

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА: АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКАХ

*В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев, Ю.П. Курило,  
Т.А. Пономаренко, Д.В. Виноградов*

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"  
г. Харьков, Украина; E-mail: tikhonovsky@kipt.kharkov.ua*

Кратко рассмотрено состояние работ в мире по использованию водорода в качестве экологически чистого источника энергии для транспорта и энергетики в целом. Приведены основные методы получения и хранения водорода, а также требования к ним. Особое внимание уделено анализу перспектив металлгидридного метода хранения водорода. На основе рассмотрения информационных потоков отмечены наиболее перспективные сплавы – накопители водорода и проанализированы тенденции развития этих материалов в различных странах.

Современное состояние мировой энергетики, основанной, главным образом, на традиционных углеводородных источниках сырья, даже по оптимистичным оценкам характеризуется как предкризисное. И дело не только в очевидном истощении этих ресурсов, но и в возрастании опасности глобальных катастроф вследствие загрязнения окружающей среды. Безусловно, атомная энергетика с учетом имеющихся запасов урана и тория будет играть все большую роль в мировой экономике. Предполагается, что в отдаленном будущем решающее место в крупномасштабной энергетике займет термоядерная энергия. Однако уже сейчас видно, что серьезные энергетические и экологические проблемы наступят мир прежде, чем в строй вступит первая термоядерная электростанция. Кроме того, даже если предположить, что атомная и термоядерная энергетика будет в состоянии произвести необходимое количество электроэнергии, остается неясным, каким образом полученная энергия может обеспечить, например, функционирование транспорта или жизнедеятельность удаленных районов. (На сегодняшний день транспорт использует около половины мирового объема потребления нефтепродуктов, а в США – до 65%. При этом в выхлопах двигателей внутреннего сгорания содержится около 45 токсичных веществ, в том числе канцерогены [1]). Поэтому поиск альтернативных возобновляемых и экологически чистых источников, способных обеспечить человечество энергией на ближайшие сотни лет, является одним из несомненных приоритетов современной науки. Этот поиск показывает, что одним из наиболее вероятных заменителей органического топлива энергоносителей для транспорта и энергетики в целом является водород [1-4]. Водород пригоден для всех видов тепловых двигателей: поршневых, турбинных, поршнетурбинных, двигателей Стирлинга и т.д. При этом водород как топливо имеет высокое содержание энергии на единицу массы – 120,7 МДж/кг, что выше, чем у любого органического топлива [1]. Использование водорода для

получения энергии ведет к резкому снижению загрязнения окружающей среды. (При сгорании водорода в кислороде токсичные выхлопы полностью отсутствуют, так как продуктом реакции является вода, а при сгорании в воздухе загрязнения намного ниже, чем при использовании бензина).

Очень важно, что водород может быть использован для прямого преобразования химической энергии в электрическую. Такое преобразование происходит в электрохимическом генераторе (топливном элементе) при соединении водорода с кислородом на одном из электродов [3-5], вредные выбросы при этом практически отсутствуют. Коэффициент полезного действия (КПД) топливного элемента может достигать очень высоких значений – от 40 до 70 %, и он относительно мало зависит от установленной мощности и нагрузки (напомним, что КПД тепловых машин, таких как двигатель внутреннего сгорания, дизель и т.д. не превышает 40%).

Именно прогресс в разработке топливных элементов (ТЭ) с высоким КПД вселяет уверенность в перспективах использования водорода как топлива при создании автономных мобильных и стационарных источников энергии. Такие источники могут найти широкое применение на транспорте, в том числе в автомобилях с так называемыми "гибридными" двигателями (обычный двигатель плюс электродвигатель на ТЭ). Автомобили с ТЭ особенно перспективны для использования в городских условиях. Другой бурно развивающийся рынок ТЭ связан с необходимостью увеличения длительности непрерывной работы малогабаритных электронных устройств (сотовых телефонов, портативных персональных компьютеров и т.д.) и замены в них обычных батарей и аккумуляторов на более энергоёмкие источники электропитания.

Успехи, достигнутые в разработке ТЭ, рост цен на традиционные энергоносители (в особенности на нефть), политическая нестабильность в странах – экспортерах нефти, экологические проблемы – все это привело к осознанию на правительственном

уровне необходимости ускоренного развития исследований и технологий в области водородной энергетики. В этой связи характерно решение президента США Дж. Буша о включении водородной энергетики в число национальных приоритетов. Конгресс США принял решение о финансировании в размере 1,3 млрд. дол. США работ по топливным элементам для автомобилей [1]. Япония поддерживает развитие технологий, основанных на водороде и ТЭ, путем 28-летней программы (1993-2020) с общим бюджетом 2,4 млрд. евро. Финансирование исследований по ТЭ в Европе составляет примерно 1/3 часть от финансирования в США и 1/4 часть от финансирования в Японии [1,3,4,6]. При этом в последние годы страны ЕС активно разрабатывают стратегию консолидации усилий правительств и крупных межнациональных компаний в области разработки водородных технологий и топливных элементов [3]. Отметим, что крупные негосударственные компании, главным образом автомобильные, также вкладывают в разработку водородных технологий значительные средства [1,3,6]. В России, например, компания "Норильский никель" заключила соглашение с Российской академией наук о выделении последней ежегодно 30 млн. долларов на работы в области водородной энергетики [4].

Существуют идеи и более широкой "глобализации" работ по водородной энергетике. Так, в ноябре 2003 г. подписано соглашение "Международное партнерство по водородной экономике". Его участниками стали Австралия, Великобритания, Бразилия, Германия, ЕС, Индия, Исландия, Италия, Канада, Китай, Норвегия, Республика Корея, Россия, США, Франция, Япония [1]. Предполагается, что "Международное партнерство по водородной экономике" (МПВЭ) обеспечит механизм организации, оценки и координации многосторонних исследований, разработок и программ развертывания, которые ускорят переход к глобальной водородной экономике [1]. Очевидно, что для перехода к водородной энергетике необходимо решить серьезные научные, технологические и технические проблемы. К таким проблемам относят в первую очередь получение достаточно дешевого водорода в массовом количестве, хранение и доставку водорода, эффективное его использование. Ниже мы вкратце остановимся на проблеме получения водорода и подробнее проанализируем вопросы хранения водорода, главным образом, с использованием материалов-аккумуляторов. С проблемой эффективного использования водорода можно ознакомиться в работах [3-5].

## ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА

Общее представление о различных технологиях получения водорода дает табл. 1.

На сегодняшний день рынок водорода в мире составляет около 50 млн.т, в том числе 12 млн.т в США. Согласно оценкам к 2010 г. рынок водорода в мире возрастет до 100 млн. т, из которых на США придется 50 млн.т. В настоящее время наиболее

рентабельным способом производства водорода является паровая конверсия метана (реформинг). Согласно данным Министерства энергетики США в 1995 г. стоимость водорода, получаемого реформингом, для условий большого завода составляла 7 дол. за 1 ГДж, что эквивалентно стоимости 0,24 дол. за 1 л бензина при стоимости природного газа 2,3 дол. за 1 ГДж (80 дол./1000 м<sup>3</sup>). Производство водорода путем электролиза воды на основе современной технологии оценивается по затратам от 10 до 20 дол. за 1 ГДж в зависимости от стоимости электроэнергии и капитальных вложений в электролизеры [1]. В будущем для массового производства водорода считается весьма перспективным использование атомной энергии. При этом рассматриваются два основных пути: а) использование избыточных мощностей АЭС в ночное время для наработки водорода методом электролиза; б) использование высокотемпературных реакторов с газовым или металлическим теплоносителем для получения водорода в процессе термических циклов. Последняя технология может быть наиболее выгодна с экономической точки зрения. (Разработанная в СССР в начале 70-х годов XX века концепция широкого использования производимого из воды с помощью ядерных реакторов водорода как энергоносителя в промышленности, энергетике, на транспорте и в быту получила название атомно-водородной энергетики [1,2]).

## ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА

Одной из центральных проблем водородной энергетики являются большие затраты на хранение и транспортировку водорода. Проблема связана в первую очередь с очень низкой плотностью водорода в газообразном состоянии (при атмосферном давлении и обычной температуре 1 кг водорода имеет объем 11 м<sup>3</sup>).

На сегодняшний день рассматривается несколько основных вариантов хранения водорода (табл. 2).

Различные способы хранения водорода сравниваются по ряду параметров, основными из которых являются:

1. Объемное содержание водорода (кг/м<sup>3</sup>) – масса водорода, приходящаяся на объем аккумулятора.

2. Массовое содержание водорода (кг водорода на кг общего веса заряженного аккумулятора в %).

3. Условия хранения (давление и температура), герметичность, чувствительность к влаге и воздуху.

4. Условия гидрирования-дегидрирования. При каких условиях происходит поглощение водорода аккумулятором и при каких условиях он выделяет водород – Т(К), Р(МПа), необходимость катализатора или химического реагента.

5. Циклическая устойчивость. Сколько циклов перезарядки с сохранением приемлемых параметров может обеспечить аккумулятор (фактически – время эксплуатации).

6. Стоимость.

## Основные технологии получения водорода [1,3]

Технология получения водорода	Преимущества	Недостатки
1	2	3
<i>Электролиз:</i> разложение воды электрическим током	Устоявшаяся и коммерчески доступная технология; детально изученный промышленный процесс, удобный для получения водорода от воспроизводимых источников энергии (например, солнечной), компенсирует периодическую природу некоторых источников возобновляемой энергии; высокая чистота конечного продукта	Высокие энергозатраты, конкуренция с прямым использованием возобновляемой электроэнергетики
<i>Реформинг (стационарный и на транспорте):</i> тепловое разложение углеводородного топлива паром	Хорошо изучен в больших масштабах; широко распространенный процесс; низкая стоимость продукта из природного газа; возможность комбинации с секвестрацией двуокиси углерода ("углеродное хранение")	Маломасштабные устройства не имеют коммерческого значения; конечный продукт содержит примеси, требуется газоочистка для некоторых приложений; выбросы двуокиси углерода; дополнительные затраты на секвестрацию двуокиси углерода; первичное топливо может использоваться непосредственно
<i>Газификация:</i> разложение тяжелых углеводородов и биомассы на водород и газы для последующего реформинга	Технология хорошо изучена для тяжелых углеводородов в больших масштабах; может быть использована для твердых и жидких топлив; продемонстрирована газификация биомассы	Маломасштабные устройства редки; конечный продукт требует интенсивной очистки перед использованием; биомасса используется в качестве удобрения; процесс до конца не изучен; конкуренция с синтетическими топливами из биомассы
<i>Термохимические циклы,</i> использующие дешевое высокотемпературное тепло ядерных реакторов или концентрированной солнечной энергии	Принципиально возможно производство больших объемов при низкой стоимости и без выброса парниковых газов для тяжелой промышленности и транспорта. Существует международное сотрудничество в области исследований, разработок и внедрения	Процесс сложен, еще не имеет коммерческого значения, требуются долговременные исследования (порядка 10 лет) материалов, усовершенствования химической технологии; требуется высокотемпературный ядерный реактор (ВТЯР) или солнечные концентраторы
<i>Биологическое производство [7]:</i> при некоторых условиях водоросли и бактерии вырабатывают водород	Потенциально большой ресурс	Малая скорость накопления водорода; нужны большие площади; наиболее подходящие объекты еще не найдены; исследования продолжаются

С учетом перспектив использования водорода в мобильных системах различными организациями были разработаны основные требования к хранению водорода приведены в табл.3.

В табл. 4 представлены характеристики некоторых металлогидридов, перспективных в качестве материалов для хранения водорода.

Анализ требований и данных по характеристикам различных систем хранения водорода (см.табл. 2-4) показывает, что хранение водорода в связанном виде в гидридах является весьма перспективным. Так, ряд гидридов на основе магния по массовому и объемному содержанию водорода

удовлетворяет (или близок к этому) требованиям, изложенным в табл. 3 (отметим, что рекорд по граvimетрическому содержанию водорода принадлежит  $\text{LiBH}_4$  и  $\text{VeH}_2$  – около 18 мас.%, а по объемному содержанию  $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$  – 150 кг/м<sup>3</sup> [10]).

Таблица 2

**Основные методы хранения водорода [3,8,9]**

Способы хранения	Преимущества	Недостатки
1. Баллоны со сжатым газом (T=300 К, P<200 бар)	Технология хорошо отработана и доступна, стоимость относительно невысока	Низкое объемное содержание (около 7,7 кг/м <sup>3</sup> при давлении 100 бар). Плотность запасенной энергии при высоких давлениях (до 700 бар) сравнима с жидким водородом, но технология хранения при таких высоких давлениях до конца не отработана
2. Емкости с жидким водородом (T =20,4 К)	Технология доступна, высокая плотность (71 кг/м <sup>3</sup> )	Высокие энергозатраты на сжижение, потери водорода на испарение, необходимость суперизоляции, как следствие, высокая стоимость
3. Криоадсорбционный: активированный уголь (T=155 К)	Технология проста и достаточно отработана	Низкое объемное содержание (0,5... 20 кг/м <sup>3</sup> ). Необходимость охлаждения и компримирования
4. Углеродные наноструктуры: нанотрубки, фуллерены	Технологии в перспективе могут обеспечить высокую плотность хранения водорода (30... 100 кг/м <sup>3</sup> )	Производство углеродных структур недостаточно отработано, результаты по удержанию водорода невоспроизводимы
5. Гидриды металлов, сплавов, интерметаллических соединений и композитов	Удобство и безопасность хранения в твердой фазе (в связанном состоянии); ряд технологий достаточно хорошо отработаны	Недостаточная емкость, необходимость подогрева, деградация со временем, относительно высокая стоимость

Таблица 3

**Современные требования к мобильным системам хранения водорода [9]**

Японская правительственная программа WE-NET	Департамент энергетики США	Международное Энергетическое Агентство
Количество водорода – >3мас.%. Температура дегидрирования <100 °С. Циклическая устойчивость – >90% после 5000 циклов	Количество водорода – >6мас.%. Количество водорода по объему - >60 кг/м <sup>3</sup>	Количество водорода - >5мас%. Температура дегидрирования – <150 °С

Таблица 4

**Характеристики перспективных металлгидридных систем хранения водорода [9]**

Металлическая фаза	Плотность сплава (гидрида), г/см <sup>3</sup>	Содержание Н в гидриде, мас. %	Условия выделения водорода		ΔH, кДж/моль H <sub>2</sub>
			T, К	P <sub>H<sub>2</sub></sub> , МПа	
LaNi <sub>5</sub>	8,3 (6,6)	1,4	293	0,12...0,15	31
La <sub>0,7</sub> Mm <sub>0,3</sub> Ni <sub>5</sub>	8,2 (6,5)	1,4	293	0,35...0,40	30
TiFe	6,9 (5,5)	1,7	293	0,1...0,2	30...33
(Ti,Zr)(Mn,V,Fe,Gr) <sub>2</sub>	6...7 (5...6)	1,8...2,2	293	0,1...1,0	30...40

Mg <sub>2</sub> Ni	3,4 (2,7)	3,7	523	0,12...0,15	65
Mg-Mm-Ni	2,5 (2,1)	5...5,4	573	0,3 и 0,1	70

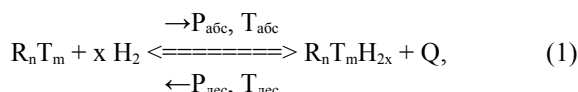
Примечания: 1. Mm – мишметалл. 2. ΔH - количество тепла, выделяемого при образовании гидроида (соответственно поглощаемого при диссоциации гидроида).

Основные трудности, которые необходимо решить для этих материалов, это улучшение условий сорбции-десорбции и повышение циклической устойчивости аккумулятора.

Ниже мы подробнее остановимся на некоторых аспектах гидридного хранения водорода и проанализируем потоки научной литературы по проблеме хранения водорода.

### АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ ГИДРИДНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА

В основе металлгидридного способа аккумулярования водорода лежит способность ряда металлов, интерметаллических соединений, сплавов и композиционных материалов обратимо и избирательно поглощать водород по реакции [ 9]:



где R – гидридообразующий металл II, III и IV групп; T – 3d и 4d-переходный металл; n, m=1...5; Q – теплота реакции.

Повышение давления газообразного водорода и понижение температуры смещают равновесие (1) в сторону образования гидроида, а понижение давления и повышение температуры вызывают разложение гидроида.

Интерес к гидроидам как источникам водорода появился во второй половине 20-го века. Так, в 1960 г. В.И. Михеева в книге "Гидриды переходных металлов" [11], отметила целесообразность использования гидридов металлов как источника водорода высокой чистоты (выделяющийся из гидридных фаз водород содержит не более 0,001% газообразных примесей), поскольку в них атомы водорода "химически скомпактированы" более плотно, чем в жидком водороде. Возможность реализовать эту идею практически появилась лишь в 1970 г, когда было обнаружено, что интерметаллид LaNi<sub>5</sub> способен поглощать, а при десорбции выделять большее количество водорода при температурах, близких к комнатной, и давлениях порядка 0,2 МПа [10]. В результате последующих исследований было синтезировано большое количество сплавов-накопителей водорода [8,12-14].

Постоянно растущий интерес к проблеме хранения водорода в целом и к разработке сплавов-накопителей водорода, в частности, иллюстрируется рис.1, 2. Исследования информационных потоков осуществлялись нами с помощью анализа Международной автоматизированной Базы Данных (БД) "Materials Science Citation Index" (MSCI), созданной в 1991 г. Институтом Научной Информации США.

В БД вводятся рефераты публикаций из 500 наименований журналов всего мира по материаловедению.

Анализ рис.1, 2 позволяет сделать несколько выводов.

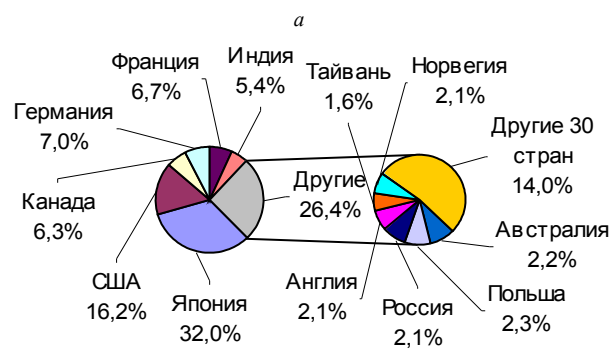
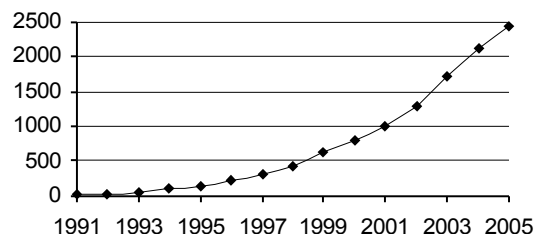


Рис.1. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991- июнь 2005 гг.) по проблеме хранения водорода (а) и вклад стран в публикации (б)

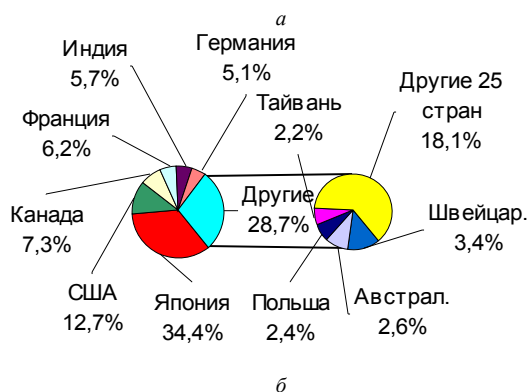
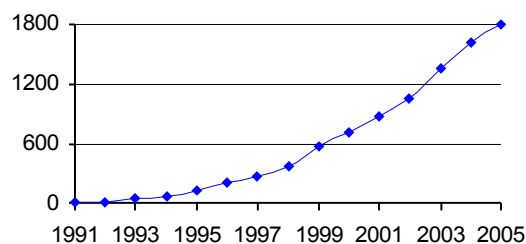
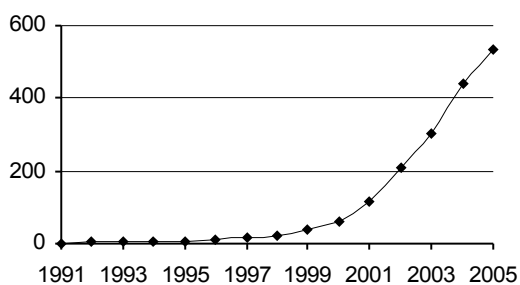


Рис. 2. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991 – июнь 2005 гг.)

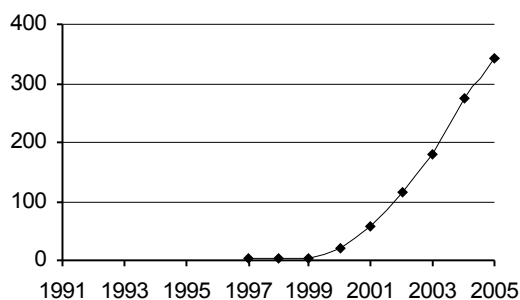
по гидридным материалам для хранения водорода  
(а) и вклад стран в публикации (б)

Во-первых, видно, что публикации по гидридно-му хранению водорода составляют основную долю всех документов, связанных с проблемой хранения водорода. Во-вторых, лидирующее положение по числу публикаций по этим вопросам занимает Япония, значительно опережающая США. В-третьих, отметим относительно высокую долю индийских и норвежских публикаций. Отдельно заметим, что подавляющее число публикаций (около 93%) опубликовано на английском языке.

Хотя проблема использования углеродных структур для хранения водорода выходит за рамки данной статьи, отметим стремительный рост количества публикаций в этом направлении, особенно в части нанотрубок (рис.3). Причем, распределение публикаций по странам здесь существенно другое. Так, по использованию углеродных структур в целом доли Японии и США равны (приблизительно по 23%), а по нанотрубкам США опережает Японию (26% против 18%).



а



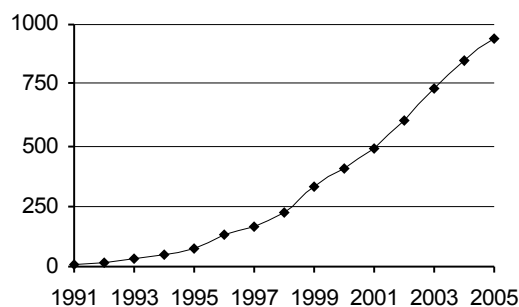
б

Рис.3. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991-июнь 2005 гг.) по проблеме хранения водорода в углеродных материалах в целом, включая активированный уголь (а), и в нанотрубках в отдельности(б)

Возвращаясь к проблеме хранения водорода в сплавах-накопителях водорода (СНВ), суммируем требования, предъявляемые к таким сплавам. СНВ должны [10]: 1) обладать большой сорбционной емкостью; 2) легко поглощать и выделять водород при комнатной или относительно невысоких температурах при давлениях водорода, равных или несколько ниже атмосферного; 3) выделять максимум погло-

щенного водорода при десорбции; 4) характеризоваться небольшим различием давлений водорода при его поглощении и выделении; 5) обладать высокой теплопроводностью; 6) легко активироваться; 7) иметь невысокую стоимость; 8) сохранять рабочие характеристики в процессе эксплуатации.

Разработанные к настоящему времени СНВ состоят из металлов, образующих стабильные гидриды (Mg, Ti, Zr, Nb, PЗМ и др.), и металлов, являющихся хорошими катализаторами в химических реакциях (Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu и др.), хотя и имеющих слабое сродство к водороду [13]. Предложенные сплавы-накопители водорода можно разделить на следующие группы: а) сплавы на основе PЗМ, в том числе мишметалла (*Mm*); б) сплавы на основе титана; в) сплавы на основе циркония; г) сплавы на основе магния; д) сплавы на основе других металлов и сплавов. Основой сплавов, содержащих PЗМ, является интерметаллид  $LaNi_5$  (соединения  $AB_5$ ) [13]. Поскольку лантан дорог, то его заменяют мишметаллом (*Mm*), который содержит 25...35 % La, 40...50% Ce, 4...15 % Pr, 4...15 % Nd, 1...7 % Sm + Gd и неизбежных примесей (Fe, Si, Mg, Al). Для увеличения способности сплавов типа  $LaNi_5(MmNi_5)$  к поглощению водорода, уменьшению числа циклов активации, повышению стабильности характеристик в процессе эксплуатации и снижения стоимости их легируют различными элементами (B, Al, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn). Сорбционную емкость СНВ типа  $RNi_5$ , где *R* – PЗМ, удалось заметно повысить, заменив часть PЗМ на Ca (например,  $Ca_{1-x}Ce_xNi_5$ ) [13], а также путем замещения атомов никеля другими элементами (Mg, Al, Ti, Zr, Mn, Mo, Cr, V, Fe, Co, Si, Zn и Sn). С учетом того, что эти сплавы исторически были первыми реальными материалами для накопителей водорода, вполне резонно, что им посвящено наибольшее число публикаций (рис. 4,а). И на сегодняшний день продолжают интенсивные исследования, направленные на улучшение свойств этих материалов [8,14].



а

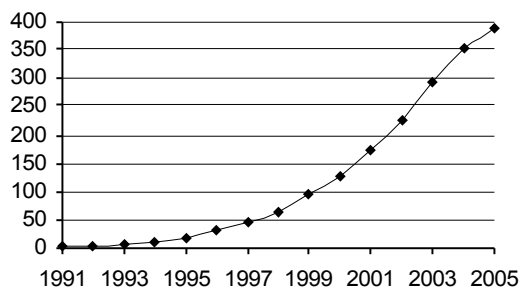


Рис.4. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991- июнь 2005гг.) по хранению водорода в различных сплавах: а – соединения типа  $AB_5$ ; б – сплавы на основе титана

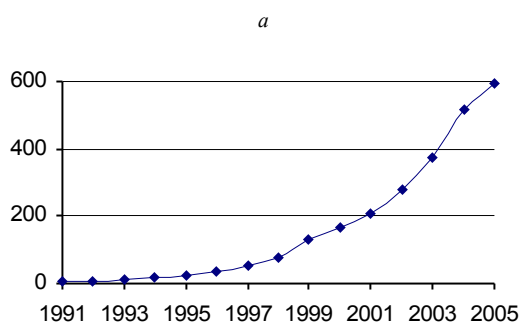
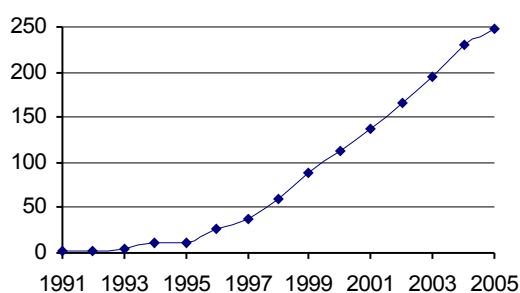


Рис.5. Кумулятивный рост количества информационных документов в БД MSCI (1991- июнь 2005гг.) по хранению водорода в различных сплавах: а – сплавы на основе циркония; б – сплавы на основе магния

Гидриды на основе сплавов титана имеют неплохие шансы заменить соединения  $AB_5$  главным образом благодаря своей низкой стоимости.

Исследования в области этих материалов (см.рис. 4,б) связаны в основном со сплавами на основе TiFe, TiMn, TiV и направлены на улучшение обратимости процессов поглощения-выделения водорода, улучшение термодинамических характеристик сплавов, повышение их водородной емкости [8, 13,15,16].

Сплавы-накопители водорода на основе циркония (рис. 5,а) базируются в основном на фазах Лавеса ( $ZrMn_2$ ,  $ZrV_2$ ,  $ZrFe_2$ ,  $ZrCo_2$ ) [8,12-17]. Однако гидриды этих фаз отличаются высокой стабильностью, так что давления их диссоциации слишком малы для практического использования. Легируя эти фазы железом, титаном, хромом, никелем, медью, удается повысить давление диссоциации до приемлемых величин.

Магний может связывать большое количество водорода (в расчете на единицу массы) 7,6% [9-13]. К достоинствам магния относятся также малая его плотность и низкая стоимость. С этими обстоятельствами и связан большой интерес к магнию и его сплавам (см.рис. 5,б). К сожалению, магний взаимодействует с водородом при довольно высоких температурах (250...400 °С) и трудно активируется. Для повышения скорости поглощения и выделения водорода магний превращают в порошок с размерами частиц менее 50...75 мкм и легируют Ni, La, Ce, Cd, Fe, Lu, Sn, Er, Ti, Mn [13]. Основная задача исследований СНВ на основе магния состоит в поиске легирующих элементов, снижающих температуры абсорбции и десорбции водорода.

СНВ на основе других металлов разработано мало [13], например сплавы типа  $(V_{1-x}Ti_x)_{1-y}M_y$ , где M – Fe, Cr, Mn, Si, Al, Ni. К преимуществам этих сплавов можно отнести возможность непрерывного изменения термодинамических характеристик путем изменения параметров их состава x и y.

Табл.5 показывает предпочтения, которые отдают исследователи различных стран в разработке тех или иных СНВ. Видно, что Украина по числу публикаций входит в число шести ведущих стран в области исследования СНВ на основе циркония. Вероятно, это связано с тем вниманием, которое уделяется в Украине цирконию как стратегическому материалу, играющему существенную роль в атомном реакторостроении.

Таблица 5

**Относительная доля публикаций специалистов ведущих стран по хранению водорода в СНВ**

Сплавы типа $AB_5$	Япония ~ 37%	США ~ 11%	Канада ~ 8%	Франция ~ 7%	Германия ~5%
Сплавы на основе Ti	Япония ~ 35%	США ~ 17%	Германия ~ 8%	Канада ~ 8%	Индия ~4%
Сплавы на основе Zr	Япония ~ 24%	США ~ 19%	Германия ~ 8%	Индия ~6%	Украина ~ 5%
Сплавы на основе Mg	Япония ~ 33%	Канада ~ 15%	США ~ 8 %	Германия ~ 7%	Франция ~ 6%

В заключение отметим, что в течение длительного времени оптимизация свойств СНВ осуществлялась в основном путем изменения их химического состава. В последние годы появилось значительное число публикаций, в которых изучается связь специфической микроструктуры (аморфной, микро- и нанокристаллической, нанокомпозитной и др.) со свойствами СНВ (см., например, [18]). Нам представляется, что дальнейшие успехи в улучшении свойств СНВ будут связаны с одновременной оптимизацией состава и микроструктуры сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Н.Н. Пономарев-Степной, А.Я. Столяревский. *Атомно-водородная энергетика — пути развития*, «Энергия», 2004, № 1, с. 3-9.
- В.А. Легасов, Н.Н. Пономарев-Степной, А.Н. Проценко. и др. Атомно-водородная энергетика (прогноз развития) // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика*. 1976, в. 1, с. 5-34.
- Водородная энергетика и топливные элементы — взгляд в будущее: Заключительный отчет экспертной группы Евросоюза*, 2003. ([www.ioffe.rssi.ru/FuelCells/FC-final.pdf](http://www.ioffe.rssi.ru/FuelCells/FC-final.pdf)).
- Г.А. Месяц, М.Д. Прохоров. Водородная энергетика и топливные элементы // *Вестник Российской академии наук*, 2004, т. 74, № 7, с.579-597. ([http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/VRAN/2004/04\\_07/HYDRO.HTM](http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/VRAN/2004/04_07/HYDRO.HTM)).
- Н.В. Коровин. Водородные топливные элементы. Состояние и проблемы // *7-я Международная конференция "Водородное материаловедение и химия углеродных материалов"*. 2001, с.928-929.
- A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy — To 2030 and Beyond . United Sate Department of Energy, 2002. ([www.energetics.com/rep\\_products.asp?Product=37](http://www.energetics.com/rep_products.asp?Product=37))
- D.V. Levin, L. Pitt, M. Love. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004, v.29, p. 173-185.
- A. Züttel. Materials for hydrogen storage. // *Materials Today*. 2003, September, p.24-33
- Б.П. Тарасов. Металлогидридные системы обратимого хранения водорода // *Сборник тезисов второго Международного симпозиума «Безопасность и экономика водородного транспорта» (IFSSEHT-2003) // Альтернативная энергетика и экология*. 2003, спец. выпуск, с.38-39.
- Б.М. Булычев, П.А. Стороженко. Молекулярные и ионные гидриды металлов как источники водорода для энергетических установок. // *Сборник тезисов второго Международного симпозиума «Безопасность и экономика водородного транспорта» (IFSSEHT-2003) // Альтернативная энергетика и экология*. 2003, спец. выпуск, с.30-31.
- В.И. Михеева. *Гидриды переходных металлов*. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 198с.
- М.М. Антонова. *Свойства гидридов металлов*. Киев: "Наукова думка", 1975, 128с.
- Б.А. Колачев, А.А. Ильин, В.А. Лавренко, Ю.В. Левинский. *Гидридные системы: Справочник*. М.: "Металлургия", 1992, 350с.
- E. David. An overview of advanced materials for hydrogen storage // *Journal of Materials Professing Technology*. 2005, v.162, pp. 169-177.
- Z. Dehoche, M. Savard, F. Laurencelle, J. Goyette. Ti-V-Mn based alloys for hydrogen compression system // *Journal of Alloys and Compounds*. 2005, v.400, №1-2, p.276-280.
- H. Taizhong, W.Zhu, X.Baojia, H.Tiesheng. Influence of V content on structure and hydrogen desorbtion performance of TiCrV-based hydrogen storage alloys // *Materials Chemistry and Physics*. 2005, v.93, p. 544-547
- Y.L. Du, G. Chen, G.L. Chen. Optimization of Zr-based hydrogen storage alloys for nickel-hydride batteries // *Intermetallics*. 2005, v.13, №3-4, p.399-402.
- M. Au. Hydrogen storage properties of magnesium based nanostructured composite materials // *Materials Science and Engineering B.*, 2005, v.117, №1, p.37-44.

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ: АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ НА ОСНОВІ ДАНИХ ПРО ІНФОРМАЦІЙНІ ПОТОКИ

*В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев, Ю.П. Куріло, Т.А. Пономаренко, Д.В. Виноградов*

Коротко розглянуто стан робот в світі по використанню водню як екологічно чистого джерела енергії для транспорту і енергетики в цілому. Наведено основні методи отримання і зберігання водню, а також вимоги до них. Особливу увагу відведено аналізу перспектив металогідридного методу зберігання водню. На основі розгляду інформаційних потоків відмічено найбільш перспективні сплави – накопичувачі водню та проаналізовано тенденції розвитку цих матеріалів в різних країнах.

## HYDROGEN STORAGE MATERIALS: ANALYSIS OF TRENDS IN THE PROGRESS BASED ON THE DATA RETRIEVED FROM INFORMATION FLOWS



*V.M. Azhazha, M.A. Tikhonovsky, A.G. Shepelev, Yu.P. Kurilo, T.A. Ponomarenko, D.V. Vinogradov*

A brief consideration is given to the world state of the art of using hydrogen as an ecologically clean energy source for transport and power engineering on the whole. Basic methods are presented together with the requirements imposed on the methods. Special attention is paid to the analysis of prospect for the metal-hydride method of hydrogen storage. On the basis of the information flows considered, most promising alloys as hydrogen accumulators are indicated; trends in the development of these materials in different countries are analyzed.