

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА РАН

На правах рукописи

УДК 539.125.5; 621.039.555/556

МИТЮХЛЯЕВ
Виктор Алексеевич

**СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКОВ
ХОЛОДНЫХ И УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

01.04.01- приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2010 г.

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
А. П. Серебров,

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, ведущий науч-
ный сотрудник
М. Г. Землянов,

доктор физико-математических наук, старший науч-
ный сотрудник
Е. П. Шабалин.

Ведущая организация: Физический факультет Санкт-Петербургского госу-
дарственного университета

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2010 г. в ____ час. ____ мин. на за-
седании диссертационного совета Д 002.115.01 при Петербургском институте ядер-
ной физики им. Б. П. Константинова РАН по адресу: 188300, Гатчина, Ленинград-
ская обл. Орлова роща.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Митропольский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На протяжении последних пяти десятилетий наблюдается большой интерес к холодным нейтронам (ХН) – это нейтроны с энергиями от 10^{-7} до $2,5 \cdot 10^{-3}$ эВ. Объясняется это тем, что они обладают ярко выраженными волновыми свойствами и являются уникальным инструментом в различных областях фундаментальных и прикладных исследованиях.

Особенно возрос интерес в последние годы к холодным нейтронам в связи с изучением наноструктур. Изучение структурно-динамических свойств наноструктурированных материалов является одной из важнейших фундаментальных задач современной физики конденсированного состояния.

В то же время нейтроны интересны как объект научного исследования и сами по себе. В частности, представляют большой научный интерес эксперименты по поиску электрического дипольного момента нейтрона (ЭДМ), по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций, по измерению времени жизни нейтрона и т.д.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является увеличение интенсивности потока холодных и ультрахолодных нейтронов на стационарных реакторах ВВР-М (Гатчина, ПИЯФ), ВВР-СМ (КФКИ Венгрия), OPAL (ANSTO Австралия) за счет создания и использования высокоэффективных источников ХН и УХН на основе водорода и дейтерия.

При создании эффективного источника холодных нейтронов основной задачей является размещение камеры с замедлителем при низких температурах в максимуме или как можно ближе к максимуму потока тепловых нейтронов. Это, в свою очередь, требует создания эффективных систем отвода тепла для поддержания замедлителя при низких температурах. Кроме этого, создание эффективного источника охватывает широкий спектр задач, связанных с оптимизационными нейтронно-физическими расчетами и исследованиями, как то: нейтронной светимостью источника, оптимальными толщинами замедлителя и формами камеры, фактором выигрыша, тепловыделениями, влиянием источника на реактивность реактора, влиянием облучения на замедлитель и конструкционные материалы.

Научная новизна работы. Впервые на реакторе ВВР-М средней мощности были получены рекордные значения по интенсивности и плотности потока пучка поляризованных холодных нейтронов. Эти параметры в 3 – 5 раз превосходили характеристики наилучшего пучка поляризованных холодных нейтронов гренобльского высокопоточного реактора. Плотность потока ультрахолодных нейтронов данного источника уступала приблизительно в 5 раз новому каналу ультрахолодных нейтронов из жидкодейтериевого замедлителя на высокопоточном реакторе в Гренобле.

С использованием этого источника была получена наиболее точная оценка возможного ЭДМ нейтрона $d_n = (+2.6 \pm 4.0 \pm 1.6) 10^{-28}$ е·м, экспериментально измерено время жизни нейтрона, которое составило $\tau_n = (888.4 \pm 3.1 \pm 1.1)$ с., и получено значение коэффициента корреляции между направлением вылета электрона и спином распадающегося нейтрона – $A = -0.1131 \pm 0.0014$, что соответствует значению $\lambda = g_A/g_V = -1.249 \pm 0.008$.

Впервые разработана и апробирована методика расчета контура естественной циркуляции жидкого водорода и дейтерия. Определены предельные возможности по

отводу тепла в такой системе. Исследованы тепловые характеристики работы контура естественной циркуляции.

Впервые на основе разработанной методики создан способ охлаждения и поддержания замедлителя при низких температурах с использованием контура естественной циркуляции жидкого водорода (однофазный термосифон).

Впервые проведены исследования смеси водорода с дейтерием под облучением, определен их равновесный состав и константа равновесия.

С помощью разработанной компенсационной методики проведены исследования по измерению суммарных и удельных тепловыделений в замедлителе и конструкционном материале источника.

Изучено влияние жидкого водорода, дейтерия и их смесей, а также процесса конденсации замедлителя в контуре естественной циркуляции (термосифоне) на реактивность реактора.

На основе полномасштабных теплогидравлических испытаний моделей источников определены предельные возможности отвода тепла в системах непосредственного охлаждения замедлителя в камере и с использованием вертикального термосифона.

Практическая значимость работы. Впервые в мировой практике на реакторе средней мощности создан универсальный источник холодных и ультрахолодных нейтронов с высокими нейтронными характеристиками. Это достигнуто благодаря максимальному использованию возможностей реактора (размещению источника в центре зоны, что стало возможным за счет высокоэффективной системы охлаждения жидкого водорода), а также благодаря многоцелевой фокусирующей нейтронпроводной системе, которая одновременно поляризует пучок холодных нейтронов. Опыт, накопленный в процессе создания ИХН на реакторе ВВР-М, и полученные экспериментальные данные, были использованы при создании ИХН мирового класса в других нейтронных центрах ВВР-СМ (КФКИ Венгрия) и OPAL (ANSTO Австралия).

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, были представлены автором: на 5-ой международной конференции по исследовательским реакторам IGGOR5 (Франция, 1996); Intern. Workshop on Cold Neutron Utilization (South Korea, Taejon, 1997); Fifth Cryogenics 98 International conference.(Praha, Czech Republic. 1998); 7th Meeting of the International Group on Research Reactors (IGGOR 7) October 26-29, 1999. Argentina, SC de Bariloche; 4th International Conference “Ultra Cold & Cold Neutrons Physics & Sources” St. Petersburg, Russia 16 - 21 June 2003; 9th Meeting of the International Group on Research Reactors (IGGOR 9), 24-28 March 2003, Sydney, Australia; 5th International Conference “Ultra Cold & Cold Neutrons Physics & Sources” Peterhof, Russia 13 - 18 July 2005; 3rd NET Enlargement & Integration Workshop. JRC-IE Petten, 29-30 November 2006; 6th International Conference. “Ultra Cold & Cold Neutrons Physics & Sources” St. Petersburg – Moscow, 1-7 July 2007.

Основные материалы диссертации опубликованы в 4 статьях и 7 препринтах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 151 наименования. Она содержит 171 страницу машинописного текста, 55 рисунков и 31 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и кратко описано содержание работы.

В **главе 1** (обзор литературы) выполнен подробный обзор источников холодных нейтронов за последние 50 лет. Представлен график развития источников ультрахолодных нейтронов. Рассмотрены различные подходы в создании источников холодных нейтронов на различных реакторах и ускорителях. Рассмотрены и проанализированы основные аспекты и критерии создания высокоинтенсивных источников холодных нейтронов на стационарных реакторах. Показано, что в настоящее время расчетные модели рассеяния нейтронов и мощные программы MCNP, MCU и др. позволяют проводить оптимизационные расчеты ИХН на основе водорода или дейтерия с высокой точностью. Эти расчеты позволяют определять эффективность того или другого замедлителя в рамках поставленной задачи, оптимизировать его эффективную толщину, а также геометрию и форму источника с учетом места расположения ИХН в реакторе. Рассмотрены различные способы отвода тепла с анализом их достоинств и недостатков. Проанализирована применимость различных конструкционных материалов, используемых при создании ИХН. Рассмотрены основные подходы к вопросам безопасности ИХН на реакторе.

Глава 2 посвящена решению задачи создания универсального источника ХН и УХН в центре активной зоны реактора ВВР-М, ПИЯФ. Задача создания жидководородного источника холодных и ультрахолодных нейтронов в центре активной зоны реактора мощностью 18 МВт является экстремальной, ее решение не имеет аналогов в мировой практике. Для размещения жидководородного источника с объемом замедлителя ~ 1 литр была выделена центральная часть активной зоны реактора ВВР-М, в которую была помещена водная полость со свинцовым экраном.

Оптимальная толщина слоя замедлителя зависит, как известно, от орто-, пара-состава водорода и составляет в случае тангенциального расположения канала в реакторе примерно 2–3 см для нормального водорода и 7–10 см для параводорода. Коэффициент усиления нейтронного потока (G) в нейтроноводе за счет использования ИХН определялся как отношение нейтронных потоков на выходе нейтроновода, с использованием и без ИХН. Расчетный коэффициент усиления приблизительно одинаков для толщин 2, 3 и 4 см. Коэффициент усиления ИХН на основе смеси 50% пара- и 50% ортоводорода близок к коэффициенту усиления источника на основе ортоводорода. Предполагая, что водород под облучением находится в состоянии с содержанием 15% и более орто- компоненты и рабочая температура водорода будет выше, чем 20К, а также, учитывая, что ультрахолодные нейтроны выходят в основном с поверхности источника, толщина слоя замедлителя была выбрана равной 4 см.

Окружение водной полости свинцовым экраном снижает удельные энерговыделения в материале конструкции источника более чем в 9 раз, при этом плотность потоков тепловых и быстрых нейтронов снижаются всего в 1,3 и 1,5 раза, соответственно. Поток тепловых нейтронов в центре активной зоны в водной полости $1,75 \cdot 10^{14}$ н·см⁻²·с⁻¹ и поток быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ) $4,95 \cdot 10^{13}$ н·см⁻²·с⁻¹. Проведенные расчеты тепловыделений от γ -квантов деления и продуктов деления, а также от быстрых нейтронов показали достаточно высокие удельные тепловыделения в источнике, которые составляют 24 Вт/г в водороде и 0,9 Вт/г в конструкционном мате-

риале с точностью 15–20%. Оценка суммарных тепловыделений в источнике показала, что для источника объемом 1 литр полное тепловыделение составит 2–3 кВт, из них 1,5–2,2 кВт в замедлителе и 0,7–1,0 кВт в камере источника. Следует заметить, что для холодного источника в Гренобле полное тепловыделение не превышает 0,2–0,3 кВт на литр замедлителя. Плотность теплового потока для цилиндрической камеры источника составляет 3 Вт/см^2 , что на порядок величины больше максимальных тепловых потоков в предельных своих значениях, при которых возможен отвод тепла через боковые поверхности камеры без кипения водорода. Для отвода радиационного тепла от источника в 2–3 кВт впервые был предложен способ естественной циркуляции жидкого водорода между камерой и внешним теплообменником. Такой способ позволяет отводить тепло в теплообменнике без кипения водорода при плотности теплового потока до $5\text{--}10 \text{ Вт/см}^2$.

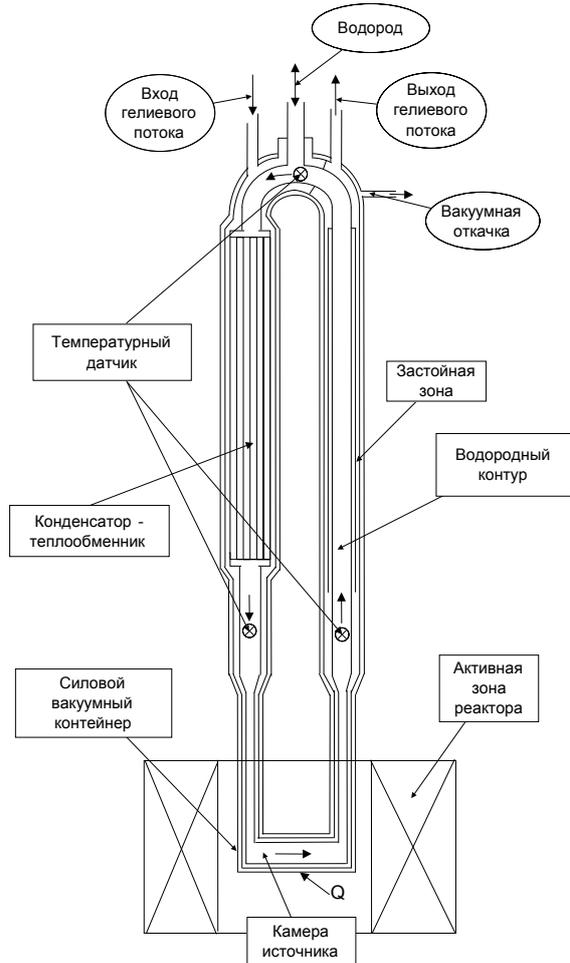


Рис. 1. Жидководородный контур с оболочкой холодного гелия

потерь давления на трение и разностью гидростатических давлений в теплом и холодном плечах контура:

$$\Delta\rho \cdot g \cdot h = \xi_{mp} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{l}{d} \quad (1)$$

где $\Delta\rho$ – разность плотностей водорода в теплом и холодном плечах, g – ускорение силы тяжести, h – высота контура, и V – скорость движения водорода, l/d – отношение

Схема жидководородного контура представлена на Рис. 1. Движение жидкости в контуре вызывается гидростатическими силами, возникающими вследствие разности плотностей водорода в теплом и холодном плечах контура. При увеличении подвода тепла скорость циркуляции возрастает, система является саморегулирующейся по отношению к внешней тепловой нагрузке. Охлаждение водорода в теплообменнике производится холодным гелием от криогенной гелиевой установки. Этот способ известен как контур естественной циркуляции или термосифон, но ранее никогда не использовался для работы с переохлажденным жидким замедлителем. В связи с отсутствием методики расчета контура естественной циркуляции с замедлителем в однофазном состоянии была разработана и апробирована методика расчета в аналитическом виде. Для достаточно большой высоты контура, когда $l = 2h$ и можно пренебречь потерями на местные сопротивления и на неизотермичность течения, режим циркуляции не зависит от высоты контура. Условие стационарной циркуляции водорода в контуре определяется равенством

полной длины контура l к диаметру трубы d , ξ_{mp} – коэффициент трения, для турбулентного режима течения (критерий Рейнольдса $Re > 2300$) при расчете прямых гладких труб равный $\xi_{mp} = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$ для $4 \cdot 10^3 < Re < 1 \cdot 10^5$. Массовый расход водорода в контуре определяется подводимой мощностью и установившейся разностью температур и может быть определен из следующего уравнения:

$$Q = C_p^{H_2} \cdot m^{H_2} \cdot \Delta T^{H_2}. \quad (2)$$

Используя соотношения (1) и (2) и аппроксимируя физические величины для водорода степенными функциями в интервале температур жидкого водорода $15 \leq T \leq 23$, получили важную аналитическую зависимость (3), позволяющую определить установившуюся разность температур в плечах контура, которая связана с подводимой тепловой мощностью к нему и с диаметром трубопровода, из которого он изготовлен:

$$\Delta T^{H_2} = 5,2 \frac{Q^{0,636}}{T_{cp}^{H_2 1,08} \cdot d^{1,73} (\text{см})}, \quad (3)$$

где $T_{cp}^{H_2}$ – средняя температура водорода (К), Q – тепловая нагрузка на водород (Вт), d – диаметр трубопровода контура (см). При проведении аппроксимации термодинамических величин для водорода было выявлено, что от степени при T зависит точность расчета и величина численного коэффициента в формуле. Относительная ошибка на краях диапазона при подгонке физических величин при температуре 19К не превышает 3-4 %. Установлено, что уравнение (3) может применяться для расчетов контуров естественной циркуляции и с использованием других веществ в однофазном состоянии.

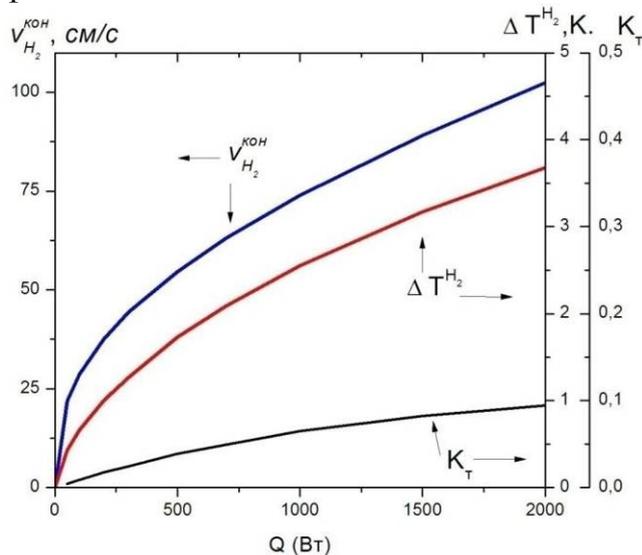


Рис. 2. Зависимости $V_{H_2}^{кон}$ – скорости циркуляции водорода в контуре, ΔT^{H_2} – разности температур водорода между «холодным» и «теплым» плечами контура, K_T – коэффициент теплопередачи в теплообменнике (Вт/см² К)

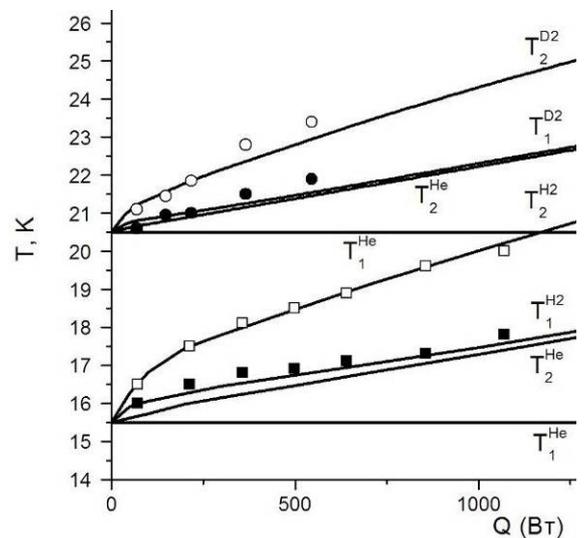


Рис. 3. Изменение температуры водорода и дейтерия в «холодном» и «теплом» плечах контура в зависимости от подводимой мощности. ■, ● – экспериментальные точки для водорода и дейтерия, соответственно, в «холодном» плече контура; □, ○ – то же в «теплом» плече контура.

Для определения предельных возможностей контура по теплосъему учитывалась роль теплообменника. Средняя температура водорода увеличивается с подводимой мощностью не только из-за увеличения разности температур водорода, но также из-за увеличения температуры гелия в теплообменнике (Рис. 3).

Скорость водорода, необходимая для расчета Re , может быть получена из массового расхода водорода, связанного с мощностью (Q), и разностью температур (ΔT^{H_2}). Уравнения, используемые в методике расчета контура естественной циркуляции водорода, связаны между собой через $T_{cp}^{H_2}$ и ΔT^{H_2} , поэтому в расчете используется метод последовательных приближений. Так как температура водорода меняется в не очень широких пределах, обеспечивается достаточно быстрая сходимость метода. Результат такого самосогласованного расчета приведен на Рис. 2, где представлены основные параметры режима циркуляции и теплосъема в зависимости от тепловой нагрузки. Скорость циркуляции водорода в контуре достигает 1 м/с при тепловой нагрузке в 2 кВт. Установившийся теплообменный режим наступает при мощности выше 500 Вт. На Рис. 3 показаны окончательные результаты расчета для переходного режима (до 1,0 кВт подводимой мощности): зависимость от мощности температур водорода и дейтерия в холодном и теплом плечах контура. Здесь же нанесены экспериментальные точки, которые показывают хорошую сходимость расчетов с экспериментом. Из представленных расчетных и экспериментальных данных видно, что способ термосифона позволяет поддерживать замедлитель в камере источника при температуре на несколько градусов ниже температуры кипения водорода.

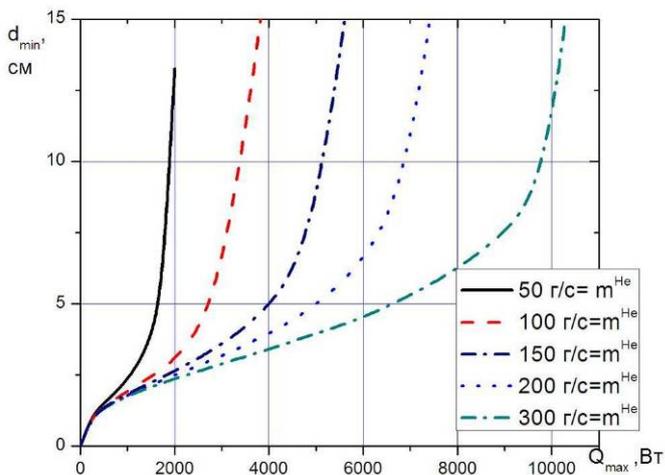


Рис. 4. Зависимость максимальной тепловой нагрузки от минимального диаметра трубопровода контура при различных расходах гелия.

жидководородного контура в зависимости от тепловой нагрузки на источник:

$$d_{\min} = \frac{2Q_{\max}^{0,37}}{\left(T_{\text{кин}}^{H_2} + T_1^{He} + \frac{Q_{\max}}{C_p^{He} \cdot m^{He}}\right)^{0,42} \cdot \left(T_{\text{кин}}^{H_2} - T_1^{He} - \frac{Q_{\max}}{C_p^{He} \cdot m^{He}}\right)^{0,58}}, \quad (4)$$

где d_{\min} – минимальный диаметр трубопровода контура, Q_{\max} – максимальная тепловая нагрузка на водород, $T_{\text{кип}}^{H_2}$ – температура кипения водорода, T_1^{He} – температура гелия на входе в контур, C_p^{He} – теплоемкость гелия, m^{He} – массовый расход гелия. На Рис. 4 показаны функции, связывающие предельные параметры для пяти массовых расходов гелия. Для заданного расхода гелия существует ограниченный диапазон предельных значений мощности. При расчете принято $T_{\text{кип}}^{H_2}=23\text{К}$, $T_1^{He}=15\text{К}$. Если ограничиться минимальным диаметром контура 50 мм и принять расход гелия в 200 г/с, то отводимая контуром мощность, как видно из Рис. 4 будет, около 5000 Вт. Дальнейшее увеличение диаметра трубопровода приводит к необоснованному увеличению жидкого замедлителя в контуре. Применение замкнутых контуров естественной циркуляции с диаметром в пределах 50 мм может быть оправдано для источников холодных нейтронов с жидким дейтерием, которые требуют больших объемов (20 – 30 литров) замедлителя. При этом криогенная гелиевая установка потребуется в два раза большей криогенной мощности, чем для универсального источника на реакторе ВВР-М. В связи с этим обстоятельством предельную возможность контура естественной циркуляции нужно ограничить 5000–7000 Вт.

В **главе 3** сосредоточены основные экспериментальные результаты, полученные на универсальном источнике УХН и ХН на реакторе ВВР-М. На реакторе средней мощности получены рекордные значения интенсивности и плотности потока поляризованных ХН – $3 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ и $6 \cdot 10^8 \text{ н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а также интенсивность УХН $5 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ с плотностью потока $6 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ для диапазона скоростей $V_x, V_y, V_z < 7,8 \text{ м/с}$. Степень поляризации нейтронного пучка $90 \pm 5\%$. Проведены исследования выхода ультрахолодных и холодных нейтронов для дейтерия и водородно-дейтериевых смесей.

Спектры поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов были измерены времяпролетным методом. Для регистрации холодных нейтронов использовалась ионизационная камера деления, для ультрахолодных – пропорциональный детектор ^3He . Поток поляризованных ХН был прокалиброван методом активации золотой фольги. На Рис. 5 приведены спектры поляризованных ХН, полученные до и после ожижения водорода в источнике.

Их отношение определяет фактор выигрыша в выходе ХН за счет использования жидководородного замедлителя. Фактор выигрыша имеет характерную спектральную зависимость и достигает 40 – 50 раз в области больших длин волн (10 – 20 Å).

Понижение температуры водорода от точки кипения 23,5 К до 16,5 К дает 25-процентное увеличение выхода длинноволновых нейтронов. Максимум интенсивности нейтронного потока находится при 4,0 Å.

Спектр формируется как низкотемпературным замедлителем, так и изогнутым нейтронным каналом, который обрезает коротковолновую часть спектра. Нейтронный поток часто характеризуют в единицах так называемого захватного потока, т.е. эквивалентного по захвату потоку тепловых нейтронов. Для полученного пучка холодных нейтронов захватный поток (φ_c) и захватная плотность потока (f_c) соответственно равны $9 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ и $1,8 \cdot 10^9 \text{ н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Дифференциальная плотность потока в максимуме $5 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}(\text{м/с})$. Плотность потока ультрахолодных нейтронов со скоростями вдоль оси нейтронного канала $V_z < 7,8 \text{ м/с}$ определялась методом шторочной разности,

для чего на пути пучка устанавливалась тонкая (10 мкм) алюминиевая фольга с пыльным покрытием, имеющим граничную скорость 7,8 м/с, такую же, как граничная скорость стенок нейтроновода.

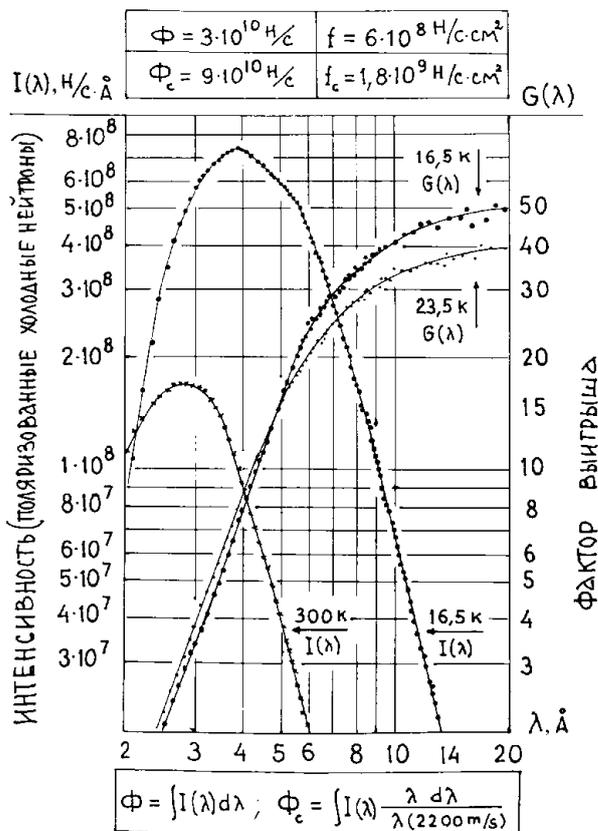


Рис. 5. Спектры и фактор выигрыша для поляризованных холодных нейтронов

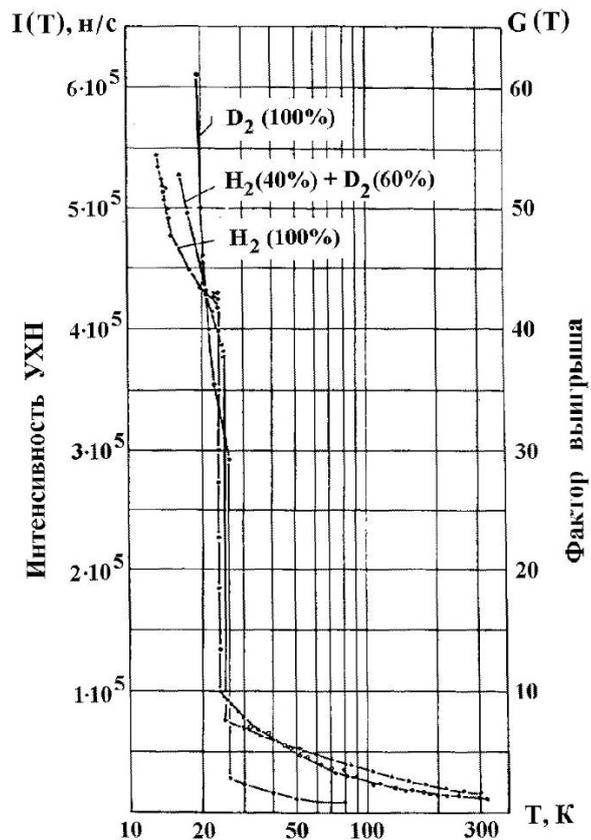


Рис. 6. Температурная зависимость выхода ультрахолодных нейтронов для газообразного и жидкого водорода, дейтерия и водородно-дейтериевой смеси

Спектральные измерения, проведенные со шторкой и без шторки, показывают, что в разностном спектре содержится 20% нейтронов со скоростями $V > 7,8 \text{ м/с}$, поглощенных либо рассеянных на фольге. Определенная с учетом поправки плотность потока ультрахолодных нейтронов со скоростями $V_x, V_y, V_z < 7,8 \text{ м/с}$ оказалась равной $6 \cdot 10^3 \text{ н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а полная интенсивность для двух нейтроноводов – $2,25 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$. Плотность нейтронов в фазовом пространстве $8,1 \cdot 10^{-3} \text{ н} \cdot \text{см}^{-3} (\text{м} \cdot \text{с}^{-3})$. Плотность ультрахолодного нейтронного газа, вычисленная из плотности в фазовом пространстве для данного нейтроновода ($|V| < 7,8 \text{ м/с}$), равна 16 см^{-3} , а, например, для ловушки из нержавеющей стали ($|V| < 6,2 \text{ м/с}$) соответственно равна 8 см^{-3} .

Температурная зависимость выхода ультрахолодных нейтронов для газообразного и жидкого водорода приведена на Рис. 6. В точке конденсации водорода при $T = 23,5 \text{ К}$ выход ультрахолодных нейтронов резко увеличивается в связи с термализацией потока тепловых нейтронов в замедлителе; дальнейшее понижение температуры жидкого водорода приводит к дополнительному увеличению выхода ультрахолодных нейтронов, при этом фактор выигрыша достигает 55 раз. За единицу принят

выход ультрахолодных нейтронов из газообразного водорода при $T = 285$ К. Корректный учет доли потока ультрахолодных нейтронов, генерируемого циркониевой оболочкой источника, был осуществлен измерениями с ^3He при низком давлении и с откачанным объемом источника.

Спектр нейтронов на выходе нейтронотода УХН имеет максимум при скорости 18,5 м/с, что определяется граничной скоростью покрытия (7,8 м/с) и радиусом нейтронотных поворотов (1 м).

Исследованы выходы ультрахолодных и холодных нейтронов для дейтерия и водородно-дейтериевых смесей. В точке конденсации дейтерия (25 К) выход ультрахолодных нейтронов (в единицах фактора выигрыша для нормального водорода) составляет 31–32 раза, однако с понижением температуры выход очень резко возрастает, достигая при 17 К 66 раз. При температуре 19 К кривые для водорода и дейтерия пересекаются и выходы совпадают. Здесь же пересекаются кривые для водородно-дейтериевых смесей. Для холодных нейтронов фактор выигрыша в случае чистого дейтерия приблизительно втрое меньше. Однако для смеси 43% H_2 и 57% D_2 имеется 10-процентное превышение по сравнению с чистым водородом.

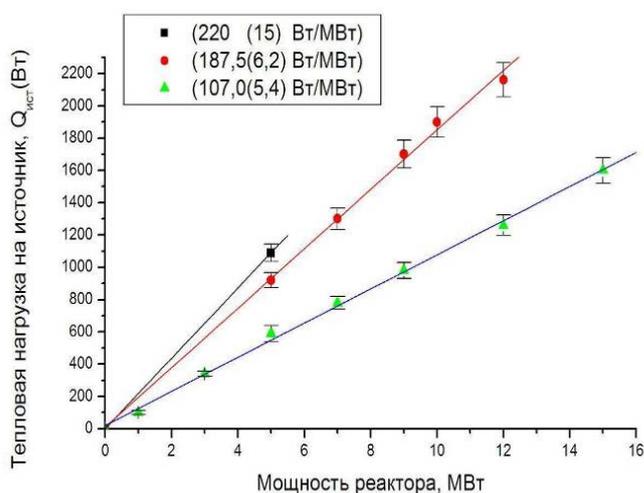


Рис. 7. Экспериментальные данные суммарной тепловой нагрузки на источник в зависимости от мощности реактора при различных загрузках активной зоны

замедлителем, так и без него, по разности тепловых нагрузок определялось удельное на МВт мощности реактора тепловыделение в замедлителе. Результаты измерений тепловыделений приведены в Табл. 1.

Конденсация (испарение) водорода в источнике при стартовой (для источника) сборке активной зоны реактора (I) приводила к значительному изменению реактивности реактора $\Delta\rho$ 0,78%, и дальнейшая работа источника по условиям безопасной работы реактора была невозможна.

С точки зрения безопасности эксплуатации реактора предпочтительнее были условия с наименьшим изменением реактивности в процессе конденсации и испарения жидкого замедлителя в источнике. Лучшие условия реализовались при использова-

Предложенная компенсационная методика позволила провести измерения удельных тепловыделений в источнике для различных загрузок зоны реактора и различных замедлителей.

Измерения тепловой нагрузки на источник проводились при работе с водородом и с пустой камерой. Измерялись суммарные тепловыделения в замедлителе и материале источника и отдельно без замедлителя только в материале источника. Тепловыделение в замедлителе и материале источника имеет линейную зависимость от мощности реактора (Рис 7). В предположении, что в материале источника тепловыделения в пределах 15-25% одинаковы как с

нии дейтерия $\Delta\rho = 0,025\%$. Однако выход холодных нейтронов при этом уменьшался в 3 раза из-за неоптимальных размеров дейтериевого замедлителя.

Табл. 1. Экспериментальные данные по тепловыделению в источнике для различныхборок активной зоны реактора и замедлителей в источнике. (Ошибки указаны в относительных единицах)

Сборка активной зоны реактора	Замедлитель	Суммарное удельное тепловыделение, Вт/МВт	Суммарное тепловыделение при мощности реактора 15МВт, Вт	Удельное тепловыделение в цирконии, Вт/МВт	Удельное тепловыделение в замедлителе, Вт/МВт	Изменение реактивности реактора, $\Delta\rho$, %
I	H ₂	187,5(6,2)	2805,0(92,8)	67(5)	120,0(9,8)	0,78
II	H ₂	220(15)	3300(225)	70(15)	150,0(14,5)	0,5
III	H ₂	107,0(5,4)	1605(81)	40,0(7,2)	67(12)	0,06
III	D ₂	77(10)	1155(150)		37(8)	0,025
IV	Смесь 43% H ₂ 57% D ₂	121(7)	1815(105)	62(4)	59(5)	0,3

Для увеличения выхода холодных нейтронов и для обеспечения условий безопасной работы реактора в дейтерий добавлялся водород. Оптимальная ситуация была найдена при использовании водородно-дейтериевой смеси в соотношении 43%H₂ и 57%D₂ в газовой фазе, что соответствует концентрации 24%H₂ и 76%D₂ в жидкости, в этом случае изменение реактивности реактора не превышало $\Delta\rho$ 0,3%, выход холодных нейтронов и УХН практически сохранился.

Для уменьшения влияния источника на реактивность реактора использовались бинарные смеси водорода с дейтерием. Смесь готовилась в ресивере объемом 20 м³ путем добавления порционно водорода в дейтерий. При конденсации бинарной смеси в источнике объемом 6 л соотношение компонентов в жидкой фазе будет отличаться от соотношения в газовой фазе в сторону увеличения концентрации дейтерия. При периодическом анализе смеси из ресивера после испарения замедлителя и при сбросе его в ресивер было обнаружено значительное увеличение количества HD в смеси, указывающее на более высокие скорости образования молекулы HD. Состав трехкомпонентной смеси в ресивере после многократных испарений из источника, после работы на мощности реактора следующий: 21,7(0,5)% - H₂, 43,0(1,4)% – HD и 35,3(1,4)% – D₂ и атомарный состав при этом 43,2% – H и 56,8% – D. По атомарному составу смесь не изменилась от первоначальной смеси водорода и дейтерия, заправленной в ресивер. В основном происходила «накачка» HD в ресивере при сбросе 6 литров жидкой смеси из источника. По результатам анализа трехкомпонентной смеси получена константа равновесия K_{HD} молекулы HD: $K_{HD} = 4,66(0,32)$, которая соответствует температуре $T \sim 1000$ К.

Этот факт свидетельствует о том, что мощные радиационные поля в месте установки источника интенсифицируют процесс образования молекулы HD в бинарной смеси водорода с дейтерием и приводят в состояние равновесия трехкомпонентную

смесь. Было проверено, что уже после работы источника на мощности в течение нескольких часов смесь переходит в равновесное состояние. Константу скорости образования молекулы HD в трехкомпонентной смеси под облучением определить не удалось в связи с техническими сложностями ожижения и испарения смеси. Эта задача еще ждет своего решения. За время (около полугода) работы источника со смесью равновесное состояние трехкомпонентной смеси в ресивере объемом 20 м³ не было достигнуто, $K_{HD} = 2,4$, который соответствует $T \sim 150\text{--}200\text{ К}$, что свидетельствует о низкой скорости образования HD при нормальных условиях. Смесь постоянно находилась в ресивере при температуре окружающей среды. Определена константа скорости естественного образования молекулы HD в газовой среде при температуре окружающей среды $\sim 298\text{ К}$, $k = 1,0 \cdot 10^{-3}\text{ ч}^{-1}$.

Глава 4 С середины 70-х годов Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ) в Гатчине активно начал развивать область проектирования, создания и применения Источников Холодных и Ультрахолодных Нейтронов (ИХН и ИУХН) для научных исследований на реакторах. Программа развития ИХН охватывала различные концепции и способы охлаждения замедлителей: с использованием жидкого дейтерия, жидкого водорода, смесей дейтерия и водорода, а также твердого дейтерия. Новаторские подходы, применяемые при проектировании ИХН и ИУХН, и накопленный к 90-м годам опыт позволили ПИЯФ стать одним из ведущих мировых лидеров в области создания ИХН и ИУХН.

Это, в свою очередь, позволило успешно конкурировать и участвовать в различных международных проектах по созданию ИХН, в частности, в проекте источника холодных нейтронов на реакторе ВВР-СМ в Венгрии.

Создание современного источника холодных нейтронов предназначалось для расширения исследовательских возможностей реактора в области физики конденсированного состояния, ядерной физики, радиохимии и др. Особая важность в реализации проекта современного ИХН в Будапештском Нейтронном Центре была подчеркнута в отчетах Международной комиссии и ЮНЕСКО.

В связи с малым диаметром тангенциального канала (диаметр канала равен 205 мм) для источника в качестве замедлителя был выбран водород. Расчетные факторы выигрыша для нейтронов с длиной волны 4Å для нормального водорода имеют значение 8,2 – 9,7, а для 10Å нейтронов 35, отличаясь для различных составов на 18%. С учетом нормального состояния водорода под облучением выбранная толщина замедляющего слоя водорода равна 4 см, которая является оптимальной для данного источника. Расчетный поток холодных нейтронов на конце канала длиной 1 м и диаметром, равным диаметру ИХН для смеси (50:50)% и для нейтронов с длиной волны $>4\text{Å}$ равен $2,4 \cdot 10^9\text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Для данного водородного источника ИХН радиационные условия в месте расположения камеры с замедлителем следующие: поток тепловых нейтронов $3,4 \cdot 10^{13}\text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, поток быстрых нейтронов с $E > 1,2\text{ МэВ}$ $1,1 \cdot 10^{12}\text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Удельное тепловыделение в водороде 1,23 Вт/г и 0,13 Вт/г в материале. Уровни удельных тепловыделений в жидком водороде и конструкционном материале источника реактора ВВР-СМ не очень высокие. Для источника объемом $\sim 0,5\text{ л}$ радиационное тепловыделение в водороде составляет 40-50 Вт, а в материале камеры источника весом 580 г – 80-110 Вт. Это тепло можно отвести непосредственно через стенки камеры обдувом

холодным гелием. Измеренные тепловыделения, о которых говорилось выше, показали превышение значений удельных тепловыделений как в алюминии, так и в водороде ~ 1.2 раза по сравнению с расчетными значениями.

Для расчета коэффициента теплопередачи в камере источника использовались традиционные методики, которые недостаточно точно учитывают условия теплообмена в реальном источнике. В связи с этим, для проверки работоспособности источника и определения возможности максимального отвода тепла при заданных параметрах были проведены полномасштабные термогидравлические тесты. Предельное значение плотности теплового потока от водорода для данной камеры в эксперименте составило $0,3 \text{ Вт/см}^2$, что несколько выше, чем приводится в литературе. 500 Вт суммарной подводимой мощности для такого способа охлаждения водорода в камере является предельным значением. Реализованный проект данного источника при подводимой мощности в 210 Вт позволил поддерживать водород в камере в жидком состоянии при температуре ниже температуры кипения при рабочем давлении.

На Рис. 8 представлены нейтронные спектры со старой нейтронной системой без ИХН и с новой нейтронной системой с ИХН. Интегральная плотность потока холодных нейтронов с длиной волны больше 4 \AA на мощности 10 МВт на выходе канала из биологической защиты для данного источника составила $1,3 \cdot 10^8 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ на один канал.

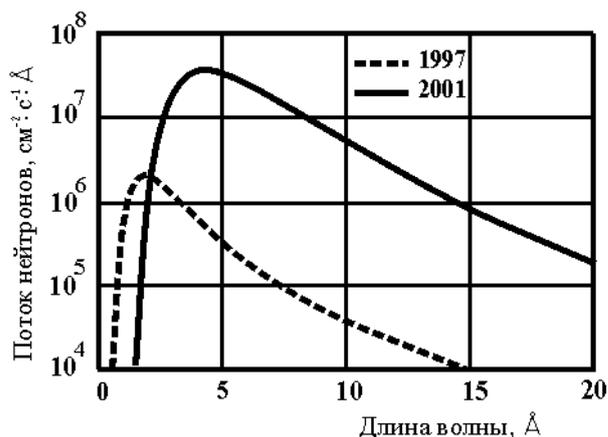


Рис. 8. Нейтронные спектры, измеренные времяпролетным методом, и прокалиброваны методом активации золотой фольги (пунктирная линия до установки ИХН и сплошная линия с ИХН)

Доступная для эксперимента суммарная плотность потока холодных нейтронов источника равна $3,9 \cdot 10^8 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Максимум интенсивности нейтронного потока находится при $\sim 4 \text{ \AA}$ и фактор выигрыша (по сравнению со старой нейтронной системой) достигает 30–60 раз в зависимости от места расположения установки и длины волны. Такой суммарный фактор выигрыша был получен: за счет жидководородного источника – в 7–10 раз; за счет уменьшения потерь – в 2 раза (замена шибера устаревшей конструкции) и за счет установки суперзеркальных нейтронных труб – в 2–3 раза.

Данный источник холодных нейтронов позволил существенно расширить экспериментальные возможности реактора ВВР-СМ.

В 2001 году компания INVAP (Аргентина) выиграла тендер на создание современного научно исследовательского реактора OPAL в ANSTO (Австралия, Lukas Heights). В конкурсе участвовало более восьми ведущих компаний мира из Франции, Германии, Японии и других стран. Обязательным условием тендера было то, что реактор должен оснащаться интенсивным источником холодных нейтронов. ПИЯФ выступал в качестве соисполнителя INVAP, и ему было поручено создание внутриреакторной части комплекса ИХН. Предложенные в ПИЯФ инновационные решения

в создании ИХН позволили успешно выиграть тендер. По замыслу разработчиков реактор OPAL должен был составить конкуренцию самым лучшим исследовательским ядерным реакторам по качеству и интенсивности нейтронных пучков.

На протяжении всего периода создания источника проводился большой объем оптимизационных расчетов с целью получения окончательных параметров ИХН. В этот объем входили нейтронные, прочностные и тепло-гидравлические расчеты. Расчеты проводились многократной итерацией между перечисленными выше видами расчетов.

Окончательные расчетные нейтронные характеристики источника приводятся в Табл. 2. В центре камеры поток тепловых нейтронов $1,65 \cdot 10^{14}$ н·см⁻²·с⁻¹ с энергией $E < 625$ мэВ и поток холодных нейтронов с энергией $E < 10$ мэВ составляет $1,12 \cdot 10^{14}$ н·см⁻²·с⁻¹. Расчетный спектр может быть представлен максвелловским спектром с температурой, равной $26,5 \pm 1$ К.

Табл. 2. Расчетные потоки тепловых и холодных нейтронов в источнике и на выходе из горизонтальных каналов реактора на мощности 20 МВт

	Поток тепловых нейтронов, $E < 625$ мэВ, н см ⁻² с ⁻¹		Поток холодных нейтронов $E < 5$ мэВ, н см ⁻² с ⁻¹		
	На до- нышке канала	На входе в ней- троноводы	На до- нышке канала	На входе в нейтроноводы	На выхо- де из ре- актора
Направление CG1-3	$4,96 \cdot 10^{13}$	$2,68 \cdot 10^{11}$	$1,88 \cdot 10^{13}$	$1,84 \cdot 10^{11}$	$1,58 \cdot 10^{10}$
Направление CG4	$4,37 \cdot 10^{13}$	$2,34 \cdot 10^{11}$	$1,72 \cdot 10^{13}$	$1,49 \cdot 10^{11}$	$1,27 \cdot 10^{10}$

Расчеты показали (Табл.3), что суммарное радиационное тепловыделение в источнике составит около 3700 Вт, из которого ~1400 Вт тепла выделяется в жидком дейтерии, ~2280 Вт в конструкционном материале камеры источника и около 200 Вт в остальной конструкции источника. Внешние теплопритоки к термосифону оценены на уровне 350 Вт. Суммарное тепловыделение в источнике составляет 4050 Вт. Ошибка в расчетах тепловыделений не превышает 10% (370 Вт), что учитывается в консервативной оценке суммарных тепловыделений в источнике.

Тепловая нагрузка на источник является критическим параметром при проектировании в связи с тем, что ее величина напрямую связана с выбором криогенной системы, т.е. ее криогенной мощностью. В системе источника холодных нейтронов используется хорошо проверенная на реакторе ВВР-М в ПИЯФ концепция термосифона с жидко-дейтериевым контуром естественной циркуляции.

С целью получения более низкой температуры замедлителя для отвода тепла выбран комбинированный способ охлаждения с улучшенной системой обдува вертикального термосифона. Основной системой отвода тепла от дейтерия является вертикальный контур естественной циркуляции жидкого дейтерия (термосифон). Часть тепла отводится от материала камеры непосредственным ее обдувом холодным гелием, а вторая часть от дейтерия в противоточном теплообменнике в контуре естественной циркуляции. Суммарный расход гелия при $T = 19$ К составляет 160 г/с, который делится на два потока по ~ 80 г/с каждый. Работоспособность контура с ус-

тановленными параметрами была проверена на полномасштабной модели с имитацией радиационных теплопритоков электрическими нагревателями.

Табл. 3. Радиационные тепловыделения в источнике

Радиационный нагрев в источнике [Вт]							
	LD ₂ в камере	LD ₂ в трубах	Al камера	Al трубы	Стальные трубы	Стальной т/о	
Q_n	446,4	2,5	6,2	0,3	0,0	0,0	
Q_β	0,0	0,0	790,4	57,9	0,0	0,0	
Q_γ	951,0	17,8	1278,8	152,2	1,3	30,0	
$Q_{\text{сум}}$	1397,4	20,3	2075,4	210,4	1,3	30,0	3705

Представляет значительный интерес возможность измерения тепловой нагрузки в реальных эксплуатационных условиях работы ИХН и сравнение с расчетными значениями. Работы по измерению тепловой нагрузки проводились сотрудниками реактора OPAL.

Криогенная установка обеспечивает циркуляцию гелия через источник при криогенных температурах для поддержания дейтерия в жидком состоянии. Дейтерий и гелий физически разделены в термосифоне. Все тепло, выделяемое в жидком дейтерии и в конструкционном материале источника, отводится гелием посредством конвекции и теплопроводности. В установившемся режиме тепловая нагрузка на источник может быть измерена посредством теплового баланса по гелиевому потоку. Результаты измерения тепловой нагрузки как с жидким дейтерием в источнике (температура гелия на входе в источник 20 К), так и с дейтерием в газообразном состоянии (температура гелия на входе в источник 35 К) позволяют разделить тепло, выделяемое в жидком дейтерии и в конструкционном материале, и определить внешние теплопритоки (Рис. 9).

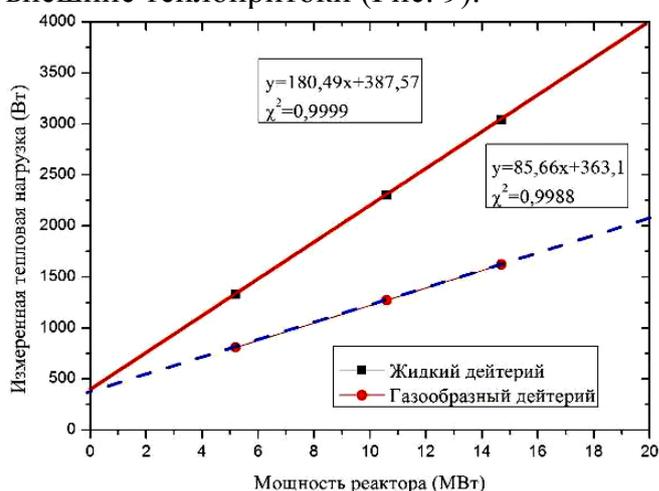


Рис. 9. Измеренная тепловая нагрузка на источник посредством теплового баланса по гелиевому потоку

данной задачи. В то же время наблюдается достаточно большое расхождение (35%) с измеренной отдельно тепловой нагрузкой в материале и, соответственно, вычисленной в дейтерии. Общее тепловыделение в источнике по экспериментальным данным снижается в 2,1 раза при отсутствии жидкого дейтерия. Это обстоятельство свя-

Наклон подгоночной кривой показывает радиационный нагрев (Вт/МВт), а смещение кривой по оси тепловой нагрузки – внешние теплопритоки (Вт). Измерение общей тепловой нагрузки на уровне 4 кВт выполнялось с высокой точностью 0,2% ~ 8 Вт. Видна хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных по суммарной тепловой нагрузке от реактора (~3%) и по общей тепловой нагрузке на источник (1,4%). Расхождение экспериментальных данных по внешним теплопритокам с расчетами находится в пределах 10%. Такая ошибка является приемлемой для

зано, в первую очередь, со смягчением нейтронного спектра в камере жидким дейтерием. Сечение захвата нейтрона ядром алюминия ведет себя по закону $\sim 1/v$, где v – скорость нейтрона. Соответственно, чем меньше скорость нейтрона, тем больше сечение захвата нейтрона ядром ^{27}Al . Поэтому заполнение камеры дейтерием приводит к увеличению числа холодных нейтронов в камере, к существенному увеличению числа захватов нейтрона ядрами алюминия и, соответственно, большему образованию ядер ^{28}Al , бета-распад которых приводит к увеличению энерговыделения в камере, а также к увеличению нагрева от $(n+\gamma)$ в этом случае. Становится очевидным, что экспериментальные данные по измерению тепловыделений в материале для данного источника дают более низкие значения, чем реально существующие тепловыделения в материале при наличии жидкого дейтерия. Экспериментальные данные по общему тепловыделению и отдельно в материале могут быть использованы в качестве опорных для тестирования расчетных нейтронно-физических программ.

Для определения нейтронных характеристик источника холодных нейтронов измерялись общие нейтронные потоки и нейтронные спектры на выходе нейтронно-проводов из реактора и в нейтронноводном зале перед экспериментальными установками с использованием традиционной времяпролетной методики и калибровкой по активационному анализу золотых фольг. Измеренные нейтронные потоки и спектры, характеризующие эффективность источника холодных нейтронов, представлены в Табл. 4, на Рис. 10 и Рис. 11, соответственно.

Табл. 4. Нейтронные потоки.

	Поток холодных нейтронов, $\text{н см}^{-2}\text{с}^{-1}$		
	На выходе из реактора	Нейтронноводный зал	Пик спектра
Направление CG1-3	$1,8 \cdot 10^{10}$	$6,4 \cdot 10^9$	3,05 мэВ
Направление CG4	$2,5 \cdot 10^{10}$	–	2,35 мэВ

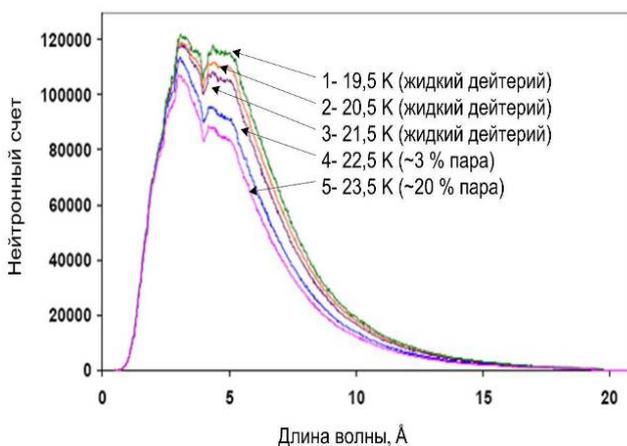


Рис. 10. Нейтронные спектры для различных температур замедлителя

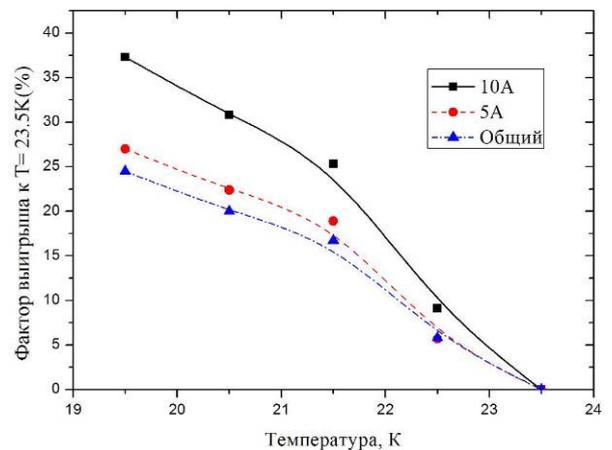


Рис. 11. Факторы выигрыша в % для холодных нейтронов в зависимости от температуры замедлителя (нормализованы к температуре 23,5 К)

Детальное рассмотрение спектров холодных нейтронов указывает на их значительную термализацию за счет жидкого дейтериевого замедлителя.

Увеличение выхода холодных нейтронов из источника с понижением температуры по отношению к «кипящему» состоянию замедлителя представлено на Рис. 11. Понижение температуры замедлителя для данного источника до 19,5 К дает увеличение в производстве нейтронов с длиной волны 10 Å более чем на 35% и 5 Å нейтронов более чем на 25 %.

Наблюдалась хорошая однородность нейтронных пучков во всех местах расположения экспериментального оборудования, что подтверждает правильность выбора формы и размеров камеры источника и высокое качество нейтронной системы.

До настоящего времени высокопоточный реактор в ILL является лучшим исследовательским реактором в мире, поэтому представляет определенный интерес в проведении сравнения нейтронных характеристик источников холодных нейтронов на этом реакторе и на реакторе OPAL. Источник холодных нейтронов на реакторе OPAL по потоку холодных нейтронов $(1,8-2,5) \cdot 10^{10}$ н·см⁻²·с⁻¹ на выходе из реактора несколько уступает горизонтальному источнику на реакторе в ILL $4,0 \cdot 10^{10}$ н·см⁻²·с⁻¹. В то же время превосходит по потоку ХН ($6,4 \cdot 10^{10}$ н·см⁻²·с⁻¹) в экспериментальном зале в ~1,2 раза за счет большего объема замедлителя и лучшей организации и качества нейтронной системы.

Созданный источник холодных нейтронов на реакторе OPAL в Австралии полностью подтвердил проектные и затребованные характеристики с очень хорошим соотношением цена/производство холодных нейтронов и минимальными затратами на обслуживание и эксплуатацию оборудования. Данный проект является великолепным результатом совместной работы INVAP и ПИЯФ и позволяет гордиться достигнутым общим уровнем нейтронных характеристик источника холодных нейтронов.

Источник Холодных Нейтронов на реакторе OPAL в Австралии является научным прибором мирового класса, и его нейтронные характеристики позволяют реактору OPAL быть одним из немногих в мире, обладающим значительными возможностями для использования холодных нейтронов в различных областях науки и техники.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы:

1. впервые в мире в центре активной зоны реактора ВВР-М средней мощности был создан интенсивный универсальный источник УХН и ХН. Объем жидководородного источника – 1 л, поток тепловых нейтронов в месте расположения источника – $(1-2) \cdot 10^{14}$ н·см⁻²·с⁻¹, полное тепловыделение в источнике – 2 кВт, интенсивность пучка поляризованных холодных нейтронов – $3 \cdot 10^{10}$ н·с⁻¹, плотность потока – $6 \cdot 10^8$ н·см⁻²·с⁻¹, степень поляризации – $(90 \pm 5)\%$, интенсивность пучка ультрахолодных нейтронов – $5 \cdot 10^5$ н·с⁻¹, плотность потока – $6 \cdot 10^3$ н·см⁻²·с⁻¹ для диапазона скоростей $V_x, V_y, V_z < 7,8$ м/с. С использованием этого источника была получена наиболее точная оценка возможного ЭДМ нейтрона $d_n = (+2,6 \pm 4,0 \pm 1,6) 10^{-28}$ е·м, экспериментально измерено время жизни нейтрона, которое составило $\tau_n = (888,4 \pm 3,1 \pm 1,1)$ с, и получено значение коэффициента корреляции между направлением вылета

электрона и спином распадающегося нейтрона – $A = -0,1131 \pm 0,0014$, что соответствует значению $\lambda = g_A/g_V = -1,249 \pm 0,008$.

2. впервые для отвода тепла от замедлителя в экстремальных условиях использован контур естественной циркуляции жидкого водорода (однофазный термосифон), как на реакторе ВВР-М (Гатчина, Россия) так и на реакторе OPAL (Lucas Heights, Австралия). В настоящее время на реакторе OPAL источник холодных нейтронов с использованием термосифона для отвода тепла является единственным в мире.

3. впервые разработана и апробирована методика расчета контура естественной циркуляции переохлажденного жидкого водорода и дейтерия в применении к способу отвода тепла от замедлителей ИХН. Получены аналитические зависимости, позволяющие проводить расчеты контура естественной циркуляции и определять его предельные возможности, как по максимальной отводимой мощности, так и по его геометрическим параметрам. Изучены тепловые характеристики работы контура естественной циркуляции.

4. впервые определен равновесный состав трехкомпонентной смеси водорода и дейтерия с образованием молекулы HD под облучением. Определена константа равновесия для молекулы HD под облучением $K_{HD}=4,66(0,32)$, которая соответствует температуре $T \sim 1000$ К.

5. впервые разработана и использована в эксперименте на источнике ХН и УХН реактора ВВР-М компенсационная методика измерения удельных тепловыделений в замедлителе и конструкционном материале источника с точностью 10-15%. Для различныхборок активной зоны реактора измеренные радиационные тепловыделения в водороде составили: 67 – 150 Вт/МВт, в дейтерии 37 Вт/МВт, в смеси (43% H₂, 57% D₂) 59 Вт/МВт и в цирконии 40 – 70 Вт/МВт.

6. изучено влияние жидкого водорода, дейтерия и их смесей, а также процесса конденсации и испарения замедлителя в контуре естественной циркуляции (термосифоне) на реактивность реактора. Оптимальная ситуация была найдена при использовании водородно-дейтериевой смеси в соотношении 43% H₂ и 57% D₂ в газовой фазе; при этом изменение реактивности реактора не превышало $\Delta\rho$ 0,3%, а выход холодных нейтронов и УХН практически сохранился.

7. на основании испытаний полномасштабных моделей источников определены предельные возможности для различных способов охлаждения замедлителя. Непосредственное охлаждение замедлителя в камере позволяет отводить тепло в пределах 500 Вт. Использование контура естественной циркуляции замедлителя оправдано для отвода тепла в диапазоне 500 – 7000 Вт. Для источников с большим тепловыделением необходимо применение систем с кипящим замедлителем и конденсатором.

8. в ПИЯФ (в группе ИХН ОНФ) создан источник холодных нейтронов с прямым охлаждением водорода в камере для реактора ВВР-СМ в Будапеште, позволившим существенно расширить экспериментальные возможности реактора в области физики конденсированного состояния. Доступная для эксперимента плотность потока холодных нейтронов источника равна $3,9 \cdot 10^8$ н·см⁻²·с⁻¹ для длин волн $\lambda > 4\text{Å}$.

9. в ПИЯФ (в группе ИХН ОНФ) для 20 МВт реактора OPAL (Австралия) создан дейтериевый источник холодных нейтронов мирового класса с интегральной плот-

ностью нейтронного потока $(1,8-2,5) \cdot 10^{10}$ н·см⁻²·с⁻¹ для длин волн $\lambda > 4 \text{ \AA}$ на выходе из реактора и $6,4 \cdot 10^9$ н·см⁻²·с⁻¹ в нейтроноводном зале. Данные параметры превышают характеристики вертикального ИХН и несколько уступают плотности потока холодных нейтронов горизонтального дейтериевого ИХН на 58 МВт реакторе ILL (Гренобль, Франция).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. И.С. Алтарев, Б.Г. Ерозолимский, А.А. Захаров, С.Г. Кирсанов, И.А. Кузнецов, В.А. Митюхляев, А.П. Серебров. Универсальный жидководородный источник поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М ЛИЯФ //Письма в ЖЭТФ, 1986, том 44, вып. 6, стр. 269-272.
2. А.А. Захаров, В.А. Митюхляев, и др. Испытание турбодетандера новой конструкции ДТГ 0.2/25 в составе комплекса универсального канала реактора ВВР-М //Отчет ЛИЯФ ЭП-132, 1988, 23 с.
3. И.С. Алтарев, Б.Г. Ерозолимский, А.А. Захаров, С.Г. Кирсанов, И.А. Кузнецов, В.А. Митюхляев, А.П. Серебров. Универсальный нейтронный источник с контуром естественной циркуляции жидкого водорода реактора ВВР-М //Препринт ЛИЯФ-1406, Л., 1988, 15 с.
4. И.С. Алтарев, Б.Г. Ерозолимский, А.А. Захаров, С.П. Карпов, С.Г. Кирсанов, И.А. Кузнецов, В.А. Митюхляев, А.П. Серебров. Криогенная система универсального источника на реакторе ВВР-М с контуром естественной циркуляции жидкого водорода// Сборник научных докладов 4й Всесоюзной научной конференции «Научно-технические проблемы и достижения в криогенной технике «КРИОГЕНИКА-87». Часть 1, 1988, стр. 102-108.
5. I.S. Altarev, V.A. Mityukhlyaev, A.P. Serebrov, A.A. Zakharov. Cold and ultracold neutron sources at the WWR-M Reactor//Preprint PNPI-1785, Gatchina, 1992. 15 p.
6. I.S. Altarev, V.A. Mityukhlyaev, A.P. Serebrov, A.A. Zakharov. Cold and ultracold neutron sources in Gatchina, Russia//Journal of Neutron Research, 1993, Vol. 1, No. 4, pp. 71-77.
7. A.P. Serebrov, V.A. Mityukhlyaev, A.A. Zakharov, V.V. Nesvizhevsky, A.G. Kharitonov. Is it possible to produce next generation of UCN sources with density? //Письма в ЖЭТФ, 1994, том 59, вып. 11, стр.728-733.
8. T. Grosz, V.A. Mityukhlyaev, L. Rosta, A.P. Serebrov, A.A. Zakharov. Cryogenic system of the liquid hydrogen cold neutron source at Budapest Research Reactor //Proceedings of fourth international conference “Cryogenics 96”, pp 65-68, Praha. Czech Republic. 1996.
9. T. Grosz, V.A. Mityukhlyaev, L. Rosta, A.P. Serebrov, A.A. Zakharov Liquid hydrogen cold moderator optimization at the Budapest Research Reactor// Physica B 234-236 (1997) 1194-1195.
10. К.А. Коноплев, В.А. Митюхляев, Р.Г. Пикulik, А.П. Серебров and А.А. Захаров The safety issue of the Cold Neutron Source at the WWR-M reactor //Proceedings of 5th meeting of International Group on Research Reactors, November 4-6, 1996, France, p 112.
11. А.П. Серебров, В.А. Митюхляев, А.А. Захаров et. al. Studies of solid-deuterium source of ultracold neutrons and hydrogen-deuterium mixtures for cold neutron sources. //Preprint PNPI-2200, Gatchina, 1997, 25 p.

12. A.P. Serebrov, V.A. Mityukhlyaev, A.A. Zakharov. Hydrogen cold and ultracold neutron sources on the WWR-M reactor, Gatchina //Proceedings of Fifth Cryogenics 98 II R International conference. Praha, Czech Republic, 1998, pp. 39-41.
13. А.А. Захаров, А.Б. Давыдов, В.А. Митюхляев, Г.А. Пересторонин, А.П. Серебров, Л.М. Шмикт, В.Д. Щербаков. Криогенная система универсального источника холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М. Препринт ПИЯФ-2310. Гатчина, 1999, 25 с.
14. S.D. Bondarenko, V.A. Mityukhlyaev. Thermodynamic and transport properties of the liquid and gaseous deuterium. Preprint PNPI 2435, Gatchina, 2001, 39 p.
15. A. Serebrov, V. Mityukhlyaev, A. Zakharov. Hydrogen and deuterium cold and ultracold neutron sources at the PNPI research reactor in Gatchina. 7th Meeting of the International Group on Research Reactors (IGGOR 7), October 26-29, 1999, San Carlos de Bariloche, ARGENTINA, p. 85.
16. V. Mityukhlyaev. Development of the RRR Cold Neutron Source Facility. 9th Meeting of the International Group on Research Reactors (IGGOR 9), 24-28 March 2003, Sydney, Australia. SNS03, p. 267.
17. С.Д. Бондаренко, В.А. Митюхляев. Теплофизические и транспортные свойства жидкого и газообразного водорода. Препринт ПИЯФ- 2578, Гатчина, 2004, 33 с.
18. V. Mityukhlyaev. PNPI experience of Cold & Ultracold Neutron Sources. 5th International Conference. "Ultra Cold & Cold Neutrons Physics & Sources" Peterhof, Russia 13-18 July 2005, p. 504.
19. M. Bonneton (Air Liquide, France), O. Lovotti (INVAP, Argentina), V. Mityukhlyaev (PNPI, Russia), R. Thiering (ANSTO, Australia). INSTALLATION AND TESTING OF THE OPAL (ANSTO) COLD NEUTRON SOURCE. 10th Meeting of the International Group on Research Reactors (IGGOR 10). September 2005 - Washington, USA, p. 256.
20. V. Mityukhlyaev. Cold Neutron source developments at the Petersburg Nuclear Physics Institute. Proc. of the 3rd NET Enlargement & Integration Workshop. JRC-IE Petten, 29-30 November 2006. EUR23418 EN, ISSN: 1018-5593.
21. V. Mityukhlyaev. Experience of Cold & Ultracold Neutron Sources Development at the International Research Centres. 6th International Conference. "Ultra Cold & Cold Neutrons Physics & Sources" St. Petersburg - Moscow, 1-7 July 2007, p. 486.
22. В. Митюхляев, М. Онегин, И. Потапов, А. Серебров, А. Фирсов, Lu Weijian, Russell Thiering. Создание источника холодных нейтронов на реакторе OPAL в Австралии. Препринт ПИЯФ-2822, Гатчина, 2009, 32 с.