

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ
АРМЕНИЯ

Հայաստանի քիմիական հանդես 60, №2, 2007 Химический журнал Армении

УДК 541.44:546.821:546.8:539.12

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ Sc, Gd, Nd И Pr С ВОДОРОДОМ
В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ И В ПУЧКЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ**

А. Г. АЛЕКСАНЯН, С. К. ДОЛУХАНЯН И А. Г. АКОПЯН

Институт химической физики им. А.Б. Налбандяна
НАН Республики Армения, Ереван

В работе представлены результаты исследований радиационно-термических процессов, протекающих в системах Me-H₂ (Me – Sc, Gd, Pr и Nd) под пучком ускоренных электронов и в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Показано, что при облучении образцов пучком электронов в присутствии водорода инициируется экзотермическая реакция Me+H₂, приводящая к синтезу гидридов. Предварительно облученные в вакууме образцы металлов способны начать взаимодействие с водородом при относительно низких температурах (60°C и ниже) с образованием гидрида. Показано, что в режиме горения можно получать ди- и тригидриды металлов третьей группы.

Рис. 2, табл. 7, библиографические ссылки 8.

Способность РЗМ металлов связывать значительные количества водорода, сравнительно большие сечения захвата тепловых нейтронов (табл.1) [1] и относительно высокие температуры разложения гидридов делают их привлекательными материалами как для защиты от тепловых нейтронов, так и в качестве материалов для регулирования ядерных процессов в реакторах. Редкоземельные металлы и их соединения представляют интерес также как материалы для современных электронных и оптических устройств, батарей, катализаторы, абразивы и пр. В связи с этим поиск лучших методов синтеза гидридов РЗМ является актуальным.

Для решения этих проблем были изучены возможности образования гидридов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2,3] и под воздействием ускоренных электронов [4] в системах Sc и РЗМ (Gd, Nd, Pr) – H₂.

Сечения захвата тепловых нейтронов для РЗМ

Элемент	σ , барн	Элемент	σ , барн
La	8.9	Gd	46000
Ce	0.70	Tb	44
Pr	11.2	Dy	1100
Nd	46	Ho	64
Pm	60	Er	166
Sm	5500	Tm	36
Eu	4600	Lu	108

Металлы третьей группы и лантаноиды образуют гидриды состава от MeH_2 до MeH_3 . Исключение составляют скандий и европий, которые гидрируются до состава MeH_2 . Кристаллическая структура этих металлов, как правило (в большинстве случаев, кроме самария), гексагональная (ГПУ), а у гидридов – гранцентрированная кубическая (ГЦК, со структурой типа флюорита). Для легких РЗМ (La, Ce, Pr, Nd) при переходе от дигидридов MeH_2 к тригидридам MeH_{3-x} наблюдается постепенное заполнение октаэдрических пустот решетки флюорита атомами водорода. Это сопровождается сжатием решетки гидрида – уменьшается параметр ГЦК решетки. В порошковой металлургии традиционным методом получения гидридов Sc и РЗ металлов является синтез в вакуумной установке типа установки Сиверса [1,6]. Заранее очищенный металл помещают в реактор и дегазируют в вакууме 10^{-5} мм рт ст при 800°C в течение нескольких часов. В систему впускают водород до давления 1 атм и выдерживают металл 5-8 ч до полного поглощения, о чем судят по изменению давления в системе. Этим достаточно длительным методом получают дигидриды РЗМ, а для получения тригидридов требуются более жесткие условия: так, для получения тригидрида гадолиния нужны длительные выдержки до 40 ч.

В последние десятилетия в материаловедении признан и успешно развивается процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, который основан на проведении экзотермической реакции между химическими реагентами в режиме горения. В случае, когда один из реагентов газ (азот, водород), взаимодействие в зоне химической реакции происходит путем фильтрации активного газа из внешней среды. При этом после локального инициирования процесса формируется тепловая волна, которая самопроизвольно распространяется по исходному веществу, приводя к получению ценных конденсированных продуктов реакции.

Представляет интерес также инициированное воздействием ускоренных электронов поглощение водорода металлами и сплавами [4,5]. При воздействии на твердые тела ионизирующего облучения, в том числе и пучка ускоренных электронов, часто наблюдается нарушение их структуры и образование дефектов. Вследствие накопления радиационных дефектов возможно изменение межплоскостных расстояний в кристаллической решетке, появление дефектов упаковки (выражающееся в изменении чередования плотности упаковки

атомных слоев кристаллической решетки и возможного отступления от того порядка, который свойственен ГПУ и ГЦК структурам). Возникающие радиационные дефекты оказывают значительное влияние на физико-химические свойства исходного материала, в частности на их диффузионные свойства, реакционную способность и т.д. При изучении воздействия пучка ускоренных электронов на процессы $\text{Me}+\text{H}_2$ было установлено два режима поглощения водорода металлами и сплавами четвертой и пятой групп – радиационно-термический синтез (РТС) и «холодный синтез» (ХС) [4].

Экспериментальная часть

Техника эксперимента. Исследования по синтезу гидридов в режиме горения проводились по известной методике СВС [2] в бомбе постоянного давления. В процессе работы применяли газообразный водород электролизной чистоты при давлениях 1-60 *атм*. Температуры и скорости процесса измерялись вольфрам-рениевой термопарой.

Исследования радиационно-термических процессов проводились на линейном ускорителе электронов «ЛУЭ-5» Ереванского физического института с энергией пучка 4 *МэВ* при силе тока до 150 *А* в специальной камере, обеспечивающей электронно-лучевую обработку материалов в вакууме и в водороде при 1-2 *атм*. Облучение образцов проводилось в интервале мощностей дозы 0,025-1,3 *Мрад/с*. Измерение температур протекающих процессов при облучении образцов осуществлялось платина-платинородиевой термопарой.

В экспериментах использовались скандий Sc-2, гадолиний ГДМ-1 (99, 90%), празеодим ПрМ-1 (99,3%) и неодим НМ-1 (99,91%). Металлическая стружка, полученная механическим измельчением кускового металла (0,3-0,5 *мм*), прессовалась в цилиндрические образцы диаметром 20 и высотой 5 *мм* с относительной плотностью 0,3-0,4. После облучения гидрированные образцы празеодима и неодима транспортировались в специальных пластиковых контейнерах во избежание длительного контакта с внешней средой. В случае скандия и гадолиния такой необходимости не было, поскольку их гидриды устойчивы.

Аттестация полученных материалов проводилась методами химического анализа на содержание водорода пиролизом, рентгенофазового анализа («ДРОН-0,5») и дифференциально-термического анализа («Q-1500»).

СВС процессы в системах $\text{Me}^{\text{III}}-\text{H}_2$. При исследовании процессов горения скандия и РЗ металлов в водороде было установлено, что температуры СВС процесса гидрирования лантаноидов по сравнению с температурами горения металлов IV группы несколько выше. Дисперсность, плотность и геометрия образцов, как и в случае металлов IV и V групп, не оказывали существенного влияния на температуры и скорости СВС. Скорости и температуры горения ряда металлов, измеренные при давлении водорода 3 *атм*, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика процессов СВС в системах РЗМ–H₂

Металл	Скорость горения, см/с	Температура горения, °С	T _{пл} металла, °С
Pr	8,31	1265	935
Nd	8,25	1240	1024
Sm	10,27	1250	1072
Dy	9,69	1340	1407
Ho	6,25	1460	1461
Gd	12,4	1315	1312
Sc	8,7	1500	1541

Как видно из приведенных данных, температуры горения легких лантаноидов (празеодима и неодима) выше температур плавления соответствующих металлов, однако это не является препятствием при внедрении атомов водорода в кристаллическую решетку металла. В процессе образования и формирования конечных продуктов образцы не деформируются, хотя на изломе образцов некоторых гидридов РЗМ имеются расплавленные участки. Исходные образцы имели серебристый блеск металла, после гидрирования продукты получались с характерными для каждого гидрида оттенками (темно-синим, темно-фиолетовым и др).

В отличие от металлов IV группы, при горении РЗМ изменение давления сильно влияет на химический и фазовый составы гидридов (табл. 3). Конечными продуктами СВС-гидрирования празеодима и неодима при давлениях водорода <3 атм являются дигидриды, при давлениях 5 атм и выше формируются тригидридные фазы Pr и Nd с неполной стехиометрией (H/Me = 2,20-2,98). У гадолия фаза дигирида гадолия с ГЦК структурой формируется при давлениях водорода до 10 атм. Дальнейшее увеличение давления приводит к появлению наряду с кубической фазой дигирида тригидридной фазы гадолия с гексагональной плотной упаковкой (ГПУ), а при 60 атм водорода в результате горения формируется однофазный GdH_{2,88} с ГПУ структурой.

Таблица 3

Характеристики синтезированных СВС-гидридов

Металл	P_{H_2} , атм	Сод. H_2 в продукте, масс. %	Кристалл. решетка	Параметр решетки, Å	Формула гидрида
Sc	10	4,25	ГЦК	$a = 4,7828$	$ScH_{2,0}$
Pr	3	1,41	ГЦК	$a = 5,512$	$PrH_{2,0}$
	60	2,08	ГЦК	$a = 5,491$	$PrH_{2,8}$
Nd	3	1,43	ГЦК	$a = 5,459$	$NdH_{2,1}$
	60	1,78	ГЦК	$a = 5,446$	$NdH_{2,6}$
Gd	5	1,26	ГЦК	$a = 5,513$	$GdH_{2,0}$
	60	1,79	ГПУ	$a = 3,373$; $c = 6,710$	$GdH_{2,8}$

Радиационно-термический синтез гидридов металлов III группы. РТС в системе Sc–H₂. В ходе экспериментов было показано, что РТС в системе Sc–H₂ реализуется при высоких мощностях дозы 1-1,5 Мрад/с. Аналогично металлам четвертой группы [4] здесь после нагрева скандия под пучком ускоренных электронов происходит тепловой взрыв. Температуру начала взаимодействия водорода с образцом четко не удалось зафиксировать, однако наблюдается резкий скачок температуры до 1010-1130°C. В результате РТС содержание водорода в продукте достигло 3,3-3,4 масс.%. Надо отметить, что исходный скандий содержал до 15% окисной фазы Sc₂O₃. По данным рентгенофазового анализа, получен дигидрид скандия с ГЦК кристаллической решеткой. К сожалению, окисная фаза Sc₂O₃ в процессе РТС осталась неизменной (табл. 4).

Таблица 4

Радиационно-термический синтез в системе Sc–H₂

Мощность дозы, Мрад/с	Доза, Мрад	$T_{нагр.}$ °C	$T_{реакции}$, °C	Сод. H_2 в продукте, масс. %	Фазовый состав
0,2-0,5	200	190-385	–	0,57-0,86	Sc + Sc ₂ O ₃ .
1,0-1,5	100	300-560	900-1140	3,0-3,40	ScH _x + Sc ₂ O ₃ (~15%)

РТС гидридов РЗМ. Эксперименты по радиационно-термическому синтезу в системах РЗМ–H₂ проводились в диапазоне мощностей доз 0,3-1,0 Мрад/с при давлении водорода 1 атм. При воздействии более слабых пучков электронов реакция гидрирования не наблюдалась. Начальные температуры радиационного разогрева в водороде достигают 200-300°C, а температуры реакции взаимодействия РЗМ с водородом под пучком ускоренных электронов – одни из самых высоких среди исследованных систем Me–H₂ – 800-1000°C (рис. 1).

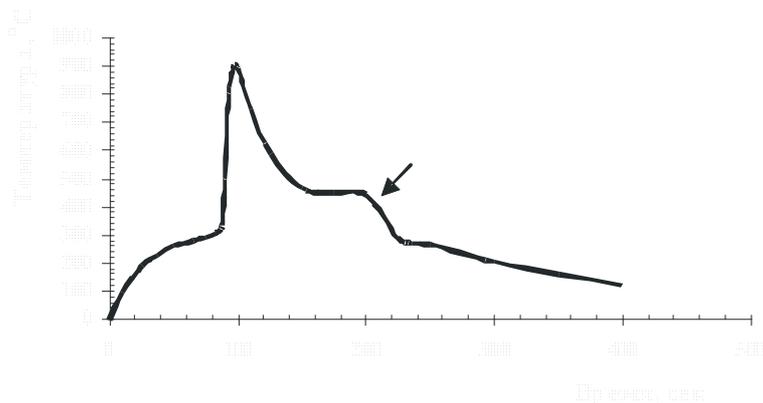


Рис. 1. Радиационно-термические процессы в системе неодим–водород при облучении электронным пучком с мощностью дозы 0,5 *Мрад/с* (стрелкой обозначен момент выключения пучка).

Рентгенофазовый и химический анализы продуктов радиационного воздействия на неодим и празеодим показали, что в результате РТС при 1 *атм* водорода формируются сразу тригидридные фазы MeH_{3-x} , чего не было при получении этих гидридов методом СВС. Здесь, вероятно, играет роль радиационный фактор генерации активных центров (табл. 5).

«Холодный синтез» гидридов РЗМ. В ранних работах при исследованиях радиационно-термических процессов в системах $Me^{IV}-H_2$, $Me-C(N)-H_2$, $Me-Me^I-H_2$ и др. обнаружено новое явление – пост-радиационное взаимодействие металлов и некоторых нестехиометрических соединений с водородом или так называемый «холодный синтез» [4]. Сущность его состоит в том, что после предварительного облучения металлов в вакууме после выключения пучка электронов и понижения температуры образцов до 25-60°C в реакционную зону (камеру) подается водород, и через несколько секунд термопара регистрирует резкий скачок температуры, что свидетельствует о протекании экзотермической реакции данного металлического образца с водородом (рис. 2).

РТС в системах РЗМ - H₂

Система	Мощность дозы, Мрад/с	Доза, Мрад	T _{нач.} , °С	T _{макс.} , °С	Конц-ия водорода в продукте, масс. %	H/Me
Pr + H ₂	0,3	55	220	890	1,68	2,41
	0,4	76	220	925	1,70	2,50
	0,5	94	278	900	1,79	2,57
Nd + H ₂	0,3	100	300	800	1,75	2,58
	0,5	100	305	935	1,76	2,60
	0,7	100	305	860	1,84	2,71
Gd + H ₂	0,4	60	305	925	1,14	1,82
	0,6	45	305	960	0,97	1,55
	1,0	110	305	1005	1,09	1,74

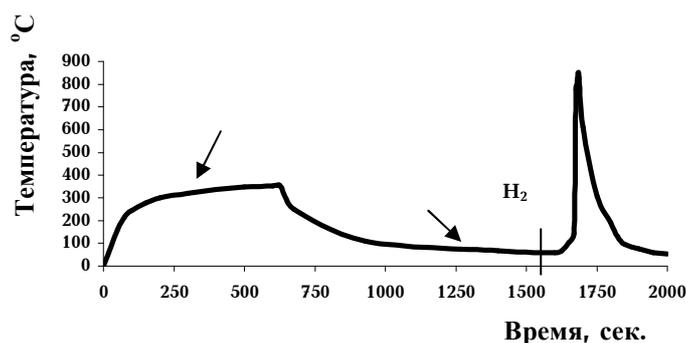


Рис. 2. «Холодный синтез» в системе празеодим-водород (мощность дозы 0,2 Мрад/с). (стрелками обозначены моменты выключения пучка и подачи водорода в камеру).

Рентгенофазовый и химический анализы полученных продуктов взаимодействия показали, что в результате этой реакции образуются гидриды. Надо отметить, что у каждого металла есть свои условия протекания пострадиационного взаимодействия с водородом и образования гидрида в режиме «холодного синтеза». Оптимальные условия, при которых реализуется этот процесс, для образцов РЗМ приведены в табл. 6.

Гидрирование образцов РЗМ в режиме "холодного синтеза"

Система	Мощность дозы, <i>Мрад/с</i>	Доза, <i>Мрад</i>	Предварительный радиацион. разогрев, °С	Темп-ра подачи водорода, °С	T_{xc} , °С	Концентрация водорода в продукте, масс. %	H/Me
Pr + H ₂	0.025	100	140	30	Нет реакции		
	0.05	100	240	30	610	1,56	2,31
	0.05	100	295	60	650	1,71	2,52
	0,1	100	355	60	680	1,60	2,35
	0,2	100	365	60	840	1,72	2,54
	0,3	100	585	60	825	1,63	2,40
	0,3	100	555	30	715	1,63	2,40
	0,3*	100	420	30	725	1,65	2,42
	0,5	100	600	60	Нет реакции		
	0,7	100	955	60	Нет реакции		
Nd + H ₂	0,05	50	185	60	Нет реакции		
	0,1	52	330	60	775	1,85	2,66
	0,1	60	460	60	850	1,70	2,50
	0,2	120	425	60	790	1,73	2,50
	0,3	120	560	60	855	1,68	2,41
	0,4	60	610	60	Нет реакции		
	0,5	88	600	60	Нет реакции		
Cd + H ₂	0,1				Нет реакции		
	0,2	100	420	60	755	1,28	2,07
	0,4			60	Нет реакции		

* – подача водорода произведена спустя 45 мин.

Отметим, что при облучении более мощными пучками электронов возникшие в металле дефекты исчезают (отжиг дефектов), а при слабых мощностях доз в процессе охлаждения они исчезают в результате рекомбинации [7, 8].

Интересно отметить, что в результате взаимодействия образцов празеодима и неодима с водородом при давлении газа 1 атм в режиме «холодного синтеза» формируются тригидридные фазы, т. е. взаимодействие празеодима и неодима с водородом под воздействием радиации всегда приводит к образованию гидридов с соотношением H/Me(2).

У образцов гадолиния при облучении той же дозой 0,2 *Мрад/с* в водороде реакция радиационно-термического синтеза не наблюдается. Однако при предварительном облучении металла в вакууме даже при низких мощностях доз (0,2 *Мрад/с*) в образце создаются достаточно высокие концентрации радиационных дефектов и происходит накопление избыточной энергии. После выключения пучка электронов за время остывания до 60-30 °С в образце сохраняется значительное превышение концентрации радиационных

дефектов, образующихся в результате воздействия пучка электронов над равновесным уровнем. Таким образом, при радиационно-термических условиях синтеза происходит снятие диффузионных сопротивлений, и синтез гидридов переходных и РЗ металлов протекает в режиме ускоренной диффузии, что при облучении связано с избыточной концентрацией радиационных точечных и протяженных дефектов и с избытком накопленной энергии в образцах. Этим определяется повышенная активность некоторых металлов и обуславливается их взаимодействие с водородом при необычно низких температурах, а также тот факт, что при давлении водорода уже 1 атм в результате взаимодействия водорода и металла сразу образуются высшие гидриды почти стехиометрического состава, чего не было в условиях СВС.

Холодный синтез в системе Sc – H₂ не удалось реализовать ни при каких условиях в диапазоне мощностей дозы 0,2-0,5 Мрад/с с общей дозой облучения до 200 Мрад.

Ниже приводятся характеристики синтезированных гидридов РЗМ и гидроксида скандия (табл. 7).

Таблица 7

Характеристики синтезированных гидридов

Металл	Метод синтеза	H/Me	Кристал. решетка	Параметры, Е
Pr	СВС	2,00	ГЦК	5,512
	СВС *	2,80	ГЦК	5,468
	РТС	2,33 - 2,56	ГЦК	5,467-5,479
	ХС	2,57-2,72	ГЦК	5,440-5,482
Nd	СВС	2,1	ГЦК	5,459
	СВС *	2,26	ГЦК	5,439
	РТС	2,52-2,70	ГЦК	5,402-5,443
	ХС	2,40-2,60	ГЦК	5,417-5,449
Gd	СВС	1,82-2,0	ГЦК	5,266 – 5,274
	СВС *	2,88	ГПУ	a=3,373; c=6,71
	РТС	1,82	ГЦК	5,274
	ХС	2,07	ГЦК	5,270
Sc	СВС	2,0	ГЦК	4,7828
	РТС	2,0	ГЦК	4,772

* – при высоких давлениях водорода

Сравнение ДТА для гидридов, полученных разными методами (РТС, СВС, ХС), показывает что характер их разложения не зависит от метода получения этих гидридов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ- Грант А-192).

**Sc, Gd, Nd եւ Pr-ի Փոխազդեցութեան Ընթացքի Զննման Զեռնման Անոմալիաների Եւ
Արագացված Էլեկտրոնային Փնջի
Ազդեցութեան Սույ**

Ա. Գ. ԱԼԵԿՍԱՆՅԱՆ, Ս. Կ. ԴՈԼՈՒԽԱՆՅԱՆ և Հ. Գ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

Ներկայացվող աշխատանքում բերված են այրման պրոցեսների՝ բարձրջերմաստիճանային ինքնատարավող սինթեզի (ԲԲՄ) և արագացված էլեկտրոնների փնջի ազդեցության տակ ընթացող ռադիացիոն-թերմիկ պրոցեսների ուսումնասիրությունների արդյունքները Me^{III} - ջրածին ($Me - Sc, Gd, Pr$ և Nd) համակարգերում:

Ուսումնասիրվել են ԲԲՄ և ռադիացիոն-թերմիկ եղանակներով հիդրիդների ձևավորման գլխավոր օրինաչափությունները: Ցույց է տրված, որ հազվագյուտ հողային մետաղների այրումը (ԲԲՄ) ջրածնում ընթանում է առավելապես բարձր ջերմաստիճաններում և վերջնային հիդրիդների ձևավորման վրա ազդում է ջրածնի ճնշումը: Այրման ռեժիմում սինթեզվել են Sc -ի երկհիդրիդ, և վերևում նշված հազվագյուտ հողային մետաղների երկհիդրիդներ և եռհիդրիդներ ($H/Me = 2,20-2,98$):

Ռադիացիոն-թերմիկ սինթեզը ուսումնասիրելիս օգտագործվել է “LAE-5” գծային էլեկտրոնային արագացուցիչի՝ 4 MeV արագացված, ֆոկուսացված էլեկտրոնների փունջ: Ստացված են ռադիացիոն-թերմիկ պրոցեսների գլխավոր օրինաչափությունները: Ցույց է տրված, որ հազվագյուտ հողային մետաղների ճառագայթումը ջրածնի միջավայրում բերում է նրանց հիդրիդների սինթեզին: Հաստատված է, որ ճառագայթման դոզայի աճը բերում է նմուշի ջերմաստիճանի աճին մինչև 200-300°C, որին անմիջապես հետևում է ջերմաստիճանի թռիչքաձև աճ: Փաստորեն տեղի է ունենում $Me+H_2$ ռեակցիան ջերմային պայթման ռեժիմում: Ցույց է տրված նաև, որ վակուումի մեջ հազվագյուտ հողային մետաղների ճառագայթման դոզայի ցածր հզորության դեպքում նախնական ճառագայթումից հետո նմուշներում առաջանում են մեծ թվով ռադիացիոն դեֆեկտներ, ինչի հետևանքով նմուշում կուտակվում է ավելցուկային էներգիա: Էլեկտրոնային փնջի անջատումից և նմուշի սառեցումից հետո մինչև 60°C (և ավելի ցածր) կետային դեֆեկտների կոնցենտրացիան մնում է համեմատած հավասարակշռված մակարդակի հետ զգալիորեն ավել: Սրանով է պայմանավորված նմուշի բարձր ակտիվությունը և ցածր ջերմաստիճաններում՝ 25-60°C ռեակտոր ներարկվող ջրածնի հետ փոխազդեցության հանգամանքները (սառը սինթեզ): Սառը սինթեզը բերում է $NdH_{2.26-2.80}$, $PrH_{2.43-2.73}$, and $GdH_{2.07}$ բաղադրությամբ հիդրիդների ձևավորմանը:

THE INTERACTION OF Sc, Gd, Nd, AND Pr WITH HYDROGEN IN THE MODE OF COMBUSTION AND IN THE ACCELERATED ELECTRONS BEAM

A. G. ALEKSANYAN, S. K. DOLUKHANYAN and H. G. HAKOBYAN

In the present work, the results of investigation of combustion (SHS) and thermal-radiation processes (TRS) in the systems Me^{III} -hydrogen ($Me: Sc, Gd, Pr$ and Nd) under action of accelerated electrons' beam (AEB) are demonstrated. The main regularities of hydrides creation in SHS and TRS modes are studied. We have shown that SHS of REMs proceeds at rather high temperature, and the hydrogen pressure also influences the formation of final hydride. In the combustion regime, hydride

and dihydride of Sc and dihydrides and three-hydrides of above mentioned REMs are synthesized ($H/Me = 2.20 - 2.98$).

The high-current 4 MeV LAE-5 with a focused accelerated electron beam has been used in investigation of TRS. The main peculiarities of the thermal-radiation processes have been obtained. It was shown, that at irradiation of the metals in hydrogen environ, the thermal-radiation synthesis of their hydrides took place. It was established, that at the increasing of irradiation dose, the temperature of sample increases up to 200-300°C, after which, sharp temperature jump was observed. Actually, the reaction $Me+H_2$ proceeds in a thermal explosion regime. It was shown also that after preliminary irradiation of REMs in vacuum even at low dose rate (0.2 Mrad/sec), the radiation defects of high concentration were created, and the energy excess is accumulated in the sample. After switching off the electron beam, and cooling down to 60°C (and lower), the point defects concentration in the significant excess relative to the equilibrium level remained in the sample. Those determine the high activity of sample, and condition its interaction with supplied to the reactor hydrogen at as low temperature as 25-60°C (Cold Synthesis, CS). CS results in the formation of hydrides of compositions: $NdH_{2.26-2.80}$, $PrH_{2.43-2.73}$, and $GdH_{2.07}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гидриды металлов / под ред. В. Мюллера, Д. Блекледжа, Дж. Либовица. Пер. с англ., М., Атомиздат, 1973, с. 432.
- [2] Мержанов А.Г., Боровинская И.П. // ДАН СССР, 1972, т. 204, №2, с. 366.
- [3] Dolukhanyan S.K. // J. Alloys Comp., 1997, v. 253-254, p. 10.
- [4] Dolukhanyan S.K., Shekhtman V.Sh., Aghajanyan N.N., Abrahamyan K.A., Harutyunyan Kh.S., Aleksanyan A.G., Hakobyan H.G., Ter-Galstyan O.P. // J. Alloys Comp., 2002, 330-332, p. 551.
- [5] Адигамов Б.Я., Лунин В.В., Мирошниченко И.И., Пантелеев Д.М., Садовничая М.В., Соловецкий Ю.И., Талецкий Ю.В. // Журнал физической химии, 1989, № 11. с. 3119.
- [6] Антонова М.М., Морозова Р.А. Препаративная химия гидридов. Справочник. Киев, Наукова Думка, 1976, с. 99.
- [7] Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердые тела и полимеры. Прикладные аспекты. М., Наука, 1987, с.448.
- [8] Своллоу А. Радиационная химия. Пер.с англ., (Англия, 1973), М., Атомиздат, 1976, 280 с.