

ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИСТОЧНИКА УХН НА РК ПИК

*А. П. Серебров*¹, *В. А. Лямкин*^{1,*}, *С. Н. Иванов*¹,
*А. К. Фомин*¹, *Д. В. Прудников*¹, *А. О. Коптюхов*¹,
*П. А. Хазов*¹, *А. Н. Мурашкин*¹, *Г. О. Бородин*¹,
А. В. Сиротин^{1,2}

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, 188300, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101,
Россия

В Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» ведутся работы по изготовлению источника ультрахолодных нейтронов, в котором в качестве конвертера используется сверхтекучий гелий, для научных исследований в области физики фундаментальных взаимодействий. Плотность ультрахолодных нейтронов в закрытой камере источника ожидается на уровне $3,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. На этом источнике смогут поочередно работать до четырех экспериментальных установок. Эффективная транспортировка ультрахолодных нейтронов до установок будет осуществляться с помощью круглых нейтроноводов из нержавеющей стали с внутренним диаметром 125 мм. Описана технология изготовления данных нейтроноводов, в частности полировка и нанесение тонкой ^{58}Ni -пленки на внутреннюю поверхность.

In Petersburg Nuclear Physics Institute named after B. P. Konstantinov of NRC “Kurchatov Institute”, work is proceeding on production of an ultracold neutron source based on superfluid helium for scientific research in the field of physics of fundamental interactions. The ultracold neutron density in the closed source vessel is to be around $3.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$. Up to four experimental facilities are expected to operate based on this source. Effective transportation of ultracold neutrons to the facilities is to be executed by using stainless steel neutron guides with an internal diameter of 125 mm. The manufacturing procedure of such neutron guides is described, in particular, the polishing and the deposition of ^{58}Ni thin film on the inner surface.

PACS: 28.20.Cz

ВВЕДЕНИЕ

Ультрахолодные нейтроны (УХН) — это нейтроны с длиной волны 500–1000 Å или энергией порядка 100–330 нэВ [1]. УХН используются в исследованиях по физике фундаментальных взаимодействий, например

* E-mail: lyamkin_va@pnpi.nrcki.ru

в поиске электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона [2, 3] и прецизионном измерении времени жизни нейтрона [4, 5]. В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ завершаются работы по созданию нового источника УХН на основе сверхтекучего гелия в качестве конвертера [6]. Предполагаемая плотность УХН в закрытой камере источника ожидается на уровне $2,2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ [7]. Зона для экспериментов на пучках УХН находится на расстоянии 15 м от камеры конвертера. Эффективная транспортировка ультрахолодных нейтронов осуществляется с помощью нейтроноводов, изготовленных из материалов с высоким коэффициентом отражения и низким поглощением нейтронов. Основной характеристикой нейтронОВОДА является пропускание — это отношение потока УХН на выходе к потоку на входе. Реальные нейтронОВОДНЫЕ системы УХН имеют значение пропускания 0,95–0,98 м⁻¹, а значит, на 15 м до экспериментаторов доходит только 45–75 % нейтронов [8, 9]. Таким образом, эффективность экспериментов на пучках УХН в большой степени зависит от качества нейтронОВОДНОЙ системы. На пропускание нейтронОВОДОВ УХН оказывают влияние ряд факторов [1].

Остаточный вакуум. Остаточный вакуум ниже 10^{-3} мбар не влияет на транспортировку УХН. Однако в нашем случае «холодный» нейтронОВОД длиной 3 м от камеры конвертера до разделительной мембраны заполнен остаточными парами гелия при давлении 2 мбар (в случае температуры конвертера, равной $T = 1,34 \text{ К}$). В работе [10] для гелиевого газа была экспериментально получена постоянная при фиксированной комнатной температуре величина $P\tau = (46\,700 \pm 3300) \text{ Па} \cdot \text{с}$. Соответственно, для $P = 2 \text{ мбар}$ и $T = 85 \text{ К}$ имеем $\tau = (66 \pm 5) \text{ с}$, что сравнимо с потерями в камере конвертера УХН. С этими потерями в этой части нейтронОВОДНОЙ системы придется смириться, так как над жидким гелием всегда присутствуют пары насыщенного газа в равновесии с жидкой фазой. В остальной части нейтронОВОДНОЙ системы будет поддерживаться вакуум на уровне 10^{-5} мбар, и потери из-за столкновения с остаточным газом будут отсутствовать.

Геометрия нейтронОВОДА. Время хранения, которое зависит от потерь при соударениях, определяется уравнением $\tau_{\text{ст}} = \tau_1 / \delta$, где τ_1 — время между двумя соударениями, а δ — вероятность потерь УХН при взаимодействии со стенками. Время между двумя соударениями прямо пропорционально диаметру нейтронОВОДА, а значит, больший диаметр дает лучшую проводимость. Также очевидно, что чем короче нейтронОВОД, тем меньше соударений с его стенками испытает нейтрон для его преодоления. Ограничения по диаметру нейтронОВОДА исходят из конструкции и места расположения источника УХН, а длина обусловлена местом размещения нейтронных станций.

Шероховатость поверхности. Общее отражение нейтронов от поверхностей можно разделить на спекулярное отражение, когда угол падения компланарен и равен углу отражения, и диффузное отражение, когда угол отражения не зависит от угла падения. Диффузное рассеяние

нейтронов происходит из-за неровностей и шероховатостей на поверхности. Так, для неполированной камеры источника УХН 90% отражений являются диффузными, а для полированных нейтронородов долю диффузных отражений от стенок удается снизить до 0,7%. Нейтроны, рассеиваясь диффузно, отклоняются от изначального потока (в том числе и в обратную сторону), что снижает эффективность передачи нейтронов по трубе. В результате диффузного отражения увеличивается количество соударений со стенками нейтронорода, что также увеличивает потери нейтронов и уменьшает поток УХН на выходе.

Материал поверхности. Взаимодействие УХН с поверхностью материала задается когерентным сильным взаимодействием, т. е. потенциалом Ферми $V_F = V - iW$, где V и W зависят от ядерных свойств поверхности. Действительная часть V определяет высоту потенциального барьера, а потери нейтронов определяются мнимой частью W . Условием отражения нейтрона от материала является $v_n < v_b = \sqrt{2V/m}$, где v_n — проекция вектора скорости на нормаль к поверхности, v_b — граничная скорость материала стенки, а m — масса нейтрона. При высоком значении v_b происходит отражение УХН с более высокими энергиями, следовательно, увеличивается интенсивность УХН на выходе из нейтронорода.

При отражении от поверхности для УХН существует небольшая вероятность ядерного захвата, неупругого рассеяния или ускорения за счет того, что температура стенок всегда превышает температуру УХН. Общие потери из-за этих поверхностных эффектов могут быть описаны коэффициентом «потери на скачок» как отношение мнимой и действительной частей оптического потенциала $\eta = W/V$. Для большинства материалов при комнатной температуре значение W/V составляет 10^{-3} – 10^{-4} .

Основные характеристики поверхностей для отражения УХН [1, 11–15]

Материал	Эффективный потенциал, нэВ	Граничная скорость материала, м/с	Коэффициент потерь, 10^{-5}
DLC	255	7,0	7
Al	54	3,2	2,2
Нержавеющая сталь	190	6,0	10
Графит	196	6,1	0,6
^{58}Ni	343	8,1	9
$^{58}\text{NiMo}$	311	7,8	30
Ni	220	6,5	18
NiMo	210–290	6,3–7,5	16
NiP	213	6,4	13
Be	249	6,9	0,5
BeO	262	7,1	7
Cu	168	5,7	14,5

Значения граничной энергии, скорости, а также коэффициента потерь для материалов, обычно используемых при работе с ультрахолодными нейтронами, приведены в таблице.

Щели. Прохождение УХН через нейтронород можно рассматривать аналогично распространению идеального газа. Отверстия или зазоры, необходимые, например, для вакуумной откачки или для подвижных частей шиберов, являются причинами потерь при транспортировке УХН. Величина потерь зависит от относительной площади щелей. Поэтому для достижения высокой проводимости нейтронородов необходимо минимизировать количество зазоров и отверстий.

Суммируя все вышеописанное, нами было принято решение об изготовлении нейтронородов со следующими характеристиками:

- остаточный вакуум — ниже 10^{-3} мбар;
- внутренний диаметр — 125 мм;
- количество щелей — 6 шт. по 0,5 мм;
- величина шероховатости — $Ra0,025$;
- внутренний материал нейтронорода — ^{58}Ni .

Остаточный вакуум, диаметр и щели получаются в результате создания нейтронородной системы в целом и описаны в работах [16, 17]. Настоящая же работа посвящена технологии изготовления круглых нейтронородов в части разработки и внедрению технологии по полировке и нанесению тонкой ^{58}Ni -пленки на внутреннюю поверхность стального нейтронорода.

1. ПОЛИРОВКА НЕЙТРОНОРОДОВ УХН

Для нейтронородов были закуплены два типа круглых труб из нержавеющей стали AISI 316: литая бесшовная 140×10 мм и электросварная 129×3 мм. Качество отливки бесшовной трубы должно быть очень высоким. Имеющийся опыт показывает, что незначительные вкрапления шлака или других частиц во время отливки при полировке будут отрываться и создавать задиры на полируемой поверхности. Форма внутренней поверхности трубы 140×10 мм заметно отличалась от цилиндрической (имела волнистый вид). Для исправления волн и приведения внутреннего диаметра нейтронородов из разных труб к одной величине трубы 140×10 мм были предварительно расточены до внутреннего диаметра 123 мм. Для дальнейшей полировки и напыления трубы были нарезаны на заготовки длиной 1 м.

На первом этапе велась обработка внутренних поверхностей труб материалами 3М TRIZАКТ трех градаций с помощью гильзы на центробежной/надувной оправке-барабане диаметром 100 мм. Данный материал имеет упорядоченную пирамидальную структуру и обеспечивает чистоту поверхности на уровне $Ra1,6$, что позволяет перейти к следующему этапу полировки. На втором этапе сизалевыми и хлопчатобумажными кругами

с полировальными пастами по нержавеющей стали двух градаций удалось получить чистоту поверхности порядка $Ra0,03-Ra0,05$.

Финишный этап обработки — анодно-механическая полировка (АМП), которая должна обеспечить чистоту внутренней поверхности трубы до $Ra0,02-Ra0,025$. Принцип анодно-механического полирования заключается в непрерывном чередовании двух циклов: анодное растворение поверхностного слоя металла с образованием пассивной оксидной пленки; удаление пассивной оксидной пленки с выступающих гребешков макро- и микронеровностей механическим воздействием притира. Образование пассивной пленки на поверхности изделия прекращает электрохимическое растворение металла во впадинах неровностей. Удаление пленки с гребешков и повторяющийся цикл электрохимического растворения на их вершинах ведут к постепенному уменьшению их высоты. По мере уменьшения высоты неровностей их впадины также становятся доступными для воздействия притира и удаление пассивной пленки уже со всей выровненной поверхности производится механическим воздействием притира.



Рис. 1. Финишная механическая полировка трубы (слева), исходное состояние трубы при покупке (справа сверху) и итоговое состояние трубы (справа снизу)

При АМП обрабатываемая труба подключалась к положительному полюсу источника тока и служила анодом, в то время как катодом была полировальная головка. Пространство между электродами заполнялось электролитом, который в процессе работы постоянно прокачивался через зону обработки, фильтровался и перемешивался. Электролит представляет собой 10%-й водный раствор натрия азотно-кислого (NaNO_3) с добавлением окиси хрома (Cr_2O_3). Окись хрома, шаржируясь в поверхность притира, выполняет роль абразива при удалении оксидной пленки. Притир изготовлен из вспененного полиуретана и обладает достаточной эластичностью, что позволяет ему плотно прилегать к обрабатываемой поверхности, повторяя ее форму, и обеспечивает достаточное для снятия оксидной пленки удельное давление на поверхность. Кинематика установки АМП обеспечивает притиру возвратно-поступательное движение по обрабатываемой трубе с одновременным его колебательным движением. Обработка велась при плотности тока 1 А/см^2 .

Внешний вид установки для финишной анодно-механической полировки и результаты обработки внутренней поверхности трубы представлены на рис. 1. Для измерения шероховатости полированных труб используется портативный измеритель шероховатости TR200. Среднее значение шероховатости труб после АМП получилось равным $(0,032 \pm 0,006) \text{ мкм}$.

2. НАПЫЛЕНИЕ ^{58}Ni НА ВНУТРЕНнюю ПОВЕРХНОСТЬ НЕЙТРОНОВОДОВ УХН

Процесс напыления происходит с использованием технологии магнетронного напыления. Нанесение отражающих покрытий на внутреннюю поверхность труб производится в установке вакуумного напыления «Ника-164». Эта установка предназначена для использования магнетронного напыления и ионной чистки в вакууме. Она разрабатывалась для задач по напылению круглых труб диаметром до 150 мм. Принципиальная схема установки представлена на рис. 2. Принцип работы установки основан на использовании скрещенных магнитного и электрического полей для повышения эффективности ионизации рабочего газа и создания над поверхностью катода-мишени области плотной плазмы. Установка работает в двух режимах: ионная чистка и напыление.

В режиме ионной чистки в камеру к ионному источнику подается аргон, а высокое напряжение подается между ионным источником и корпусом установки. Магнитное поле создается с помощью катушки, находящейся снаружи вакуумной камеры. Электроны, двигаясь по спирали, ионизируют газ, и положительно заряженные ионы аргона очищают внутреннюю поверхность трубы от различных загрязнений.

В режиме напыления в камеру также подается аргон, но мишень магнетрона в этом случае служит катодом, а анодом является корпус камеры. Ионизированные атомы аргона бомбардируют мишень, при этом

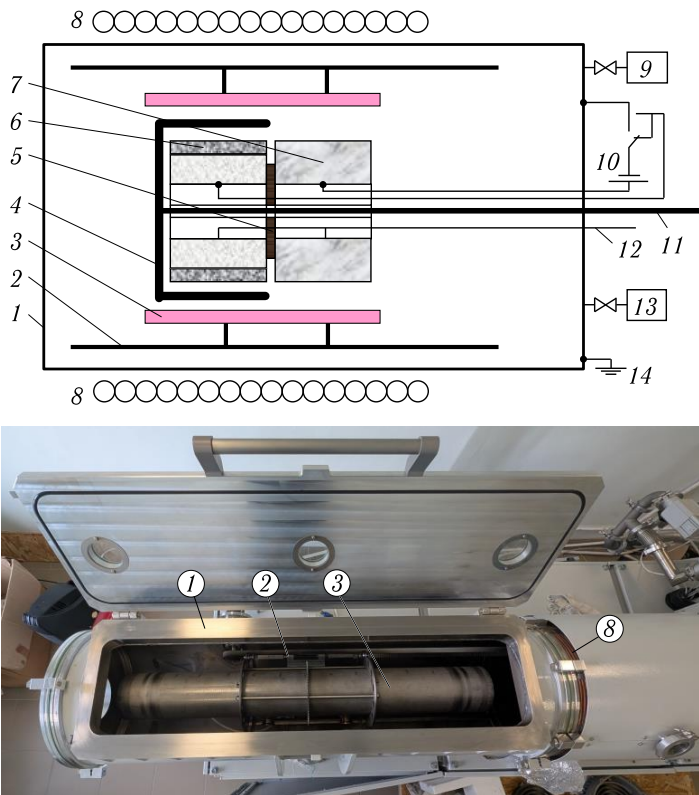


Рис. 2. Принципиальная схема (сверху) и внешний вид установки по магнетронному напылению нейтронноводов (снизу): 1 — вакуумный корпус; 2 — направляющие рельсы для труб; 3 — напыляемый нейтронновод; 4 — заслонка магнетрона; 5 — изолятор; 6 — ^{58}Ni -мишень; 7 — ионный источник; 8 — катушка магнитного поля; 9 — подача аргона; 10 — высоковольтный источник питания; 11 — пневмопривод заслонки; 12 — подача воды для охлаждения; 13 — система вакуумной откачки; 14 — заземление

с поверхности мишени выбиваются атомы металла, которые, вылетая, осаждаются на внутренней поверхности трубы. В начале процесса при подаче напряжения на магнетрон его мишень закрыта специальной заслонкой с пневматическим приводом для избежания возможного загрязнения поверхности трубы примесями, находящимися на поверхности мишени. После разогрева магнетрона и достижения рабочего режима заслонка открывается и начинается процесс осаждения атомов мишени на внутреннюю поверхность трубы. Процесс продолжается до достижения предустановленной дозы электрического разряда. Для получения равномерного напыления нейтронновод, находящийся в специальной тележке,

вращается относительно продольной оси и совершает возвратно-поступательное движение относительно блока магнетрона и ионного источника. Ионный источник и магнетрон охлаждаются водой с помощью специальной замкнутой системы охлаждения для предотвращения перегрева.

Мишень магнетрона в напылительной установке, с которой производится распыление металла, представляет собой отрезок круглой трубы 46×3 мм длиной 100 мм и массой около 360 г. Имеющийся запас изотопа ^{58}Ni из выработанных плоских мишеней составлял порядка 400 г. Для изготовления из имеющегося сырья мишени в виде трубки 46×3 мм длиной 100 мм была выбрана технология индукционной плавки с центробежным литьем в атмосфере инертного газа. Для этого использовалась индукционная плавильная установка с микропроцессорным управлением Lifumat-M-2000-7.7-V. Принципиальная схема установки представлена на рис. 3.

Процесс отливки представляет собой следующее:

1. Прогрев изложницы до $250\text{--}300^\circ\text{C}$.
2. Отжиг ^{58}Ni в вакуумной печи при $T = 1000^\circ\text{C}$ в течение 3 ч.
3. В герметичную камеру, закрепленную на валу машины центробежного литья, устанавливаются изложница и керамический тигель с никелем (см. рис. 3).
4. Камера закрывается и уравнивается на валу во избежание чрезмерного дисбаланса при ее последующем вращении.
5. Камера откачивается и заполняется инертным газом (Ar).

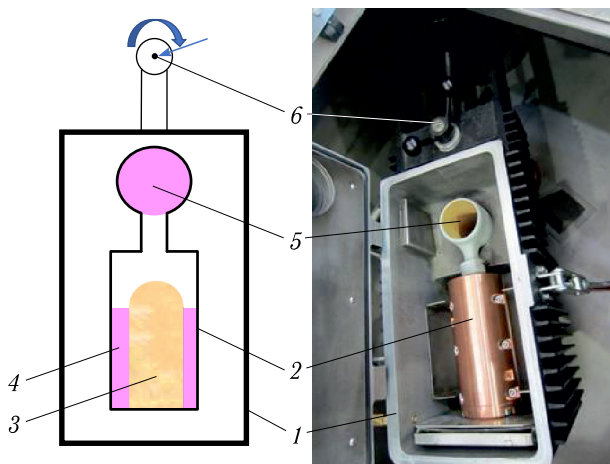


Рис. 3. Схема (слева) и внешний вид установки для изготовления Ni-мишени: 1 — вакуумный корпус; 2 — изложница; 3 — керамический стержень; 4 — ^{58}Ni -мишень; 5 — тигель с исходным никелем; 6 — ось вращения

6. Индуктор, встроенный под тиглем, разогревает и плавит металл. Контроль температуры и визуальный контроль расплавления осуществляются через прозрачное окошко в крышке камеры.

7. После расплавления металла и достижения температуры литья камера приводится во вращение и расплавленный металл под действием центробежных сил переливается в изложницу, где застывает.

8. После остановки вращения изложница извлекается из камеры.

В результате полученная никелевая мишень имела слегка зернистую «двухслойную» структуру стенок, а также небольшую трещину. Мишень как будто составлена из двух трубок, вставленных друг в друга: у внутренней стенка — около 1 мм, у внешней — около 2 мм. Трещину отливки удалось заварить ТIG-сваркой путем сплавления кромок без присадочного материала, а зернистость в итоге не повлияла на процесс напыления в установке. Внешний вид технологического узла напылительной установки из никелевой мишени и ионного источника приведен на рис. 4 (нумерация позиций соответствует рис. 2).

На первом этапе с помощью ионной бомбардировки проводится чистка внутренней поверхности трубы от различных загрязнений, чтобы повысить прочность сцепления при напылении никелем. Для этой цели камеру заполняют чистым аргоном, расход которого 0,25 л/ч. На ионный источник относительно корпуса установки подается напряжение 2500 В, и внутри трубы загорается электрический разряд с током примерно 15 мА. Время чистки трубы длиной 1 м составляет примерно 30 мин.

После чистки газовым разрядом устанавливается расход аргона 22 л/ч, и на магнетрон подается напряжение 600 В. На начальном этапе магнетрон закрыт специальной заслонкой во избежание загрязнения поверхности трубы примесями, находящимися на поверхности мишени. После разогрева и достижения рабочего режима магнетрона заслонка открывается и происходит напыление никеля на поверхность трубы до указанной в программе дозы. Были проведены контрольные циклы напыления никеля с целью определения зависимости толщины нанесенного покрытия от дозы разряда на магнетроне. Для каждой трубы

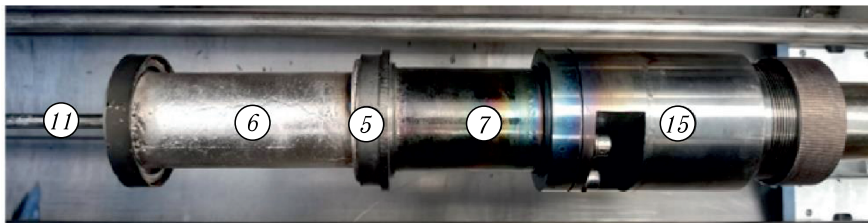


Рис. 4. Технологический узел напылительной установки: 5 — изолятор; 6 — ^{58}Ni -мишень; 7 — ионный источник; 11 — пневмопривод заслонки; 15 — соединительный корпус с трубками охлаждения (12) и высоковольтными проводами (10)

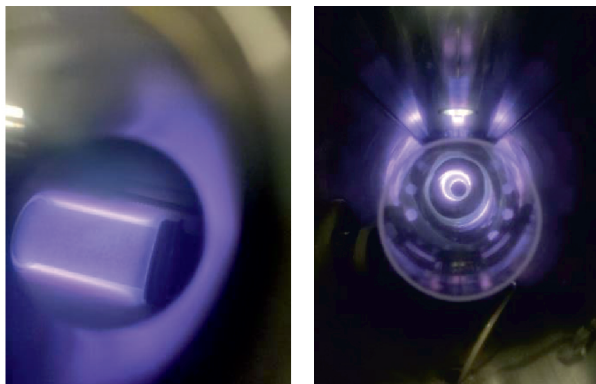


Рис. 5. Процесс чистки (слева) и напыления (справа) нейтронновода УХН

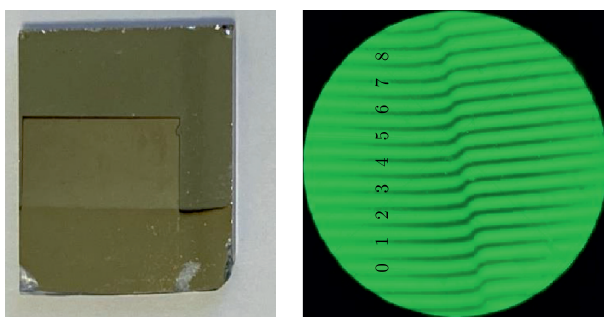


Рис. 6. Покровное стекло для определения толщины напыления (слева) и интерференционная картина на микроинтерферометре МИИ-4М (справа)

необходимы два цикла напыления с перерывом для механической чистки поверхности, чтобы обеспечить более равномерное покрытие поверхности трубы. Процесс чистки и напыления представлен на рис. 5.

Для контроля толщины напыления в специально изготовленные углубления с отверстиями на концах трубы устанавливаются стекла размером 30×25 мм, на которые предварительно напылен слой алюминия. Часть предметного стекла с напылением алюминия закрывается покровным стеклом размером 18×18 мм и толщиной $0,1$ мм, в результате чего после напыления никеля на предметном стекле образуется ступенька, показанная на рис. 6. Высота ступеньки измеряется с помощью микроинтерферометра МИИ-4М по искривлению интерференционных полос. Типичная толщина напыления изотопа ^{58}Ni для нейтроннопроводов УХН составляет 3000 \AA .

3. СБОРКА НЕЙТРОНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

Сборка нейтроноводной системы осуществляется двумя способами: TIG-сваркой для сборки «холодного» нейтроновода при $T = 20$ К и механической сборкой на витонových уплотнениях для сборки внешнего «теплого» нейтроновода.

Сборка «теплого» нейтроновода не вызывает проблем. Два напыленных нейтроновода вставляются в стыковочную муфту и уплотняются витонowymi уплотнениями. Муфты можно делать под различными углами, тем самым будет обеспечена разводка пучков УХН к различным научным станциям. В отличие от внешнего нейтроновода нейтроновод внутриказематной части источника УХН будет эксплуатироваться при температуре 20 К, и использование муфт с резиновыми уплотнениями здесь не работает. Сварка «холодного» нейтроновода осложняется малыми толщинами (1–1,5 мм) стыкуемых элементов и наличием на внутренней поверхности напыленного слоя никеля, который при чрезмерном нагреве может отслоиться или окислиться. Для решения этой проблемы на концах нейтроноводных секций были сделаны «температурные мосты». Температурный мост представляет собой оттянутый ус, который отдаляет место сварки от внутренней напыленной поверхности. Именно для этих целей и были закуплены толстостенные трубы 140×10 мм. При толщине стенки 10 мм после всех механических обработок удается получить длину температурного моста 7,5 мм.

Был произведен теоретический расчет тепловых мостов. Расчет делался для сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа (TIG). Для минимизации тепловложения будет применен режим сварки одиночным импульсом — так называемый COLD TIG. В этом режиме сварочный ток величиной 150 А подается всего на 0,2 с, при этом ток в разы выше постоянного тока, на котором производится сварка подобных швов. Из-за высокой мощности импульса металл стыкуемых элементов в зоне шва успевает расплавиться и сплавиться, но при этом за счет кратковременности импульса количество вложенного тепла дозировано и металл вокруг места сварки не перегревается. Сварка будет производиться импульсно с перерывами для остывания металла.

Средняя мощность в сварочной дуге составляет 480 Вт. Температура дуги в зависимости от времени воздействия электрода диаметром 0,3 мм будет достигать 4400–4900 К. Максимальный нагрев поверхности со стороны никеля для представленных выше периодов времени воздействия будет равен 145 °С. Температурный график расчетов и температурное поле в разрезе отбортовки при времени взаимодействия 2 с представлены на рис. 7.

Для подтверждения сделанных расчетов была произведена сварка на образцах-свидетелях, напыленных никелем, с контролем температуры и наблюдением за покрытием. Температура на поверхности никеля достигла значения 150 °С. Как видно из рис. 8, потемнение и/или окис-

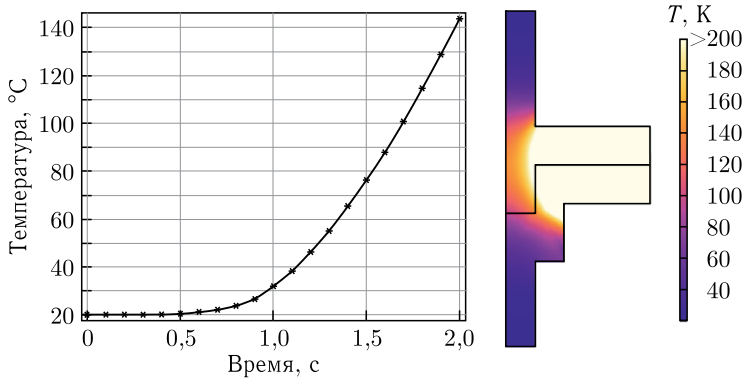


Рис. 7. Максимальная температура внутренней поверхности нейтроновода



Рис. 8. Отработка технологии сварки напыленных поверхностей нейтроновода УХН на образцах-свидетелях

ление никелевого покрытия не наблюдается. Данную технологию можно использовать для сборки «холодного» нейтроновода источника УХН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источник ультрахолодных нейтронов в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ претендует на рекордную мировую плотность УХН в экспериментах по изучению физики фундаментальных взаимодействий. Для получения высоких плотностей УХН в эксперименте необходимо создание нейтронопроводов с высоким коэффициентом пропускания. Более того, технологию создания этих нейтронопроводов необходимо реализовать «на месте» для того, чтобы иметь возможность менять трассировки

УХН в зависимости от установленных научных станций. Таким образом, можно будет говорить о современном нейтронном центре коллективного пользования с уникальным высокоинтенсивным источником УХН.

Источник УХН на РК ПИК будет укомплектован полированными нейтроноводами внутренним диаметром 125 мм с напылением из изотопа ^{58}Ni . Был разработан и реализован полный цикл изготовления данных нейтроноводов: закупка материала, полировка до $Ra0,032$ методом анодно-механической полировки, нанесение тонкого слоя ^{58}Ni толщиной 3000 Å и окончательная сборка (сварка) конструкции. Изготовление подобных нейтроноводов в институте поставлено на поток.

На начальном этапе источник ультрахолодных нейтронов будет оснащен экспериментальными установками по поиску электрического дипольного момента нейтронов и установкой по измерению времени жизни нейтронов в гравитационной ловушке. Под эти установки в общей сложности изготовлено 30 м нейтроноводов. Под будущие задачи имеются все компетенции и возможности изготовления нейтроноводов любой конфигурации и трассировки.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-10007, <https://rscf.ru/project/23-72-10007/>).

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатович В. К.* Физика ультрахолодных нейтронов. М.: Наука, 1986. 272 с.
2. *Abel C. et al.* Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 124. P. 081803; doi: 10.1103/PhysRevLett.124.081803.
3. *Serebrov A. P. et al.* New Measurements of the Neutron Electric Dipole Moment // *JETP Lett.* 2014. V. 99. P. 4; doi: 10.1134/S0021364014010111.
4. *Gonzales F. M. et al. (UCN τ Collab.)* Improved Neutron Lifetime Measurement with UCN τ // *Phys. Rev. Lett.* 2021. V. 127. P. 162501; doi: 10.1103/PhysRevLett.127.162501.
5. *Serebrov A. P. et al.* New Measurement of the Neutron Lifetime with a Large Gravitational Trap // *JETP Lett.* 2017. V. 106. P. 623; doi: 10.1134/S0021364017220143.
6. *Ковальчук М. В., Воронин В. В., Григорьев С. В., Серебров А. П.* Приборная база реактора ПИК // *Кристаллография.* 2021. Т. 66. С. 191; doi: 10.31857/S0023476121020065.
7. *Серебров А. П., Лямкин В. А., Фомин А. К., Онегин М. С.* Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК // *ЖТФ.* 2022. Т. 92. С. 899; doi: 10.21883/JTF.2022.06.52522.21-22.
8. *Serebrov A. P., Vasil'ev A. V., Lasakov M. S., Siber E. V., Murashkin A. N., Egorov A. I., Fomin A. K., Sbitnev S. V., Geltenbort P., Zimmer O.* Replica Neutron Guides for Experiments with Ultracold Neutrons // *Techn. Phys.* 2017. V. 62. P. 164; doi: 10.1134/S1063784217010212.

9. *Blau B., Daum M., Fertl M., Geltenbort P., Göttl L., Henneck R., Kirch K., Knecht A., Lauss B., Schmidt-Wellenburg P., Zsigmond G.* A Prestorage Method to Measure Neutron Transmission of Ultracold Neutron Guides // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 807. P. 30; doi: 10.1016/j.nima.2015.10.075.
10. *Косвинцев Ю. Ю., Кушнир Ю. А., Морозов В. И., Терехов Г. И.* Взаимодействие ультрахолодных нейтронов с газообразной средой // *Нейтронная физика: Материалы 5-й Всесоюз. конф. по нейтронной физике. Ч. 1.* М.: ЦНИИАтоминформ, 1980. С. 130–137.
11. *Pattie R. W., Jr., et al.* Evaluation of Commercial Nickel-Phosphorus Coating for Ultracold Neutron Guides Using a Pinhole Bottling Method // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. V. 872. P. 64; doi: 10.1016/j.nima.2017.07.051.
12. *Atchison F., Bryś T., Daum M., Fierlinger P., Geltenbort P., Henneck R., Heule S., Kasprzak M., Kirch K., Pichlmaier A., Plonka C., Straumann U., Wermelinger C., Zsigmond G.* Loss and Spinflip Probabilities for Ultracold Neutrons Interacting with Diamondlike Carbon and Beryllium Surfaces // *Phys. Rev. C.* 2007. V. 76. P. 044001; doi: 10.1103/PhysRevC.76.044001.
13. *Bondar V. et al.* Losses and Depolarization of Ultracold Neutrons on Neutron Guide and Storage Materials // *Phys. Rev. C.* 2017. V. 96. P. 035205; doi: 10.1103/PhysRevC.96.035205.
14. *Kahlenberg J., Ries D., Ross K. U., Siemensen C., Beck M., Geppert C., Heil W., Hild N., Karch J., Karpuk S., Kories F., Kretschmer M., Lauss B., Reich T., Sobolev Yu., Trautmann N.* Upgrade of the Ultracold Neutron Source at the Pulsed Reactor TRIGA Mainz // *Eur. Phys. J. A.* 2017. V. 53. P. 226; doi: 10.1140/epja/i2017-12428-9.
15. *Serebrov A. P., Romanenko N., Zherebtsov O., Lasakov M., Vasiliev A., Fomin A., Geltenbort P., Krasnosheikova I., Kharitonov A., Varlamov V.* UCN Anomalous Losses and the UCN Capture Cross Section on Material Defects // *Phys. Lett. A.* 2005. V. 335. P. 327; doi: 10.1016/j.physleta.2004.12.032.
16. *Fomin A. K., Serebrov A. P.* Optimization of the Neutron Guide System of the Ultracold Neutron Source at the PIK Reactor // *Phys. Part. Nucl.* 2025. V. 56. P. 928; doi: 10.1134/S1063779624702538.
17. *Серебров А. П., Лямкин В. А., Фомин А. К., Коптюхов А. О., Прудников Д. В., Бородинов Г. О., Иванов С. Н., Мурашкин А. Н., Хазов П. А., Сиротин А. В.* Нейтроноводная система источника УХН для РК ПИК // *Письма в ЭЧАЯ.* 2026. Т. 23, № 1(264). С. 30–38.