

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

дата защиты 27.11.2019 протокол № 13

О присуждении **Бочарникову Михаилу Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация **«Разработка и исследование металлгидридных компрессоров водорода высокого давления для систем аккумулирования энергии»** в виде рукописи, по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы, принята к защите 11.10.2019 г. (протокол № 12) диссертационным советом Д 002.110.03, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jih.ru, (495) 485-83-45), утвержденном приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 75/нк от 15.02.2013 г.

Соискатель **Бочарников Михаил Сергеевич**, 1985 года рождения, в 2008 году окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

В период подготовки диссертации обучался в заочной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химической физики Российской академии наук (ИПХВ РАН).

Работает начальником отдела в Акционерном обществе «Специальное

конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом» (АО «СКТБЭ»).

Диссертация выполнена в Лаборатории материалов для водородного аккумулирования энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химической физики Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат химических наук, заведующий лабораторией материалов для водородного аккумулирования энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химической физики Российской академии наук **Тарасов Борис Петрович**.

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова» (119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, тел. (495) 939-3010, cs.msu.su, e-mail: cmc@cs.msu.su)

Клямкин Семен Нисонович;

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории алифатических борорганических соединений, № 127 (ЛАБС) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (119991, ГСП-1, Москва, 119334, ул. Вавилова, д. 28, тел.: (499) 135-9202, ineos.ac.ru, e-mail: larina@ineos.ac.ru) **Григорьев Сергей Александрович**, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14) в своем положительном заключении, принятом на научном семинаре кафедры

инженерной теплофизики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (протокол №9/2019 от 16 октября 2019 г.), составленном заведующим кафедрой инженерной теплофизики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», к.ф.-м.н., доцентом Герасимовым Денисом Николаевичем и профессором кафедры инженерной теплофизики, д.т.н., с.н.с. Яньковым Георгием Глебовичем (утверждено Проректором ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», д.т.н., доцентом Драгуновым В.К.), указало, что диссертация является завершённым исследованием, выполненным по актуальной теме на высоком научном уровне. Диссертантом получен большой объём экспериментальных и расчетно-теоретических данных, представляющих значительный интерес для научно-исследовательских организаций, учебных заведений и технологических компаний, занимающихся исследованиями, проектированием и внедрением водородных систем накопления энергии.

Результаты исследования могут быть использованы в научно-исследовательских организациях, учебных заведениях и технологических компаниях, занимающихся проектированием и внедрением водородных систем аккумулирования энергии: ФГАОУ ВО «МФТИ (национальный исследовательский университет)», ФГБУН ОИВТ РАН, ФГБУ «НИЦ Курчатовский институт», ФГБУН ИПХФ РАН, ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ООО «ИнЭнерджи», АО «СКТБЭ», а также предприятиях по производству технического водорода, таких как ООО «НИИ КМ», АО «ЛИНДЕ ГАЗ РУС» и др.

Соискатель имеет 13 опубликованных по теме диссертации работ, в т.ч. 3 статьи – в журналах из перечня ВАК и 2 статьи – в журналах, входящих в реферативные базы данных Scopus и Web of Science, 8 тезисов докладов, представленных на российских конференциях, а также получен один патент.

Основные работы:

1. Tarasov B.P., **Bocharnikov M.S.**, Yanenko Y.B., Fursikov P.V., Lototsky M.V. Cycling stability of RNi_5 ($R = La, La+Ce$) hydrides during the operation of metal hydride hydrogen compressor. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43. – Issue 9. – P. 4415–4427.
2. Minko K.B., **Bocharnikov M.S.**, Yanenko Y.B., Lototsky M.V., Kolesnikov A., Tarasov B.P. Numerical and experimental study of heat-and-mass transfer processes in two-stage metal hydride hydrogen compressor. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – V. 43. – Issue 48. – P. 21874–21885.
3. **Бочарников М.С.**, Яненко Ю.Б., Тарасов Б.П. Металлогидридный термосорбционный компрессор водорода высокого давления. // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 12. – С. 18–23.
4. Минко К.Б., Артемов В.И., **Бочарников М.С.**, Тарасов Б.П. Моделирование работы термосорбционного металлогидридного компрессора с интенсификацией теплообмена. // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 10. – С. 15–22.
5. **Бочарников М.С.**, Яненко Ю.Б., Тарасов Б.П. Металлогидридные компрессоры водорода. // Морской вестник. – 2017. – № 4(64). – С. 53–55.
6. Пат. на ПМ 147395 РФ, МПК С01В 3/00 (2014.11). Модуль термосорбционного компрессора на основе интерметаллидов для получения водорода высокого давления/ Г.В. Сорокин, Ю.Б. Яненко, **М.С. Бочарников**, Н.С. Стерхов, Н.Н. Куртина, И.С. Литвинов, И.А. Ипаткина (Россия). Заявка № 2014108732/05, заявлено 07.03.2014, опубл. 10.11.2014. Бюл. № 31.

На диссертацию и автореферат **поступили отзывы:**

- 1) Д.ф.-м.н., профессор **Антонов В.Е.**, заведующий лабораторией физики высоких давлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки **Института физики твердого тела** Российской академии

наук (**ФГБУН ИФТТ РАН**) (142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 2) – отзыв положительный без замечаний;

2) Д.т.н. **Чаховский В.М.**, главный научный сотрудник Департамента экономики и жизненного цикла АЭС (ДЭ и ЖЦ АЭС) Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт эксплуатации атомных электростанций (АО «ВНИИАЭС») (109507, г. Москва, ул. Ферганская, д. 25) – отзыв положительный без замечаний;

3) К.т.н. **Теличкань В.С.**, инженер конструкторско-технологического отдела **Общества с ограниченной ответственностью «Гидрогениус» (ООО «Гидрогениус»)** (141730, Московская область, г. Лобня, ул. Крупской, д. 12а) – отзыв положительный, с замечаниями:

1. Надписи и обозначения на рис. 8 мелкие и плохо читаются.
2. Отсутствует информация о перспективах продолжения работы.

4).К.т.н. **Ковалев Д.Ю.**, заведующий лабораторией рентгеноструктурных исследований **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук (ИСМАН)** (142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, д. 8) – отзыв положительный, с замечанием:

Неудачная фраза на стр. 18: «Показано, что между экспериментально измеренными и рассчитанными зависимостями наблюдается качественное и количественное согласование».

5) К.ф.-м.н. **Мельников С.А.**, начальник лаборатории металлургических процессов **АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии» (АО «ВНИИХТ»)** (15409 г. Москва, Каширское шоссе, д. 33) – отзыв положительный, с замечаниями:

Соискателем обнаружен эффект уменьшения емкости и производительности компрессора ТСК1-3,5/150 по мере увеличения числа циклов (~23,0% по водородоемкости). Причинами этого, как считает М.С. Бочарников, является окисление интерметаллида LaNi_5 парами воды и примесью кислорода в

электролизном водороде и реакции гидрогенолиза ($\text{LaNi}_5 + \text{H}_2 \rightarrow \text{LaH}_2 + 5\text{Ni}$). Процесс, аналогичный реакции гидрогенолиза, реализуется в качестве обработки «HDDR» в сплавах системы Nd-Fe-B при температуре более 800 °C: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B} \rightarrow \text{NdH}_x + \text{FeB} + \text{Fe}$. И он не может быть определяющей причиной снижения емкости.

б) К.х.н. **Негримовский В.М.**, заведующий лабораторией водородной энергетики Института арктических технологий **Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ)** (141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9) отзыв положительный, с замечаниями:

1. Недостаточное обоснование выбора давления водорода на входе в металлгидридные реактор (0.27, 0.37, 0.57 МПа) при проведении экспериментальных исследований.
2. Обозначение единицы измерения температуры «градус Цельсия» без пробела после величины.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

Клямкин Семен Нисонович является крупным специалистом в области водородного материаловедения, гидридов, хранения водорода, химии и физики высоких давлений. В настоящее время Клямкин С.Н. работает над проблемами, связанными с использованием альтернативных методов получения многокомпонентных водородаккумулирующих сплавов (механохимия, высокоскоростная кристаллизация). Другим направлением исследований является создание металл-полимерных композитов для мембранного разделения водородсодержащих газовых смесей.

Основные публикации Клямкина С.Н., близкие к тематике диссертационной работы Бочарникова М.С.:

1. Zadorozhnyy, V. Y., Klyamkin, S. N., Zadorozhnyy, M. Y., Strugova, D. V., Milovzorov, G. S., Louzguine-Luzgin, D. V., Kaloshkin, S. D. Effect of mechanical activation on compactibility of metal hydride materials //Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Т. 707. – С. 214-219.

2. Zadorozhnyy, M. Y., Klyamkin, S. N., Strugova, D. V., Olifirov, L. K., Milovzorov, G. S., Kaloshkin, S. D., Zadorozhnyy, V. Y. Deposition of polymer coating on metallic powder through ball milling: Application to hydrogen storage intermetallics //International Journal of Energy Research. – 2016. – Т. 40. – №. 2. – С. 273-279.

3. Zadorozhnyy, V., Berdonosova, E., Gammer, C., Eckert, J., Zadorozhnyy, M., Bazlov, A., Zheleznyi, M., Kaloshkin, S., Klyamkin, S. Mechanochemical synthesis and hydrogenation behavior of (TiFe) 100-xNix alloys //Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Т. 796. – С. 42-46.

Григорьев Сергей Александрович является ведущим специалистом в области возобновляемой энергетики. Основные направления исследований Григорьева С.А. в настоящее время – создание энергоустановок на основе ВИЭ и водородных электрохимических систем, математическое моделирование, электрохимическое компримирование водорода.

Основные публикации Григорьева С.А., близкие к тематике диссертационной работы Бочарникова М.С.:

1. S.A. Grigoriev, A.S. Grigoriev, N.V. Kuleshov, V.N. Fateev, and V.N. Kuleshov. Combined Heat and Power (Cogeneration) Plant Based on Renewable Energy Sources and Electrochemical Hydrogen Systems // Thermal Engineering, 2015, Vol. 62, No. 2, pp. 81-87.

2. Grigoriev A.S., Skorlygin V.V., Grigoriev S.A., Melnik D.A., Losev O.G. Optimization of the hybrid power station on the basis of modeling of thermal processes // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, vol. 92, No. 3, pp. 584-595.

3. A.S. Grigoriev, V.V. Skorlygin, S.A. Grigoriev, D.A. Melnik and O.G. Losev. Power Plants Based on Renewables and Electrochemical Energy Storage

and Generation Systems for Decentralized Autonomous Power Supply // Russian Electrical Engineering, July 2019, Volume 90, Issue 7, pp. 505–508.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» – является ведущим техническим университетом в России, занимающимся проблемами энергетики. В МЭИ ведутся исследования автономных энергетических комплексов с использованием возобновляемых источников энергии, что близко к тематике диссертационной работы соискателя.

Основные публикации сотрудников ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», близкие к тематике диссертации Бочарникова М.С.:

1. Artemov V. I., Minko K. B., Yan'kov G. G. Numerical study of heat and mass transfer processes in a metal hydride reactor for hydrogen purification //international journal of hydrogen energy. – 2016. – Т. 41. – №. 23. – С. 9762-9768.

2. Minko K. B., Artemov V. I., Yan'Kov G. G. Numerical simulation of sorption/desorption processes in metal-hydride systems for hydrogen storage and purification. Part I: development of a mathematical model //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 68. – С. 683-692.

3. Minko K. B., Artemov V. I., Yan'kov G. G. Numerical simulation of sorption/desorption processes in metal-hydride systems for hydrogen storage and purification. Part II: verification of the mathematical model //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 68. – С. 693-702

Диссертационный совет отмечает, что в результате выполненных соискателем исследований:

1. Получены новые экспериментальные данные о процессах тепломассопереноса в слоях металлгидридов и их композиций с теплопроводящими добавками при сорбции и десорбции водорода.

2. Предложена математическая модель, описывающая работу металлгидридного компрессора водорода, и выполнена ее верификация на основе экспериментальных данных. Использование разработанной модели позволяет получать технические характеристики отдельных реакторов и модулей, а также оптимизировать режимы работы металлгидридных систем компримирования и процессы управления ими.

3. Теоретически и экспериментально обоснована оригинальная конструкция металлгидридного модуля, отличающаяся эффективностью, эксплуатационной надежностью и ремонтпригодностью, что позволяет создавать на ее основе металлгидридные системы компримирования водорода производительностью до $15 \text{ м}^3/\text{ч}$, предназначенные для энергетических комплексов на основе ВИЭ.

4. Исследованы и выявлены причины изменения водородсорбционных характеристик сплавов LaNi_5 и $\text{La}_{0,5}\text{Ce}_{0,5}\text{Ni}_5$ при многократных циклах сорбции/десорбции водорода (в температурном диапазоне от 20 до 150°C и диапазоне давлений от $0,35$ до 15 МПа) в течение длительного периода эксплуатации (12 месяцев, 18180 циклов) металлгидридного компрессора.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Изготовлены, сертифицированы и введены в эксплуатацию в АО «СКТБЭ» два типа металлгидридных компрессоров водорода с пароводяным и органическим теплоносителями производительностью до $15 \text{ м}^3/\text{ч}$, повышающих давление водорода с $0,35$ до 15 МПа .

2. Верифицированная математическая модель может быть использована для получения технических характеристик и оптимизации режимов работы металлгидридных систем аккумулялирования и компримирования водорода.

3. Создан и введен в эксплуатацию в АО «СКТБЭ» опытно-экспериментальный комплекс производства, компримирования и хранения водорода с применением металлгидридного компрессора.

Результаты исследования могут быть использованы в научно-исследовательских организациях, учебных заведениях и технологических компаниях, занимающихся проектированием и внедрением водородных систем накопления энергии: ФГУАО ВО «МФТИ (национальный исследовательский университет), ФГБУН ОИВТ РАН, ФГБУ «НИЦ Курчатовский институт», ФГБУН ИПХФ РАН, ФГБОУ Во «НИУ МЭИ», ООО «ИнЭнерджи», АО «СКТБЭ», а также предприятиях по производству технического водорода, таких как ООО «НИИ КМ», АО «ЛИНДЕ ГАЗ РУС» и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- диссертационная работа базируется на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования, обобщении опыта работы других научных групп, лабораторий и технологических компаний;
- использованы современные экспериментальные методы и оборудование;
- сравнение результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований показало хорошее согласие.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования, постановке задачи. Автором лично получены экспериментальные данные, выполнена часть расчетов. Автор непосредственно участвовал в организации и проведение длительных испытаний и опытно-промышленной эксплуатации металлгидридных компрессоров водорода, а также проанализировал и обобщил полученные результаты. Апробация результатов исследования проводилась на 8 российских конференциях, где автор принял личное участие. Подготовка основных публикаций по выполненной работе выполнялась автором лично.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивой

методологической платформы, основной идейной линии, концептуальности и взаимосвязи выводов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную для энергетики тему, и соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании 27.11.2019 г. Диссертационный совет принял решение присудить Бочарникову М.С. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 8 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы и 10 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Диссертационного совета Д 002.110.03

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Вараксин А.Ю.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 002.110.03

д.т.н.



Директор Л.Б.

М.П.

27.11.2019 г.