

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА УХН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ γ -СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

С.В.Жуков, В.Л.Кузнецов, В.И.Морозов, Ю.Н.Панин, А.И.Фомин, С.М.Чернявский

*Российский научный центр "Курчатовский институт"
123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 12 марта 1993 г.

Выполнен прямой эксперимент по выяснению причин аномального нагрева УХН при взаимодействии с поверхностью вещества. Методом γ -спектроскопии подтверждена гипотеза водорода, как основной причины этого процесса.

При взаимодействии ультрахолодных нейтронов (УХН) с поверхностью вещества эффективная глубина их подбарьерного проникновения в вещество составляет величину порядка 100–300 Å. Это приводит к частичному поглощению УХН ядрами вещества или неупругому рассеянию (нагреву) с выходом их из диапазона энергий УХН. Если на поверхности вещества имеются примеси, то вероятность этих процессов может существенно возрасти по сравнению с соответствующей расчетной величиной для "чистой" поверхности. Многочисленные эксперименты по хранению УХН в сосудах из различных материалов показали, что получить вероятность захвата и нагрева УХН, равную расчетной, не удастся. В значительной степени этот эффект оказался связанным с дополнительным или "аномальным" нагревом УХН¹, для объяснения которого была выдвинута гипотеза существования универсального для всех веществ водородсодержащего поверхностного слоя (см., например, ²). Однако до настоящего времени не было поставлено прямого эксперимента с УХН, который бы однозначно установил наличие связи между вероятностью дополнительного нагрева УХН при соударении с поверхностью и концентрацией водорода на этой же поверхности.

Для решения этой задачи нами была предпринята попытка зарегистрировать γ -излучение, возникающее при облучении УХН поверхности нержавеющей стали – наиболее распространенного материала для сосудов и нейтронотводов УХН. При этом основной целью было определение концентрации водорода по выходу γ -квантов с энергией 2,23 МэВ из реакции $n(p, d)\gamma$ и установление корреляционной связи между этой величиной и вероятностью рассеяния УХН по неупругому каналу.

Схема эксперимента показана на рис.1. Установка (рис.1,а) состояла из вакуумной камеры с исследовавшимся образцом, спектрометра γ -излучения и детектора УХН. В камеру нейтроны поступали из транспортного нейтронотода установки УХН, обеспечивавшей плотность выводимого потока $(3-4) \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в интервале скорости $(3,2-6,0) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Детектор УХН на основе ³He с входным окном площадью 60 см^2 подключался к камере через диафрагму с отверстием площадью $S_0 = 1 \text{ см}^2$. Исследуемый образец представлял собой пакет пластин из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т площадью $60 \times 100 \text{ мм}^2$ и толщиной 100 мкм. Общая площадь пластин $S_s = 0,9 \text{ м}^2$ при толщине зазора между ними 1,5 мм. Спектрометр γ -излучения был выполнен в виде двух сцинтилляционных блоков на основе кристаллов NaI(Tl) размером $75 \times 80 \text{ мм}$.

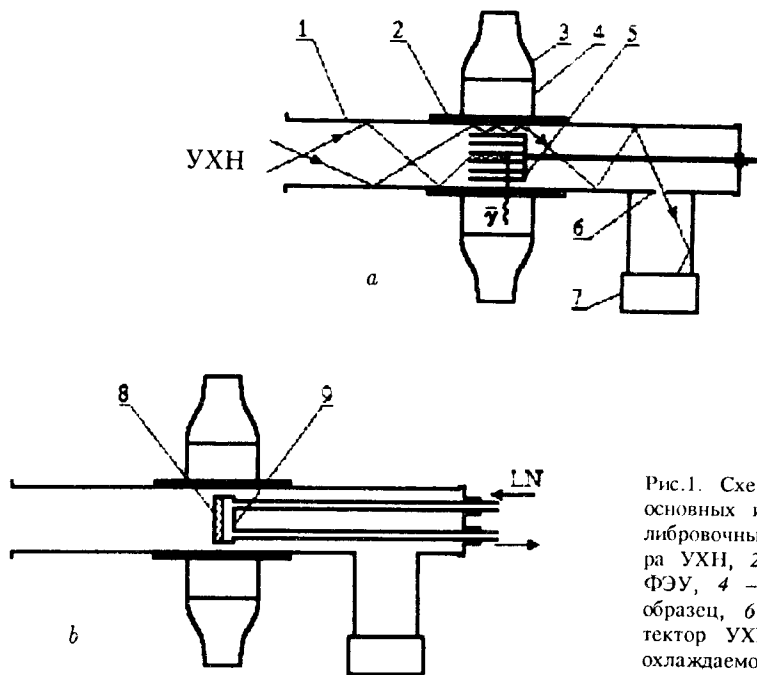


Рис.1. Схема эксперимента *a* – при основных измерениях, *b* – при калибровочных измерениях (1 – камера УХН, 2 – экран-конвертор, 3 – ФЭУ, 4 – кристалл NaI(Tl), 5 – образец, 6 – диафрагма, 7 – детектор УХН, 8 –полиэтилен, 9 – охлаждаемое основание)

Между стенками камеры и кристаллами был установлен специальный экран-конвертор, представлявший собой плоский слой карбида бора толщиной 1 см. Экран-конвертор в сочетании с γ -спектрометром являлся детектором нейтронов, нагреваемых при взаимодействии с поверхностью образца. Нагретые нейтроны, попадая в конвертор, захватывались, а γ -кванты с энергией 477 кэВ из реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha + \gamma$ (477 кэВ) регистрировались γ -спектрометром. Вся установка окружалась защитой из свинца и борированного полиэтилена.

При облучении образца УХН в спектре γ -лучей появляются пики полного поглощения γ -лучей с энергией 477 кэВ и 2,23 мэВ. Вероятность μ_{ie} нагрева нейтрона при ударе о поверхность и вероятность μ_c захвата его протоном определяются как

$$\mu_{ie} = J_{ie} / \epsilon_{ie} S_s \Phi = J_{ie} \epsilon_n S_0 / J_n \epsilon_{ie} S_s, \quad (1)$$

$$\mu_c = J_c / \epsilon_c S_s \Phi = J_c \epsilon_n S_0 / J_n \epsilon_c S_s, \quad (2)$$

где $\Phi = J_n / \epsilon_n S_0$ – плотность потока УХН, облучающих образец, J_n – скорость счета УХН детектором, ϵ_n – эффективность регистрации нейтронов, прошедших отверстие диафрагмы, ϵ_{ie} – эффективность регистрации нагретых на поверхности образца нейтронов по отсчетам в пике полного поглощения γ -квантов с энергией 477 кэВ, ϵ_c – эффективность регистрации γ -квантов с энергией 2,23 мэВ. Для определения абсолютных величин μ_{ie} и μ_c необходимо знать отношения эффективностей $\epsilon_n / \epsilon_{ie}$ и ϵ_n / ϵ_c . Измерения этих отношений были выполнены с помощью калибровочного образца в виде полиэтиленового диска толщиной 3 мм и площадью S_p , устанавливавшегося на место расположения исследуемого образца (рис.1 б). Диск укреплялся в камере на основании

из нержавеющей стали, температура которого могла меняться в пределах (80–300) К. Между диском и стенками камеры имелся кольцевой зазор площадью $S_k = 2 \text{ см}^2$, через который часть УХН поступала на детектор. В калибровочных измерениях диафрагма удалялась, и эффективность регистрации УХН, прошедших кольцевой зазор, равнялась ϵ_n .

Падающие на полиэтилен нейтроны полностью нагреваются либо захватываются. Относительные вклады этих процессов определяются как σ_{ie}/σ_t и σ_c/σ_t , где σ_c , σ_{ie} и σ_t – соответственно сечения захвата, неупругого рассеяния и полное сечение. Регистрируя скорости счета J_{ie} и J_c в пиках полного поглощения γ -квантов с энергией 477 кэВ и 2,23 МэВ, можно получить искомые отношения:

$$\epsilon_{ie}/\epsilon_n = \sigma_{ie} S_k J_{ie} / \sigma_t S_p J_n, \quad (3)$$

$$\epsilon_c/\epsilon_n = \sigma_c S_k J_c / \sigma_t S_p J_n, \quad (4)$$

где неопределенным является только σ_{ie} (величина σ_c для молекулы CH_2 составляет 290 барн при средней скорости нейтронов $4,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$). Для измерения σ_{ie} диск охлаждался до температуры, близкой к 80 К, после чего определялось изменение скоростей счета ΔJ_{ie} и ΔJ_c , обусловленное понижением сечения σ_{ie} при переходе от температуры 300 К до 80 К. Поскольку величина $\Delta J_{ie}/\Delta J_c = \epsilon_{ie}/\epsilon_c$, то, используя (3) и (4) и результаты измерений γ -спектров для полиэтилена, можно определить величины σ_{ie} , ϵ_{ie}/ϵ_n и ϵ_c/ϵ_n . Из полученных в наших измерениях данных величина $\sigma_{ie} = (3745 \pm 370)$ барн при комнатной температуре, а отношения $\epsilon_{ie}/\epsilon_n = (9,23 \pm 0,06)\%$ и $\epsilon_c/\epsilon_n = (2,00 \pm 0,15)\%$.

Измерения спектров γ -излучения проводились на различных стадиях последовательной очистки поверхности образца от примесей. На первой стадии образец промывался ацетоном, на второй – электрополировался в H_3PO_4 , после чего выдерживался в атмосфере 1,5 месяца, на третьей – повторно электрополировался, на четвертой – отжигался в вакууме при температуре 350°C в течение 6 час. Интенсивности пиков 477 кэВ и 2,23 МэВ оказались существенно зависящими от степени очистки поверхности образца. На рис.2 приведены фрагменты спектров γ -лучей в областях этих пиков на всех четырех стадиях очистки поверхности. Видно, что по мере очистки поверхности вероятность нагрева УХН уменьшается, что сопровождается уменьшением концентрации водорода на поверхности. После отжига концентрация водорода понизилась настолько, что пик полного поглощения γ -лучей с энергией 2,23 МэВ перестал наблюдаться вообще, хотя пик γ -лучей с энергией 477 кэВ продолжал существовать. Небольшая добавка в этот пик (20%) обусловлена аннигиляционными γ -квантами с энергией 512 кэВ. Обработка спектров с помощью формул (1) и (2) показала, что величины μ_c и μ_t связаны между собой линейной зависимостью (рис.3). Полученный результат однозначно свидетельствует о том, что водород на поверхности стали является основной причиной дополнительного неупругого рассеяния УХН. Однако этот канал нагрева не является единственным, поскольку даже при нулевой концентрации водорода ($\mu_c = 0$) величина μ_{ie} остается конечной и равной $(0,95 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$. Расчетное значение величины μ_t (полного коэффициента потерь) для нержавеющей стали составляет $1,44 \cdot 10^{-4}$ при средней скорости $\bar{V} = 4,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и определяется захватом. Поэтому природа остаточного "безводородного" нагрева требует дальнейших исследований. Не

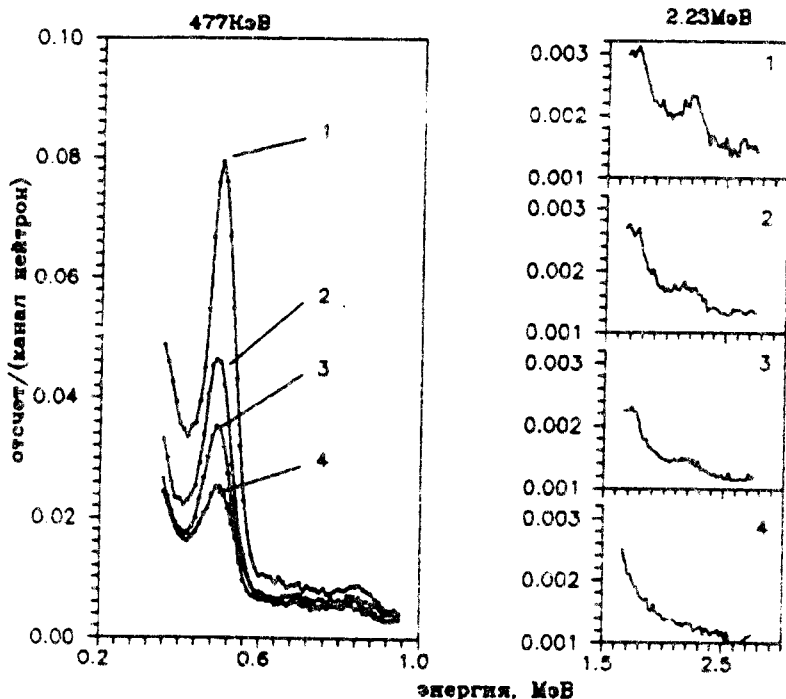


Рис.2. Фрагменты спектров γ -лучей в области энергии (E) 477кэВ и 2,23МэВ для различных стадий очистки поверхности образца (1 – после промывки ацетоном, 2 – после электрополировки, 3 – после второй электрополировки, 4 – после отжига в вакууме)

исключено, что этот процесс является усиленным по каким-то причинам нагревом УХН на нержавеющей стали либо нагревом на поверхностных примесях, не содержащих водород и не десорбирующихся при отжиге.

Для количественной оценки поверхностной концентрации водорода использовалось соотношение, приведенное в ²:

$$\mu_c = 8N_H \bar{V} V_{th} \sigma_{th} / 3V_{lim}^2, \quad (5)$$

где N_H – число атомов водорода на единицу площади, V_{th} – скорость тепловых нейтронов, σ_{th} – сечение захвата тепловых нейтронов на водороде, V_{lim} – граничная скорость для нержавеющей стали. Как видно из рис.3, поверхностная концентрация водорода в результате очистки уменьшилась от $1,6 \cdot 10^{17}$ ат/см² до уровня $N_H < 6 \cdot 10^{15}$ ат/см², что не противоречит данным, полученным методом ядерных реакций ³.

Предложенный метод может быть эффективно использован для изучения процессов взаимодействия УХН с другими веществами и, в частности, исследования эффекта повышенных потерь УХН для низкотемпературных бериллиевых сосудов, наблюдавшегося в ^{4,5}. В целом выполненная работа показала возможность развития нового направления исследования поверхности – нейтрон-радиационного анализа ее ядерного состава с использованием УХН. Применение интенсивных источников УХН в сочетании с Ge(Li) детекторами должно резко расширить диапазон задач, которые могут быть решены с по-

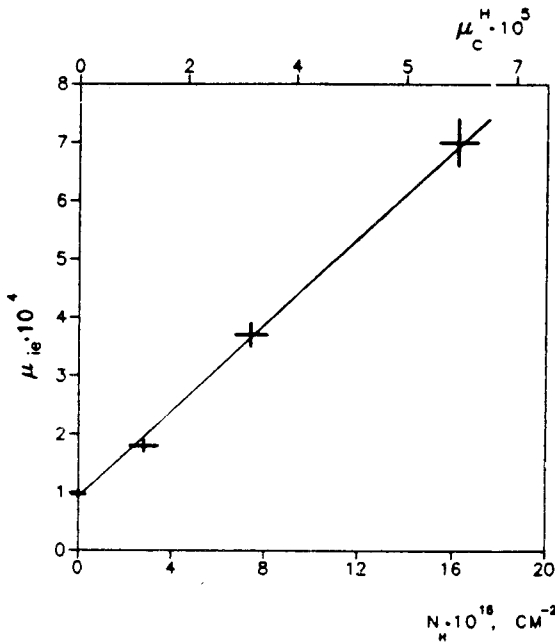


Рис.3. Зависимость вероятности μ_{ic} нагрева УХН от вероятности их захвата протоном μ_c и концентрации N_H водорода на поверхности

мощью нейтрон-радиационного и, возможно, нейтрон-активационного анализа поверхности на УХН.

Авторы благодарны С.О.Борисову и А.Ю.Ненагляднову за помощь в подготовке и проведении измерений.

1. А.В.Стрелков, М.Хетцельт, ЖЭТФ 74, 23 (1978).
2. В.К.Игнатович. Физика ультрахолодных нейтронов, М.: Наука, 1986.
3. J.P.Bugeat, W.Mampe, Z. Phys. B35, 273 (1980).
4. P.Ageron, R.Golub, W.Mampe, et al. Z. Phys. B59, 261 (1985).
5. В.П.Алфименков В.В.Несвижевский, А.П.Серебров и др., Письма в ЖЭТФ 55, 92 (1992).