

(Для НТС ЛНФ 13.12.2022)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ О ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ Лычагина Е.В.

Диссертационная работа «Отражатели очень холодных и холодных нейтронов на основе ультрадисперсных алмазов» посвящена теоретическому и экспериментальному изучению возможности создания эффективных отражателей очень холодных нейтронов (ОХН) на основе порошков наноалмазов детонационного синтеза (ДНА), а также определению возможности использования таких отражателей в области холодных нейтронов (ХН). В рамках проведённого исследования было экспериментально показано, что порошок ДНА эффективно отражает ОХН за счёт многократного упругого рассеяния в среде ДНА. Количественно определено содержание примесей, в первую очередь атомов водорода в порошках наноалмазов, и установлено их влияние на альбедо ОХН. Впервые реализовано хранение ОХН со скоростями до 160 м/с в замкнутом объёме. Обнаружено явление «квазизеркального» отражения ХН от слоя порошка наноалмазов при малых скользящих углах. Предложен модельный подход, позволяющий на основе результатов измерений абсолютного сечения малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), вычислять альбедо ОХН. С использованием данного подхода и результатов всестороннего исследования образцов порошков ДНА различными методами (СЭМ, ПЭМ, РД, ДРС, МУРР, МУРН и др.) определены пути улучшения характеристик отражателей. Изучены влияние изменения структуры порошка (в результате деагломерации) и размеров наночастиц (в результате сепарации) на альбедо ОХН. Экспериментально продемонстрирована возможность увеличения направленного потока извлекаемых ОХН из источника более чем в 10 раз путём применения отражателей из ДНА. Актуальность работы обусловлена перспективами применения разработанных отражателей для увеличения потоков холодных и существенного увеличения потоков очень холодных нейтронов. Это увеличение позволит создавать более эффективные экспериментальные установки, использующие ХН, и открывает возможности широкого применения ОХН для решения вопросов физики частиц и физики конденсированного состояния вещества. По своему уровню, объёму, научной новизне и практической значимости работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторской диссертации в ОИЯИ.

Исследования по тематике диссертационной работы были выполнены автором в период 2005 – 2022 гг. в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка (ОИЯИ, г. Дубна, Россия). Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим.

Основные результаты работы:

1. Показано, что алмазные наночастицы являются наиболее перспективным материалом для создания отражателей ОХН. Предложено использовать в качестве перспективного материала для создания отражателей ОХН ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза (ДНА). Проведены экспериментальные исследования взаимодействия ОХН со слоями порошков. На основании порошков ДНА созданы первые в мире эффективные отражатели ОХН.

2. Впервые наблюдалось хранение ОХН со скоростями 40–160 м/с (энергия до 10^{-4} эВ) в ловушке со стенками из порошка наночастиц алмаза. Хранение ОХН позволило измерить альбедо от порошка ДНА, которое оказалось значительно выше, чем у всех известных отражателей. Сделан вывод о том, что дальнейшее увеличение времени хранения ОХН может быть достигнуто только путём удаления из порошка поглотителей нейтронов, в основном — водорода.

3. Определены существенные для отражения нейтронов примеси ДНА. В нейтронном эксперименте определено содержание атомов водорода в порошке наноалмазов и показано, что оно может быть понижено прогревом в вакууме (или просто длительной откачкой) до

соотношения $C_{12.4N}$. Методом неупругого рассеяния нейтронов установлено, что остающийся после прогрева и откачки водород химически связан с углеродом. Таким образом, прогревом и откачкой существенно улучшить отражающие свойства порошка наноалмазов не удастся. Показано, что после замещения водорода фтором за 3 года хранения порошка в атмосфере происходит накопление химически связанного водорода.

4. Предложена модель алмазных наносфер с дискретным распределением по размерам для описания свойств конкретного образца порошка. Параметры модели определяются на основании данных малоуглового рассеяния нейтронов на данном образце. Данная модель позволяет рассчитать альбедо от порошка ДНА данного типа. С помощью данного подхода определено влияние замещения водорода фтором на альбедо ОХН.

5. Исследовано влияние размеров наноалмазов и разрушения агломератов в порошке фторированного алмаза на малоугловое рассеяние очень холодных нейтронов. Проведено моделирование влияния разрушения агломератов на альбедо ОХН. Это моделирование показывает, что уменьшение кластеризации увеличивает альбедо нейтронов. В результате существенно увеличивается время хранения нейтронов в закрытых ловушках со стенками из ДНА при условии, что глубина проникновения нейтронов сопоставима с размером ловушки или с толщиной стенки ловушки. Увеличение альбедо в данном случае обусловлено значительно большей плотностью деагломерированного порошка. Показано, что в зависимости от скорости нейтронов, изменение размера наноалмазов улучшает или ухудшает альбедо. Уменьшение среднего размера (возможный фактор уменьшения примерно равен трём) позволяет более эффективно отражать более быстрые нейтроны. Увеличение среднего размера (возможный фактор увеличения тоже примерно равен трём) позволяет увеличить время хранения более медленных ОХН. Моделирование на основе данных МУРН и модели алмазных наносфер с дискретным распределением по размерам для реалистичной геометрии отражателя (в виде полости) показало, что уменьшение размера частиц с 4,5 нм до 3,8 нм увеличивает альбедо нейтронов в широком диапазоне скоростей выше ~ 60 м/с. Это увеличение альбедо приводит к увеличению плотности более быстрых ОХН в такой полости отражателя до $\sim 25\%$, а также к увеличению верхней границы скоростей эффективно отражаемых ОХН.

6. Предсказано и впервые обнаружено новое явление квазизеркального отражения холодных нейтронов при малых углах падения от слоя наноалмазного порошка, а также рассчитан возможный выигрыш в потоках ХН при использовании отражателей из порошков наноалмазов в системе извлечения ХН от источника. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и создания более эффективных экспериментальных установок и нейтронных источников.

7. Экспериментально продемонстрирована возможность увеличения направленного потока ОХН в ~ 10 раз при помощи предложенных отражателей. Использование отражателей ОХН и ХН нового типа позволит заметно увеличить потоки нейтронов в выведенных пучках нейтронных источников и расширить область применения нейтронов.

Научная и практическая ценность работы.

Полученные в работе результаты открывают широкие перспективы для создания отражателей ОХН на основе УДА. Показано, что промышленные ДНА после специальной обработки могут быть использованы в качестве материала отражателей. Указаны направления развития технологии производства и обработки УДА для оптимизации отражателей (очистка от определённых загрязнений, производство наночастиц с определёнными размерами и порошков с уменьшенным содержанием агломератов).

Развитый в работе метод изучения рассеяния нейтронов порошками УДА позволяет вести подбор оптимальных параметров порошков, синтезируя небольшие (порядка грамма) пробные образцы.

Полученные экспериментальные данные подтверждают выводы о перспективности применения предложенных отражателей для увеличения потоков ХН и ОХН.

Результаты диссертации были представлены на ежегодных международных семинарах по исследованию взаимодействия нейтронов с ядрами ISINN (2008, 2018, 2019, 2021), на международных рабочих совещаниях GRANIT (2010, Лез-Уш, Франция), SLON (2016, Гренобль, Франция), на VII европейской конференции по нейтронному рассеянию ECNS (2019, Санкт-Петербург, Россия), на международной конференции по перспективным углеродным наноматериалам ACNS (2019, Санкт-Петербург, Россия), на международной конференции по нейтронному рассеянию ICNS (2022, Буэнос-Айрес, Аргентина), семинарах ЛНФ ОИЯИ.

Результаты диссертации, представляемые к защите, содержатся в 13 научных статьях, в том числе 11 из них опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в систему цитирования Web of Science, одна статья опубликована в иностранном реферируемом журнале и одна в виде раздела книги. Ниже перечислены данные публикации:

1. V.V. Nesvizhevsky, E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, A.V. Strelkov, G. Pignol, K.V. Protasov "The reflection of very cold neutrons from diamond powder nanoparticles" // *NIM A* **595**, (2008) 631-636
2. Lychagin E.V., Muzychka A.Yu., Nekhaev G.V., Nesvizhevsky V.V., Pignol G., Protasov K.V., Strelkov A.V. "Storage of very cold neutrons in a trap with nano-structured walls" // *Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics; ISINN-16 Dubna June 11-14, 2008, JINR Report E3-2009-33*, pp.34-44; *Physics Letters B* **679** (2009) 186–190
3. E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, V.V. Nesvizhevsky, G.V. Nekhaev, G. Pignol, K.V. Protasov, A.V. Strelkov "Coherent scattering of slow neutrons at nanoparticles in particle physics experiments" // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **611** (2009) 302–305
4. Valery Nesvizhevsky, Robert Cubitt, Egor Lychagin, Alexei Muzychka, Grigory Nekhaev, Guillaume Pignol, Konstantin Protasov and Alexander Strelkov "Application of Diamond Nanoparticles in Low-Energy Neutron Physics" // *Materials* (2010), **3**, 1768-1781; doi:10.3390/ma3031768
5. R. Cubitt, E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, G.V. Nekhaev, V.V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K.V. Protasov, and A.V. Strelkov (2010). "Quasi-specular reflection of cold neutrons from nano-dispersed media at above-critical angles." // *NIM A* **622**: 182-185.
6. R. Krylov, E. V. Lychagin, A. Yu. Muzychka, V. V. Nesvizhevsky, G. V. Nekhaev, A. V. Strelkov, and A. S. Ivanov "Study of Bound Hydrogen in Powders of Diamond Nanoparticles" // *Crystallography Reports*, 2011, Vol. 56, No. 7, pp. 1186–1191 pp. 102–107
7. E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, V.V. Nesvizhevsky "Nano-Structured Reflectors for Slow Neutrons" in [New Developments in Low-Energy Physics Research](#) **Editors:** Tao Zoeng and Meng Ngai NOVA Publishers 2013
8. V. V. Nesvizhevsky, M. Dubois, Ph. Gutfreund, E. V. Lychagin, A. Yu. Nezvanov, and K. N. Zhernenkov, "Effect of nanodiamond fluorination on the efficiency of quasispecular reflection of cold neutrons" // *Phys. Rev. A* **97**, 023629 – Published 21 February 2018
9. Bosak, A. Dideikin, M. Dubois, O. Ivankov, E. Lychagin, A. Muzychka, G. Nekhaev, V. Nesvizhevsky, A. Nezvanov, R. Schweins, A. Strelkov, A. Vul, K. Zhernenkov «Fluorination of Diamond Nanoparticles in Slow Neutron Reflectors Does Not Destroy Their Crystalline Cores and Clustering While Decreasing Neutron Losses» // *Materials* **2020**, *13*(15), 3337; <https://doi.org/10.3390/ma13153337>
10. Aleksander Aleksenskii, Markus Bleuel, Alexei Bosak, Alexandra Chumakova, Artur Dideikin, Marc Dubois, Ekaterina Korobkina, Egor Lychagin, Alexei Muzychka, Grigory Nekhaev, Valery Nesvizhevsky, Alexander Nezvanov, Ralf Schweins, Alexander Shvidchenko, Alexander Strelkov, Kylyshbek Turlybekuly, Alexander Vul' and Kirill Zhernenkov "Clustering of Diamond Nanoparticles, Fluorination and Efficiency of Slow Neutron Reflectors" // *Nanomaterials* **2021**, *11*, 1945. <https://doi.org/10.3390/nano11081945>

11. Aleksander Aleksenskii, Markus Bleuel, Alexei Bosak, Alexandra Chumakova, Artur Dideikin, Marc Dubois, Ekaterina Korobkina, Egor Lychagin, Alexei Muzychka, Grigory Nekhaev, Valery Nesvizhevsky, Alexander Nezvanov, Ralf Schweins, Alexander Shvidchenko, Alexander Strelkov, Kylyshbek Turlybekuly, Alexander Vul', Kirill Zhernenkov "Effect of Particle Sizes on the Efficiency of Fluorinated Nanodiamond Neutron Reflectors" // *Nanomaterials* **2021**, 11, 3067 <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/11/3067>
12. C. Hramco, K. Turlybekuly, S.B. Borzakov, N.A. Gundorin, E.V. Lychagin, G.V.Nehaev, A.Y. Muzychka, A.V. Strelkov, E. Teymurov, Experimental setup for elemental analysis using prompt gamma rays at research reactor IBR-2, *Nuclear Engineering and Technology* **2022**, 54(8), 2999-3005 doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.02.022>
13. S.M. Chernyavsky, M. Dubois, E. Korobkina, E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, G.V. Nekhaev, V.V. Nesvizhevsky, A.Yu. Nezvanov, A.V. Strelkov, and K.N. Zhernenkov "Enhanced directional extraction of very cold neutrons using a diamond nanoparticle powder reflector" // *Review of Scientific Instruments*, **2022**, RSI22-AR-01966R