических технологий;
- знания важнейших результатов в области объектов интеллектуальной собственности.



Производство водорода

Объем мирового производства водорода оценивается в 55-58 млн. т. в год

В России ежегодно производится около 5 млн.т водорода.

Водород получают электролизом воды, из природного газа, угля и нефти.

96% водорода в настоящее время получается посредством парогазовой конверсии (Steam Methane Reforming, SMR) природных углеводородов (газа 48%, угля 30% и нефти 18% и выделением его из парогазовой смеси (синтез-газа).

Однако процесс паровой конверсии не позволяет получить чистый водород (от 99,95%), необходимый для питания топливных элементов и производства высокотехнологичных изделий (микроэлектроника, LED и др.), процессов обессеривания нефтепродуктов и производства аммиака и метанола.

Сейчас для получения чистого водорода используются:

- Короткоцикловая абсорбция - громоздкий промышленный метод, который не подходит для энергоустановок с мощностью меньшей нескольких мегаватт.
- Мембранный метод – универсален и в том числе применим в небольших/мобильных/автономных энергоустановках. Однако существующие на рынке мембраны - дороги и недостаточно производительны.

Объем мирового производства водорода оценивается в 55-58 млн. т. в год



Рынок водорода

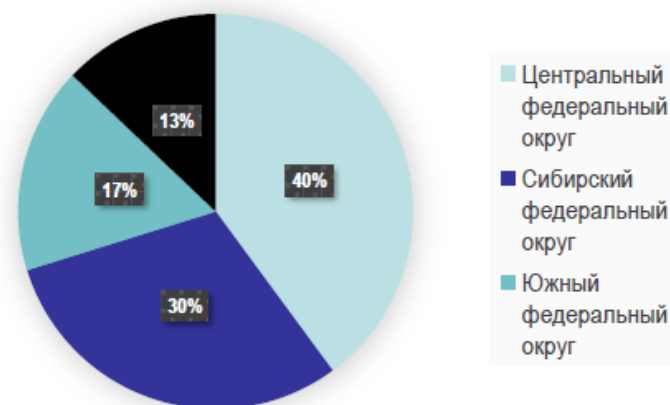
В 2019 году рынок водорода составил 138 млрд. долл. США.

Доля России в производстве водорода составляет 8-10%.

Ежегодный прирост объема производства водорода в России составляет 3-4%.

География производства водорода совпадает с географией потребления.

Рынок водорода: география потребления и производства



Удельный вес разных регионов мира в потреблении водорода: Северная Америка 17%, Латинская Америка 5%, Европа и Евразия 23%, Средний Восток 23%, Африка 4%, Азиатско-тихоокеанский регион 33%.

Удельный вес разных регионов России в потреблении водорода: ЦФО 40%, СибФО 30%, ЮжФО 17%, другие 13%.

Структура потребления водорода



Водород не является конечной продукцией, а используется в различных производственных процессах поэтому объемы потребления водорода линейно зависят от объемов производства готовой продукции.

В настоящее время нефтеперерабатывающая и химическая отрасли лидируют по потреблению водорода, причем, потребление водорода в нефтепереработке с 2015гпо 2019гг. ежегодно росло на 5,8%.

Наиболее перспективными областями применения водорода являются производство электроники, полупроводников и использование топливных элементов в энергетике.

* Источники данных: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/hydrogen.asp>
<http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?>

Структура потребления водорода (продолжение)



Особенностью российского рынка является заметный рост доли нефтеперерабатывающей промышленности в потреблении водорода. За несколько лет доля химической промышленности сократилась с 80% до 68%, при этом доля водорода, производимого на нефтеперерабатывающих предприятиях выросла в 2 раза.

- Химическая промышленность (производство аммиака , метанола) 68%
- Нефтеперерабатывающая промышленность 22%
- Остальное (производство и изготовление металла, переработка пищевых продуктов, электроника, топливные элементы, фармацевтика, аэрокосмическая отрасль, производство стекла, сварка, научные исследования) 10%.

Потребление водорода: нефтепереработка и химическая промышленность

- **Водород в химическом комплексе** используется для гидроочистки при обессеривании нефтепродуктов, а также для очистки масел и парафинов, синтеза аммиака т.д. Регулярное принятие новых стандарт топлива ведет к увеличению потребления водорода НПЗ, т.к. растут требования к выбросам автотехники и содержанию серы в бензине.
- **Производство химического комплекса (нефтепереработка и химическая промышленность)** показывает стабильный рост не только в России, но и во всем мире. Ежегодный прирост составляет примерно 4,4%. В текущем 2020 году объем производимой химическим комплексом продукции достигнет 5 трлн долл., в 2025г. 6,8, а в 2030г. 8,4 трлн. долл. По всем прогнозам в сравнении с 2012г. в 2030 году мировой объем производств химического комплекса увеличится более чем в 2 раза.
- **Нефтеперерабатывающая промышленность.** Чистый водород используется для производства моторного топлива наивысшего экологического стандартов Евро-5 и Евро-6 с жесткими требованиями по чистоте. **Потребители в России:** Более 40 крупных НПЗ, перерабатывающих в среднем по 9 млн тонн нефти в год. Более 200 мини НПЗ, перерабатывающих в среднем по 600 тыс. тонн нефти в год.
- **Химическая промышленность.** Основными драйверами химической промышленности являются производство аммиака и минеральных удобрений, в производстве которых применяется водород. Потребители в России: Около 800 крупных и средних промышленных предприятий.
- **Внимание!** Стоимость установки 50 000 нм³/час по производству водорода составляет 45-50 млн долл. США

Потребление сверхчистого водорода: полупроводниковая промышленность

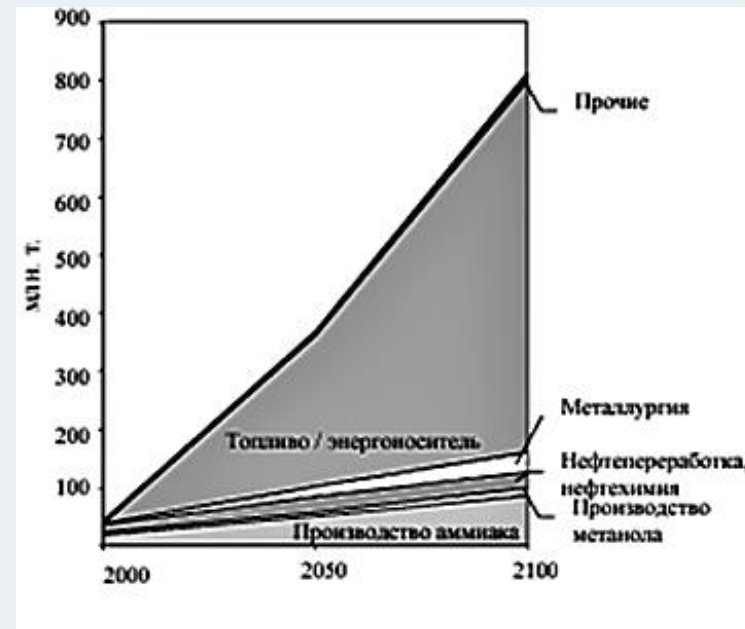
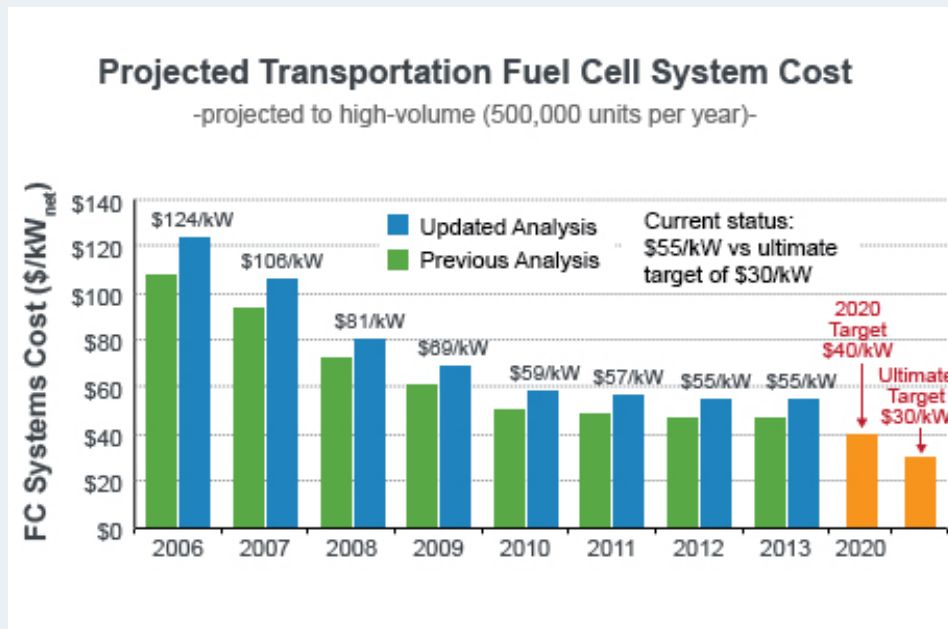
Сверхчистый водород широко используется при производстве компонентов для электронной промышленности и полупроводников, в т.ч. широко распространенным методом роста полупроводниковых структур осаждением металлоорганических соединений из газовой фазы MOCVD, где водород используется в качестве газа-носителя. Рынок оборудования MOCVD растет на 14% в год вследствие развития сегментов светодиодов и фотовольтаники.

Потребители в российской промышленности: Более 300 производителей электроники и электронных компонентов, в т.ч. - более 20 портфельных компаний Роснано; - более 110 предприятий в холдинге Росэлектроника.

Потребители в российской науке: Более 100 вузов и НИИ в России, занимающихся исследованиями и разработками в области полупроводников, многие имеют по несколько лабораторий. Обычно предприятия и лаборатории данного сегмента не производят водород, а очищают водород от поставщиков до нужной чистоты (>99,999%) установками на палладиевых мембранах или адсорбционными установками MOCVD.

Внимание! Цены таких установок на 10 - 100 л/мин. 50-150 тыс \$

Рынок водорода. Тенденции



- **Рост потребления водорода в мире увеличивается**, при этом наибольший рост показывает потребление чистого водорода – в основном за счёт всё большего распространения топливных элементов.
- **Исследования в области мембранных технологий увеличиваются**. Основная цель исследований - снижение стоимости мембранных модулей и увеличение их производительности.
- **Стоимость топливных элементов неуклонно снижается**.

Прогноз потребления водорода

- **На рост потребления водорода будут влиять** : - ограниченность минеральных ресурсов; -ухудшение экологической ситуации; -рост рынка топливных элементов; - рост рынка соляной кислоты; аммиака и т.д.
- **К 2050г. в мире прогнозируется достижение повышения потребления водорода чуть более 10 раз:**
 - в производстве метанола до 50 млн. т
 - в нефтепереработке и нефтехимии 70 млн.т
 - в металлургии 100 млн.т
 - в производстве аммиака до 50 млн. т
 - в прочих направлениях до 350 млн.
- **Цены топливных элементов для автотранспорта** имеют тенденцию к неуклонному снижению - за 10 последних лет снизились с 55 до 40 долл./ kW

ПРОГНОЗ ЦЕНЫ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТА

❑ *К 2050г. в мире прогнозируется повышение потребления водорода более 10 раз:*

- в производстве аммиака **50** млн. т
- в производстве метанола **50** млн. т
- в нефтепереработке и нефтехимии **70** млн.т
- в металлургии **100** млн.т
- в прочих направлениях **350** млн.

❑ *На рост потребления водорода будут влиять :*

- ограниченность минеральных ресурсов;
- ухудшение экологической ситуации;
- рост рынка топливных элементов;
- рост рынка соляной кислоты; аммиака и т.д.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

РЫНОК СВЕРХЧИСТОГО ВОДОРОДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (производители полупроводников, микроэлектроники, солнечных батарей и др.)

- Среднегодовой темп роста российского рынка микроэлектроники до 2019г. составляла примерно 7-8%, ежегодный объем рынка окол 3 млрд. долл. США.
- Потребление электронных компонентов при производстве военной электроники ежегодно растет примерно 15-20%.
- В сфере электроники потребляется 14% от 120 тысяч тонн производимого в США жидкого водорода.
- Объем российского внутреннего рынка гражданской микроэлектроники - свыше 120 млрд руб <http://www.mforum.ru/news/article/118924.html>

Основная причина роста потребления:

Процесс эпитаксии (формирование одной кристаллической решетки на поверхности другого) и роста полупроводников невозможен без сверхчистого водорода. Поэтому рынок оборудования для эпитаксии быстро развивается. По прогнозам до 2030 г. среднегодовой рост темп роста составит более 14%.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ (продолжение)

Рынок сверхчистого водорода в водородной энергетике

- Сверхчистый водород используется для генерации электроэнергии с помощью топливных элементов.
- Благодаря более высокому КПД, отсутствию движущихся частей, бесшумности и экологичности быстро растут применение в коммунальном хозяйстве, на транспорте, в системах инфокоммуникаций, оборонном комплексе и др.
- В 2015 году в мире было продано более 60 000 систем когенерации электричества и тепла для коммунальных хозяйств на общую мощность 180 МВт.
- /G. Di Marcoberardino, G. Manzolini (Investigation of a 5 kW micro-CHP PEM fuel cell based system integrated with membrane reactor under diverse EU natural gas quality, International Journal of Hydrogen Energy, 42 (2017) 13988-14002)./

Существующие технологии на рынке очистки водорода

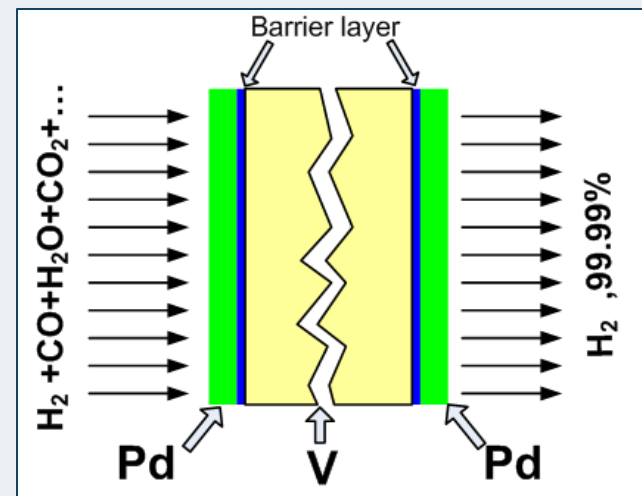
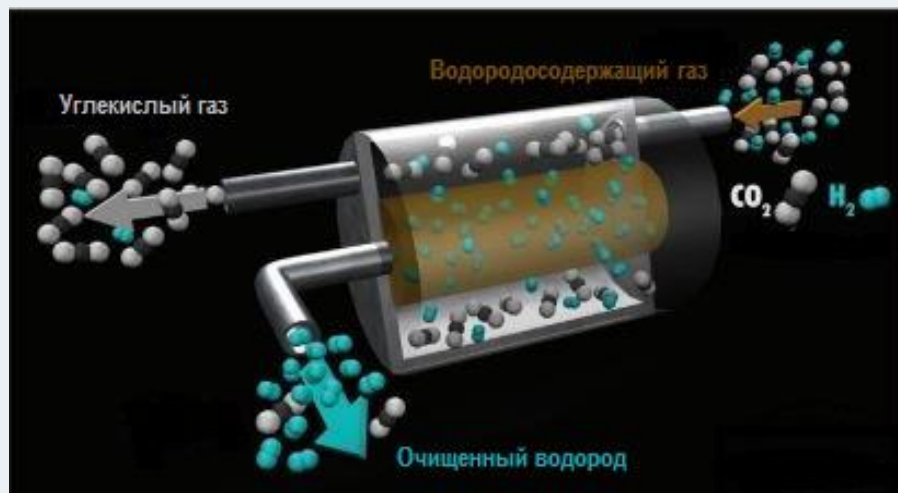
□ На данный момент существуют две основных технологии очистки водорода:

- Технология короткоциклового адсорбции (КЦА) - разделения газовых смесей с использованием адсорбентов, веществ, селективно поглощающих тот или иной газ. Для очистки водорода употребляются адсорбенты, поглощающие окись и двуокись углерода, водяные пары, углеводороды, сероводород, органические сернистые соединения.
- Мембранные технологии - разделения газовых смесей через мембрану.

□ Существует два основных типа мембран: полимерные и металлические мембраны:

- Полимерные мембраны быть весьма производительными, но их селективность посредственна и тем ниже чем выше производительность.
- Металлические мембраны, к которым относятся коммерческие мембраны из сплавов палладия, обладают идеальной селективностью, но малопроизводительны и для большинства приложений неприемлемо дороги.

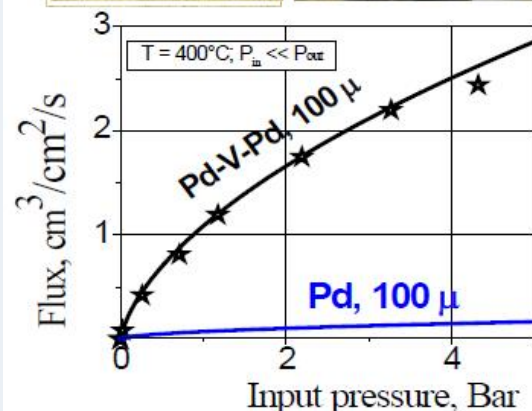
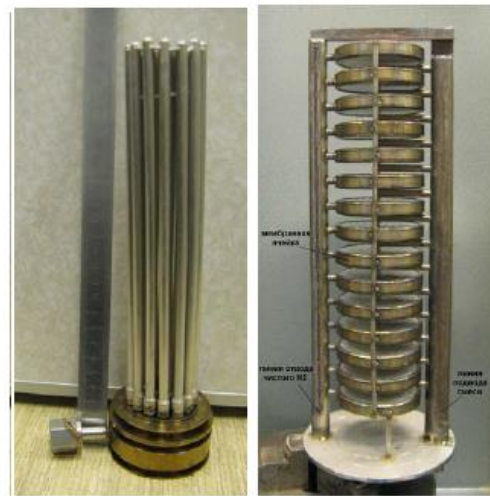
Мембранная технология очистки водорода по проекту



- Композитные многослойные мембраны для выделения водорода из газовых смесей на основе сплавов металлов 5-ой группы с защитно-каталитическим покрытием их поверхностей на основе палладия (см. схему).
- Транспорт водорода сквозь решётку металлов 5-ой группы (ванадий, тантал, ниобий) происходит на порядки быстрее чем в конкурирующих решениях: в решётках металлов 5-ой группы атомы водорода обладают значительно более высокой подвижностью и в этих металлах существенно выше растворимость водорода.
- Покрытие входной и выходной поверхности мембран из этих металлов (или их сплавов) тонким слоем Pd обеспечивает:
- катализ диссоциативно-ассоциативных процессов при абсорбции-десорбции молекул H_2
- защищает мембрану от коррозии при рабочих температурах (300-600 C) в химически активных газовых смесях

Текущее состояние разработки

- ❑ Впервые в мире созданы мембраны из непалладиевых сплавов, пригодные для практического применения, а именно
 - тонкостенные мембраны трубчатой формы из сплавов ванадия с тонким (микронным) палладиевым покрытием наружной и внутренней сторон
- ❑ Экспериментально показано, что:
 - - удельная производительность этих мембран более чем на порядок превосходит производительность мембран из палладия,
 - - расход драгметаллов на два порядка ниже.
- ❑ Созданы мембранные системы в виде сборок трубчатых мембран (мембранные модули)
- ❑ Проведены испытания (март 2018) этих мембранных систем в составе топливного процессора, производящего сверхчистый водород из углеводородных топлив (природного газа, дизтоплива) для генерации 1 кВт электрической мощности с помощью топливных элементов. (см рис и схему)



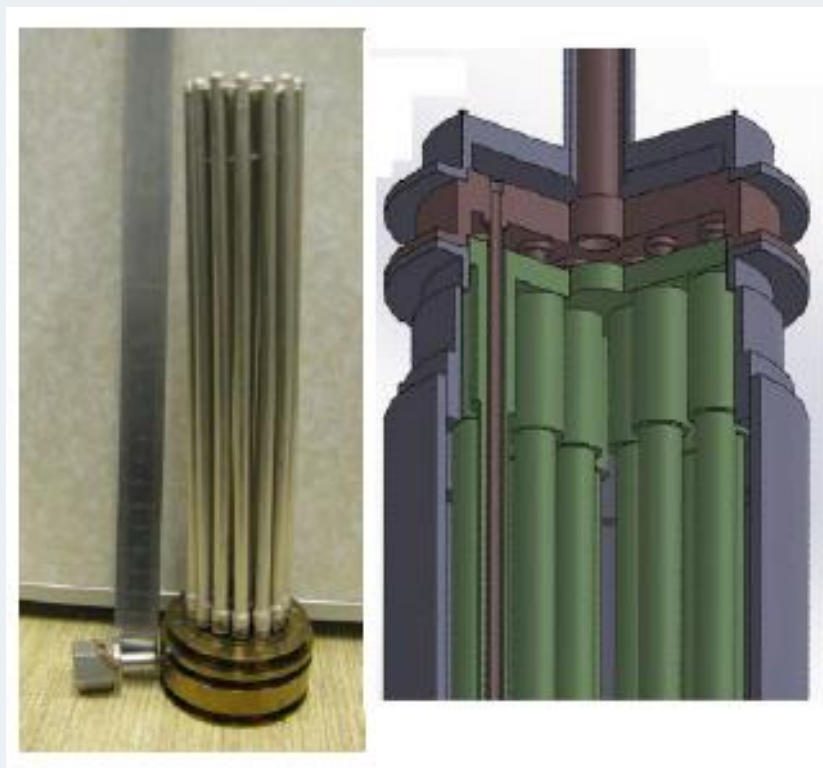
Текущее состояние разработки (продолжение)

**Впервые в мире созданы
мембраны из непалладиевых
сплавов, пригодные для
практического применения, а
именно:**

Единичная трубчатая мембрана
из ванадиевого сплава с
палладиевым покрытием
внешней и внутренней сторон и
со сварными концевыми
переходами из
нержавеющей стали для
рутинного монтажа

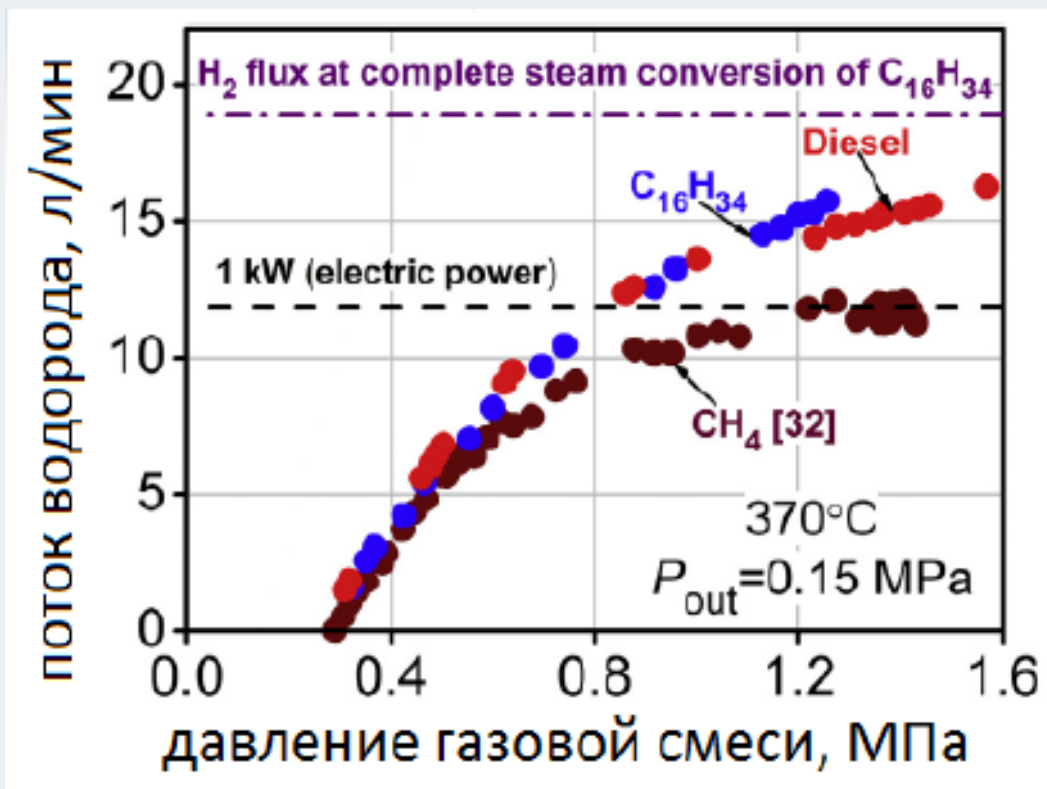


Текущее состояние разработки (продолжение)



Сборка из 18 трубчатых мембран

Зависимость скорости извлечения водорода от давления газовой смеси



Поток сверхчистого водорода извлечённый из продуктов конверсии углеводородов: метана, дизтоплива (Евро 5) и цетана ($C_{16}H_{34}$).

Ключевые объекты индивидуальной собственности

- Полезная модель, патент РФ № 130987. Мембрана для выделения водорода из газовых смесей. Приоритет от 29.01.2013 г.
- Полезная модель, патент РФ № 129416. Мембрана для выделения водорода из газовых смесей. Приоритет от 11.09.2012.
- Полезная модель, патент РФ № 126266. Мембрана для выделения водорода из газовых смесей. Приоритет от 30.10.2012 г.
- Полезная модель, патент РФ № 110541. Устройство масс-спектрометрического анализа чистоты водорода и количественного состава газовых примесей. Приоритет от 17.05.2011 г.
- Полезная модель, патент РФ № 147541 Композитная мембрана для выделения водорода из газовых смесей. Приоритет от 10.11.2014 Поданные заявки и др.

В рамках реализации проекта будут созданы ИС на способ и технологию.

Заключение

- Разработана лабораторная технология изготовления трубчатых мембран из сплавов ванадия с палладиевым покрытием внешней и внутренней сторон и переходами для монтажа.
- Продемонстрирована удельная производительность созданных мембран, в разы превышающая производительность коммерческих мембран из палладиевых сплавов.
- Проведены успешные долговременные испытания мембран (более 10 000 часов).
- Разработана лабораторная технология изготовления мембранных сборок.
- Продемонстрировано извлечение сверхчистого водорода (16 нл/мин) с помощью мембранной сборки (18 трубчатых мембран) из продуктов паровой конверсии углеводородных топлив (включая дизельное).
- Создан электрохимический генератор на 1 кВт с мультитопливным процессором, ключевым инновационным элементом которого является мембранная система, питающая топливный элемент сверхчистым водородом.

Ближайшие цели и задачи потенциального проекта

1.Продолжение работы в направлении оптимизации структуры и конструкции мембран.

2.Создание промышленного прототипа конечного продукта: блока мембранного выделения ультрачистого водорода с системой питания и управления («обвязка»).

3. Переход от лабораторной к промышленной технологии изготовления мембран и их сборок

4.Завершение оформления ОИС для продвижения на международные рынки

5.Проведение маркетинговых мероприятий

6.Проработка запросов на коммерческое использование ОИС

7.Коммерческая реализация ОИС

Потенциальные участники следующего этапа проекта

- ОО «Международная академия технологических наук» (МАТН) - инициатор проекта
- ПАО «Газпром»
- СПбГУТ им. Бонч-Бруевича
- ООО «МЕВОДЭНА»
- В.В. Плеханова - Институт инновационного развития промышленности
- МИРЭА-РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ - Научно-технологический центр «твердотельная электроника»



Предварительная оценка технико-экономических показателей проекта

*Институт инновационного развития промышленности
Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова*

Всего инвестиций, млн. руб.	208
• средства из федерального бюджета, млн. руб	100
• средства инвестора	108
Горизонт расчета, лет	5
Срок окупаемости, лет	2,5
Ставка дисконтирования, %	15 %
IRR, %	39,6 %
NPV, млн.руб.	186.7
Индекс прибыльности	1,71

Международная академия технологических наук

Спасибо за внимание!

Казань

Апрель 2021