

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «ГНИИХТЭОС»

к.т.н.  О.Е. Каменер

« 27 »  2024 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Тарасова Бориса Петровича

на тему «**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ**

**ЭФФЕКТИВНЫХ ВОДОРОД-АККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ**»,

представленной на соискание

учёной степени доктора химических наук по специальностям

1.4.4. Физическая химия (химические науки)

1.4.15. Химия твердого тела (химические науки)

### Актуальность темы исследования

Водородная энергетика в настоящее время - перспективный вид топлива. Соотношение энергия/масса у водородного топлива в три раза выше, чем у бензина. Способы преобразования водородной энергии по сравнению с традиционными энергосистемами разнообразны, просты, эффективны и экологичны.

Общество стремится к улучшению экологической ситуации, поэтому водородная энергетика, как способ снижения разрушительного антропогенного воздействия на биосферу, выходит на новый уровень.

При этом, водородная энергетика имеет свои недостатки. Первая проблема заключается в том, что водород практически не встречается на Земле в чистом виде — его необходимо выделять из различных химических соединений, затрачивая на это энергию. Наиболее распространённые способы получения водорода:

- пиролиз;
- электролиз воды;

- газификация угля;
- паровая конверсия метана.

Кроме того, водород очень легкий и плохо сжижаемый газ, который трудно транспортировать. Его хранение в баллонах под большим избыточным давлением или в сжиженном виде требует соблюдения особых мер безопасности, поскольку водород образует с воздухом взрывоопасные смеси. Использование явления хемосорбции помогает лишь отчасти решить задачу хранения водорода, так как есть проблема стоимости и ресурса работы.

Поэтому главной задачей мобильной водородной энергетики является создание эффективного способа хранения водорода. Особый интерес представляют металлогидридные топливные элементы из-за своей уникально высокой плотности водорода (в некоторых гидридах содержание атомов водорода в 1,5–2 раза выше, чем в жидком водороде), широкого интервала рабочих давлений и температур, высокой безопасности при работе.

Целями работы Тарасова Б.П. являются разработка физико-химических основ создания эффективных водород-аккумулирующих материалов и металлогидридной технологии хранения и компримирования водорода, установление связи реакционной способности металлических фаз с их строением и условиями реакции гидрирования, выявление закономерностей в процессах сорбции и десорбции водорода, научно-обоснованные решения для компактного и безопасного хранения, компримирования и генерации водорода, для водородного накопления и аккумуляирования электроэнергии.

Актуальность данной работы не вызывает сомнений, так как она направлена на радикальное сокращение потребления угля, нефти и газа и переход к «безуглеродной» энергетике, то есть на развитие энергетики с использованием возобновляемых источников энергии, а также на решение проблемы безопасности при хранении и транспортировке водорода и создания водород-нейтральных конструкционных материалов.



## Содержание работы

Работа оформлена в форме научного доклада на основе материала 136 оригинальных статей по теме диссертации, 15 глав в книгах и монографиях, 13 патентах, 1 учебного пособия, изданных в период с 1982-2024 года, из которых более половины опубликованы за последние 10 лет.

Доклад изложен на 125 страницах, состоит из введения, основной части, где представлены результаты проведенных исследований, выводов, общего списка работ по теме диссертации и списка работ за последние 10 лет. Текст доклада содержит 80 рисунков и 13 таблиц, а также 67 ссылок на литературные источники. Основное содержание доклада посвящено обзору физико-химических основ эффективных водород-аккумулирующих материалов и металлгидридной технологии хранения и компримирования водорода, установлению связей реакционной способности металлических фаз с их строением и с условиями реакции гидрирования, выявлению закономерностей в процессах сорбции/десорбции, поиску решений для безопасного хранения, компримирования и генерации водорода.

### Новизна полученных результатов и выводов

Изложенный в докладе материал исследований, выполненных автором, позволил получить результаты и сформулировать выводы, имеющие несомненную научную новизну, подтвержденную патентами и публикациями в высокорейтинговых научных журналах.

Автором были:

1. Выработаны оригинальные научные подходы к разработке новых высокоэффективных водород-аккумулирующих материалов для компактного и безопасного хранения и транспортировки водорода.

2. Созданы новые водород-аккумулирующие интерметаллические соединения, способные поглощать и выделять водород при температурах от

минус 50 до +50°C и давлениях 0.01–100 атм. с обратимой емкостью водорода от 1.5 до 2 мас. %.

3. Запатентованы высокоэффективные катализаторы гидрирования магния, интерметаллических соединений и сплавов – металл-графеновые и металл-нанотрубка-графеновые композиты.

4. Найдены условия формирования композитных водород-аккумулирующих материалов – интерметаллидов и металл-графеновых добавок – с высокими скоростями обратимого гидрирования.

5. Запатентованы водород-аккумулирующие композитные материалы – магний и его сплавы с металл-графеновыми добавками – с емкостью водорода до 5–7 мас. % при температурах 50–350°C и давлениях 1–50 атм.

6. Предложены новые конструкционные решения и компактные безопасные металлгидридные системы хранения водорода с улучшенным теплообменом и высокими технико-эксплуатационными характеристиками.

7. Разработаны оригинальные металлгидридные аккумуляторы, поглощающие водород с более высокой скоростью, чем вырабатывает электролизный генератор, и выделяющие высокочистый водород с большей скоростью, чем требуется для работы топливного элемента.

8. Разработаны металлгидридные сорбционные компрессоры водорода, поглощающие водород из электролизного генератора при температуре 15–20°C и давлении 2–6 атм. и выделяющие высокочистый водород при 150°C под давлением 150–160 атм.

9. Научно-обоснованные решения и создание автономной интегрированной системы накопителя энергии из ВИЭ (солнечного генератора), состоящей из солнечной панели, электролизного генератора водорода, металлгидридной системы хранения водорода, топливного элемента и автоматической системы управления.



## Апробация работы и публикации

Основное содержание работы изложено в 136 оригинальных статьях по теме диссертации. За последние 10 лет опубликованы 61 статья в журналах ВАК категории К1 (49) и К2 (12), 5 глав в коллективных монографиях, 1 учебное пособие, получены 11 патентов. Результаты работы за последние 10 лет апробировались в виде пленарных и приглашенных докладов на всероссийских и международных конференциях: «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (г. Санкт-Петербург, 2014–2022), «Топливные элементы и энергоустановки на их основе» (г. Черноголовка, 2014–2024), «Органические и гибридные наноматериалы» (г. Иваново, 2014–2023), «Фундаментальные проблемы ионики твердого тела» (г. Черноголовка, 2014–2023), «Водород. Технологии. Будущее» (г. Томск, 2021), «Химия твердого тела и функциональные материалы» и «Термодинамика и материаловедение» (г. Екатеринбург, 2022), «Актуальные проблемы адсорбции и катализа» (г. Плес, 2016–2017), «Роль электрохимии в развитии энергетики и страны. Водородные технологии – 2018» (г. Севастополь, 2018), «Возобновляемая энергетика – XXI век: энергетическая и экономическая эффективность» (Москва, Сколково, 2018), «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности» (Москва, 2014), «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (г. Кострома, 2018), Российско-Германская конференция по водородной энергетике (2021), «Физическая химия в России и за рубежом: от квантовой химии до эксперимента» (г. Черноголовка, 2019), «Графен: молекула и 2D-кристалл» (г. Новосибирск, 2017, 2019), «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (г. Минск, 2016–2022); «Наука будущего – наука молодых» (г. Орел, 2023); в виде устных докладов в соавторстве с коллегами на симпозиумах: «Metal-Hydrogen Systems» (United Kingdom, 2014; China, 2018), «Materials for Energy Storage and Conversion» (Turkey, 2019, 2023), «Hydrogen Power Theoretical & Engineering Solutions»

(South Africa, 2020; Oman, 2023), 17 «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» (Черноголовка, 2024).

### **Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных в работе результатов и сформулированных выводов базируется на использовании современной приборной базы, включающей в себя высокоточный сорбционный анализатор HSorb2600, шлифовальный станок Alpha-100B, потенциостат-гальваностат P-20X8, а также использованием комплекса современных методов аттестации и исследования водород-аккумулирующих материалов и подтверждена большим количеством статей в высокорейтинговых журналах с высокой цитируемостью (в базе данных РИНЦ на 15.08.2024 г. приведены: 400 публикации, 5190 цитирований и индекс Хирша 34, в базе Scopus – 190/2900/29).

### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Теоретическая (научная) значимость работы связана с более глубоким пониманием закономерностей в процессах взаимодействия в системах интерметаллид–водород, в фазовых переходах, в структурах металлической и гидридной фаз, в роли примесей в сплаве и в водороде, в явлениях деградации водород-аккумулирующих характеристик при многократном повторении циклов «гидрирование–дегидрирование», в создании высокоэффективных катализаторов гидрирования, в формировании композитных материалов, в создании водород-генерирующих материалов на основе магния, в разработке научно-технических решений для создания металлгидридных аккумуляторов и компрессоров водорода многократного действия.

Практическая значимость работы заключается в разработке ряда устройств для водородных и металлгидридных технологий:



низкотемпературных и высокотемпературных металлгидридных систем хранения водорода многократного действия; термосорбционных и химических компрессоров водорода; интегрированной системы «высокотемпературный электролизный генератор водорода – металлгидридный накопитель-компрессор – поршневой компрессор» и водородной системы аккумулирования электроэнергии в составе «солнечный электрогенератор – электролизный генератор водорода – металлгидридный аккумулятор водорода – водород-воздушный топливный элемент». Предложенные технические решения защищены 20 патентами на изобретения или полезные модели (за последние 10 лет – 11 патентов), которые награждены золотыми и серебряными медалями международных салонов.

Учебно-образовательная значимость работы состоит в использовании результатов работы при разработке и реализации рабочих программ подготовки студентов и аспирантов: «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» для аспирантуры ФИЦ ПХФ И МХ по специальностям 1.3. Физические науки и 1.4. Химические науки; «Материалы для водородной энергетики» для магистратуры ФФФХИ МГУ им. М.В. Ломоносова и МФТИ по направлению «Новые энергетические технологии и материаловедение»; «Способы хранения и получения водорода. Водородное материаловедение» для магистрантов Факультета физики ВШЭ; «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» для Вятского государственного университета. Опыт преподавания таких дисциплин отражен в опубликованном Учебном пособии: Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В. «Водородные и металлгидридные энерготехнологии». Черноголовка: ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2024, 250 стр.

### **Общие замечания по диссертационной работе**

1. Несомненным достоинством работы является обилие иллюстрационного материала, облегчающего восприятие представленной

информации. Однако качество такого материала оставляет желать лучшего и порой не читаемо (рис. 43,45,46,54,64).

2. Автор, описывая металлгидридные аккумуляторы водорода многократного действия (стр. 81), характеризует их ёмкость как относительно небольшую. Однако уже на следующей странице приводит таблицу с конкретными показателями аккумуляторов, где при требуемой мощности в 5 кВт содержание водорода варьируется от 6-9 м<sup>3</sup>, что является малым количеством только относительно к промышленному использованию данного газа. Однако данное замечание сугубо субъективно и не несет критического характера.

3. Хотелось бы увидеть более детальные характеристики, систем хранения/генерации водорода, созданных автором, в частности, объёмное, массовое содержание водорода по отношению к массе прибора.

Вышеперечисленные замечания не снижают общей теоретической, практической и учебно-образовательной значимости выполненных Тарасовым Б.П. исследований, а, возможно, являются следствием случайных ошибок и не снижают общего положительного впечатления от работы.

### Заключение

В целом, по совокупности объёма выполненных исследований, обоснованности, новизны и значимости полученных результатов и выводов, представленная диссертационная работа является **научным достижением**. Результаты работы использованы при разработке и реализации рабочих программ подготовки студентов и аспирантов: «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» для аспирантуры ФИЦ ПХФ И МХ по специальностям 1.3. Физические науки и 1.4. Химические науки; «Материалы для водородной энергетики» для магистратуры ФФФХИ МГУ им. М.В. Ломоносова и МФТИ по направлению «Новые энергетические технологии и материаловедение»; «Способы хранения и получения водорода. Водородное



материаловедение» для магистрантов Факультета физики ВШЭ; «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» для Вятского государственного университета. Опыт преподавания таких дисциплин отражен в опубликованном Учебном пособии: Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В. «Водородные и металлгидридные энерготехнологии». Черноголовка: ФИЦ ПХФиМХ РАН, 2024, 250 стр.

В ходе выполнения данного диссертационного исследования, полученный материал стал основой для 6 успешно защищенных научных работ:

1. Бочарников М.С. «Разработка и исследование металлгидридных компрессоров высокого давления для систем аккумулирования энергии» (кандидат технических наук, ОИВТ РАН, 2019);
2. Герасимова Е.В. «Электрокатализаторы на основе платины и углеродных наноструктур» (кандидат химических наук, ИПХФ РАН, 2011);
3. Лукашев Р.В. «Водород-аккумулирующие и водород-генерирующие материалы на основе  $MgH_2$ , содержащие углерод» (кандидат химических наук, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008);
4. Володин А.А. «Углеродные нановолокна и нанотрубки: каталитический синтез, строение и свойства» (кандидат химических наук, ИПХФ РАН, 2006);
5. Мурадян В.Е. «Электродуговой синтез и исследование физико-химических свойств углеродных нанотрубок» (кандидат химических наук, ИПХФ РАН, 2004);
6. Фурсиков П.В. «Исследование фуллеренсодержащих продуктов электродугового испарения графита» (кандидат химических наук, ИПХФ РАН, 2002).

Диссертационная работа Тарасова Бориса Петровича **«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ВОДОРОД-АККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ»** соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, в том числе п.п. 9-14, и п.п.

2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской Академии Наук» от 29 марта 2024г, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора химических наук по специальностям 1.4.4. Физическая химия (химические науки) и 1.4.15. Химия твердого тела (химические науки).

Диссертация обсуждена, отзыв одобрен на совместном заседании лаборатории «Простых, сложных гидридов и карборанов» и секции учёного совета «Элементоорганика» на базе Государственного научного центра РФ АО «Государственный Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений» (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»), протокол №5 от 11 ноября 2024г.

Ведущий научный сотрудник,  
доктор химических наук  
по специальности 02.00.08 (1.4.8)  
(Химия элементоорганических соединений)  
Тел.: 8(495)-673-72-30,  
e-mail: shcherbakova@eos.su;



Щербакова Галина Игоревна

«27» ноября 2024 г.

Государственный научный центр РФ АО «Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений» (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»).

105118, Москва, шоссе Энтузиастов, 38, тел. 8 (495)673-44-82

Подпись ведущего научного сотрудника лаборатории «Специальных волокон и компонентов композиционных материалов», доктора химических наук Щербаковой Галины Игоревны заверяю:

Ученый секретарь  
ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС», к.х.н.



Кирилина Надежда Ивановна

«27» ноября 2024 г.



## Сведения о ведущей организации

### Полное и сокращенное наименование организации

Государственный научный центр Российской Федерации «Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»).

### Место нахождения

Москва

### Почтовый адрес

105118, Москва, шоссе Энтузиастов, 38

### Адрес электронной почты

[ous@eos.su](mailto:ous@eos.su)

### Официальный сайт

<https://eos.su>

### Список публикаций по теме диссертации в рецензируемых журналах за последние пять лет

1. Д.А. Ягодников, Ш.Л. Гусейнов, А.П. Шпара, А.В. Сухов, С.Г. Фёдоров, Морфологический, химический и спектральный анализы продуктов сгорания микро- и нанодисперсных частиц боридов алюминия. *Доклады академии наук*, **2019**, 484 (1), 44-47.
2. П.А. Стороженко, К.Д. Магдеев, А.А. Грачев, В.И. Ширяев, Катализаторы в прямом синтезе оловоорганических соединений. I. Реакция органогалогенидов со сплавами олова. *Катализ в промышленности*, **2021**, 1(1-2), 16-29. DOI: 10.18412/1816-0387-2021-1-2-16-29
3. S.M. Frolov, V.Y. Basevich, A.A. Belyaev, I.O. Shamahin, V.S. Aksenov, F.S. Frolov, S.L. Guseinov, Kinetic Model and Experiment for Self-Ignition of Triethylaluminum and Triethylborane Droplets in Air. *Micromachines*, **2022**, 13, 2033. DOI: 10.390/mi13112033
4. А.А. Ищенко, М.А. Лазов, Е.В. Миронова, А.Ю. Путин, А.М. Ионов, П.А. Стороженко, Анализ наночастиц и наноматериалов методом рентгеновской фотоэлектронной микроскопии. *Тонкие химические технологии*, **2023**, 18(2), 135-167. DOI: 10.32362/2410-6593-2023-18-2-135-167.
5. K. A. Byrdin, S. M. Frolov, P. A. Storozhenko, S. L. Guseinov, Thermochemical study of the detonation properties of boron- and aluminum-containing compounds in air and water. *Shock Waves* **2023**, 33, 501–520. DOI: 10.1007/s00193-023-01150-5.
6. Н.М. Кузнецов, С.М. Фролов. Расчет стандартной энтальпии образования и теплоты полного сгорания триэтилалюминия в водяном паре и в воздухе. Журнал «Горение и взрыв», 2019. Том 12. №2. С 9-12

7. **Г.И. Щербакова, Д.В. Сидоров, Ф.П. Маполис, А.Д. Кирилин, Л.О. Белова, Д.В. Жигалов.** Молекулярная структура олигомерного карбосилана. Неорганические материалы, 2020, Т. 56, № 3. С. 319 – 323.
8. **П.А. Стороженко, А.В. Веселов, А.А. Грачев, Н.И. Кирилина, В.И. Ширяев.** Оловоорганические соединения в промышленном катализе. I. Процессы (пере)этерификации. Катализ в промышленности, 2020, Т. 20, № 3. С.191 - 203.
9. **К.Д. Магдеев, А.А. Грачев, Н.И. Кирилина, В.И. Ширяев.** Оловоорганические соединения в промышленном катализе. II. Процессы образования полиуретанов. Катализ в промышленности. 2020, Т. 20, № 3. С. 204 – 216.
10. **В.В. Туманов, И.В. Столярова.** Состав гидросольватов при экстракции азотной кислоты в системе  $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{ДЭГФок}$ . Журнал физической химии, 2020, Т. 94, № 6. С.837-843.
11. **Г.И. Щербакова, М.К. Шаухин, А.Д. Кирилин, А.С. Прохоренко.** Квантово-химический расчет геометрии алкокси(гидрокси)(этилацетоацетат)алюмоксана. Журнал Общей химии, 2021, Т. 91, № 2. С. 283-289.
12. **Н.В. Климова, А.Г. Иванов, А.В. Лебедев.** Процессы в системах « $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -РАСТВОРИТЕЛЬ». ЧАСТЬ 1. Спиртовые растворы. Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах, 2022, Т. 504, № 1. С. 29-33.
13. **Н.В. Климова, А.Г. Иванов, А.В. Лебедев.** Процессы в системах « $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -РАСТВОРИТЕЛЬ». ЧАСТЬ 2. Метил(винил)силоксановые растворы. Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах, 2022, Т. 506, № 1. С.35-42.
14. **S.M. Frolov, V.Y. Basevich, A.A. Belyaev, I. Shamahin, V.S. Aksenov, F.S. Frolov, S.L. Guseinov.** Kinetic model and experiment for self-ignition of triethylaluminum and triethylborane droplets in air. Micromachines 2022, Vol. 13, № 11. P. 2033.

Верно

Ученый секретарь

ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС», к.х.н.

Н.И. Кирилина

