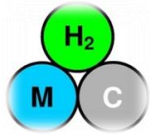


# Металлогидридные материалы и устройства для водородного аккумулирования электроэнергии

Тарасов Борис Петрович,  
Фурсиков П.В., Володин А.А., Арбузов А.А.



Лаборатория водородного аккумулирования электроэнергии



Центр компетенции по технологиям новых и мобильных источников энергии



Институт проблем химической физики РАН

142432, Черноголовка, Московская обл., пр-т Академика Семенова, д.1  
e-mail: tarasov@icp.ac.ru

Всероссийская научно-практическая конференция «Водород. Технологии. Будущее»,  
г. Томск, ТПУ, 23-24 декабря 2020 года

# Основная причина развития водородной энергетики – уменьшение количества выброса CO<sub>2</sub>

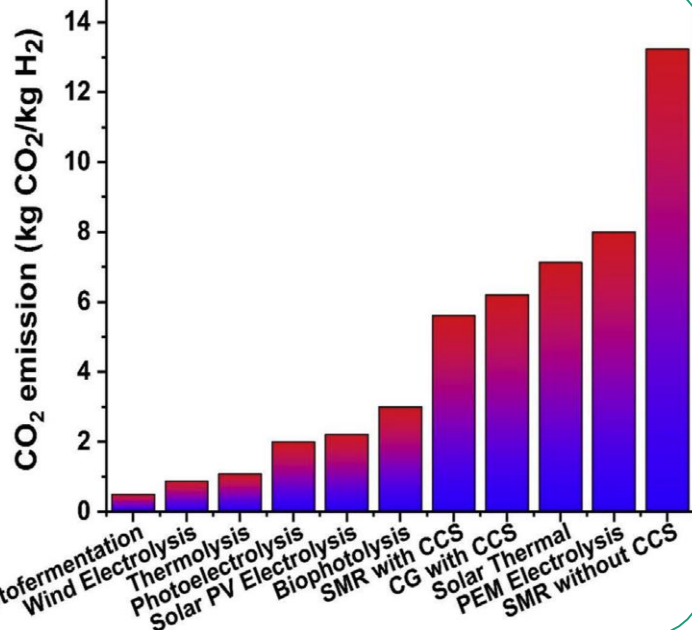
Основной тренд производства водорода: электролиз воды с использованием ВИЭ.

Преимущество: отсутствие углеродного следа, экологическая чистота.

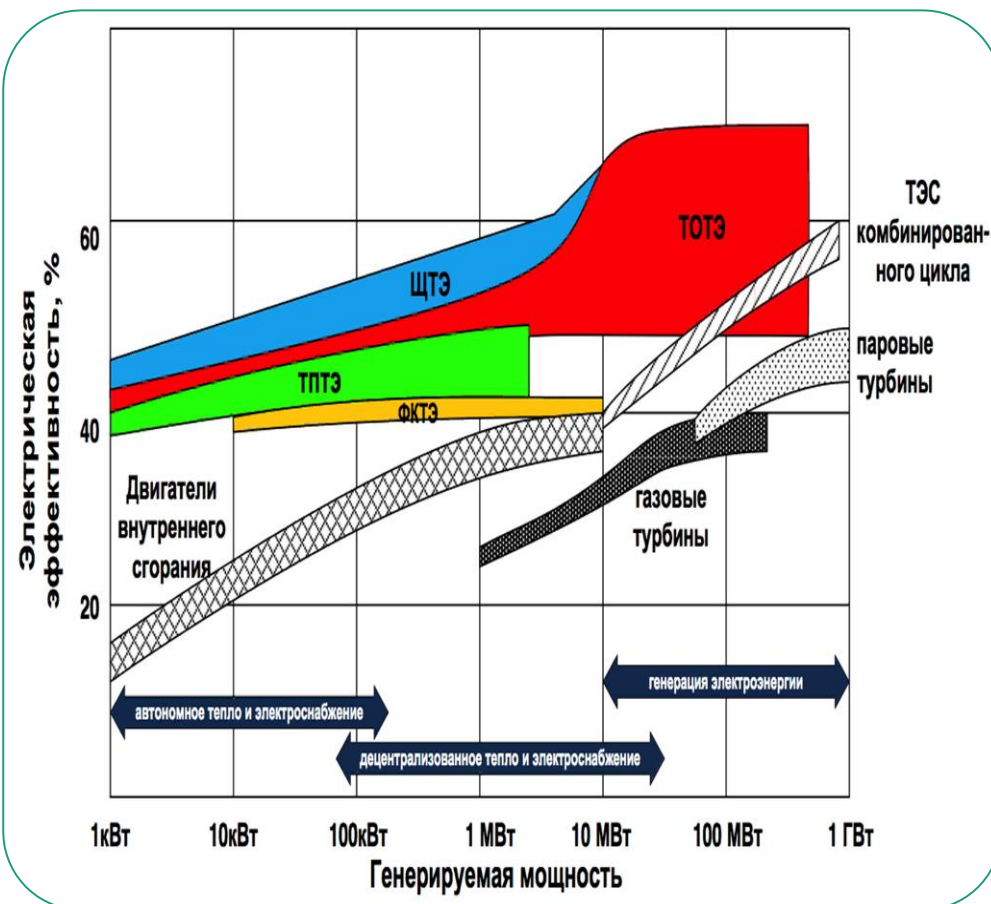
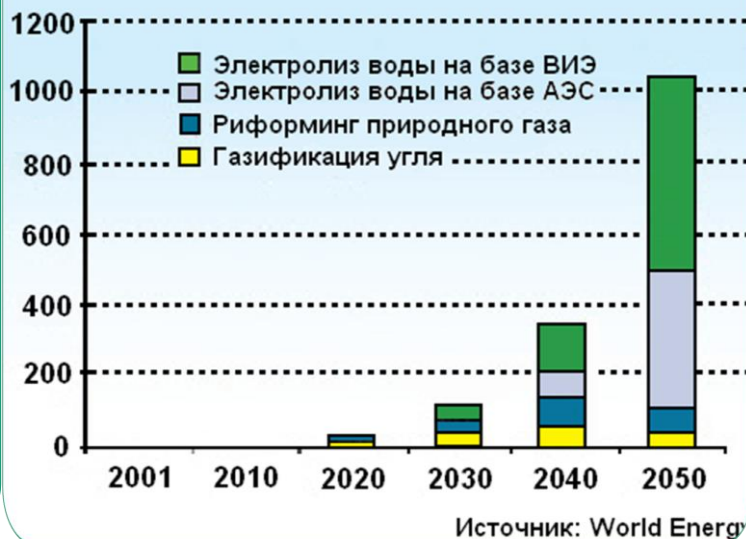
- «Зеленый» (возобновляемый) водород: безуглеродный метод - электролиз с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).
- «Желтый» водород: безуглеродный - электролиз с использованием атомных электростанций (АЭС),
- «Бирюзовый» водород: малоуглеродный - пиролиз метана (природного газа),
- «Голубой» водород: среднеуглеродный - паровая конверсия метана или угля с утилизацией CO<sub>2</sub> (CCS),
- «Серый» водород: высокоуглеродный - паровая конверсия метана,
- «Бурый» водород: высокоуглеродный - газификация или паровая конверсия угля.

Основной тренд получения электроэнергии из водорода: топливные элементы.

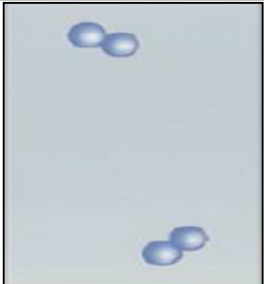
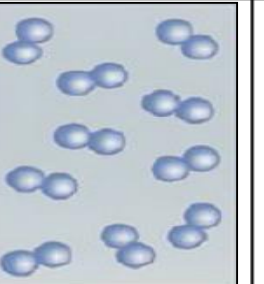
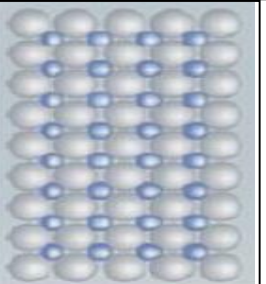
Преимущество: эффективность и экологическая чистота.



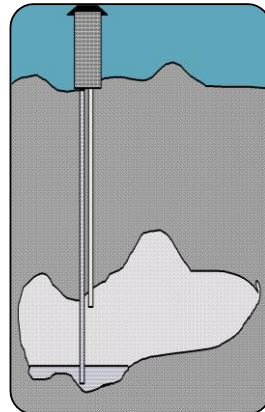
Производство водорода в мировом энергобалансе (водородный сценарий), млн т н.э.



# Основная проблема водородной энергетики – безопасное хранение и транспортировка водорода

Состояние водорода	Газообразный водород			Жидкий водород	Водород в связанном состоянии
Давление, атм	1	350	700	1	1
Температура, К	300	300	300	20	300
Расстояние $H_2-H_2$ или $H-H$ , нм	3,3	0,54	0,45	0,36	0,21
Концентрация атомов, ат./см <sup>3</sup>	$5,6 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{22}$	$2,3 \cdot 10^{22}$	$4,2 \cdot 10^{22}$	$10,7 \cdot 10^{22}$
Схема расположения молекул или атомов водорода					

Системы хранения





# Существующие способы хранения и транспортировки водорода

Хранение и транспортировка водорода в сжатом и сжиженном состояниях  
в больших масштабах

проблема: высокие требования техники безопасности и дороговизна

Стальные и композитные баллоны высокого давления

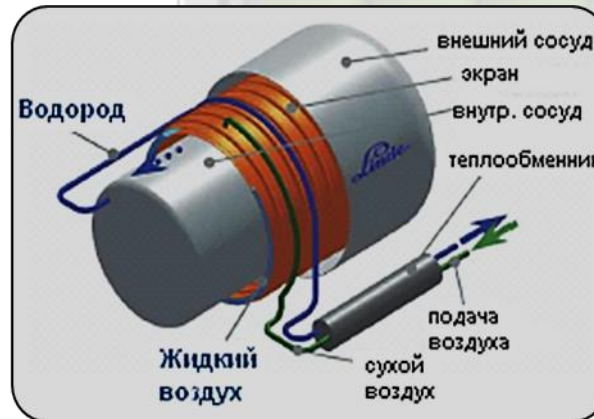


Стальные  
баллоны

вес – 60 кг,  
объем – 40 л,  
 $P_{H_2}$  – 150 атм,  
( $H_2$ : 6000 л н.у., 530 г)  
(ЕС, США – 200 атм)



Криогенные баки, танки, цистерны: 20 К, 1 атм



# Перспективные варианты хранения водорода

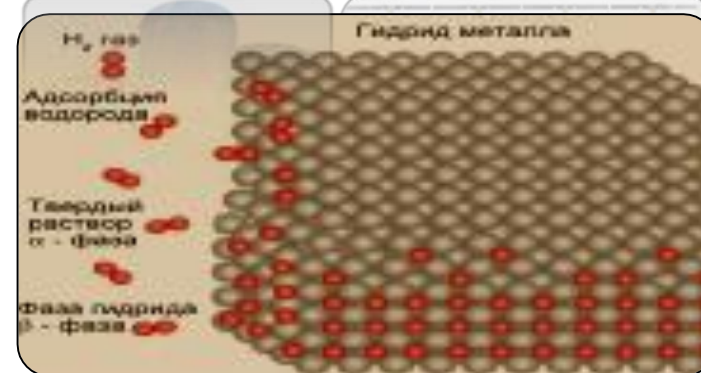
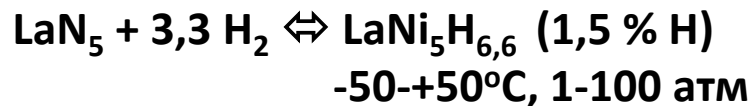
## ➤ В газообразном состоянии в композитных баллонах

Характеристики	Коммерческий продукт	Разработки
Давление, бар	до 350	до 700
Удельный вес баллона, кг/л	0.3-0.5	0.15-0.20
Плотность H, масс. %	5-7	10.5-13.8
Объемная плотность H, г/л	14-18	22-40



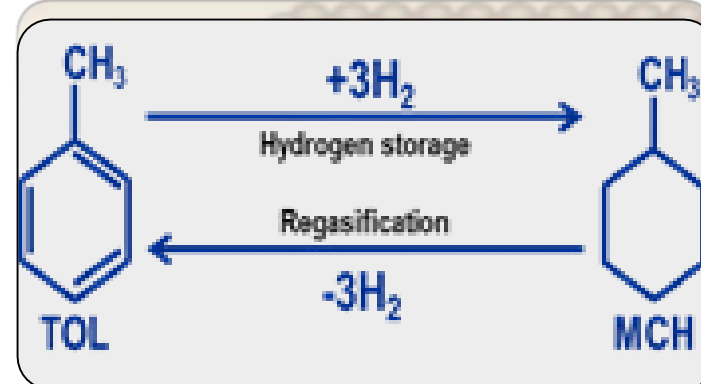
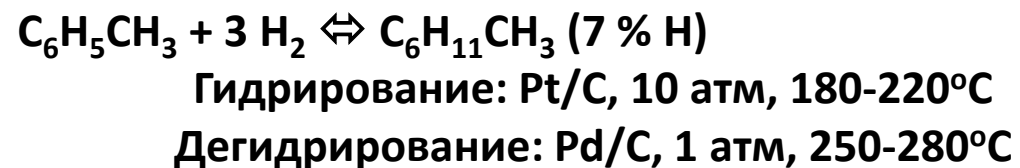
*Проблема: высокие требования безопасности*

## ➤ в виде обратимых металлгидридов:



*Проблема: высокая плотность материала*

## ➤ в виде обратимо гидрирующихся органических соединений:



*Проблема: токсичность органических соединений*



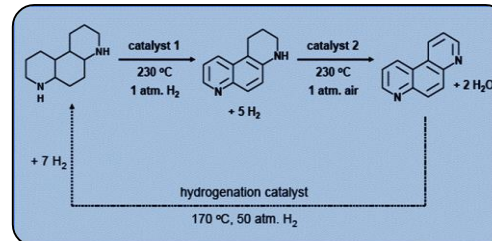
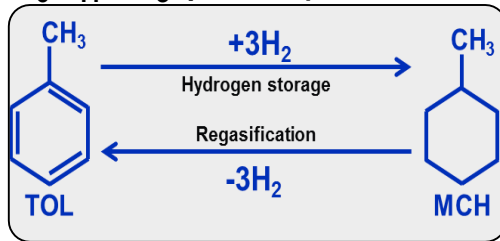
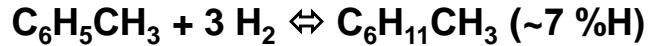
# Перспективные варианты транспортировки водорода

1. Добавка H<sub>2</sub> в газопроводы: смесь CH<sub>4</sub> с H<sub>2</sub> (до 20%);

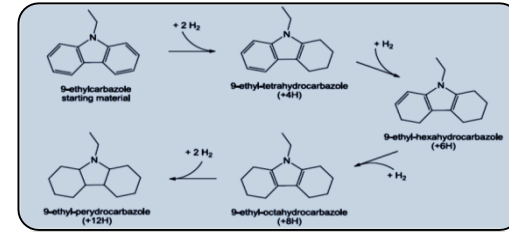
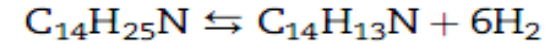


*проблема – водородное охрупчивание*

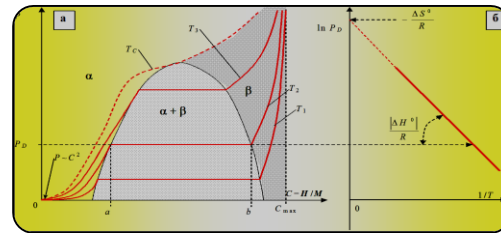
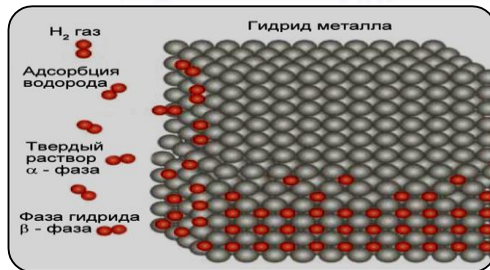
2. Жидкие обратимо гидрирующиеся органические соединения:



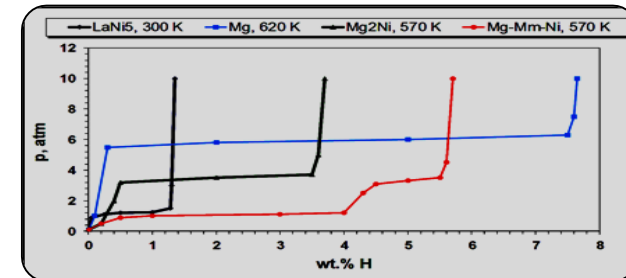
*проблема – токсичность «ароматики»*



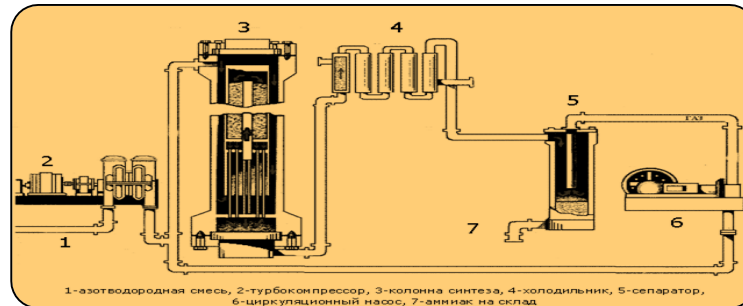
3. Твердые обратимо гидрирующиеся металлы и сплавы:



*проблема – высокая плотность MH*



4. Жидкий аммиак:  $2 NH_3 \rightleftharpoons N_2 + 3 H_2$  (17% H):



*проблема – жесткие условия реакции*


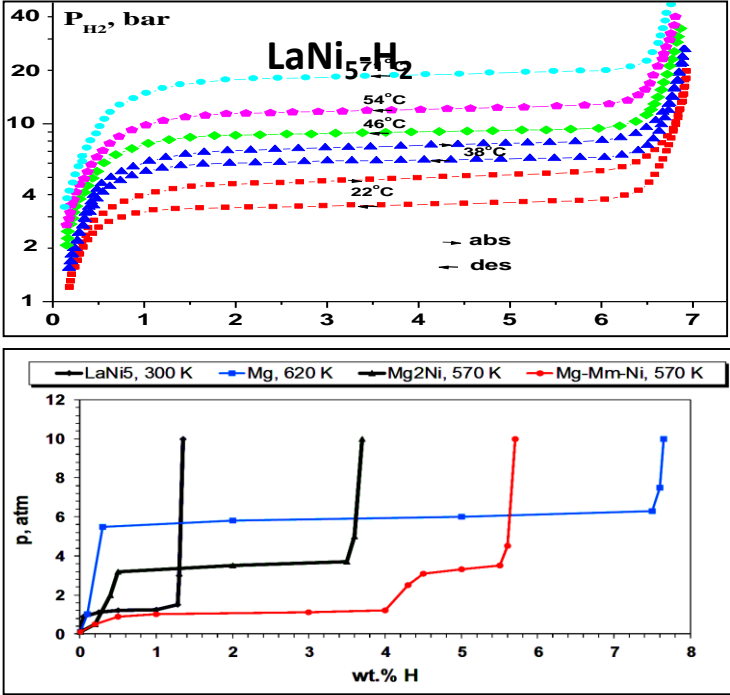
Кат.: Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

P = 350-500 атм,

T = 400-600°C

# Металлогидридный способ хранения – наиболее компактный и безопасный

Компактность – из-за плотной упаковки атомов H в гидриде, безопасность – из-за низкого давления H<sub>2</sub>.

Макет аккумулятора	Принцип действия	Материал	Температура, °C	Количество H <sub>2</sub> , мас.%
	<p>Обратимое гидрирование металлов, сплавов, КОМПОЗИТОВ:</p> $M + xH_2 \rightleftharpoons MH_{2x}$ 	<p>Металлы, сплавы, КОМПОЗИТЫ:</p> <p>La(Mm)Ni<sub>5</sub></p> <p>TiFe</p> <p>(Ti,Zr)(Mn,Cr)<sub>2</sub></p> <p>La(Mg)Ni<sub>3</sub></p> <p>Mg<sub>2</sub>Ni</p> <p>Сплавы V</p> <p>Mg-Mm-Ni</p> <p>Mg + 5%C</p> <p>Mg + 3%Ni/C</p>	<p>-50 – +50</p> <p>-30 – +50</p> <p>-30 – +50</p> <p>0 – +100</p> <p>250 – 300</p> <p>200 - 400</p> <p>250 – 300</p> <p>300 – 350</p> <p>300 – 350</p>	<p>1.5</p> <p>1.8</p> <p>2.0</p> <p>2.0</p> <p>3.6</p> <p>3.6</p> <p>5.5</p> <p>7.0</p> <p>7.0</p>

# Металлогидридные аккумуляторы водорода многократного действия

## Преимущества:

- ✓ высокое объемное содержание водорода,
- ✓ дополнительная очистка водорода,
- ✓ заправка электролизным водородом,
- ✓ многократность использования,
- ✓ регулируемость давления и скорости поглощения и выделения водорода,
- ✓ компактность, безопасность, бесшумность.

## Области применения:

- хранение, очистка и транспортировка водорода,
- выравнивание давления в водородных линиях,
- гидрирование и восстановление соединений,
- гидридное диспергирование сплавов,
- обеспечение питанием топливных элементов,
- водородное аккумулирование энергии.





# Аккумуляторы водорода многократного действия и химические источники водорода

Тип источника водорода	Принцип действия	Материал	Температура, °С	Количество H <sub>2</sub> , мас.%
<p><b>Металлогидридные аккумуляторы водорода</b></p> 	<p>Обратимое гидрирование металлов, сплавов, композитов:</p> $M + xH_2 \rightleftharpoons MH_{2x}$	<p>Металлы, сплавы, композиты:</p> <p>La(Mm)Ni<sub>5</sub> TiFe (Ti,Zr)(Mn,Cr)<sub>2</sub> Mg<sub>2</sub>Ni Mg-Mm-Ni Mg + 5%С</p>	<p>-50 – +50 -30 – +50 -30 – +50 250 – 300 250 – 300 300 – 350</p>	<p>1.5 1.8 2.0 3.6 5.5 7.0</p>
<p><b>Генераторы водорода термолизного типа</b></p> 	<p>Термическое разложение гидридов и их композитов:</p> $MH_{2x} \rightarrow M + xH_2$	<p>Гидриды металлов, композиты:</p> <p>AlH<sub>3</sub> MgH<sub>2</sub> LiBH<sub>4</sub> NaBH<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O NH<sub>3</sub>BH<sub>3</sub></p>	<p>100–200 300–350 250–300 100–150 100–400</p>	<p>10 7.5 12.5 9.5 18</p>
<p><b>Генераторы водорода гидролизного типа</b></p> 	<p>Гидролиз металлов, сплавов, гидридов и композитов:</p> $M + xH_2O \rightarrow M(OH)_x + 0.5xH_2$ $MH_x + xH_2O \rightarrow M(OH)_x + xH_2$	<p>Металлы, сплавы, гидриды:</p> <p>Mg Al MgH<sub>2</sub> NaBH<sub>4</sub> NaBH<sub>4</sub>+NaSi</p>	<p>0–50 0–80 0–80 0–80 0–60</p>	<p>3–5 4–6 5–6 7–9 7–9</p>

# Водородная система резервного электропитания с металлгидридной системой хранения: ИПХФ РАН – Инэнерджи

Водородная система резервного электроснабжения:  
металлогидридные аккумуляторы водорода с топливными элементами.



## Потенциальные области применения:

- **Электроэнергетика:** резервное электропитание вместо дизельных генераторов и электрохимических аккумуляторных батарей.
- **Телекоммуникация:** повышение надежности электропитания оборудования.
- **Электротехника:** бесперебойное питание ключевых узлов корпоративной сети и критичных объектов.

# Зарядное устройство для портативной техники с металлгидридным аккумулятором водорода: Инэнерджи – ИПХФ РАН



Электролизер



МН-аккумулятор



Топливный элемент



# Линия производства и заправки водорода с металлгидридным компрессором: СКТБЭ – ИПХФ



Щелочной генератор водорода



Компрессор ТСК2-3,5/150



Водородные баллоны

Характеристики		Материал				
		LaNi <sub>5</sub>	La <sub>0.8</sub> Ce <sub>0.2</sub> Ni <sub>5</sub>	La <sub>0.5</sub> Ce <sub>0.5</sub> Ni <sub>5</sub>	Ti <sub>0.55</sub> Zr <sub>0.45</sub> (Cr,Mn,Fe,Ni) <sub>2</sub>	Ti <sub>0.65</sub> Zr <sub>0.35</sub> (Cr,Mn,Fe,Ni) <sub>2</sub>
Абсорбция H <sub>2</sub> при 20 °С	P <sub>H2</sub> , атм	5	10	40	15	50
	[H <sub>2</sub> ], л/кг	160	160	130	160	150
Температура десорбции, °С	P <sub>H2</sub> , 1 атм	18	-8	-30	-34	-60
	P <sub>H2</sub> , 10 атм	77	52	24	42	-10

# Стенд водородной системы аккумулирования электроэнергии из солнечных генераторов

Солнечная панель



1

Система накопления и преобразования электроэнергии



2

Электролизный генератор водорода



3

Металлогидридный аккумулятор водорода



4

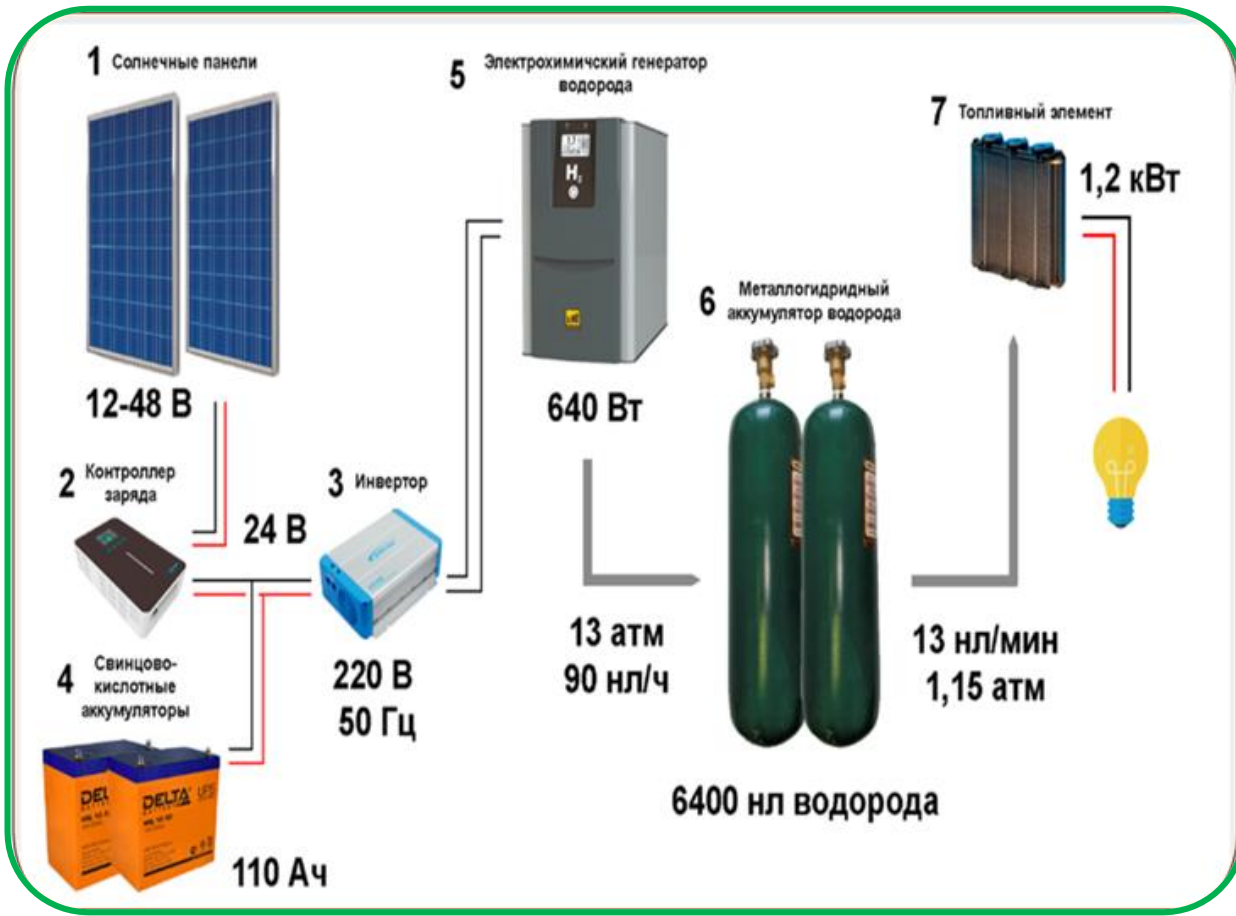
Водород-воздушный топливный элемент



5

- 1 - Солнечная панель JAP60S09-280/SC: 280 Вт, 12В;
- 2 - Система накопления и преобразования электроэнергии (контроллер заряда Steca Solar Charge Controller PR3030, инвертор Cotek Pure sine wave inverter SP-700, батареи Banner Stand by Bull 55Ач/12В);
- 3 - Электролизный генератор водорода HG 4U PRO 1200: 1200 см<sup>3</sup>/мин, 16 атм;
- 4 - Металлогидридный аккумулятор водорода: 4000 л H<sub>2</sub>;
- 5 - Топливный элемент Ballard FCGen: 1.2 кВт.

# Водородная система аккумулирования электроэнергии из солнечных генераторов: ИПХФ – Драгцветмет – Инэнерджи



1 – Солнечные панели SRP-280-ВРВ, 2 – Контроллер заряда Wipanda MPPT Solar Charge Controller, 3 – Инвертор EPsolar Epever SHI1000-22, 4 – Аккумуляторы Delta HRL 12-55, 5 – генератор водорода HG Pro 1500, 6 – Металлогидридный аккумулятор водорода, 7 – Топливный элемент Ballard FCGen 1020ACS.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, Соглашение № 05.574.21.0209 в рамках ФЦП-Приоритеты



# Предложения к сотрудничеству в рамках Консорциума

## Научно-исследовательские работы по поиску и разработке:

- новых водород-аккумулирующих материалов, в т.ч. наноразмерных и композитных,
- металл-графеновых катализаторов и сорбентов водорода,
- новых анодных и катодных материалов для NiMH перезаряжаемых источников тока.

## Прикладные НИР по созданию технологии и пилотных установок:

- систем водородного аккумулирования электроэнергии,
- металлгидридных аккумуляторов и компрессоров водорода,
- химических генераторов и компрессоров водорода термолизного и гидролизного типов,
- прототипов NiMH перезаряжаемых источников тока,
- пилотных демонстрационных установок в области водородной энергетики.

## Научно-образовательные программы:

- усовершенствование спецкурсов по водородной энергетике и водородному материаловедению,
- создание учебно-демонстрационного оборудования для практических занятий со студентами,
- организация дистанционного обучения студентов и аспирантов в области водородной энергетики.

**Всероссийская научно-практическая конференция «Водород. Технологии. Будущее»,  
г. Томск, ТПУ, 23-24 декабря 2020 года**