

УДК 538.945 +
621.384.668.83

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ РАДИАЦИОННО-ПРОЗРАЧНЫЙ МАГНИТ УСТАНОВКИ АМПИР

*А.А.Картамышев¹, Е.В.Архипов, В.Д.Бартенев, К.В.Безруков²,
М.Н.Бочаров², В.И.Дацков, В.Е.Кейлин¹, И.А.Ковалев¹, И.В.Наумов¹,
О.О.Патаракин¹, В.Д.Рябов¹, А.И.Сковородкин², Г.Ю.Цфасман²*

Дано описание уникального сверхпроводящего магнита спектрометра АМПИР, создаваемого в настоящее время для проведения исследований в области элементарных частиц промежуточных энергий. Основные параметры магнита: внутренний диаметр — 1,2 м, длина обмотки — 1,8 м, индукция ~ 1,2 Тл, ток — 2,8 кА. Рассмотрена конструкция отдельных узлов магнита и криогенной системы, даны результаты предварительных испытаний. Обсуждаются схемы захлаживания и контроля. Дан расчет общей радиационной толщины криосоленоида (0,42 рад. длины).

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

The AMPIR Thin Superconducting Magnet

A.A.Kartamyshev et al.

The description of the superconducting magnet of the AMPIR spectrometer has been done. This spectrometer is under manufacturing now, it will be used for the investigation of the medium-energy particle physics. The magnet basic parameters are: inner diameter is 1.2 m, the length of the coil is 1.8 m, the magnetic field is 1.2 Tl, the nominal operating current is 2.8 kA. The description of the construction of the magnet and cryogenic system has been given in detail as the preliminary test results. The refrigeration and control systems are under discussion. The calculation of the radiation thickness of the magnet was shown, its value is 0.42 radiation length.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

1. Введение

За последние годы в изучении физики промежуточных энергий (область энергий налетающих частиц от нескольких МэВ до нескольких ГэВ) сделан значительный шаг

¹РНЦ «Курчатовский институт», Москва

²АО КРИОГЕНМАШ

вперед. Наличие интенсивных пучков мезонных фабрик и других сильноточных ускорителей позволяет планировать качественно новые эксперименты по исследованию редких ядерных процессов. Важность таких исследований определяется необходимостью дальнейшего продвижения в понимании структуры ядра и ядерных сил как в рамках традиционных мезонных теорий, так и в рамках квантовой хромодинамики. Экспериментальное изучение кварковых, мезонных, Δ -изобарных и других степеней свободы ядра требует сейчас специальных условий — высокой интенсивности используемых пучков и хорошей разрешающей способности детектора для всех сортов частиц в полном телесном угле регистрации.

Для реализации физической программы по исследованию редких и многочастичных процессов в мезон-ядерных и мезон-адронных процессах на Московской мезонной фабрике ИЯИ (г.Троицк) было предложено создать универсальный спектрометр АМПИР [1,2]. Спектрометр должен обладать высоким быстродействием, способностью одновременной регистрации и идентификации нескольких (до 10) заряженных и нейтральных частиц в большом (близком к 4π) телесном угле, с импульсным разрешением $\Delta p/p \approx 0,02$ для заряженных частиц до 1000 МэВ/с и разрешением $\Delta E/E \approx 0,05$ для γ -квантов и π^0 -мезонов.

Основой спектрометра АМПИР служит сверхпроводящий радиационно-прозрачный магнит с железным магнитопроводом, создающий в рабочем объеме установки магнитное поле 1 Тл. В настоящей работе дано описание конструкции, результатов тестовых испытаний и состояния дел по изготовлению такого магнита.

2. Выбор параметров магнита

Выбор конструкции и параметров создаваемого магнита диктовался предложенными физическими задачами. Моделирование физических процессов показало, что импульсы вторичных частиц лежат в основном в диапазоне $50 \div 300$ МэВ/с. Центральным детектором установки является цилиндрическая дрейфовая камера [3,4]. Для дрейфовых камер разрешение по импульсу для вторичных частиц можно записать

$$\Delta p/p \sim \frac{p_t}{BL}, \quad (1)$$

где p_t — поперечный импульс частицы, B — величина магнитного поля, а L — длина пролета частицы в камере.

Из выражения (1) видно, что для хорошего разрешения необходимо иметь большое магнитное поле в достаточно большом объеме. Геометрические размеры магнита и величина магнитного поля определяются заданной точностью определения импульсов вторичных частиц (количество измеряемых точек на части трека, проходящего в рабочем объеме центрального детектора — дрейфовой камере) и возможностью одновременного измерения до $8+10$ вторичных треков. Расчеты показали, что разрешение не хуже 2% может быть получено при использовании дрейфовой камеры диаметром 1 м в магнитном поле 1 Тл [4] (для ряда экспериментов достаточно поля 0,5 Тл, но планировалось создать универсальный спектрометр). Конечно, для достижения указан-

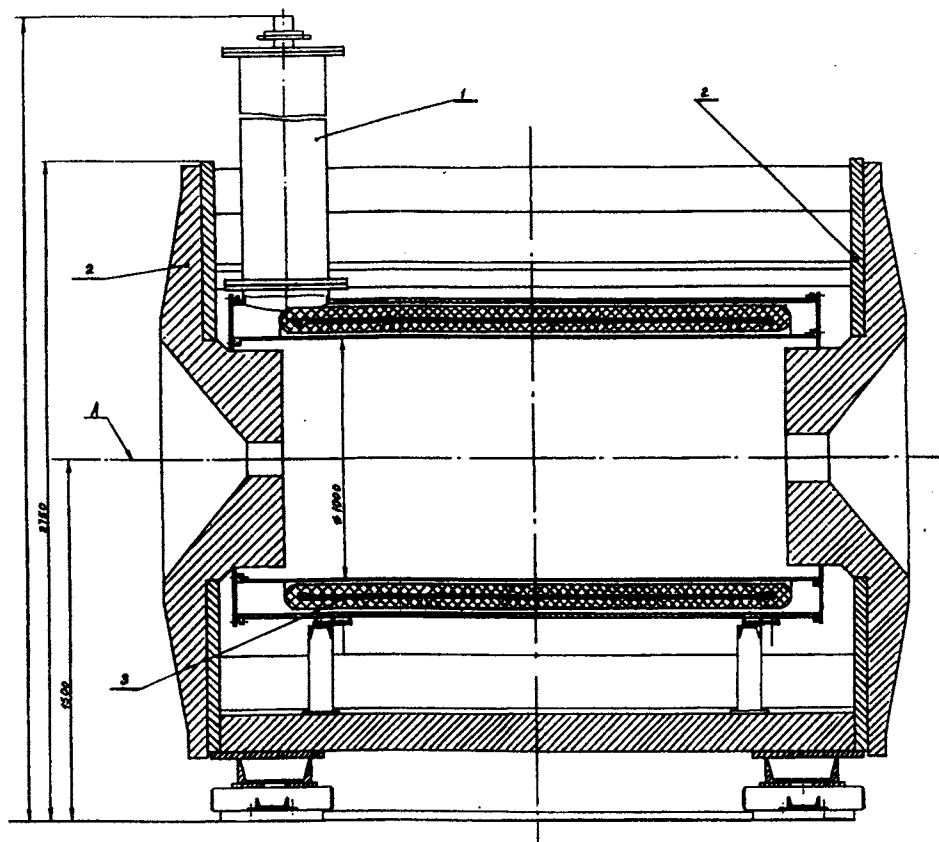


Рис.1. Чертеж сверхпроводящего магнита установки АМПИР. 1 — блок токовводов; 2 — железный магнитопровод; 3 — сверхпроводящая бескаркасная обмотка; А — ось симметрии магнита, вдоль которой движется первичный пучок частиц

ного разрешения надо иметь достаточно высокую (не хуже 3%) однородность магнитного поля. Задача регистрации нейтральных частиц делает необходимым изготовить радиационно-прозрачный соленоид и разместить детектор нейтральных частиц (НД) между магнитным ярмом и соленоидом. Нейтральные частицы на своем пути от места рождения в мишени до блоков НД должны пройти минимальное количество вещества, то есть на соленоид с криостатом накладывается условие «прозрачности». Желательно также, чтобы установка могла работать на различных пучках различных ускорителей, что требует определенных ограничений габаритов и веса магнита. Немаловажной является величина потребляемых ресурсов — электроэнергии, жидкого гелия, азота и др.

В стремлении удовлетворить всем этим условиям был разработан проект магнита со сверхпроводящей обмоткой и косвенным типом охлаждения (рис.1). Подробное описание основных узлов магнита приведено в следующих разделах.

3. Токонесущий элемент

Важнейшей частью сверхпроводящего соленоида, от которой в значительной степени зависит успех его работы, является токонесущий сверхпроводящий элемент. Во ВНИИКП (Подольск) по нашему заказу был разработан и изготовлен специальный ниобий-титановый сверхпроводящий провод, стабилизированный алюминием, марки ПСНТАБ-Т-8х0,7 [5]. Была изготовлена плоская конструкция, транспонированная из 8 металлокомпозиционных проволок марки СКНТ-0,7-210-0,5. Затем сверхпроводящая жила была впаяна легкоплавким припоем ПОССу-30-2 в канавку прямоугольного сечения в средней части биметаллической алюмомедной шины сечением $4 \times (7,0 + 7,1) \text{ мм}^2$ по ее широкой стороне (рис.2). В алюмомедной шине был использован алюминий марки А5Е. Отношение удельных сопротивлений матрицы при комнатной ($T = 300 \text{ К}$) и гелиевой ($T = 4,2 + 4,5 \text{ К}$) температурах $\rho_{\text{к}}/\rho_{\text{не}} \approx 37$. Для изоляции провода применялась оплетка из хлопчатобумажной пряжи с плотностью $\sim 60\%$. Толщина изоляционного слоя на одну сторону — около 0,2 мм.

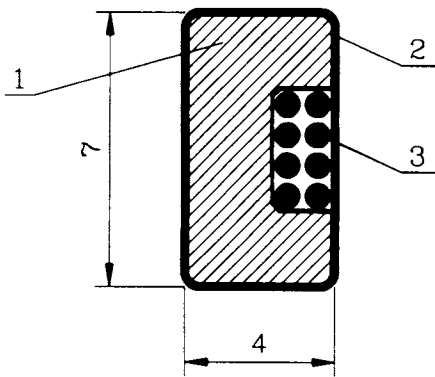


Рис.2. Токонесущий элемент в разрезе. 1 — алюминий марки А5Е; 2 — медная оболочка, покрытая припоем ПОССу-30-2; 3 — прямоугольная канавка, в которую впаяна скрутка из 8 сверхпроводящих проволок диаметром 0,7 мм

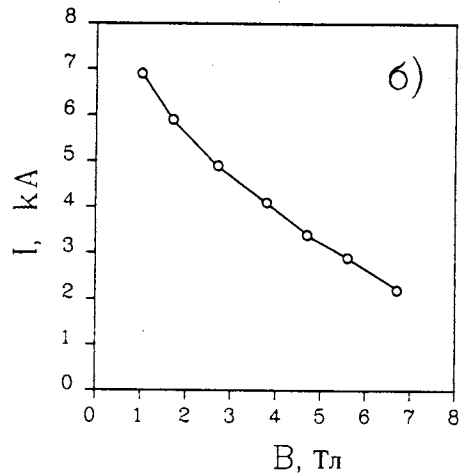
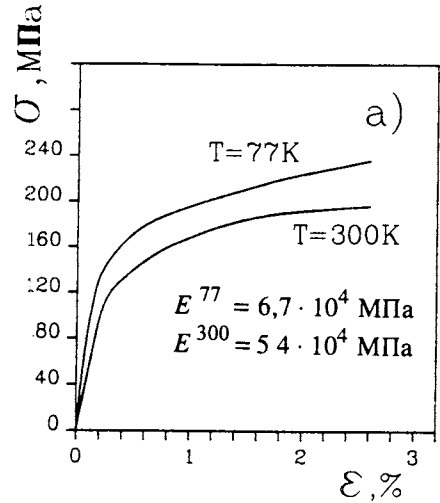


Рис.3. Результаты испытаний коротких образцов сверхпроводящей шины $4 \times 7 \text{ мм}^2$: а) на растяжение при $T = 77 \text{ К}$ и $T = 300 \text{ К}$; б) критическая кривая ток — магнитное поле

В РНЦ «Курчатовский институт» были проведены испытания коротких образцов шины $4 \times 7 \text{ мм}^2$ на растяжение при $T = 77 \text{ К}$ и $T = 300 \text{ К}$ (рис.3а). Видно, что ожидаемая нагрузка находится в области упругих деформаций. На рис.3б показана кривая зависимости критического тока от величины приложенного магнитного поля. В изготавливаемом сверхпроводящем магните при номинальных токе (2,8 кА) и магнитном поле (1 Тл) токнесущая шина будет находиться под механической нагрузкой $\sigma \approx 7 \text{ кг/мм}^2$. По данным испытаний коротких образцов видно, что шина ПСНТАБ-Т-8х0,7 вполне может быть использована при намотке соленоида основного магнита.

4. Макет сверхпроводящего соленоида

Для проверки правильности выбранных технических решений и работоспособности всех элементов большого сверхпроводящего соленоида был изготовлен макет соленоида размерами в 1/3 натуральной величины. Сверхпроводящая шина ПСНТАБ-Т-8х0,7 с хлопчатобумажной изоляцией была намотана на ребро в двухслойный бескаркасный соленоид со следующими размерами: внутренний диаметр — 360 мм, внешний диаметр — 388 мм, длина обмотки — 595 мм и количество витков в двух слоях — 252. К внешней и внутренней сторонам обмотки приклеивались по 4 алюминиевых трубки $12 \times 1 \text{ мм}$ (внутренний диаметр 10 мм). Обмотка пропитывалась клеем КРИОСИЛ (на эпоксидной основе с нитридом бора в качестве наполнителя). Охлаждающие трубки также приклеены к обмотке КРИОСИЛом. Было проведено многократное термоциклирование в жидком азоте и термоциклирование в режиме косвенного охлаждения от комнатной до гелиевой температур (5 раз) с целью проверки на механическую прочность. Визуально механических повреждений в склейке обмотки и трубок не было обнаружено.

Для проверки корректности расчетов косвенного криостатирования и отработки методики работы были проведены токовые испытания макета соленоида. В первом варианте испытания проводились в режиме косвенного охлаждения до величины тока $I = 1300 \text{ А}$. На фото рисунка 4 показан макет соленоида с охлаждающим криостатом. Расстояние между

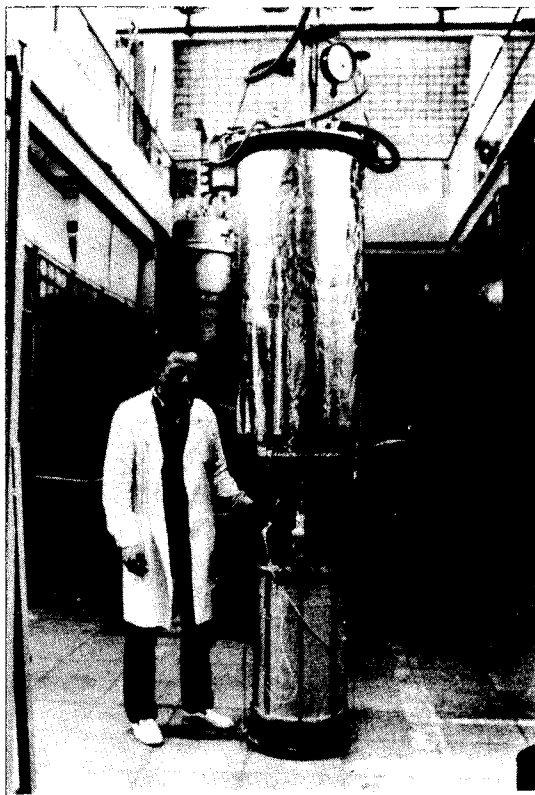


Рис.4. Макет сверхпроводящего соленоида: внешний вид соленоида с рабочим криостатом

охлаждающими трубками по обмотке $28 + 30$ см оказалось достаточным для захлаживания обмотки до гелиевой температуры и достижения сверхпроводящего режима при расходе жидкого гелия около $0,6$ г/с.

Следующие испытания проводились в погружном варианте, т.е. при помещении соленоида в объем с жидким гелием. Это дало возможность значительно увеличить магнитное поле и изучить поведение макета при больших механических нагрузках. Были проведены испытания:

а) В собственном магнитном поле. При $I = 5150$ А магнитная система перешла в нормальное состояние. Поле на обмотке — $2,4$ Тл, механическое напряжение в шине $\sigma = 8$ кг/мм². Ток перехода в нормальное состояние соответствует току перехода короткого образца (см. рис.3).

б) Дополнительно к собственному полю соленоида прикладывалось внешнее поле $B = 3$ Тл. Ток перехода $I = 3060$ А (собственное поле $\sim 1,4$ Тл). Общее поле $3 + 1,4 = 4,4$ Тл. Механическое напряжение в шине — $8,8$ кг/мм². Ток перехода в нормальное состояние также соответствует току перехода короткого образца.

Таким образом, в результате испытаний макета соленоида установлено:

1) намотка СП-шины на ребро на диаметр 360 мм и проклейка клеем КРИОСИЛ не изменяют электромагнитных и механических свойств сверхпроводящего токонесящего элемента по сравнению с короткими образцами;

2) выбранное расстояние между охлаждающими трубками по обмотке около 30 см оказалось достаточным для захлаживания двух слоев сверхпроводящего токонесящего элемента до гелиевой температуры и перевода ее в сверхпроводящее состояние;

3) многократное термоциклирование не выявило каких-либо механических повреждений;

4) сверхпроводящий токонесящий элемент выдерживает механические напряжения, превышающие расчетные для рабочего режима.

5. Сверхпроводящий соленоид спектрометра АМПИР

На основании проведенных расчетов и испытаний макетов в РНЦ «Курчатовский институт» совместно с АО КРИОГЕНМАШ был сконструирован магнит, удовлетворяющий всем вышеуказанным требованиям физического эксперимента. Основными узлами магнита являются: сверхпроводящая обмотка, блок тоководов, криостат, магнитопровод.

5.1. *Катушка сверхпроводящего соленоида.* Для намотки сверхпроводящей катушки соленоида в ИСФТТ РНЦ «Курчатовский институт» создан специализированный участок, позволяющий производить намотку больших соленоидов. Сверхпроводящий соленоид наматывался сверхпроводящим токонесящим элементом (СП-шиной) на ребро в виде цилиндрической двухслойной обмотки (417 витков в слое) со средним диаметром 1165 мм и длиной 1800 мм (рис.5). Обмотка приклеивалась эпоксидным клеем КРИОСИЛ следующего состава: смола СЭДМ-3 — 1 весовая часть, отвердитель Л-20 — $0,5$ весовой части, наполнитель из порошкообразного нитрида бора — $0,75$ весовой части. Вес катушки — 450 кг, самоиндукция — $0,4$ Гн, толщина катушки — 16 мм, или $0,29$ радиационной длины.

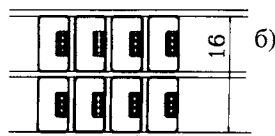
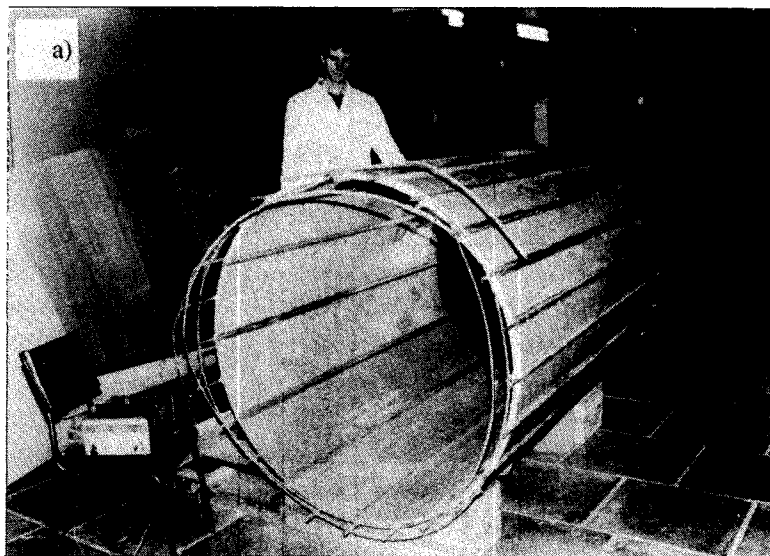


Рис.5. Сверхпроводящий соленоид установки АМПИР: а) внешний вид катушки соленоида; б) двухслойная обмотка в разрезе: зазоры между витками ($\sim 0,4$ мм) заполнены хлопчатобумажной изоляцией, пропитанной КРИОСИЛом

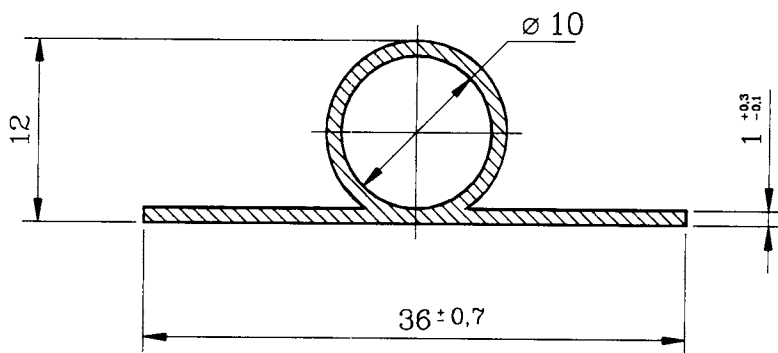


Рис.6. Охлаждающие трубки гелиевого контура специального профиля (профиль прессованный ПС 890-131, материал АМГ-2)

Для охлаждения обмотки применен метод косвенного криостатирования. Парожидкостная смесь гелия при температуре $T = 4,2 \div 4,5$ К должна прогоняться через приклеенные вдоль оси 12 алюминиевых трубок специального профиля (рис.6) внутри обмотки и 24 таких же трубки с внешней стороны обмотки. Подобный профиль был выбран для увеличения теплоконтакта хладагента с охлаждаемой катушкой. Азотное охлаждение производится жидким азотом, протекающим через алюминиевые трубки азотного экрана из азотного танка.

Для уменьшения теплопритоков к соленоиду от внешней среды используется суперизоляция СВТИ (см. раздел 5.3) между комнатной и азотной температурами и меж-

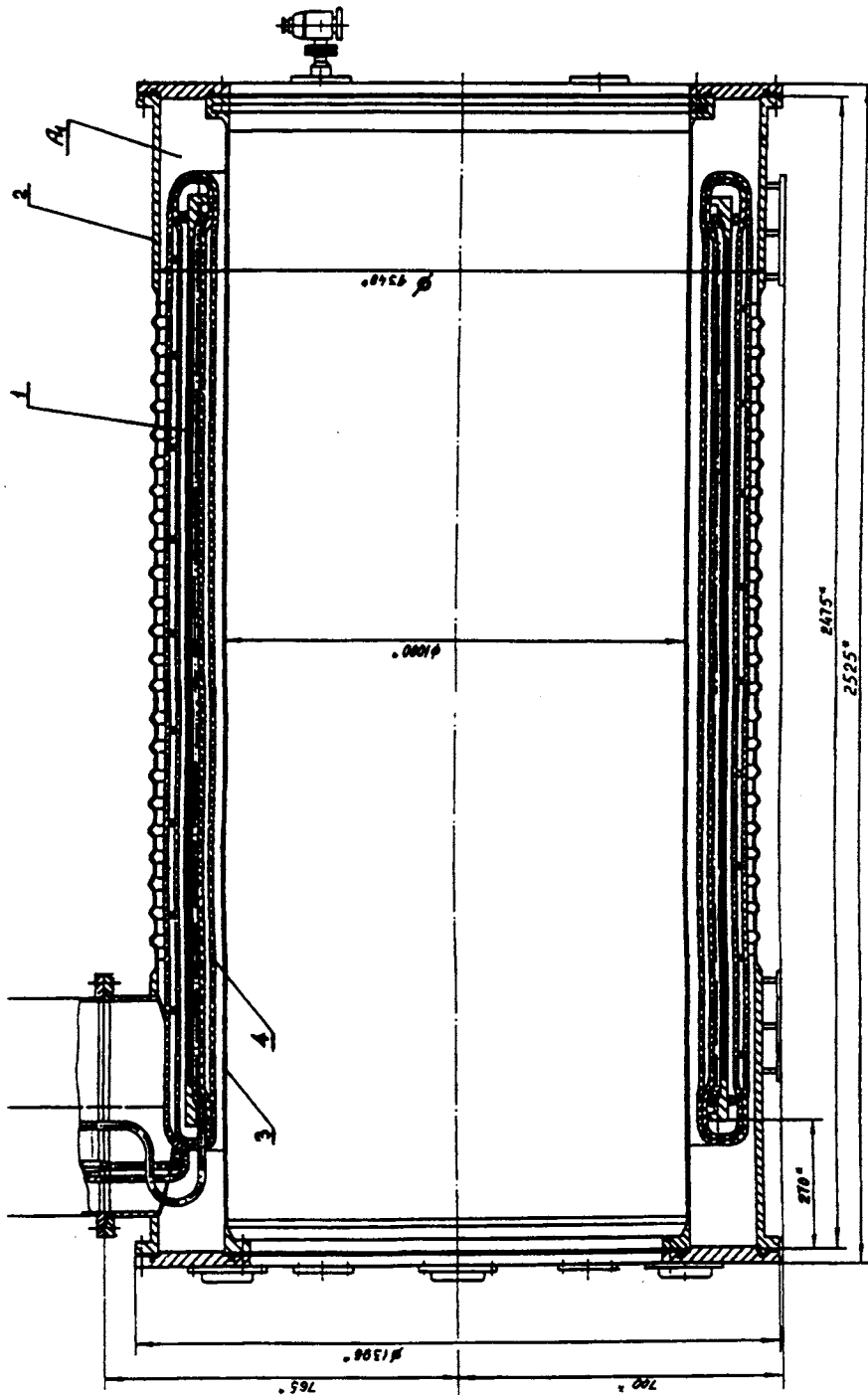


Рис.7а. Схема криостата. Общий вид криосоленоида. 1 — двухслойная сверхпроводящая обмотка, 2 — внешняя гофрированная обмотка, 3 — внутренняя обмотка, 4 — маты СВТИ

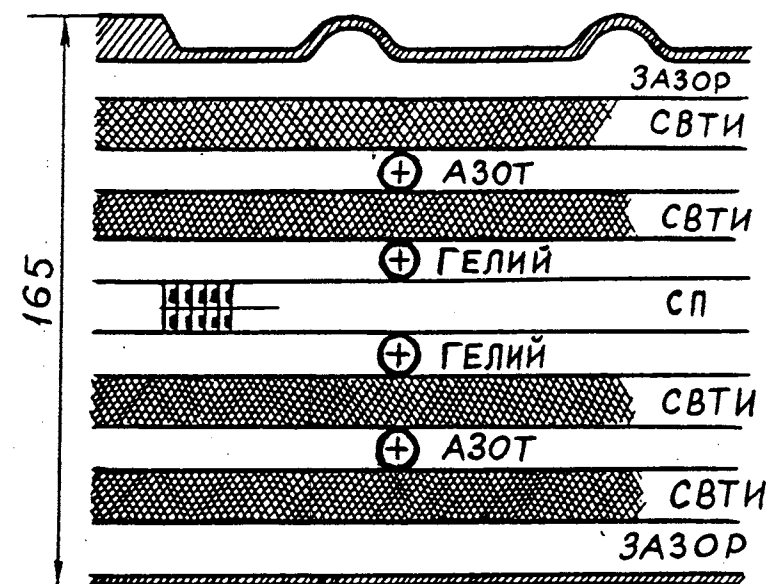


Рис.76. Схема криостата. Криосоленоид в разрезе, СВТИ — маты суперизоляции, СП — сверхпроводящая обмотка, АЗОТ, ГЕЛИЙ — системы охлаждающих трубок для жидких азота и гелия

ду азотной и гелиевой температурами (рис.76). Применение такой суперизоляции позволяет резко (в 3—4 раза) понизить теплопритоки. Расчеты показывают, что сверхпроводящий провод в рабочем состоянии в самом теплом месте должен иметь температуру, не превышающую $T = 4,7$ К.

5.2. *Криостат.* Корпус криостата сделан из алюминиевых сплавов с внешней гофрированной обечайкой из листа $\delta = 4$ мм и внутренней обечайкой из листа $\delta = 3$ мм (рис.7а). Выбор толщины и материалов — результат компромисса между требованиями прочности и стремлением минимизировать количество вещества (требование радиационной прозрачности). Криостат имеет размеры: длина — 2525 мм, внутренний диаметр — 1000 мм, внешний диаметр — 1396 мм. СП-соленоид подвешен внутри корпуса криостата на специальных стеклотекстолитовых растяжках и упорах конструкции НПО КРИОГЕНМАШ. Внешний вид изготовленного криостата представлен на фото рис.8.

5.3. *Система криогенного обеспечения.* В установке АМПИР применена сверхпроводящая магнитная система с косвенным охлаждением, при которой токонесущие витки катушки электромагнита охлаждаются примерно до 4,5 К циркулирующим по каналам охлаждения двухфазным гелием.

Всего на обмотке — 36 горизонтальных каналов охлаждения (24 — на наружной поверхности и 12 — на внутренней). Каналы выполнены из алюминиевых спецпрофилей, приклеенных плоской полкой к обмотке клеем КРИОСИЛ. Внутренний

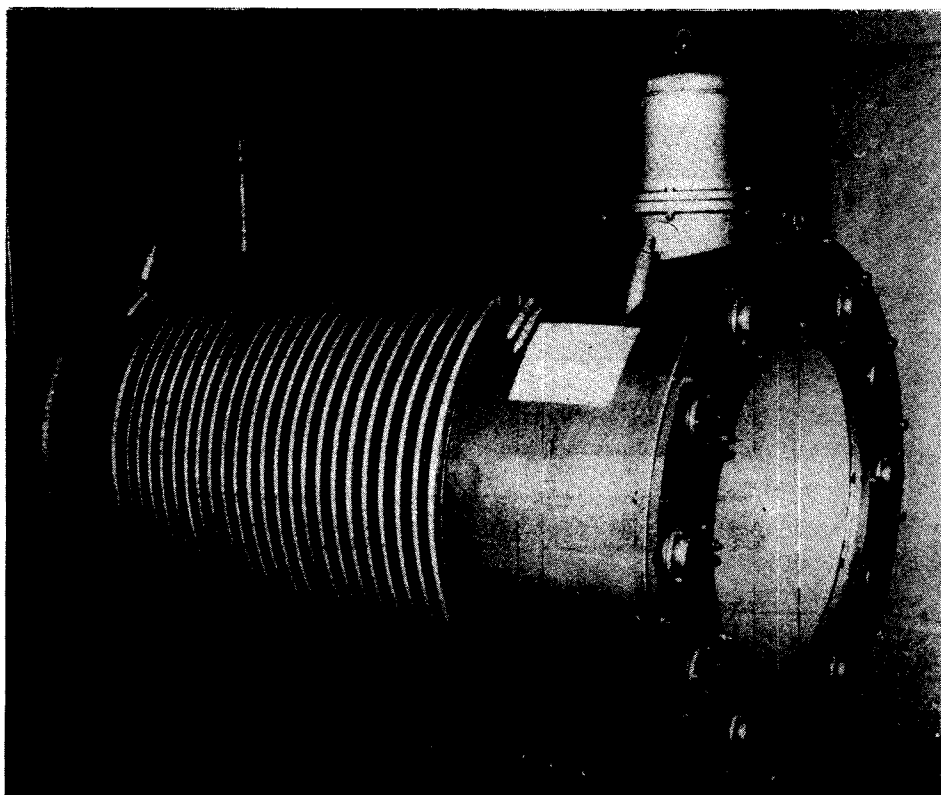


Рис.8. Внешний вид криостата

диаметр канала — 10 мм, толщина стенок — 1 мм. Все каналы (рис.9) разделены на 6 параллельных ветвей по 6 каналов в каждой таким образом, чтобы гидравлические сопротивления ветвей были примерно одинаковы и в пределах ветви отсутствовали опускные участки. В связи с этим раздающий гелиевый коллектор, расположенный в районе переднего бандажного фланца и выполненный в виде разрезного кольца из трубки с внутренним диаметром 12 мм, подает гелий в самые нижние (4 — на наружной поверхности обмотки и 2 — на внутренней) каналы охлаждения. По длине каждой ветви соответствующие горизонтальные каналы на концах обмотки соединены между собой гибкими сильфонными участками, вклеенными в коллекторы. Вывод двухфазного гелия из системы охлаждения обмотки в блок тоководов осуществляется двумя трубками, к каждому выводу в районе верхней части переднего бандажного фланца сколлектированы по три ветви каналов охлаждения.

Криогенная система обеспечивает все три основных режима: захолаживание до рабочего уровня температур, криостатирование СП-обмотки и тоководов, отогрев. На рис.10 представлена принципиальная схема системы охлаждения магнита. Отличительной особенностью указанной системы является то, что все криогенные коммуникации

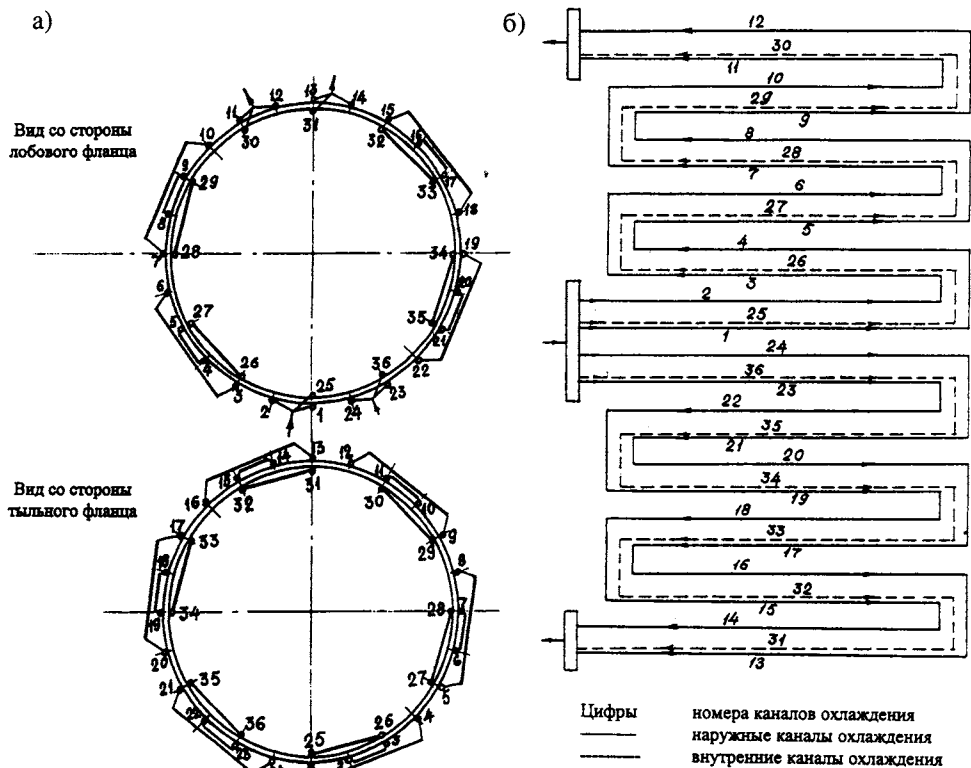


Рис.9. Гидравлическая схема гелиевого контура охлаждения. а) Схема коммутации гелиевых каналов охлаждения обмотки. б) Гидравлическая схема (развертка)

магнита расположены на блоке токовводов. Жидкий гелий от внешнего источника (например, от транспортного или стационарного резервуара) с помощью переливного сифона поступает в обмотку через ввод 7 и в бачок блока токовводов через ввод 8. Ввод 7 проходит через бачок с целью компенсации тепловых потерь в переливном сифоне и тем самым снижения паросодержания на входе в обмотку. Ввод 6 (без тепловой связи с гелием в бачке) используется в режимах захлаживания и отогрева, при этом переключение вводов осуществляется посредством двух встроенных клапанов с пневмоприводами.

Слив парожидкостной смеси, поступающей из обмотки магнита, осуществляется в бачок блока токовводов. Паровая фаза при этом поступает из бачка на охлаждение верхних участков обоих токовводов, а жидкий гелий через специальные каналы, охлаждая участки СП-шин между обмоткой и соответствующим токовводом, поступает в нижние части токовводов. В режиме криостатирования регулирование подачи жидкого гелия, необходимого для охлаждения всего магнита (обмотки и токовводов), осуществляется так, чтобы поддерживать постоянным уровень жидкости в бачке блока токо-

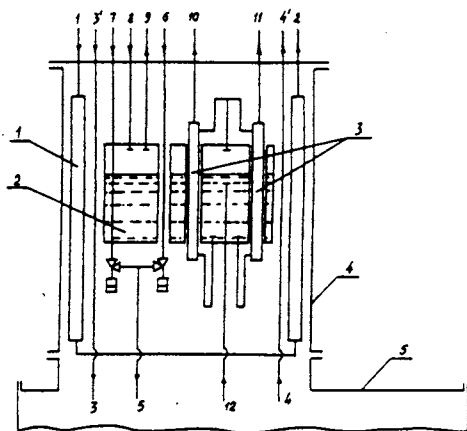


Рис.10. Принципиальная схема системы охлаждения магнита. 1 — азотный экран блока токовводов, 2 — бачок жидкого гелия, 3 — токовводы; 4 — корпус блока токовводов, 5 — криостат соленоида. Вводы: 1,2 — вход и выход из азотного экрана блока токовводов; 3,4 — вход и выход из азотного экрана обмотки; 6,7,5 — подача жидкого гелия в обмотку магнита; 8 — подача жидкого гелия в бачок блока токовводов; 9 — газосброс из бачка; 10,11 — выход газообразного гелия из токовводов; 12 — выход двухфазного гелия из обмотки в блок токовводов

вводов, поступающей из обмотки. Измерение уровня жидкого гелия в бачке выполняется при помощи дифманометра, к входам которого подключены импульсные трубки из верхней и нижней точек бачка блока токовводов.

Гелиевая криогенная система магнита для уменьшения влияния внешних теплопритоков имеет теплозащитные экраны, охлаждаемые жидким азотом. Азотный экран обмотки состоит из 4 параллельно соединенных ветвей (2 — на наружной поверхности и 2 — на внутренней). Каждая ветвь представляет собой змеевик без опускных участков из алюминиевой трубки с внутренним диаметром 10 мм, содержащей 6 горизонтальных участков вдоль обмотки. Между трубками экрана расположены два слоя алюминиевой фольги толщиной $20 \cdot 10^{-3}$ мм, к трубкам фольга прижимается специальными скобами-зажимами. Азотный экран блока токовводов состоит из жесткой алюминиевой обечайки толщиной 1 мм, на которой с помощью хомутов прикреплен канал охлаждения в виде змеевика из трубки 12×1 мм.

В криогенной системе установки АМП ИР используется современная слоисто-вакуумная теплоизоляция (СВТИ), состоящая, главным образом, из предварительно изготовленных матов. Каждый мат изоляции содержит 20 слоев металлизированной пленки ПЭТ-К-ДА-12 и 19 слоев стеклотумаги марки БМД-К. Маты изоляции устанавливаются между обмоткой и азотным экраном, а также между азотным экраном и корпусом криостата. В изоляционной полости криостата рабочее давление не должно превышать $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па.

На фото рисунка 11 представлен внешний вид сверхпроводящего соленоида с системой охлаждения. Проверка на герметичность системы охлаждения показала, что на уровне вакуума 10^{-3} течей не обнаружено.

5.4. *Расчеты захолаживания соленоида.* Основным условием проведения расчетов захолаживания является необходимость выполнения требования, чтобы в любой момент процесса разность температур в любых двух точках обмотки соленоида не превышала 20 К. Для контроля выполнения этого требования на теле обмотки и гелиевых каналах охлаждения установлены 15 датчиков температуры (см. раздел 6).

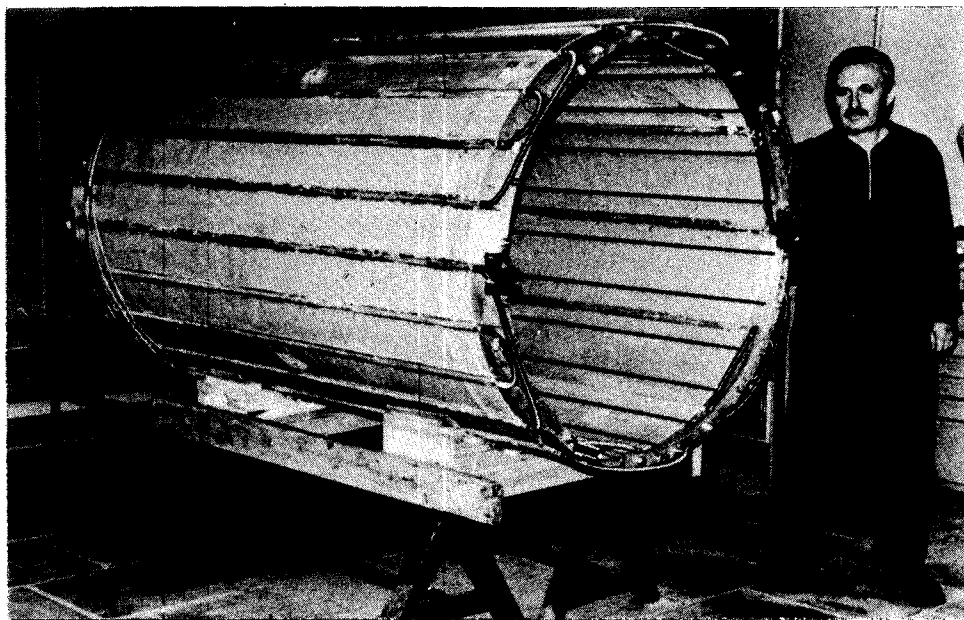


Рис.11. Внешний вид сверхпроводящего соленоида с гелиевыми контурами охлаждения и температурными датчиками на поверхности обмотки

В данной работе все характеристики режима захолаживания, включая расчеты затрат криоагентов, выполнены для способа захолаживания от рампы высокого давления через систему азотно-гелиевых теплообменников без рекуперации паров жидкого азота. В табл.1 приведены значения тепловой энергии, отводимой от СП-соленоида в режиме захолаживания в различных диапазонах температуры.

Для перепада давления $(1,0 \pm 0,2)$ атм итерационным методом определены расход криоагента и распределение гидравлических потерь по элементам системы. Основные потери давления имеют место на входном гибком трубопроводе. Для захолаживания от 300 до 280 К и от 100 до 80 К расход газообразного гелия составляет 2,5 и 4,16 г/с соответственно.

В табл.2 приведены значения времени различных ступеней захолаживания, определенных из баланса тепловых потоков, а также общее время для случая ступенчатого захолаживания. При этом затраты жидких криоагентов на захолаживание определялись из следующих условий:

— при $T_{вх} > 80$ К расход и температура газообразного гелия на входе в СП-соленоид устанавливается в результате смешения потока гелия с температурой окружающей среды и потока, пропущенного через азотную ванну;

— при $T_{вх} < 80$ К расход и температура газообразного гелия на входе в СП-соленоид устанавливается в результате смешения потока газообразного гелия через азотную ванну и потока жидкого гелия;

— после выхода из блока тоководов газообразный гелий без рекуперации холода направляется в газгольдер.

Таблица 1

Элемент системы, материал	Масса, кг	Q, Дж			
		300 +280 К	100 +80 К	80 +20 К	300 +80 К
1. Обмотка, фланцы, охлаждение, алюминий	324	$5,74 \cdot 10^6$	$2,72 \cdot 10^6$	$3,06 \cdot 10^6$	$5,21 \cdot 10^7$
2. Обмотка, медь	93,6	0,715	0,352	0,562	5,85
3. Коллекторы, узлы, крепления, сталь	21,4	0,205	0,10	0,115	1,83
4. СВТИ	18,5	0,07	0,07	0,212	0,78
СП-соленоид в целом	460	$6,73 \cdot 10^6$	$3,24 \cdot 10^6$	$3,95 \cdot 10^6$	$6,05 \cdot 10^7$

Таблица 2

Характеристика, ед. измерения	300+280 К	100+80 К	80+20 К
1. Время (балансное) одной ступени охлаждения	7,2	2,1	0,84
2. Расход гелия в канале охлаждения, г/с	0,069	0,116	0,116
3. Скорость гелия в канале охлаждения, м/с	4,4	2,0	0,6
4. Коэффициент теплопередачи в канале охлаждения, Вт/м ² К	54	27	34
5. Модифицированный критерий Стентона $\alpha F / G_{cp}$	9,3	2,8	3,5
6. Затраты жидкого азота на одну ступень охлаждения, кг	34	1,81	20
7. Затраты жидкого гелия на одну ступень охлаждения, кг (л)	—	—	9,2(73,5)
8. Общее время захлаживания от 300 до 4,2 К (при ступенчатом захлаживании с $\Delta T = 20$ К), ч			52
9. Общие затраты жидких криоагентов на захлаживание от 300 до 4,2 К без использования КГУ (без учета режима тепловой стабилизации)			
— жидкого азота, кг			1900
— жидкого гелия, кг (л)			11(88)
10. Затраты криоагентов на режим тепловой стабилизации в течение 6 часов			
— жидкого азота, кг			20
— жидкого гелия, кг (л)			31,4(245)

После достижения температуры обмотки, близкой к рабочей, необходимо в течение не менее 6 часов провести режим тепловой стабилизации, во время которой снимаются локальные остаточные «тепловые пятна» в системе, в тепловой изоляции СВТИ устанавливается стационарное температурное поле, система заполняется жидким гелием до рабочего уровня. Тепловая нагрузка в этом режиме постепенно (по экспоненте) приближается к рабочей нагрузке режима криостатирования без введения тока, она принималась равной 1,5 от теплопритока в режиме криостатирования.

Выполненные расчетные оценки показывают, что конструкция, гидравлическая схема и теплогидравлические характеристики СП-соленоида позволяют провести его захлаживание до рабочего уровня температур за приемлемое время (примерно 50 часов). Общие затраты жидких криоагентов на захлаживание и режим тепловой стабилизации (вариант схемы без использования КГУ) составляют: жидкого гелия — 340 л, жидкого азота — 1950 кг.

Технологический процесс отогрева СП-соленоида полностью идентичен процессу захлаживания, но режима тепловой стабилизации не требуется. Основные характеристики режима отогрева: время отогрева — около 50 часов; затраты жидкого гелия — 74 л; затраты жидкого азота — 1700 кг.

5.5. Блок тоководов. Для ввода тока до 3,5 кА в сверхпроводящую обмотку и подачи хладогентов в конструкции магнита имеется специальный блок тоководов с баком жидкого гелия объемом 30 л, защищенный от внешнего тепла суперизоляцией и азотным экраном. В баке находится змеевик, по которому подается под давлением жидкий гелий для охлаждения катушки и сверхпроводящих частей подводящих проводников. Концы проводников, припаянные к тоководам, также охлаждаются жидким гелием. Температура гелия на входе в обмотку — 4,6 К, на выходе из нее — 4,7 К, в самой теплой части — не более 5 К. В настоящее время блок тоководов изготовлен и проходит испытания и доработку с целью оптимизации его параметров.

5.6. Магнитопровод и однородность поля. При проектировании такого большого магнита возникал ряд вопросов, одним из которых был вопрос — насколько однородное магнитное поле в заданном рабочем объеме удастся получить при наиболее простой обмотке — цилиндрической. Для выяснения этого был изготовлен макет магнита в 1/3 натуральной величины. На нем было проведено исследование влияния конфигурации железного магнитопровода на однородность магнитного поля во внутреннем объеме катушки, которая была намотана обычным медным проводом ПЭВ-2,1 в 2 слоя на шпильку из нержавеющей стали [6]. Измерения магнитного поля при различных конфигурациях магнитопровода показали, что, во-первых, однородность поля может быть достигнута не хуже $1 \div 1,5 \%$, а во-вторых, магнитное поле внутри соленоида практически не зависит от формы

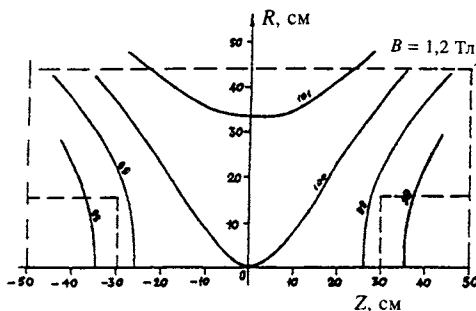


Рис.12. Результаты расчета неоднородности магнитного поля по программе POISSON. R — расстояние от оси магнита, Z — расстояние от центра магнита к краям соленоида

магнитопровода даже при варианте, когда в продольных частях магнитопровода магнитное поле достигало величины $B_{ж.} \sim 1,7$ Тл. В реальном магните сечение железного магнитопровода выбирается, чтобы при $B_{внутр.} \sim 1,0$ Тл обеспечивалась величина $B_{ж.} \leq 1,5$ Тл в любой части магнитопровода. Даже при таком условии масса магнитопровода должна быть более 30 тонн.

Расчет по двумерной программе POISSON показал, что для выбранного магнитопровода (рис.12) возможно получить неоднородность магнитного поля в рабочем объеме, не превышающую 2 %.

6. Контроль за температурой

6.1. *Установка датчиков температуры.* Для контроля процесса захлаживания СП-обмотки и контроля состояния соленоида во время работы, а также для обеспечения безопасности в аварийных ситуациях, в разные точки магнита устанавливаются температурные датчики (рис.13). В качестве термометров взяты специально отобранные и откалиброванные терморезисторы [7]. При достаточно низкой их стоимости и малых размерах (до 10 мм^3), как показывает опыт, они имеют высокую стабильность и надежность в работе. Для точного измерения температуры необходимо помещать термометр внутрь измеряемого тела, где существуют изотермические условия для измерительного места. В реальной ситуации приходится вести монтаж термометров в тех местах, где трудно его осуществить: в трубках с тонкими стенками, в готовых обмотках магнита и т.п.

Таким образом, приходится применять так называемые косвенные методы измерения температуры, помещая термометры на поверхность измеряемого объекта. Сложность заключается в том, что в вакуумном пространстве магнита существуют различные виды теплопритоков от наружного вакуумного кожуха, находящегося при комнатной температуре, к криогенным поверхностям за счет конвективного теплообмена остаточным газом и инфракрасного излучения. Влияние такого теплопритока на показания термометров может быть существенным. Чтобы решить задачу точного измерения температуры в данном месте, в сверхпроводящем магните АМПИРа предложен монтаж термометров с квазитермическими условиями.

Для создания изотермических условий для измерительного места термометры помещены в специальные кейсы из алюминия и меди (рис.14). Алюминиевые кейсы использовались для закрепления датчиков на плоской поверхности (подшвы алюминиевого профиля) и почти плоской (цилиндрическая поверхность соленоида в пределах алюминиевого кейса). Медные кейсы использованы для закрепления термодатчиков на трубках гелиевого коллектора. Часть термометров установлена в алюминиевых фланцах. На подошвах алюминиевого профиля и на поверхности обмотки алюминиевые кейсы приклеены эпоксидным клеем КРИОСИЛ. Провода от термометров тоже приклеены КРИОСИЛом вдоль оси обмотки до выхода у токового фланца. Медные кейсы к трубкам из нержавеющей стали припаивались свинцово-оловянным припоем.

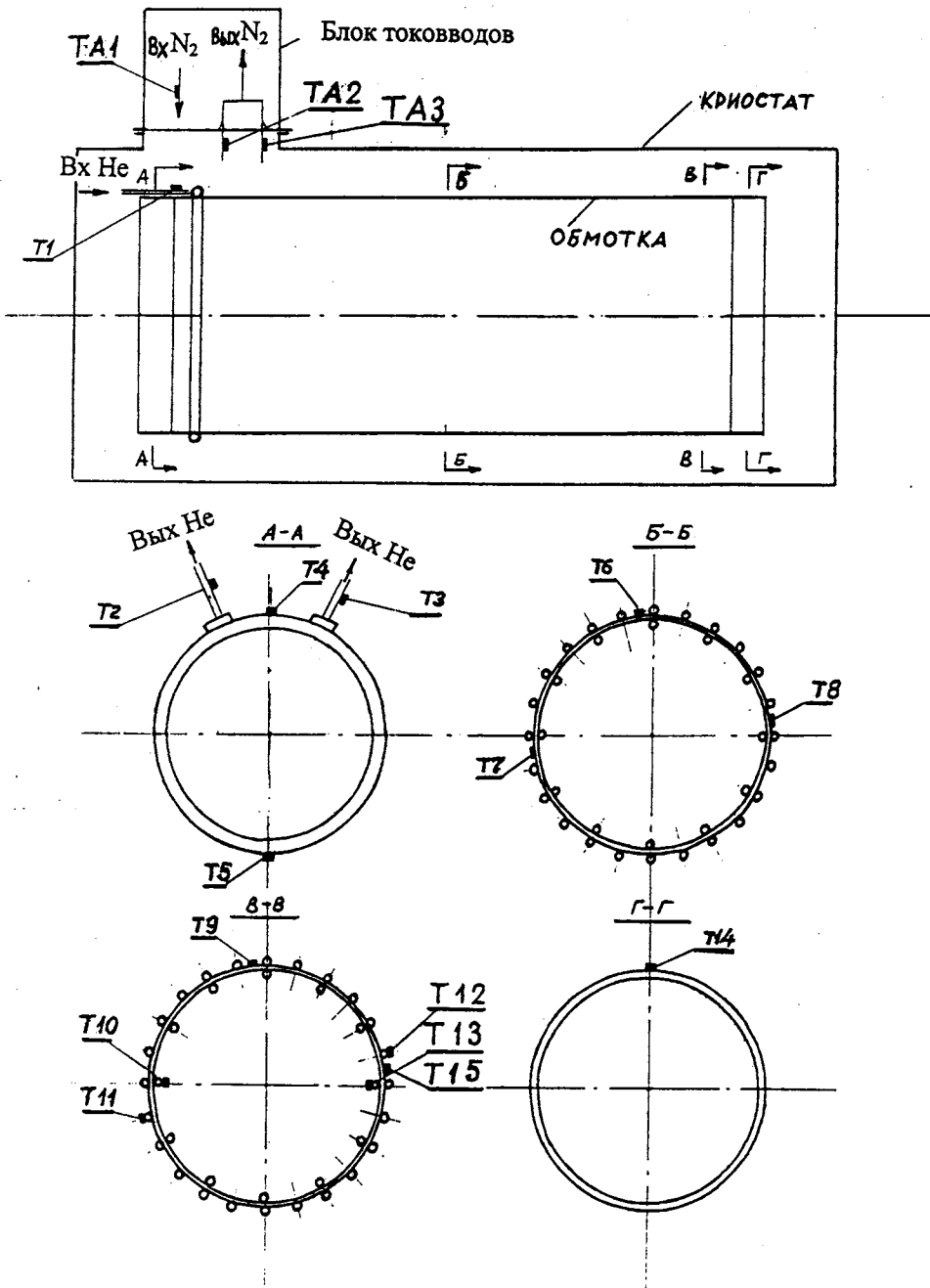


Рис.13а. Схема расположения температурных датчиков. Общая схема расположения термометров

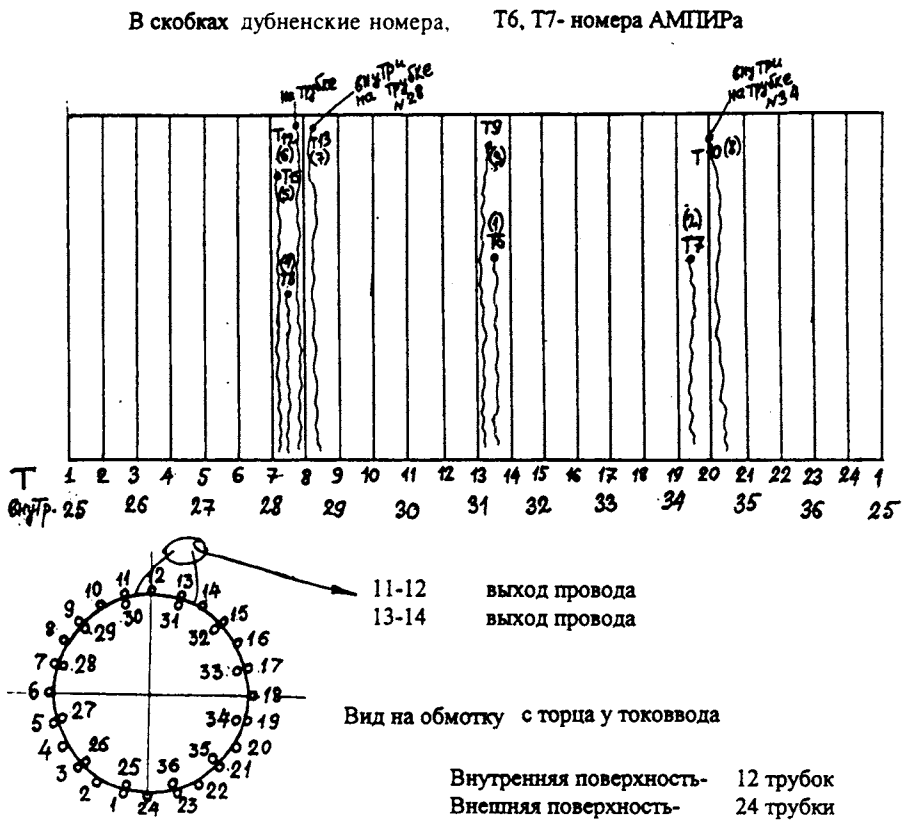


Рис.136. Схема расположения температурных датчиков. Схема размещения термодатчиков на обмотке соленоида

Сами термометры внутри алюминиевых и медных кейсов монтировались с использованием теплопроводной вакуумной смазки «Ariezon». Затем кейсы с термометрами покрывались 3—5 слоями суперизоляции.

6.2. Система измерения температуры. Функциональная схема термометрии включает в себя: набор термометров типа ТВО-0.125, подключенных каждый в отдельности к входам коммутатора аналоговых сигналов КА004. Сигнал с выбранного термометра подается на аналогово-цифровой преобразователь, в качестве которого выбран промышленный цифровой вольтметр типа DIGITAL VOLTMETER-V530. Данные с вольтметра в виде параллельного цифрового кода через входной регистр и контроллер КК009 считываются в ЭВМ. От каждого термометра идет кабель из 4 проводов из манганина диаметром 0,15 мм в эмалистой изоляции, заканчивающийся 4-штырьковой микровилкой с золочеными контактами. Далее через контактные линейки (микророзетки с золочеными контактами) питание постоянным током от специального высокостабилизированного источника тока (10 мкА на один термометр) и съем сигнала идут

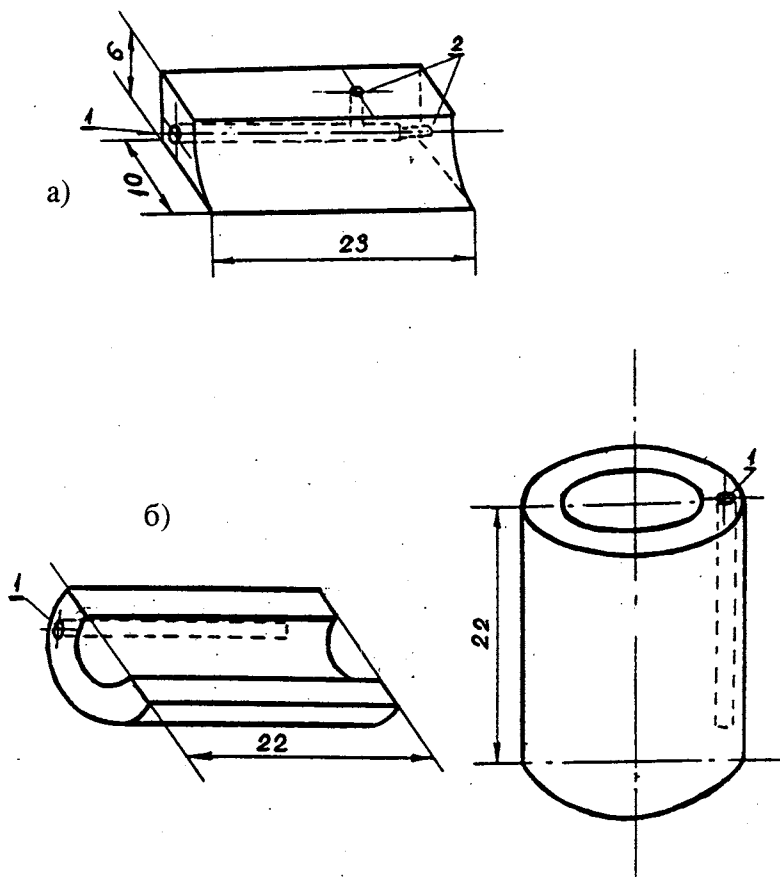


Рис.14. Кейсы для температурных датчиков: а) алюминиевый, 1 — входное отверстие, 2 — выходные отверстия; б) два типа медных: полуцилиндр и цилиндр

по проводам ПЭЛШО $0,12 \pm 0,15$ мм, выходящим на герметичные разъемы при комнатной температуре. Для уменьшения теплопритоков от этих проводов к термометрам кабель от разъемов фиксируется на азотной температуре в районе токовводов.

Точность измерения величины сопротивления резистора ограничивается стабильностью питающего тока, который может меняться под влиянием возникающих термоЭДС в местах контакта разноименных металлов. При необходимой точности измерения температуры — 0,5 % термометры запитываются постоянным током. Для каждого термометра по нескольким экспериментальным точкам (11 точек) от комнатной до гелиевой температур были составлены полиномы (зависимость сопротивления от температуры), по которым в дальнейшей работе можно определять температуру

местоположения данного резистора в зависимости от его сопротивления во всем диапазоне температур от комнатной до гелиевой (4,2 + 300 К).

7. Расчет общей радиационной толщины криосоленоида

При расчете радиационных длин использовались следующие данные (радиационные длины в мм):

Таблица 3

Алюминий	89
Медь	14,4
Свинец	5,62
Олово	12,09
Ниобий	11,81
Титан	35,94
Припой ПОССУ-30-2	7,3
Углепластик	400
Стеклотекстолит	200
СП-кабель в медной матрице	17

Для слоисто-вакуумной теплоизоляции и хлопчатобумажной изоляции, пропитанной эпоксидным клеем КРИОСИЛ, принимаем радиационную длину, как для стеклотекстолита.

Таблица 4

Элемент соленоида	Материал	рад. дл., мм
1. Обечайки, внутренняя и внешняя	алюминий	0,0841
2. Азотные экраны с трубками	алюминий	0,00787
3. Гелиевые трубки-профили	алюминий	0,00955
4. Суперизоляция (майларные «одеяла»)	алюминий + стекло	0,01455
5. Скрепляющие шпильки	алюминий	0,00584
6. Сверхпроводящий провод в алюмомедной матрице		
а) алюминиевая матрица	алюминий	0,10225
б) омеднение матрицы	медь	0,03465
в) оловянно-свинцовый припой	свинец + олово	0,0685
г) сверхпроводящий провод Ni-Ti в медной матрице	медь + ниобий + титан	0,0823
д) хлопчатобумажная изоляция, пропитанная КРИОСИЛом		0,01035
Весь соленоид (с криостатом)		0,42

Для СП-провода и свинцово-оловянного припоя расчет радиационных длин производился с учетом весовых концентраций простых веществ, входящих в состав сложного.

Заключение

В настоящее время закончен в основном этап изготовления всех элементов магнита, включая криосоленоид, блок тоководов, систему термоконтроля и др. Следующие задачи связаны с запуском и наладкой всей магнитной системы. Это — тема следующих этапов работы.

В заключение авторам хотелось бы привести таблицу основных параметров создаваемого сверхпроводящего магнита установки АМПИР и сравнить их с параметрами существующих зарубежных аналогов (часть данных взята из обзора [8]):

Таблица 5

	Zeus	CELLO	TPC	CLEO	CDF	VENUS	АМПИР (АМПИР)
Индукция, Тл	1,8	1,3	1,5	1,0	1,5	0,75	~ 1,2
Внутренний диаметр, м	1,72	1,66	2,17	2,0	2,86	3,54	1,154
Длина обмотки, м	2,85	3,42	3,3	3,2	5,07	5,27	1,8
Ток, кА	5,0	3,3	2,27	—	5,0	4,0	2,8
Запасенная энергия, МДж	16	7,0	11,0	9,4	31	11,7	1,6
Рад. толщина	0,9	0,5	0,68	0,7	0,86	0,52	0,42
Сечение провода	6 × 9	1,6 × 2,2	3,6 × 0,9	—	20 × 3,9	6,6 × 10	4 × 7
Материал матрицы	Cu, Al	Cu, Al	Cu	—	Cu, Al	Al	Cu, Al

Из таблицы видно, что создаваемый магнит не уступает существующим аналогам, а по ряду параметров, в том числе по радиационной толщине, превосходит их. Авторы надеются, что с введением в строй магнита установки АМПИР физики получают новые возможности для изучения физики промежуточных энергий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №97-02-16647).

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность за постоянный интерес к работе и поддержку С.Т.Беляеву, А.И.Малахову, В.Л.Кравчуку, А.Б.Курепину, а также выразить признательность за помощь на отдельных этапах работы А.Ф.Суставову, А.А.Крикунову, Ю.А.Шишову, Д.М.Колупаеву, С.В.Афанасьеву.

Литература

1. Kurepin A.B. et al. — Preprint INR-769/92, Moscow, 1992.
2. Patarakin O.O., Kurepin A.B., Feofilov G.A. — Proceedings of the 5 International Symposium on Meson-Nucleon Physics, Boulder, Colorado, USA. September 1993. *πN Newsletter*, 1993, No.8, p.135.
3. Sustavov A.F. et al. — *Nucl. Instr. and Meth.*, 1992, v.A323, p.157.
4. Сустанов А.Ф. и др. — *Приборы и техника эксперимента*, 1994, т.5, с.31.
5. Anashkin O.P. et al. — *Advances in Cryogenic Engineering*, 1992, v.38B, p.609.
6. Картамышев А.А. и др. — *ВАНТ*, 1988, т.2(42), с.66.
7. Дацков В.И. — *Препринт ОИЯИ 8-83-717*, Дубна, 1985.
8. Шишов Ю.А. — В сб.: *Рабочее совещание по программе экспериментов на встречных пучках*, ОИЯИ, Д1-83-541, Дубна, 1983, с.116.