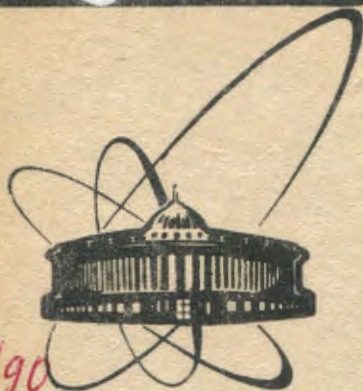


89-678

СЗ42ГЗ



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

79/90

P3-89-678

В.Д.Ананьев, А.А.Беляков, В.В.Голиков,  
Е.Н.Кулагин, А.С.Тихомиров

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИСТОЧНИК  
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ  
НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

1989

Как известно, эффективность водородсодержащих замедлителей, используемых в качестве источников ультрахолодных нейтронов /УХН/, значительно повышается при охлаждении их до низких температур <sup>1/</sup>. Наиболее эффективными из действующих в настоящее время источников являются жидководородный и жидкодейтериевый, установленные соответственно на реакторе ВВРМ ЛИЯФ /Гатчина/<sup>2/</sup> и на высокопоточном реакторе ИЛЛ /Гренобль/<sup>3/</sup>. Обеспечивая получение рекордных в настоящее время потоков УХН, оба источника представляют собой сложные инженерные устройства, позволяющие, например, в ЛИЯФ осуществлять охлаждение до 16,5 К расположенного в центре активной зоны реактора одного литра жидкого водорода при тепловыделении 2 кВт /в ИЛЛ объем жидкого дейтерия составляет 25 л/.

Вместе с тем, на некоторых реакторах используются более простые криогенные источники УХН, работающие при температурах ~80 К, в которых водородсодержащие вещества /в первую очередь вода/ намораживаются на охлажденную поверхность <sup>4/</sup>. Конструкции этих источников весьма просты и включают в себя в качестве главного элемента металлический диск, на который намораживается слой воды толщиной ~1 мм, поскольку длина пробега УХН в H<sub>2</sub>O при температуре ~80 К составляет ~300 мкм. В целом намороженные источники - конверторы УХН привлекают к себе внимание не только простотой конструкции, но и широкими возможностями регулирования толщины конвертора, надежностью и безопасностью в эксплуатации.

Возникает принципиальный вопрос: в какой степени намороженные конверторы УХН уступают в своей светосиле жидководородным источникам УХН? Согласно <sup>1/</sup>, полный поток УХН  $\phi$  в интервале энергий от 0 до  $E_{гр.}^H$ , выходящий с 1 см<sup>2</sup> конвертора, без учета отражения УХН от границы конвертор - вакуум можно представить в следующем виде:

$$\phi = \frac{\phi_0}{8} (E_{гр.}^H)^2 G(T_H, T_K), \quad /1/$$

где  $\phi_0$  - полный поток тепловых нейтронов с эффективной температурой  $T_H$ ;  $T_K$  - температура конвертора;  $E_{гр.}^H$  - граничная энергия нейтронов канала УХН. Функция  $G(T_H, T_K)$  /так называемый в физике УХН G-фактор/ определяет относительную эффективность конвертора. Обычно G-фактор, конкретный вид которого

для разного типа конверторов приведен в<sup>14/</sup>, принимается равным единице для выхода УХН из полиэтилена при  $T_K = T_H = 300$  К. При  $T_K = 20$  К расчетное значение G-фактора для замороженной воды<sup>15/</sup> всего лишь в 4 раза меньше G-фактора для жидководородного замедлителя. Однако, если экспериментальное значение G-фактора для жидкого водорода /G~ 55/<sup>12/</sup> соответствует расчету, то имеющиеся экспериментальные данные по G-фактору для замороженной воды при  $T_K = 80$  К<sup>14/</sup> в  $1,5 \div 2$  раза меньше расчетной величины. Причины этого расхождения в настоящий момент не ясны. Во всяком случае, необходимо проведение измерений G-фактора для замороженной воды при более низких температурах конвертора.

В настоящей работе сообщаются результаты первого этапа исследований выхода УХН из низкотемпературного источника, установленного на реакторе ИБР-2. В качестве рабочего вещества конвертора использовалась замороженная вода, а в качестве хладагента – газообразный холодный гелий. Подложкой служил эксплуатируемый с 1985 г. конвертор из гидрида циркония. Не предпринималось каких-либо мер по оптимизации как конструкции охлаждаемой подложки, так и в целом головной части канала УХН. Фактически холодный источник был приспособлен к существующему каналу УХН, поскольку на первом этапе эксплуатации предусматривалось его использование для физических исследований с неохлаждаемым источником УХН.

Канал УХН размещается на горизонтальном пучке № 3 реактора ИБР-2 /рис.1/. Нейтронотвод канала изготовлен из труб нержавеющей стали с внутренним диаметром 187 мм. Общая длина канала ~9,6 м. Наиболее близко расположенная к активной зоне реактора его головная часть представляет собой прямолинейный отрезок длиной 3,2 м, далее нейтронотвод плавно изогнут с радиусом кривизны ~30 м. Изогнутая часть позволяет вывести в экспериментальный зал не только УХН, но и очень холодные нейтроны со скоростями до  $150$  м·с<sup>-1</sup>. Внутренняя поверхность всего канала выложена отрезками электрополированных медных труб. Для получения чистого пучка УХН в экспериментальном зале к каналу УХН подсоединены угловые повороты из электрополированной меди. На конце изогнутой части нейтронотвода установлен выдвижной вакуумный шибер для герметизации канала УХН во время проведения персоналом наладочных работ на экспериментальных установках канала. Внутри нейтронотвода поддерживается вакуум  $\sim 10^{-6}$  Тор, обеспечиваемый сорбционными и магнитно-разрядными насосами.

В рабочем режиме расстояние между поверхностью замедлителя реактора и головной частью канала УХН составляет 15 мм. В головной части канала на расстоянии 15 мм от торца нейтронотвода,

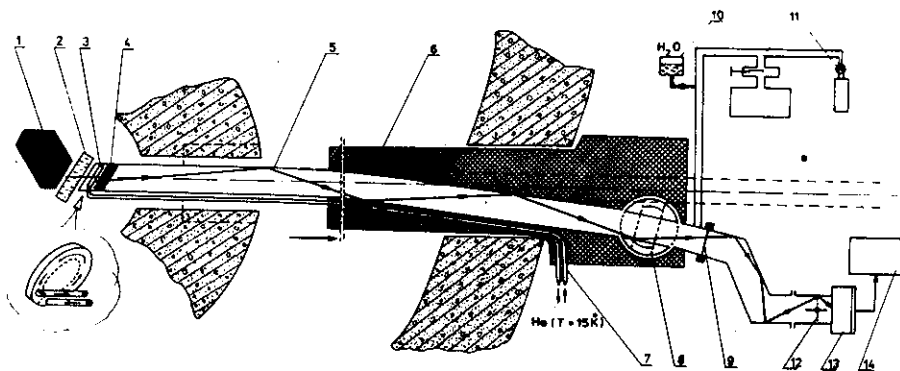


Рис. 1. Схема канала УХН. 1 - активная зона реактора; 2 - замедлитель; 3 - конвертор УХН; 4 - дырочный замедлитель; 5 - изогнутый нейтронпровод; 6 - защита; 7 - криогенные трубопроводы; 8 - защитный шибер; 9 - вакуумный шибер; 10 - вода для намораживания конвертора; 11 - система вакуумной безмасляной откачки; 12 - шторка; 13 - детектор; 14 - измерительный модуль.

где поток тепловых нейтронов  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , размещен конвертор - источник УХН, представляющий собой плоскую пластину из гидрида циркония  $\text{ZrH}_{1,9}$  толщиной  $\sim 5 \text{ мм}$  и площадью  $\sim 240 \text{ см}^2$ . Пластина  $\text{ZrH}_{1,9}$  после нанесения никелевого слоя припаяна к подложке из нержавеющей стали, являющейся стенкой контура охлаждения конвертора.

На расстоянии  $\sim 4 \text{ мм}$  от поверхности  $\text{ZrH}_{1,9}$  размещен дополнительный дырочный замедлитель, служащий для увеличения потока тепловых нейтронов на конверторе. Дырочный замедлитель представляет собой цилиндрический сосуд диаметром 185 мм и толщиной 100 мм. Для выхода УХН из конвертора в нейтронпровод соосно оси в цилиндре сделаны 5 сквозных отверстий, выложенных медью, диаметром  $\sim 40 \text{ мм}$  каждое /суммарная площадь отверстий  $\sim 60 \text{ см}^2$ /. В качестве замедляющей среды в дырочном замедлителе, а также для охлаждения головной части канала используется проточная вода из системы водяного замедлителя ИБР-2.

При эксплуатации канала УХН с источником из  $\text{ZrH}_{1,9}$  в контур охлаждения конвертора для съема радиационного тепла по подводящим криогенным трубопроводам подавалась проточная вода, так что при мощности реактора 2 МВт температура конвертора не превышала 320 К.

Отверстие канала № 3 ИБР-2 в биологической защите реактора имеет вид прямоугольника со сторонами 230 и 400 мм. Поскольку внешний диаметр нейтронотода УХН равен 219 мм, то оставшаяся часть отверстия в бетонной защите /вне нейтронотода/ используется для подвода криогенных трубопроводов и термопар /к конвертору/, а также трубок с проточной водой /для дырочного замедлителя и охлаждения головной части канала/.

При работе с низкотемпературным источником УХН пластина гидрида циркония служила подложкой, на которую намораживался слой воды. В этом случае криогенные трубопроводы контура охлаждения конвертора подсоединялись к аналогичным трубопроводам холодильной гелиевой установки ХГУ-500/15, и в контур охлаждения конвертора вместо проточной воды подавался газообразный холодный гелий. Гелиевая установка располагалась на расстоянии ~30 м от источника УХН. Криогенные трубопроводы представляют собой трубку из нержавеющей стали диаметром 20 мм, обмотанную несколькими слоями тепловой изоляции из стекловолокна и алюминиевой фольги и находящуюся в вакуумном кожухе. Внутри кожуха в рабочем режиме поддерживается вакуум  $\sim 10^{-5}$  Торр. Несмотря на значительную общую длину коммуникаций /~60 м/, тепловые потери в криогенных трубопроводах составляют  $15 \pm 20\%$  от величины суммарных теплопотерь.

Временной ход процесса захлаживания подложки из гидрида циркония при нулевой мощности реактора показан на рис.2 сплошной линией. В установившемся режиме работы ХГУ /через 2,5 ч после начала захлаживания/ температура гидрида циркония равна ~15 К при температуре выходящего из ХГУ гелия ~11 К и поступающего обратно на вход ХГУ газа с температурой ~19 К. С ростом мощности реактора  $W$  происходило повышение температуры гидрида циркония /пунктирная часть кривой на рис.2/. При  $W = 2$  МВт температура  $ZrH_{1,9} \sim 75$  К.

Зависимость температуры конвертора от  $W$  можно описать соотношением  $T_K = 15 \text{ К} + 30 \text{ К} \times W / \text{МВт} /$ .

После захлаживания гидрида циркония закрывались вакуумный шибер канала и вентили высоковакуумных насосов, и дозированное количество

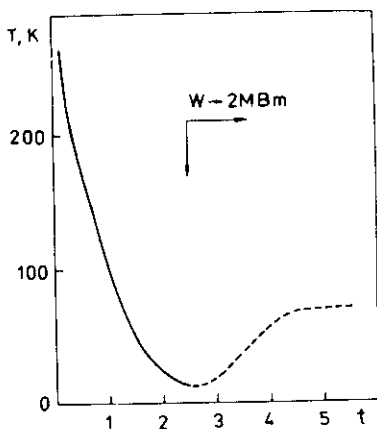


Рис.2. Зависимость изменения температуры конвертора  $T/K$  от времени  $t/ч$ . Сплошная линия — процесс захлаживания при нулевой мощности реактора; пунктирная линия — подъем мощности до 2 МВт.

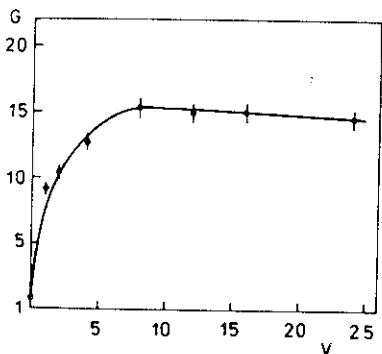


Рис.3. Зависимость увеличения интенсивности УХН /G-фактор/ от объема намороженной воды  $V/\text{см}^3/$ .

во воды вводилось в вакуумную полость нейтроновода на расстоянии 10 м от конвертора. После введения каждой порции воды наблюдалось ухудшение вакуума с  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  Тор, однако через несколько минут он постепенно улучшался до значения  $2 \div 4 \cdot 10^{-3}$  Тор. При подключении насосов вакуум восстанавливался до прежнего значения  $5 \cdot 10^{-6}$  Тор. В моменты впрыскивания порций воды в полость нейтроновода фиксировались кратковременные изменения температуры конвертора и температуры газа гелия. Так, при впрыскивании  $1 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$  температура гелия, поступающего после конвертора на вход ХГУ, повышалась на  $2 \div 2,5$  К; при впрыскивании  $3 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$  - на  $7 \div 8$  К.

На рис.3 представлена зависимость увеличения счета УХН /G-фактор/ от объема воды  $V$ , введенной в полость нейтроновода. /За "1" принят счет УХН от гидрида циркония при температуре 305 К/. Максимальный выход УХН достигался при  $7 \div 8$  /  $\text{см}^3$  введенной воды, при этом  $G = 15,30 \pm 0,05$ . Полученное экспериментальное значение G-фактора при  $T_K \sim 75$  К значительно превышает теоретическую величину  $G \approx 6$  для воды при этой температуре /5/. Этот факт, возможно, связан с частичным обеднением гидрида циркония водородом за время его длительной эксплуатации на канале УХН. Подтверждением этому может служить экспериментальный результат, из которого видно, что выход УХН из данного гидрида циркония при охлаждении его от 305 К до 45 К возрос всего в  $2,12 \pm 0,11$  раза, тогда как теория /1/ предсказывает возрастание в 4,5 раза.

Ранее /5/ было установлено, что насыщение выхода УХН из намороженной воды при  $T_K = 80$  К достигается при толщине конвертора  $\sim 0,5$  мм. В наших условиях сложная конфигурация источника УХН не позволяет точно определить толщину намораживаемого слоя воды. Наличие дырочного замедлителя непосредственно перед гидридом циркония, возможно, приводит к тому, что вода намораживается на часть поверхности гидрида циркония и создает слой переменной толщины, соответствующий отверстиям в дырочном замедлителе. Если предположить, что  $7 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$  намораживаются равномерным слоем на всю пластину гидрида циркония или только на часть поверхности, равную площади отверстий в дырочном замедлителе, тогда насыщение выхода УХН наступает при толщине

слоя 0,29 мм и  $\approx 1,16$  мм соответственно. Заметим, что после достижения максимального значения G-фактора при дальнейшем росте объема замороженной воды /  $V > 12 \text{ см}^3$  / в эксперименте проявилась тенденция плавного уменьшения выхода УХН. Возможно, этот эффект связан с близким расположением теплой поверхности дырочного замедлителя к намораживаемому слою.

При штатной работе ХГУ в течение нескольких суток не замечалось каких-либо изменений выхода УХН из замороженного конвертора. При кратковременных перерывах в работе ХГУ на  $15 \div 30$  мин /неисправность компрессора, отсутствие жидкого азота в блоке очистки и осушки гелия/ температура конвертора повышалась до  $\sim 170 \div 190 \text{ К}$ . В том случае, если в нейтроноводе УХН вакуум поддерживался при помощи крионасоса /контур охлаждения конвертора/ и не использовались насосы безмасляной откачки канала, происходило резкое ухудшение вакуума в нейтроноводе до уровня  $/5 \div 8/ \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$ . После восстановления нормальной работы ХГУ и повторного охлаждения конвертора до температуры  $75 \text{ К}$  наблюдалось уменьшение выхода УХН на  $15 \div 20\%$ . Остаточный вакуум, создаваемый крионасосом, также не возвращался к прежнему уровню, а был в  $\sim 2$  раза хуже. Введение в полость нейтроновода дополнительного количества воды / $\sim 1,5 \div 2 \text{ см}^3$  при ранее замороженных  $7 \div 8 \text{ см}^3$ / восстанавливало исходный выход УХН. Уменьшение интенсивности УХН после временного повышения температуры конвертора, очевидно, связано с дрейфом и адсорбцией молекул воды на контуре охлаждения конвертора и на возможной свободной части поверхности гидрида циркония. Изменение реактивности реактора в связи с приходом нескольких  $\text{см}^3$  воды в район конвертора, находящегося в  $80 \text{ мм}$  от активной зоны реактора, пренебрежимо мало и не влияет на работу реактора.

В заключение отметим, что при использовании конвертора из замороженной воды и при подсоединении двух  $60^\circ$ -поворотов к выходу изогнутого нейтроновода /см. рис.1/ получен поток УХН  $\sim 400 \text{ н.с}^{-1}$  на детекторе площадью  $130 \text{ см}^2$ . По сравнению с конвертором из гидрида циркония фон детектора вырос всего лишь в 2 раза, что привело к возрастанию отношения эффект/фон до 80:1. Иллюстрацией эффективности замороженного источника УХН на реакторе ИБР-2 могут служить экспериментальные результаты работы /6/, когда увеличение в 15 раз интенсивности УХН позволило провести измерения коэффициента потерь УХН в обезгаженном бериллии на уровне  $10^{-6}$ .

Авторы выражают искреннюю признательность коллективу сотрудников Механико-технологического отдела ЛНФ за обеспечение работы ХГУ; В.Б.Дучицу, Ю.В.Никитенко, А.В.Русакову и О.М.Стрелковой - за помощь при проведении измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков В.В., Лущиков В.И., Шапиро Ф.Л. - ЖЭТФ, 1973, 64, с.73.
2. Алтарев И.С. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, с.269.
3. Ageron P., Mampe W. In: The Investigation of Fundamental Interactions with Cold Neutrons. Proceedings of a Workshop. NBS Special Publication 711, Gaithersburg, 1986, p.16.
4. Игнатович В.К. - "Физика ультрахолодных нейтронов", М.: "Наука", 1986.
5. Ахметов Е.З. и др. - ОИЯИ, РЗ-8470, Дубна, 1974.
6. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. - ОИЯИ, РЗ-89-664, Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 сентября 1989 года.