



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

С.И. Волкова

Н.М. Волкова, Т.П. Егоренкова,
Г.И. Кикнадзе, Ю.В. Чушкин,
В.А. Шапошников

ИАЭ-4679/11

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО КАНАЛА
ИБН ЛУЭ "ФАКЕЛ"**

Москва — ЦНИИатоминформ — 1988

Ключевые слова: источник быстрых нейтронов, поток нейтронов, низкотемпературный облучательный канал, теплообменник, конденсатор, гелий.

В работе рассматривается низкотемпературный облучательный канал для исследования сверхпроводящих токонесущих элементов и конструкционных материалов в условиях облучения нейтронами и гамма-квантами в источнике быстрых нейтронов ЛУЭ "Факел" при сопряженном воздействии механических, токовых и магнитных нагрузок. Максимальная тепловая мощность, компенсируемая криогенной системой на уровне 4,5 – 5 К, составляет 250 Вт при потоке быстрых нейтронов с энергией $E_n \geq 0,1$ МэВ $\approx 8,5 \cdot 10^{12}$ нейтр./см².с). Охлаждение исследуемых образцов осуществляется холодоносителем-гелием, ожиженным в конденсаторе. Приведена также схема охлаждения образцов гелием при температуре $\sim 1,6$ К.

A low-temperature radiation channel to study superconducting current-carrying elements and structural materials under conditions of irradiation by neutrons and gamma-quanta in the fast neutron source LEA "Fakel" (torch) at a joint action of mechanical, current and magnetic loads is considered in the paper. A maximum thermal power compensated by a cryogenic system at a level of 4,5 – 5 K comes up to 250 W at a fast neutron flux with energy $E \geq 0,1$ MeV $\approx 8,5 \cdot 10^{12}$ neutr./cm². A cooling of samples studied is accomplished by a helium coolant liquefied in a condenser. A scheme for cooling samples by helium at a temperature $\sim 1,6$ K is also given.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов, сопровождающих прохождение ионизирующего излучения сквозь вещество, является важным приложением исследований в области ядерной физики и физики твердого тела. На стыке этих исследований и задач других разделов естественных наук, изучающих особенности конденсированного состояния веществ, возникли, как известно, специальные разделы науки о радиационных явлениях, и в их числе радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение, призванные исследовать механизм и динамику радиационных повреждений и явления, приводящие к изменению физических, механических и электромагнитных свойств веществ под действием облучения. Исследования такого рода даже в настоящее время имеют важное значение и актуальны в связи с проблемами радиационной стойкости материалов, применяемых при создании энергетических и транспортных реакторов, термоядерных и других электроэнергетических установок.

Уже стало традиционным, что изучение механизмов радиационного повреждения может осуществляться лишь в тех условиях, когда отжиг дефектов происходит под контролем. Такие условия могут реализовываться только тогда, когда температура облучения соответствует температуре кипения криогенных жидкостей: азота, неона, водорода, гелия, что позволяет обеспечить либо полное отсутствие отжига радиационных дефектов при гелиевых температурах облучения, либо, управляя температурой, исследовать динамику отжига и кинетические закономерности поведения дефектов в веществах.

Исследования радиационных повреждений в материалах при криогенных температурах могут проводиться на изотопных источниках, ускорителях заряженных частиц и в полях излучения ядерных реакторов.

Использование ядерных реакторов позволяет, как правило (см., например, [1] и табл.), проводить облучение материалов потоками нейтронов $5 \cdot 10^{12} \leq \Phi \leq 10^{15}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ с $E_n > 0,1$ МэВ. Для исследований в области низкотемпературной радиационной физики и низкотемпературного радиационного материаловедения в основном применяются водородные реакторы, в которых легкая и тяжелая вода выполняет роль замедлителя нейтронов. Из данных, приведенных в [2], следует, что удель-

Установка	Качество, нейтр./ (см ² .с.кВт)	Мощность, МВт	K _{эф}	Поток нейтронов $\bar{n}\bar{V}$ нейтр./ (см ² .с)	Уд. тепловыделение, q Вт/г	Материал
СМ-2, HFIR (r _л = 5 см, K _{эф} = 1,8)	~3.10 ¹¹	—	—	—	—	—
Ловушка	~5.10 ¹⁰	50	1,8	2,5.10 ¹⁵	20	Нерж.сталь
РБТ	0,3.10 ¹⁰	30	—	10 ¹⁴ (E > 0,8 МэВ)	0,85 (защита Pb)	Нерж.сталь
	0,25.10 ¹⁰	10	—	2,5.10 ¹³	—	—
ВВР	0,75.10 ⁹	8	—	0,6.10 ¹³ (Cd экран)	2,3	Нерж.сталь
ИБН ЛУЗ "Факел"	10.10 ¹⁰	0,2	0,95	2.10 ¹³	0,13	Нерж.сталь
	4,25.10 ¹⁰	—	—	8,5.10 ¹² (E > 0,1 МэВ)	—	

ные тепловыделения в образцах, облучаемых в исследовательском водородном ядерном реакторе за счет поглощения гамма-квантов, нейтронов и их неупругого рассеяния, составляют в зависимости от места облучения (индекс i) $q_{vi} \approx 0,05 - 0,5$ Вт/г на каждый МВт тепловой мощности активной зоны.

Зная весовые характеристики облучаемых установок G_i , удельное тепловыделение q_{vi} , а также тепловую мощность реактора W , можно определить суммарные тепловыделения в материалах криостата и в облучаемом образце:

$$Q = W \sum_{i=1}^n q_{vi} G_i$$

и подобрать с учетом тепловыделений за счет притока тепла из окружающей среды криогенный рефрижератор-ожижитель соответствующей мощности. Так как теплоприток от гамма-квантов и неупругого рассеяния нейтронов прямо пропорционален массе облучаемой конструкции, то при конструировании низкотемпературных каналов необходимо стремиться к максимальному облегчению помещаемой в активную зону части установки. Поэтому вопрос о выборе конструкционного материала низкотемпературного канала определяет успех сооружения таких установок. Кон-

струкционные материалы, применяемые в таких каналах, должны иметь относительно малые сечения взаимодействия с нейтронами, короткое время полураспада наведенной радиоактивности, малую плотность и низкую теплопроводность, кроме того, они должны обладать криогенной и радиационной стойкостью. Этим требованиям удовлетворяют алюминий, титан и их сплавы в комбинации с нержавеющей сталью аустенитного класса.

Из-за невысокой прочности и высокой теплопроводности алюминия наиболее целесообразным вариантом при создании низкотемпературного канала является комбинация двух материалов: та часть канала, которая подвергается облучению, изготавливается из алюминия, чтобы уменьшить нагрев стенок канала за счет поглощения гамма-квантов, а узлы, вынесенные за пределы зоны облучения, изготавливаются из нержавеющей стали, низкая теплопроводность которой обеспечивает малые теплопритоки к криогенным жидкостям.

В последнее время в криогенной технике с успехом стали применяться титановые сплавы типа ВТ-5, ВТ-6. Высокие пластичность при низких температурах и удельная прочность, относительно невысокий коэффициент линейного расширения по сравнению со сталями делают титановые сплавы перспективными материалами при конструировании низкотемпературных облучательных каналов.

При создании низкотемпературных каналов важен выбор холодоносителя. Обеспечение надежной и стабильной работы канала требует от холодоносителя радиационной стойкости, то есть чтобы в процессе работы в нейтронных и гамма-полях не происходило изменение его физико-химических и теплофизических параметров.

В качестве холодоносителей используются химически чистый азот [3, 4], неон, гелий [5, 6]. Использование гелия имеет существенные преимущества перед другими холодоносителями за счет практически полного отсутствия взаимодействия с нейтронами, нейтральности по отношению к любым конструкционным материалам, высоких теплофизических свойств и возможности охлаждения образцов в наиболее широком диапазоне температур.

Охлаждение образцов может проводиться:

- обдувом газом, предварительно охлажденным в теплообменнике или в рефрижераторной установке [5, 6];
- жидким холодоносителем в обычном сосуде Дюара, устанавливаемом в поле излучения;
- соприкосновением облучаемого образца с металлом высокой теплопроводности, помещенным в холодоноситель;

— холодоносителем, охлажденным в конденсаторных установках (термосифон) [3, 4, 7].

На примере низкотемпературного канала, описанного в [5] (рис. 1), рассмотрим метод охлаждения образца путем обдува потоком гелия, охлажденного в теплообменнике. Он легко осуществим при создании каналов для облучения при температурах кипения азота.

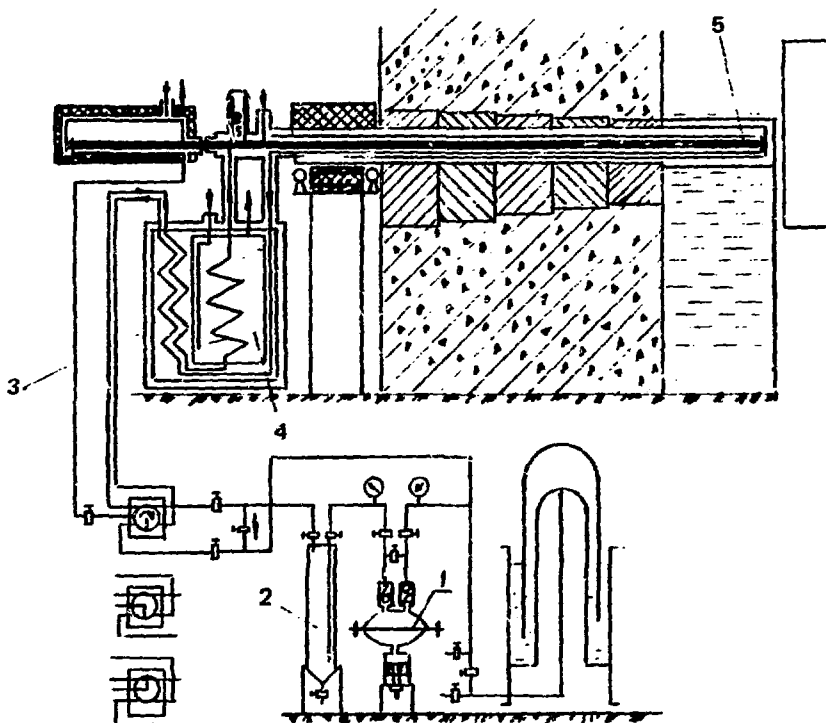


Рис. 1. Схема низкотемпературного канала с охлаждением образцов обдувом гелием, охлажденным в теплообменнике: 1 — мембранный компрессор МК-10/6; 2 — блок очистки гелия; 3 — теплообменник; 4 — азотный холодильник; 5 — камера для облучения

Посредством мембранного компрессора МК-10/6 1 газообразный гелий подается в теплообменник 3 и азотный холодильник 4. Охлажденный до ~ 80 К газообразный гелий поступает в камеру для облучения 5. Проходя через рабочую камеру, гелий снимает тепло от проникающего излучения со стенок камеры и образца. Затем гелий, экранируя по пути следования прямой поток, поступает в теплообменник, нагревается прямым потоком и возвращается во всасывающий трубопровод компрессора.

Использование мембранных компрессоров упрощает схему, поскольку

ку гелий не надо очищать от масла. Блок очистки гелия 2 служит для очистки холодоносителя от механических примесей и влаги, попадающих в циркуляционную систему низкотемпературного канала в процессе загрузки облучаемых образцов.

Использование рефрижераторов-ожижителей с расширительными машинами для охлаждения холодоносителя [6] в таких схемах позволило обеспечить охлаждение образцов вплоть до температуры кипения гелия с относительно высоким уровнем криогенной мощности.

При облучении образцов на выведенных нейтронных пучках, а также заряженными частицами на ускорительных установках относительно невысокой мощности используются сосуды Дюара, в которых организован специальный ввод пучка частиц в камеру с образцом, погруженным в криогенную жидкость. Испарение криогенной жидкости в облучаемом сосуде компенсируется периодической ее добавкой из транспортного криостата.

В ряде случаев для охлаждения образцов применяют теплопроводы в виде металлических конструкций, одна часть которых размещается в криостате с холодоносителем, вынесенном за пределы интенсивных полей излучения, а другая — имеет хороший тепловой контакт с облучаемым образцом. Выделяемое тепло отводится в криостат теплопроводностью.

Наиболее распространенными низкотемпературными каналами для облучения образцов нейтронами являются термосифоны, носящие названия контуров с двойной цепью. Принципиальная схема такого канала с использованием азота для охлаждения образцов (рис. 2, [7]) содержит систему подачи химически чистого азота 2, систему подачи технического азота 5, систему вакуумирования 3. Химически чистый азот под нужным давлением подается в замкнутый контур первого звена двойной цепи, включающий в себя ресивер для сбора газа, конденсатор 4 и камеру облучения 1. После охлаждения конденсатора техническим азотом на его поверхности ожижается химически чистый азот и заполняет камеру облучения с образцом. При выделении радиационного тепла в образце холодоноситель нагревается, что приводит к возникновению естественной циркуляции химически чистого азота между камерой облучения и конденсатором. Конденсатор вынесен за пределы интенсивных полей излучения реактора.

Описанный метод охлаждения имеет ряд преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными, в том числе при охлаждении образцов до температур более низких, чем температура кипения жидкого азота. Контур с двойной цепью могут быть использованы в случае охлаждения гелием, включая сверхтекучий гелий, так как позволяют:

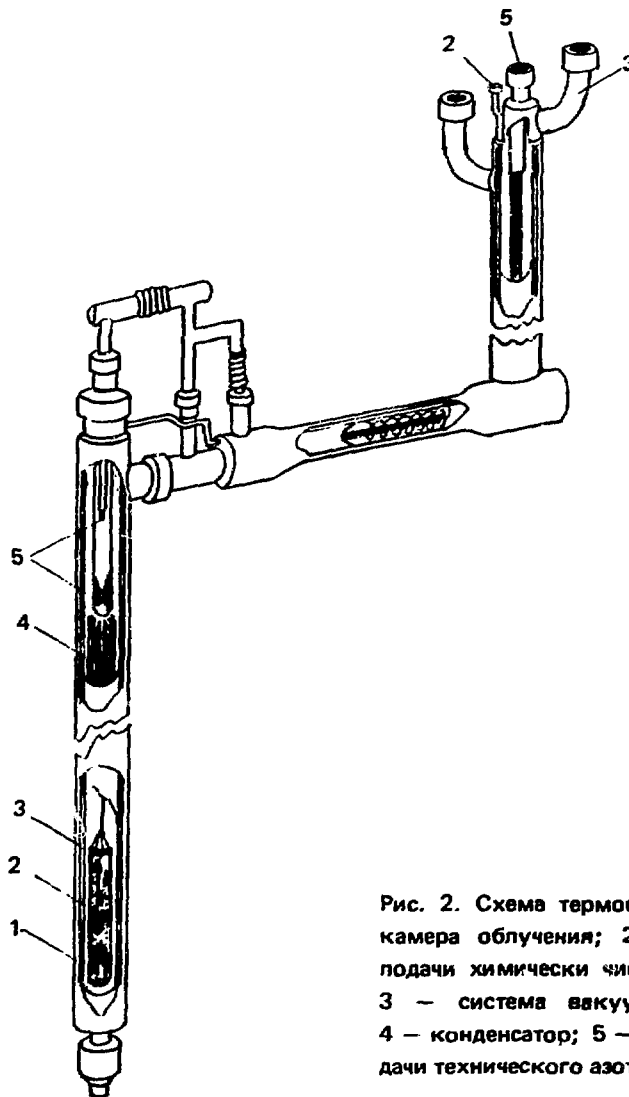


Рис. 2. Схема термосифона: 1 — камера облучения; 2 — система подачи химически чистого азота; 3 — система вакуумирования; 4 — конденсатор; 5 — система подачи технического азота

— проводить охлаждение облучаемых образцов в ванне холодоносителя при постоянной температуре непосредственно в активной зоне ядерного реактора;

— разделить циркулирующий в зоне облучения теплоноситель (I контур) от охлаждающего его хладагента в конденсаторе и рефрижераторе (II контур) и исключить очистку возвратного холодоносителя из конденсатора от возможных радиоактивных примесей-загрязнений;

— снимать тепловые потоки мощностью в несколько сот ватт за счет

развитой поверхности конденсатора вне зоны облучения, где отсутствуют ограничения, связанные с критическими параметрами активной зоны реактора или урановой критической сборки;

— использовать, как указывалось, сверхтекучий гелий для охлаждения облучаемых образцов, имея в конденсаторе гелий, охлажденный до температуры $1,5 \div 1,8$ К.

2. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ ИБН ЛУЭ "ФАКЕЛ"

Проведение экспериментов по изучению радиационных дефектов в образцах при гелиевых температурах и облучении быстрыми нейтронами на ядерных реакторах удобно с точки зрения интенсивного накопления нужного интегрального потока нейтронов ($10^{18} \div 10^{19}$ нейтр./см²). Однако из-за высокого уровня радиационного тепловыделения (см. табл.) проведение материаловедческих экспериментов на исследовательских ядерных реакторах известных типов [1] требует сложного и мощного комплекса по производству жидкого гелия.

Для уменьшения радиационного разогрева исследуемых образцов и материалов криогенного канала в ИАЭ им. И.В. Курчатова совместно с НИКИЭТ был разработан источник быстрых нейтронов (ИБН) на базе ЛУЭ "Факел" (его прототип изложен в [8]), представляющий собой размножающую мишень, где за счет реакции $e - \gamma - n$ и реакции деления на U^{235} рождаются нейтроны со спектром, близким к спектру деления U^{235} . Экспериментальный канал расположен вне конуса разлета тормозных γ -квантов, что существенно снижает вклад вторичного γ -излучения в тепловыделения в канале (см. табл.).

Для исследования сверхпроводящих и конструкционных материалов в условиях облучения нейтронами и γ -квантами в ИБН при сопряженном воздействии механических, магнитных и токовых нагрузок был разработан низкотемпературный облучательный канал (НОК). Охлаждение образцов, исходя из анализа выше рассмотренных методов охлаждения, осуществляется холодоносителем — гелием, ожиженным в конденсаторе.

Принципиальная схема НОК (рис. 3) содержит системы вакуумирования, подачи азота, подачи газообразного и жидкого гелия. НОК выполнен в виде криостата с высоковакуумной изоляцией ($P_{\text{ост.газов}} \sim 10^{-3}$ Па), азотным экраном 2, гелиевой емкостью 4 со сверхпроводящим соленоидом 5 и экспериментальным каналом 6 с конденсатором 3, в который на специальной вставке 7 вводится исследуемый образец 9. Соленоид и конденсатор вынесены за пределы зоны облучения.

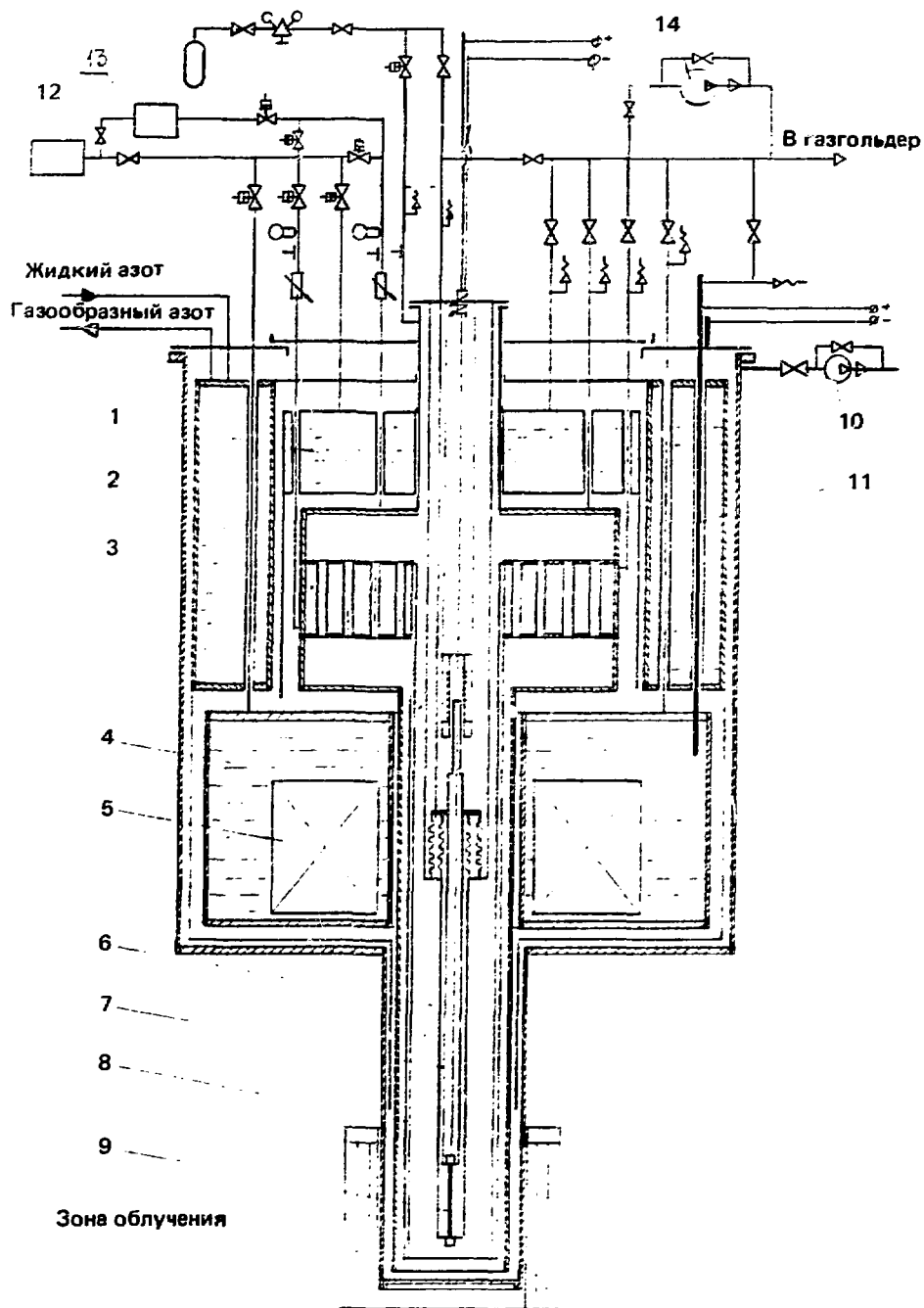


Рис. 3. Схема НОК ИБН ЛУЗ "Факел": 1 – гелиевый экран; 2 – азотный экран; 3 – конденсатор; 4 – гелиевая емкость под сверхпроводящий соленоид; 5 – сверхпроводящий соленоид; 6 – экспериментальный канал; 7 – устройство для испытания образцов; 8 – вакуумный экран; 9 – образец; 10 – насос вакуумной откачки; 11 – токоввод; 12 – холодильная машина типа КГУ-500/4,5; 13 – приставка-перехладитель; 14 – система откачки паров гелия из конденсатора

Азотный экран, снижающий подвод тепла к гелию от излучения стенок корпуса, выполнен в виде емкости с жидким азотом ($V \sim 60$ л) с припаянным медным полированным экраном. Азотные магистрали защищены от потоков нейтронов и γ -квантов.

На фланце гелиевой емкости крепится сверхпроводящий соленоид с магнитным полем ~ 8 Тл. Для запитки соленоида предусмотрены два токовода 11 ($I = 300$ а, $U = 24$ в), охлаждаемые парами гелия. Для уменьшения теплопритоков за счет излучения гелиевая емкость защищена многослойной экранно-вакуумной изоляцией. Поддержание высокого вакуума при эксплуатации осуществляется за счет адсорбента (активированный уголь), соприкасающегося с поверхностью гелиевой емкости. Кроме того, возможна постоянная откачка вакуумным насосом 10.

Экспериментальный канал представляет собой замкнутую полость, в верхней части которой находится конденсатор. Внутри канала установлен холодный вакуумный экран 8, организующий циркуляцию гелия.

Конденсатор выполнен в виде трубчатого аппарата с кипением гелия, подаваемого в межтрубное пространство от холодильной машины типа КГУ-500/4,5 12. Теплопередающая поверхность $0,9$ м² достаточна для снятия тепловой нагрузки 250 Вт на уровне температур $4,5$ К.

Низкие температуры облучаемого образца поддерживаются циркуляцией гелия в канале по принципу термосифона: гелий, охлаждая образец, вставку, оболочки канала в зоне облучения, нагревается, поступает в конденсатор, конденсируется или охлаждается и стекает вниз. Использование такой двухконтурной системы (I контур – экспериментальный канал, II контур – конденсатор и холодильная машина) позволяет избежать радиоактивации возможных примесей гелия в контуре холодильной машины и обеспечить оптимальные режимы охлаждения рабочей среды.

Перспективным режимом работы низкотемпературного канала является режим при давлениях вблизи фазового перехода жидкости в пар ($P = 2,27$ атм), где удельная теплоемкость при указанном давлении при приближении к температуре $5,2$ К и коэффициент теплопроводности имеют аномально высокие значения. Перспективным также является использование гелия при температуре ниже λ -точки, так как дает возможность улучшить условия теплосъема с облучаемых образцов за счет высокой теплопроводности He-II. Для этого в теплообменник, охлаждающий гелий в экспериментальном канале 6, предусмотрена подача сверхтекучего гелия от приставки-переохладителя 13. Схема охлаждения образцов гелия при температуре $\sim 1,6$ К будет рассмотрена ниже.

При разработке канала были выбраны следующие материалы:

- алюминиевый сплав АД1 для изготовления части НОК, которая подвергается облучению;
- нержавеющая сталь 12Х18Н10Т для изготовления всех узлов, вынесенных за пределы зоны облучения;
- медь МЗ для изготовления азотного экрана.

Герметичное соединение сплава АД1 и стали 12Х18Н10Т осуществляется сваркой прессованием (разработка НИКИЭТ). Проведенные испытания на герметичность опытных сталеалюминиевых переходников при температуре 4,2 К после тридцатикратного термоциклирования на уровне температур 77 К \approx 300 К дали величину натекания в пределах чувствительности течеискателя ПТИ-10 ($\sim 7 \cdot 10^{-13}$ м³ Па/с).

Радиационное тепловыделение в стенках канала при удельном радиационном тепловыделении в алюминии $q_v = 0,1$ Вт/г составляет ~ 25 Вт (суммарный вес оболочек ϕ 44x1 мм, ϕ 50x1 мм, ϕ 61x1 мм, находящихся в зоне облучения $l = 200$ мм, равен ~ 250 г). Теплопритоки за счет лучеиспускания и через остаточные газы составляют ~ 10 Вт, теплопритоки по тепловым мостам — ~ 5 Вт. Мощность конденсатора позволяет проводить при температурах 4,5 — 5,1 К облучения образцов, вес которых вместе с экспериментальной вставкой для внутривыпускных исследований составляет ~ 1000 г. Развитие поверхности конденсатора позволяет увеличить вес облучаемой установки, согласуя его с мощностью рефрижератора.

3. СХЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ №-II

Охлаждение экспериментального образца при температурах, меньших 2,17 К, можно осуществить как в режиме вынужденного движения He-II, так и в режиме внутренней конвекции. Для создания принудительной циркуляции целесообразно использовать термомеханический эффект. Схема низкотемпературного облучательного канала с принудительной циркуляцией He-II представлена на рис. 4. В верхней части облучательного канала встроены два теплообменника 4 и 8, охлаждающие поток He-II в полостях 9 и 5. Эти полости разделяет фонтан-насос, включающий в себя сверхщель 12, камеру 11 с нагревателем 6. Камера 11 имеет вакуумную изоляцию 7. Внутри трубок теплообменников 4 и 8 протекает He-II, получаемый в приставке к КГУ. Температура этого потока на входе в теплообменники равна 1,6 К. Фактически это минимальная температура He-II, которую можно реально получить в указанной приставке к КГУ. Величи-

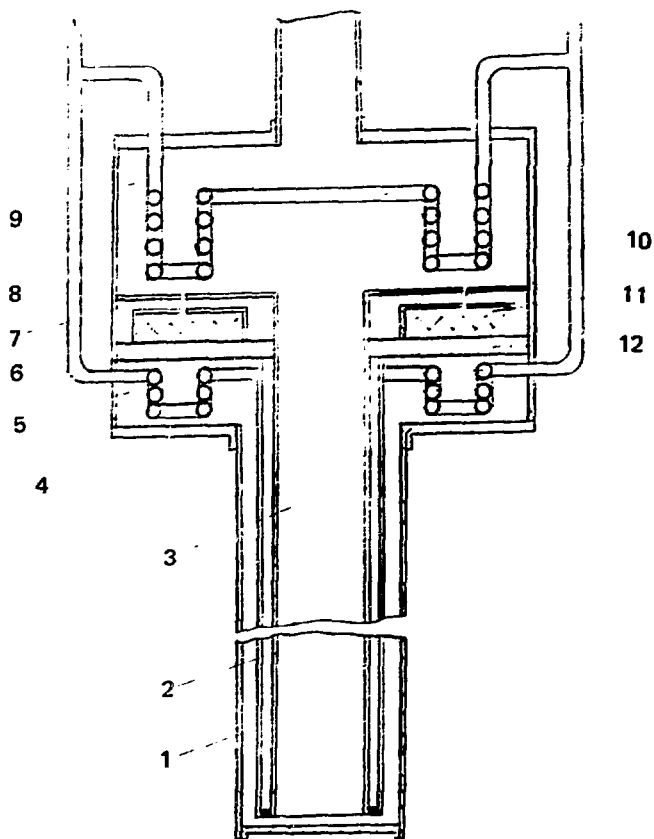


Рис. 4. Схема низкотемпературного облучательного канала с принудительной циркуляцией He-II: 1 — кольцевой канал; 2 — вакуумная изоляция; 3 — трубка — полость охлаждаемого гелия; 4, 8 — теплообменники; 5, 9 — полости с охлаждаемым гелием; 6 — нагреватель; 7 — вакуумная изоляция; 10 — канал, соединяющий камеру фонтана-насоса с полостью; 11 — камера фонтана-насоса; 12 — сверхщель

на температуры лимитируется производительностью вакуум-насосов. Температуры He-II в полостях 9 и 5 отличаются от температуры He-II на выходе из приставки на величину, определяемую сопротивлением Капицы. В рассматриваемом случае планируется поддерживать температуры He-II в полостях 9 и 5, равными 1,62 К. Температура и давление He-II в камере 11 фонтана-насоса выше, чем в полости 5. Если скорость сверхтекучей компоненты в каналах сверхщели 12 меньше критического зна-

чения, то параметры He-II в камере 11 и полости 5 определяются линией постоянного химического потенциала. Повышенное давление в камере 11 фонтана-насоса создает циркуляция He-II в облучательном канале. Поток He-II из камеры 11 по каналу 10 поступает в полость 9, где охлаждается до температуры, равной 1,62 К. Далее поток перемещается по трубке 3, в которой размещена облучаемая экспериментальная установка. Трубка 3 имеет вакуумную изоляцию 2. Далее поток движется по кольцевому каналу 1 и поступает в полость 5. Сверхтекучая компонента проникает через сверхщель в камеру 11 фонтана-насоса. Избыток нормальной компоненты в полости 5 компенсируется отводом тепла из нее на поверхности теплообменника 4. Максимальная скорость He-II, которую может развить такая конструкция, определяется из следующих соотношений:

$$[\rho V i - \rho S T V] F_{\text{сщ}} + Q = [\rho V i - \rho S T (V_n - V)] F_{\text{к}}; \quad (1)$$

$$\mu_2 = \mu_1; \quad (2)$$

$$P_2 - P_0 = \xi \frac{V^2}{2} \frac{L_{\text{к}}}{d_{\text{к}}}; \quad (3)$$

$$T_2 - T_0 = \frac{A \cdot \rho_n \rho^3}{S \rho_s^3} (V_n - V)^3 L_{\text{к}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность, V — скорость, i — энтальпия, S — удельная энтропия, T — температура, $F_{\text{сщ}}$ — суммарное сечение каналов в сверхщели 12, индекс n относится к нормальной компоненте, s — к сверхтекучей компоненте, Q — параметры He-II в полости 9, 1 — параметры He-II в полости 5, 2 — параметры He-II в камере 11; $F_{\text{к}}$, $L_{\text{к}}$, $d_{\text{к}}$ — сечение, длина и диаметр канала 10, Q — мощность нагревателя 6 в камере 11, μ — химический потенциал, P — давление, ξ — коэффициент гидравлического сопротивления, A — константа Гортера — Меллинка.

Уравнение (1) представляет собой баланс энергии, записанный для камеры фонтана-насоса. Произведение в левой части уравнения равно количеству тепла, которое вносит сверхтекучая компонента при перемещении ее через сверхщель. Оно имеет отрицательный знак. Произведение в правой части равно количеству тепла, которое выносит поток через канал 10. Оно всегда положительно. Уравнение (2) означает сохранение химического потенциала при движении сверхтекучей компоненты через сверхщель 12. Уравнение (3) связывает падение давления в канале 10 со скоростью потока He-II. Уравнение (4) — уравнение Гортера — Меллинка, связывающее падение температуры He-II с относительной скоростью нормальной компоненты.

Решение уравнений (1) – (4) показывает, что максимальная скорость потока He-II в трубке 3, которую можно получить в облучательном канале такой конструкции, равна 4 м/с. Эта скорость достигается при температуре He-II в камере 11 фонтана-насоса, равной 2,17 К. Однако при этом необходимо подвести большое количество тепла нагревателем фонтана-насоса. Это тепло должно сниматься теплообменниками 4 и 8.

Для теплообменника 4 оно равно 80 Вт, а для теплообменника 8 – 1400 Вт. Теплообменник 4 при этом дополнительно должен снимать тепло, выделенное в облучаемой экспериментальной установке. Разработка блока получения He-II такой производительности – сложная техническая задача. Поэтому в данной экспериментальной установке целесообразно работать на небольших скоростях потока, при которых обеспечивается снятие нагрузки с образца, а нагрузка на приставку к КГУ возрастает незначительно.

Как показал расчет, оптимальной скоростью потока He-II в трубке для разрабатываемой установки является 0,2 м/с. При этом дополнительная нагрузка для теплообменника 4 составит 10 Вт, а для теплообменника 8 – 100 Вт.

В режиме внутренней конвекции тепло от экспериментального элемента будет отводиться к теплообменникам 4 и 8 по трубке 3 и кольцевому каналу 1. Если расстояние между экспериментальным образцом и теплообменниками составит 1500 мм, то максимальная мощность, которую можно передать без образования паровой фазы в канале, составит 22,5 Вт. Для того чтобы передать 100 Вт, диаметр облучательного канала должен быть увеличен до 100 мм. Температура поверхности образца при этом будет равна приблизительно 3 К (если считать, что поверхность исследуемого образца равна 3 см²). Анализ полученных результатов показывает, что наиболее выгоден режим охлаждения с вынужденной конвекцией при небольшой скорости потока, так как в этом режиме можно получить более низкие температуры поверхности образца. Однако холодопроизводительность приставки к КГУ при этом должна быть увеличена в 2 – 3 раза.

Принципиальная схема блока получения He-II представлена на рис. 5. В блок для получения He-II гелиевой установки поступают два потока He-I, имеющие следующие параметры: $P = 1,5$ атм, $T = 4,5$ К. Один поток (основной) в дальнейшем будет переведен в сверхтекучее состояние и направлен в теплообменники низкотемпературного облучательного канала. Другой поток (дополнительный) служит для охлаждения основного потока, а также для снятия тепловиточков по тепловым мостам и защит-

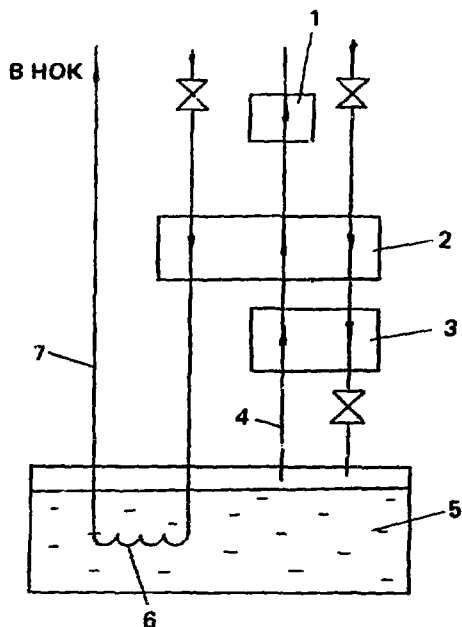


Рис. 5. Схема блока получения He-II: 1, 2, 3 — теплообменники; 4 — линия обратного потока; 5 — ванна с гелием; 6 — змеевик; 7 — переливной трубопровод

ным экранам. Дополнительный поток последовательно проходит теплообменники 2 и 3, где он охлаждается обратным потоком газообразного гелия. В теплообменнике 3 охлаждение происходит до температуры ниже λ -линии. После него дополнительный поток He-II направляется в дроссель. В результате дросселирования образуется двухфазный поток: насыщенный сверхтекучий гелий и пар. Пар отводится в линию 4 обратного потока, а жидкость пополняет запас He-II в ванне 5.

Прямой поток He-I поступает в теплообменник 2, а затем в змеевик 6, расположенный в ванне 5. В змеевике 6 прямой поток гелия переходит в сверхтекучее состояние и затем по переливному трубопроводу 7 поступает в теплообменники низкотемпературного облучательного канала. Тепло в змеевике 6 отводится за счет теплоты испарения He-II, находящегося в ванне 5. Образующийся пар поступает в линию 4 обратного потока. Обратный поток откачивается через теплообменники 1, 2, 3 вакуумным насосом. Теплообменник 1 служит для охлаждения тепловых мостов и защитных экранов. Эффективность теплообменников 3 и 2 определяет температуру He-II перед дросселем и, следовательно, паросодержание потока после него. Чем ниже температура He-II перед дросселем, тем выше эффективность установки. Однако выполнить такие теплообменники с высоким КПД сложно из-за низкого располагаемого перепада давления по газовому тракту и, следовательно, невозможности интенсифицировать

процесс теплообмена за счет увеличения скорости потока паров. В "Криогенмаш" был изготовлен и испытан блок аналогичной конструкции, но холодопроизводительностью 50 Вт. В этой установке теплообменники 3 и 2 были шнекового типа. Ребра шнека выполнены из меди. Дополнительный и основной потоки перемещались по трубкам, припаянным с наружной стороны к ребрам. Испытания установки показали, что такая конструкция теплообменников удачна: перепад давления по тракту пара на теплообменнике 3 составил $\sim 113,32$ Па, а на теплообменнике 2 — $\sim 31,99$ Па.

4. КОНДЕНСАТОР

Конструкция конденсатора представлена на рис. 6. Аппарат выполнен из медных трубок 3 диаметром 8x1 мм и длиной $l = 300$ мм. Они размещены в трубных досках 2 по сторонам шестиугольника с шагом 12 мм и крепятся с помощью припоя. Трубные доски, корпус 4, верхняя 1 и нижняя 5 крышки изготавливаются из нержавеющей стали. Гелий, подаваемый от холодильной машины, кипит в межтрубном пространстве. Конденсация и охлаждение нагретого в зоне облучения гелия осуществляется в трубках.

Определим теплопередающую поверхность. Тепловая нагрузка конденсатора $Q = 250$ Вт. Средняя температура кипения гелия $T_{\text{кип}} = 4,2$ К при давлении $P_{\text{кип}} = 0,1$ МПа. Конденсация гелия происходит при давлении $P_{\text{кон}} = 0,23$ МПа и температуре $T_{\text{кон}} = 5,2$ К.

Основные физические параметры потоков:

	Плотность жидкости $\rho_{\text{ж}}, \text{кг/м}^3$	Плотность пара $\rho_{\text{п}}, \text{кг/м}^3$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт/ (м.К)}$	Коэффициент динамической вязкости $\eta, \text{н.с./м}^2$	Теплота испарения $g, \text{Дж/кг}$	Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma, \text{н/м}$	Теплоемкость $c_p, \text{Дж/ (кг.К)}$
Кипящий гелий	125	16,89	0,0196	$31,7 \cdot 10^{-7}$	$20,8 \cdot 10^3$	$0,09 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^3$
Конденсирующийся гелий	119	57	0,0208	$31 \cdot 10^{-7}$	$20 \cdot 10^3$		

Средний температурный напор $\Delta T = 1$ К.

Определяющая температура конденсации $T = T_{\text{кип}} + \Delta T/2 = 4,7$ К.

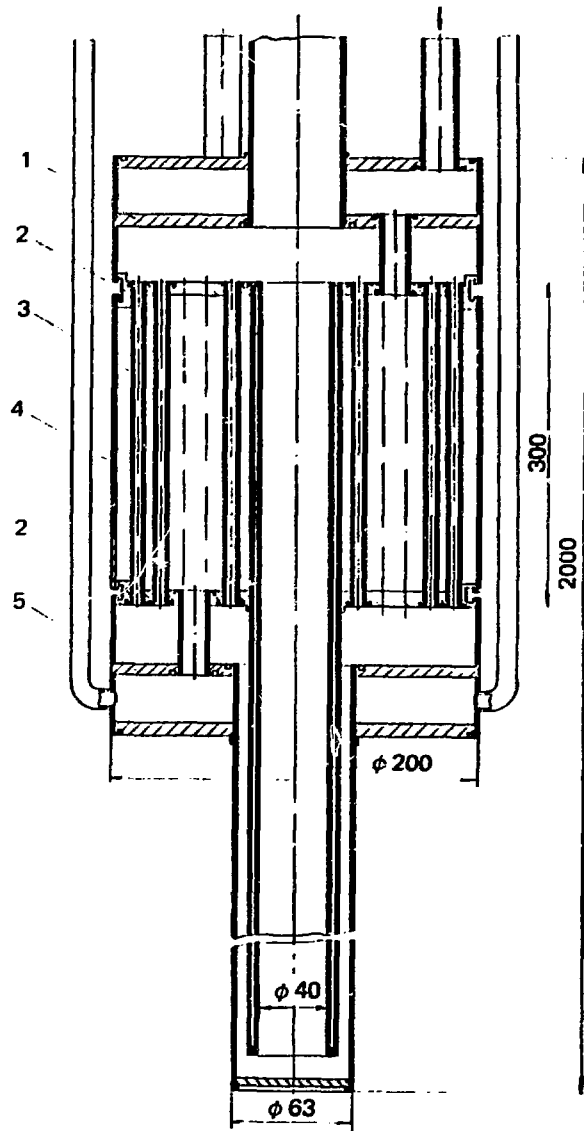


Рис. 6. Конденсатор низкотемпературного облучательного канала: 1 – верхняя крышка; 2 – трубная доска; 3 – трубки; 4 – корпус; 5 – нижняя крышка

Коэффициент теплоотдачи при кипении определяем по формуле Кутателадзе [9]

$$Nu = 7 \cdot 10^{-4} \underline{Pr}^{-0,35} (\underline{Pe} \cdot Kp)^{0,7},$$

где критерий

$$Kp = \frac{P}{\sqrt{\sigma g(\rho_{ж} - \rho_{п})}},$$

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}},$$

$$Pe = q \frac{c_p \rho_{ж}}{\rho_{п} \lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}}.$$

$$\alpha_{кип} = 7 \cdot 10^{-4} \lambda \sqrt{\frac{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}{\sigma}} \left(\frac{c_p \eta}{\lambda}\right)^{-0,35} \left[\frac{c_p \rho_{ж} P}{\rho_{п} \lambda g(\rho_{ж} - \rho_{п})}\right]^{0,7} q_{кип}^{0,7} =$$

$$= 28,3 q_{кип}^{0,7}.$$

Удельный тепловой поток

$$q_{кип} = \alpha_{кип} \Delta T_{кип} = 6,83 \cdot 10^4 \Delta T_{кип}^{3,33} \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны конденсации определяем по формуле Нуссельта [9]:

$$\alpha_{кон} = 0,943 \sqrt{\frac{\gamma \lambda^3 g \rho_{ж} (\rho_{ж} - \rho_{п})}{\eta \cdot l}} \Delta T_{кон}^{-0,25} = 323 \Delta T_{кон}^{-0,25}.$$

Удельный тепловой поток

$$q_{кон} = \alpha_{кон} \Delta T_{кон} = 323 \Delta T_{кон}^{0,75} \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

Действительную удельную тепловую нагрузку на стороне кипения находим графически, исходя из условия равенства тепловой нагрузки со стороны конденсирующегося гелия I контура и испоряющегося гелия II контура, для чего строим кривые $q_{кип} = f(\Delta T_{кип})$ и $q_{кон} = \varphi(\Delta T_{кон})$ (рис. 7, [10]). Графическое построение дает следующие значения: $q_{кип} = 278 \text{ Вт/м}^2$, $\Delta T_{кон} = 0,81 \text{ К}$, $\Delta T_{кип} = 0,19 \text{ К}$. Необходимая теплообменная поверхность

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{250}{278} = 0,9 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Число трубок в конденсаторе:

$$n = \frac{F}{\pi d_n l} = \frac{0,9}{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3} = 120 \text{ (шт.)}.$$

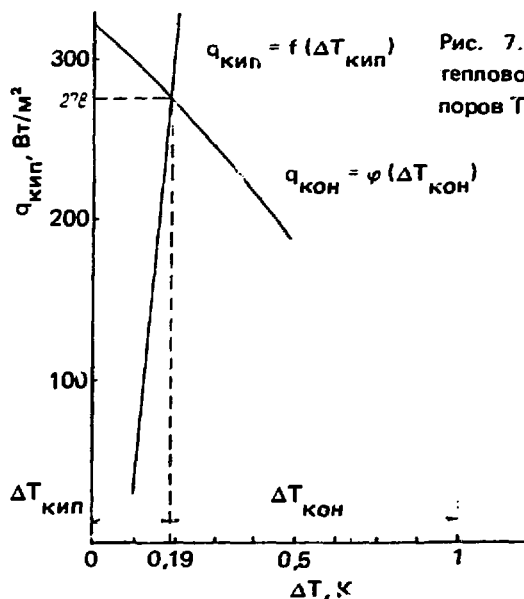


Рис. 7. Графическое определение плотности гелиевого потока $q_{\text{кип}}$ и температурных напоров $T_{\text{кип}}$ и $T_{\text{кон}}$

5. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Опыт в изучении радиационных свойств веществ, накопленный к настоящему времени, свидетельствует о необходимости изучения физико-механических и электромагнитных свойств материалов непосредственно в процессе облучения в условиях, близких к тем, в которых исследуемый материал будет использоваться на практике. Для исследования свойств сверхпроводящих и конструкционных материалов при сопряженном воздействии облучения, токовых, механических и магнитных нагрузок может быть использовано нагружающее устройство, аналогичное [11]. Принципиальная схема показана на рис. 8. Обеспечение механической нагрузки на образец 6, изготовленный из ниобий-оловянной проволоки $\phi 1 \div 2$ мм, $l = 50$ мм, осуществляется с помощью сильфонного узла 4, в котором поддувом гелия из баллона создается давление до 1 МПа, позволяющее иметь на образце растягивающее усилие 40 кгс. Узел находится вне зоны облучения. Образец одним концом закрепляется в неподвижном корпусе вставки 7, а другим — в штоке 3, который может свободно перемещаться при растяжении сильфона. Установка обеспечивает плавное регулируемое нагружение образцов. Неподвижный корпус вставки связан с системой пневмопри-

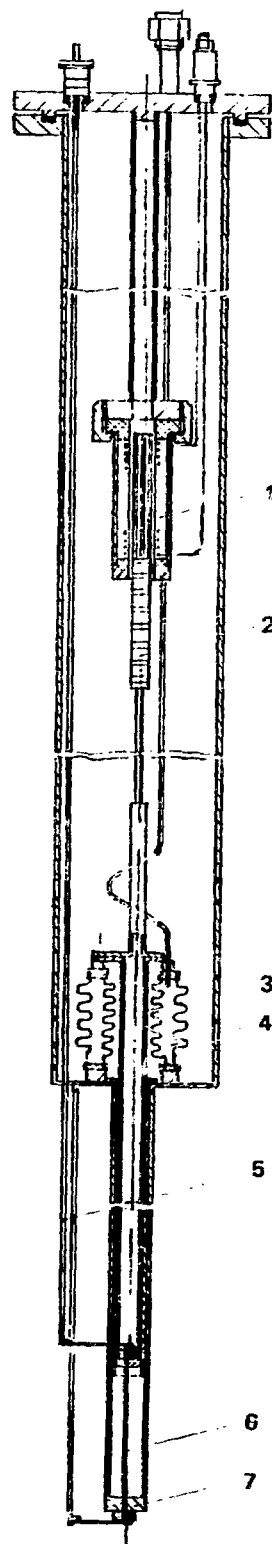
вода, обеспечивающей перемещение образца без снятия механической нагрузки из зоны облучения в зону сверхпроводящего соленоида НОК, где снимаются вольт-амперные характеристики сверхпроводника. Величина удлинения образца определяется высокочастотным датчиком перемещений 1 специальной разработки, плунжер 2 которого связан с подвижным штоком вставки. Нагрузка на образец (давление в сильфоне) определяется устанавливаемыми в системе наддува датчиками давления типа "Сапфир". В процессе испытаний к образцу подводится ток по двум тоководам 5.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемый НОК позволяет проводить исследования сверхпроводящих токнесущих элементов и конструкционных материалов при облучении в ИБН ($\Phi_{\text{быстр.нейтр.}} \approx 8,5 \cdot 10^{12}$ нейтр./ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$), обеспечивая при помощи специального устройства управляемую деформируемость образцов, нахождение их под током и перенос этих образцов без отогрева в магнитное поле для исследования вольт-амперных характеристик.

Охлаждение образцов осуществляется гелием, охлажденным в конденсаторе НОК. Максимальная тепловая мощность канала — 250 Вт на уровне температур $4,5 \div 5$ К — позволяет производить облучение образцов, вес которых вместе с экспериментальным устройством составляет ~ 1000 г.

Рис. 8. Схема устройства для испытания образцов: 1 — датчик перемещений; 2 — плунжер; 3 — шток; 4 — сильфонный нагрузочный узел; 5 — тоководы; 6 — образец; 7 — неподвижный корпус



Охлаждение образцов в НОК гелием при температуре 1,6 К может осуществляться с использованием специальной приставки к КГУ для получения He-II.

Технические характеристики НОК:

Габаритные размеры (ФхН), мм	φ 540x2595
Диаметр экспериментального канала, мм	40
Тепловая нагрузка, снимаемая конденсатором, Вт	250
Расход жидкого азота, л/ч.	2
Расход жидкого гелия, л/ч.	150
Температура испытания образцов, К	1,6 ÷ 5,2
Давление в экспериментальном канале, МПа	0,1 ÷ 0,3
Магнитное поле соленоида, Тл	8

Список литературы

1. Гончаров В.В. Исследовательские реакторы. М.: Наука, 1986.
2. Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение. М.: Атомиздат, 1970.
3. Пархоменко В.Д. и др.//Атомная энергия. 1974. Т. 36. С. 62 – 64.
4. Позняк В.Е. и др.//Хим. и нефт. машиностроение. 1980. № 3. С. 8 – 9.
5. Вадачкория Л.А. и др.//Атомная энергия. 1969. Т. 26. Вып. 3. С. 288 – 290.
6. Coltman R.R., Blewitt T.H., Noggle T.S. Rev. Scient. Instr., 1957, 28 (№ 5). P. 375.
7. Weil L. Cryog, 1961. V. 1. P. 129.
8. Алексеев Н.И. и др. Импульсный источник медленных нейтронов электронного ускорителя "Факел"/Н.И. Алексеев, Г.И. Кикнадзе, О.Е. Коляскин, И.П. Садиков, В.А. Тарабанько, Ю.В. Чушкин: Препринт ИАЭ № 4512/14, М., 1987.
9. Справочник по физико-техническим основам криогеники/Под ред. М.П. Малкова. М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Григорьев В.А., Крохин Ю.И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники. М.: Энергоиздат, 1982.
11. Наскидашвили И.А. и др.//Атомная энергия. 1970. Т. 28. Вып. 1. С. 55 – 58.

Редактор Т.И. Титкова
Технический редактор С.К. Сведлова
Корректор Г.А. Матвеева

Подписано в печать 12.07.88. Т-12548. Формат 60х90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,25. Учизд. л. 1,2
Тираж 174. Заказ 349. Цена 20 коп. Индекс 3624

Подготовлено к изданию и отпечатано
в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
123182, Москва, пл. Академика Курчатова



Препринт ИАЭ-4679/11. М., 1988