

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Федерального исследовательского центра
проблем химической физики и
медицинской химии
Российской академии наук

д.х.н. Золотухина Е.В.



17 апреля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра проблем химической физики и
медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ иМХ РАН)
(142432, Московская обл., г.Черноголовка, пр. Академика Семенова, д.1,
адрес сайта: <https://www.icp.ac.ru>)

Диссертация «Водород-аккумулирующие композиты магния с Ni-графеноподобными материалами» на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.4. — Физическая химия (химические науки) выполнена в Комплексе лабораторий водородного материаловедения Отдела функциональных материалов для химических источников энергии ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Можжухин Сергей Александрович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, в Отделе функциональных материалов для химических источников энергии, в Комплексе лабораторий водородного материаловедения в должности младшего научного сотрудника. В настоящее время работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, в Отделе функциональных материалов для химических источников энергии, в Комплексе лабораторий водородного материаловедения в должности младшего научного сотрудника.

Соискатель в 2012 г. окончил Ивановский Государственный университет (ФГБОУ ВО ИвГУ) по специальности 020101 - Химия.

В 2013–2017 гг. соискатель прошел обучение в очной аспирантуре Ивановского Государственного университета (ФГБОУ ВО ИвГУ) по направлению подготовки 02.00.04. Физическая химия.

Справка об обучении с результатами сдачи кандидатских экзаменов выдана в 2025 году Ивановским Государственным университетом (ФГБОУ ВО ИвГУ).

Научный руководитель Тарасов Борис Петрович, доктор химических наук (1.4.4. Физическая химия и 1.4.15. Химия твердого тела (химические науки)), главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Отдел функциональных материалов для химических источников энергии, заведующий Комплексом лабораторий водородного материаловедения.

По итогам обсуждения диссертации «Водород-аккумулирующие композиты магния с Ni-графеноподобными материалами» на заседании секции № 6 Ученого Совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН принято следующее заключение:

Работа Можжухина Сергея Александровича посвящена разработке и исследованию водород-аккумулирующих композитов магния с Ni-графеноподобными материалами. В диссертации предложена модель каталитического действия Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния, разработан и обоснован метод формирования водород-аккумулирующих композитов магния с добавкой Ni/ГПМ, установлена перспективность композитных материалов для создания аккумуляторов водорода многократного действия и генераторов компримированного водорода.

Актуальность темы

Увеличение концентрации углекислого газа, приводящее к потеплению климата, обуславливает необходимость уменьшения сжигания углеводородов и перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. В связи с этим все бóльшую актуальность приобретает водородная энергетика, где в качестве энергоносителя выступает водород. Одной из важнейших задач, от решения которой зависит масштабное развитие водородных технологий, является организация эффективного и безопасного способа хранения водорода. В этом отношении особое внимание уделяется металлгидриднему способу хранения водорода. Для этого метода характерна не только высокая безопасность эксплуатации, но и значительно большее количество запасенного водорода на единицу объема.

Одним из наиболее перспективных материалов-сорбентов водорода является магний, благодаря его низкой стоимости, высоким массовому (7.6 мас.%) и объемному (0.11 г H₂ на 1 см³) содержаниям водорода в гидриде. Однако низкая скорость гидрирования магния и высокая температура дегидрирования MgH₂ (более 300°C) препятствуют его эксплуатации как водород-аккумулирующего материала. Для решения этой проблемы в работе использованы металл-углеродные катализаторы гидрирования магния имеханохимический метод формирования водород-аккумулирующих композитов Mg/MgH₂+Ni/ГПМ в водородной среде.

Таким образом, выбор направления исследований соискателем представляется целесообразным и определяет актуальность выполненных в диссертационной работе поисковых исследований.

Новизна и практическая значимость результатов работы

1. Предложен оригинальный способ получения композитов Ni/ГПМ одновременным восстановлением Ni²⁺ и оксида графита; в композитах частицы Ni со средним размером 5 нм равномерно распределены на поверхности ГПМ.
2. Получены новые водород-аккумулирующие композиты MgH₂+Ni/ГПМ механохимической обработкой Mg и Ni/ГПМ в водородной среде; композиты Mg с Ni/ГПМ в 3–4 раза быстрее гидрируются с образованием MgH₂+Ni/ГПМ, водород-аккумулирующие характеристики не ухудшаются при многократном повторении циклов сорбция-десорбция.
3. Установлено и объяснено синергетическое влияние Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния в композите: частицы Ni катализируют процесс диссоциации молекул H₂, ГПМ предотвращает спекание мелкодисперсных частиц и повышает теплообмен между частицами.
4. Разработаны и запатентованы составы Mg/MgH₂+Ni/ГПМ, способные обратимо хранить более 6.5 мас.% водорода; установлены оптимальные условия гидрирования (давление 1–10 атм, температура 250–300°C) и дегидрирования (1 атм, 300–350°C).
5. Показана перспективность композитов как высокоэффективных водород-генерирующих материалов для получения компримированного водорода.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием современных физико-химических методов анализа, современного сертифицированного оборудования, согласованностью полученных результатов с данными, известными из научно-технической литературы. Результаты работы подвергались многократной независимой положительной экспертизе и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science, RSCI, относящихся к

журналам K1 и K2 в классификации ВАК Минобрнауки РФ. Основные результаты диссертации неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях:

1. X Международная конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (Черноголовка, 2014);
2. V Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (Суздаль, 2014);
3. I, II и III российские конференции «Графен: молекула и 2D-кристалл» (Новосибирск, 2015, 2017 и 2019);
4. X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем» (Иваново, 2015);
5. V и VI конференции с элементами научной школы для молодежи «Органические и гибридные наноматериалы» (Иваново, 2015 и 2017);
6. Научные конференции фестиваля студентов, аспирантов и молодых ученых (Иваново, 2015 и 2016);
7. IX Международная научная конференция «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 2016);
8. XXVIII Симпозиум «Современная химическая физика» (Туапсе, 2016);
9. II Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы адсорбции и катализа» (Плес, 2017);
10. XIII, XVI и XVII российские конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (Санкт-Петербург, 2017, 2021 и 2022);
11. III Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (Кострома, 2018);
12. II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Водород. Технологии. Будущее» (Томск, 2021);
13. Научная конференция с международным участием и III Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Водородные энерготехнологии с использованием металлгидридов» (Черноголовка, 2024);
14. IV Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» (Иваново, 2025).

Плановый характер работы

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках Государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (№ 124013000692-4, № АААА-А19-119061890019-5) и поддержаны Мегагрантом (Соглашение № 075-15-2022-1126) и госконтрактами (№ 14.740.11.1103, № 075-15-2024-654).

Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени

Всего по материалам диссертации соискателем совместно с соавторами опубликованы 11 статей в журналах, рекомендуемым ВАК Минобрнауки РФ для защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (из них 5 – в журналах Q1 и Q2), 1 глава в коллективной монографии, 2 статьи в сборнике и 20 тезисов докладов на конференциях разного уровня, результаты работы защищены 4 патентами РФ.

Статьи по результатам работы:

1. Арбузов А.А. Синтез графеноподобных структур и формирование на их основе катализаторов и водород-аккумулирующих композитов / А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, А.А. Володин, П.В. Фурсиков, Б.П. Тарасов // Известия АН. Серия химическая. – 2016. – № 8. – С. 1893-1901.

2. Тарасов Б.П. Никель-графеновый катализатор гидрирования магния и синтеза углеродных наноструктур / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, А.А. Володин, **С.А. Можжухин**, М.В. Ключев // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 43-46.

3. Тарасов Б.П. Композиты с 2D-графеновыми структурами для водородной энергетики и катализа процессов с участием водорода / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, А.А. Володин, П.В. Фурсиков // Журнал структурной химии. – 2018. – Т. 59, № 4. – С. 867-875.

4. Tarasov B.P. Hydrogen storage behavior of magnesium catalyzed by nickel-graphene nanocomposites / B.P. Tarasov, A.A. Arbuzov, **S.A. Mozzhuhin**, A.A. Volodin, P.V. Fursikov, M.V. Lototsky, V.A. Yartys // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44, N 55. – P. 29212-29223.

5. Тарасов Б.П. Особенности гидрирования магния с Ni-графеновым покрытием / Б.П. Тарасов, **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов, А.А. Володин, Э.Э. Фокина, П.В. Фурсиков, М.В. Лотоцкий, В.А. Яртыс // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94, № 5. – С. 772-777.

6. Tarasov B.P. Metal hydride – graphene composites for hydrogen based energy storage / B.P. Tarasov, A.A. Arbuzov, A.A. Volodin, P.V. Fursikov, **S.A. Mozzhuhin**, M.V. Lototsky, V.A. Yartys // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 896. – Article 162881.

7. Lototsky M.V. Tailoring of hydrogen generation by hydrolysis of magnesium hydride in organic acids solutions and development of generator of the pressurised H₂ based on this process / M.V. Lototsky, M.W. Davids, T.K. Sekgobela, A.A. Arbuzov, **S.A. Mozzhukhin**, Y. Zhu, R. Tang, B.P. Tarasov // Inorganics. – 2023. – V. 11, N 8. – Article 319.

8. Tarasov B. Metal hydride hydrogen storage (compression) units operating at near-atmospheric pressure of the feed H_2 / B. Tarasov, A. Arbuzov, **S. Mozhzhukhin**, A. Volodin, P. Fursikov, M.W. Davids, J. Adeniran, M. Lototsky // *Inorganics*. – 2023. – V. 11, N 7. – Article 290.

9. Арбузов А.А. Магниево-водород-генерирующие материалы и устройство для генерации водорода / А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, М.В. Лотоцкий, Б.П. Тарасов // *Журнал прикладной химии*. – 2023. – Т. 96, № 2. – С. 217-224.

10. Fursikov P.V. Phase transformations and kinetics peculiarities on hydrogen desorption by composites based in magnesium–nickel eutectic alloy / P.V. Fursikov, V.N. Fokin, E.E. Fokina, A.A. Arbuzov, **S.A. Mozhzhukhin**, B.P. Tarasov // *High Energy Chemistry*. – 2024. – V. 58, Suppl. 4. – S491-S495.

11. Lototsky M.V. Metal–organic frameworks and their derivatives as catalysts of magnesium hydrogenation / M.V. Lototsky, B.P. Tarasov, R.K. Baimuratova, **S.A. Mozhzhukhin**, G.I. Dzhardimalieva, V.L. Sidorov, A.A. Arbuzov, P.V. Fursikov, I.I. Khodos, S. Pasupathi, V.M. Linkov // *Journal of Physics: Energy*. – 2025. – V. 7. – Article 045016.

Статьи в Сборнике:

1. Тарасов Б.П. Графеноподобные наноструктуры и функциональные композиты на их основе / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, С.А. Можжухин, А.А. Володин // Сборник научных статей «Наноструктуры в конденсированных средах». – Минск. – 2016. – С. 141-147.

2. Володин А.А. Углерод-металлогидридные композиты для аккумуляторов водорода и электрохимических источников тока многократного действия / А.А. Володин, А.А. Арбузов, С.А. Можжухин, Б.П. Тарасов // Сборник научных статей «Наноструктуры в конденсированных средах». – Минск. – 2016. – С. 148-154

Патенты:

1. Патент № 2660232 Российская Федерация, МПК В01J 23/755 (2006.01), С01В 6/04 (2006.01), В82В 3/00 (2006.01), В01J 37/04 (2006.01), В01J 37/18 (2006.01). Никель-графеновый катализатор гидрирования и способ его получения: № 2016123445: заявл. 15.06.2016: опубл. 10.07.2018 / Арбузов А.А., Можжухин С.А., Володин А.А., Фурсиков П.В., Тарасов Б.П.: заявитель ИПХФ РАН. – 8 с.

2. Патент № 2675882 Российская Федерация, МПК С01В 6/04 (2006.01), С01В 32/194 (2017.01), В82В 3/00 (2006.01), В82У 40/00 (2011.01). Водород-аккумулирующие материалы и способ их получения: № 2016150246: заявл. 21.12.2016: опубл. 22.06.2018 / Арбузов А.А., Можжухин С.А., Володин А.А., Фурсиков П.В., Тарасов Б.П.: заявитель ИПХФ РАН. – 7 с.

3. Патент № 2735285 Российская Федерация, МПК С01В 3/08 (2006.01) F17C 5/06 (2006.01) В01J 7/02 (2006.01). Способ получения компримированного водорода и устройство

для его осуществления: № 2019141982: заявл. 18.12.2019: опубл. 29.10.2020 / Арбузов А.А., Шимкус Ю.Я., Можжухин С.А., Сон В.Б., Тарасов Б.П.

4. Патент № 2835092 Российская Федерация, МПК C01B 32/192 (2017.01) C01B 32/194 (2017.01) B01J 23/755 (2006.01) B01J 37/04 (2006.01) B01J 37/08 (2006.01) B01J 37/18 (2006.01). Способ получения никель-графенового катализатора гидрирования: № 2024110169: заявл. 15.04.2024: опубл.: 21.02.2025 / Арбузов А.А., Можжухин С.А., Володин А.А., Фурсиков П.В., Ахременков Б.В., Лотоцкий М.В., Тарасов Б.П.

Глава в коллективной монографии:

1. Можжухин С.А. Водород-аккумулирующие материалы на основе магния (с. 79-103) / С.А. Можжухин, А.А. Арбузов, М.В. Клюев, Б.П. Тарасов // Органические и гибридные наноматериалы: тенденции и перспективы. Под ред. В.Ф. Разумова и М.В. Клюева. – Иваново: Изд. Иван. гос. ун-т. – 2017. – 516 с.

Все статьи, выполненные в соавторстве, процитированы в диссертации в соответствии с п. 14 критериев Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24.04.2013 г., с учетом всех последующих изменений. Результаты, описанные в диссертации, являются оригинальными, заимствованные материалы без ссылки на источник заимствования отсутствуют.

В опубликованных материалах довольно полно изложены основные результаты работы. Работы [1], [2], [6] и [8] содержат результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.1. Работы [3] и [11] содержат результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.2. Работа [10] содержит результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.3. Работа [6] содержит результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.4. Работы [2], [3], [4] и [5] содержат результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.5. Работы [4] и [5] содержат результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.6. Работы [7] и [9] содержат результаты, приведенные в главе 3, разделе 3.7.

Ценность научных работ соискателя для специальности Физическая химия обусловлена созданием физико-химических основ технологии синтеза новых водород-аккумулирующих композитов Mg с Ni/ГПМ, установлением связи реакционной способности композитов с условиями протекания реакции обратимого гидрирования, предложенным механизмом влияния Ni/ГПМ на реакцию обратимого гидрирования Mg в композите. В диссертации предложена модель каталитического действия Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния, разработан и обоснован метод формирования водород-аккумулирующих композитов магния с добавкой Ni/ГПМ, установлена перспективность

композитных материалов для создания аккумуляторов водорода многократного действия и генераторов компримированного водорода.

Личный вклад автора

Автором были проанализированы и систематизированы литературные данные по тематике работы. Им лично экспериментально получены результаты по механосинтезу гидрида магния, по формированию и исследованию водород-аккумулирующих характеристик композитов магния с Ni/ГПМ, по анализу кинетических данных процессов обратимого гидрирования, по определению химического и фазового состава продуктов гидрирования, по определению стабильности характеристик при многократном повторении циклов гидрирования-дегидрирования, по созданию композитных материалов для хранения водорода. Автором лично разработано устройство размольного стакана для проведения механосинтеза и сконструирована волюмометрическая установка для проведения обратимой реакции гидрирования.

Анализ и обработка экспериментальных данных, а также установление механизма синергетического эффекта добавок Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния проведены совместно с д.х.н. Тарасовым Б.П. и к.х.н. Лотоцким М.В. Совместно с к.х.н. Арбузовым А.А. проведен синтез ГПМ и композитов Ni/ГПМ с различным содержанием никеля. В Аналитическом центре коллективного пользования ФИЦ получены термограммы ДСК (Блиновой Л.Н.), дифрактограммы (к.х.н. Колесниковой А.М. и к.ф.-м.н. Шиловым Г.В.), микрофотографии СЭМ (к.ф.-м.н. Дремовой Н.Н.), элементный состав (Коршуновой Л.А. и Гусевой Г.В.).

Публикации по материалам, изложенным в диссертации, выполнены в соавторстве. В работах [1-7] и [9-11] соискателем проведены механосинтез гидридов и механообработка образцов, проведены кинетические измерения реакций гидрирования/дегидрирования. В работах [4] и [5] выполнены испытания на устойчивость композитов к нескольким циклам гидрирования/дегидрирования. В работах [1-6] и [8-10] совместно с к.х.н. Арбузовым А.А. проведен синтез ГПМ и композитов Ni/ГПМ с различным содержанием никеля. Совместно с к.х.н. Лотоцким М.В. в работе [11] проведен фазовый анализ продуктов механосинтеза, а в работах [4], [5] и [11] – аппроксимация кинетических кривых и ее последующая интерпретация. В работах [4-6] совместно с д.х.н. Тарасовым Б.П. выполнен анализ экспериментальных данных, предложен механизм действия добавки Ni/ГПМ.

Соответствие диссертации научным специальностям, отрасли науки

Диссертация Можжухина С.А. на тему «Водород-аккумулирующие композиты магния с Ni-графеноподобными материалами» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решены задачи по синтезу катализаторов Ni/ГПМ; формированию

композитов на основе гидрида магния механохимическим методом; определению кинетических характеристик полученных композитов и их стабильности в многократных циклах гидрирования/дегидрирования.

Работа соответствует паспорту специальности 1.4.4. — Физическая химия (химические науки) в п. 12. Физико-химические основы процессов химической технологии и синтеза новых материалов, п. 9. Связь реакционной способности реагентов с их строением и условиями протекания химической реакции; п. 8 Динамика элементарного акта химических реакций. Механизмы реакции с участием активных частиц.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Можжухина Сергея Александровича «Водород-аккумулирующие композиты магния с Ni-графеноподобными материалами» соответствует всем критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.04.2013 г. с учетом всех последующих изменений, применительно к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.4.4. – Физическая химия (химические науки).

Заключение принято на заседании секции № 6 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН (протокол № 5 от 10 апреля 2026г.). Присутствовало на заседании 15 членов совета из 20. Результаты голосования: «за» 15, «против» н е т, «воздержались» нет.

Председатель секции № 6
Ученого Совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН,
кандидат химических наук

 Лысков Н.В.

Секретарь секции № 6
Ученого Совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН,
кандидат химических наук

 Писарева А.В.