

5417/88

Анищенко Н.Г. и др.
Б2-9-88-611

+
345



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-9-88-611

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 88

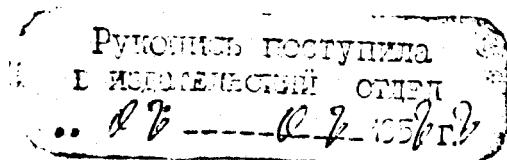
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

БЭ-9-88-611

Н.Г.Анищенко, В.Д.Бартенев, Н.А.Блинов, И.Н.Гончаров,
В.И.Дацков, А.М.Донягин, Б.З.Житников, И.Б.Иссинский,
Ю.В.Куликов, Г.Малиновский, В.А.Михайлов, В.Д.Мороз,
В.Т.Паршутов, Л.В.Петрова, Р.В.Полякова, Д.Рихтер,
Г.П.Цвинева, Ю.А.Шипов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО
МУЛЬТИПОЛЬНОГО КОРРЕКТОРА НУКЛОТРОНА



Дубна, 1988



I. ВВЕДЕНИЕ.

Сверхпроводящий мультипольный корректор (МПК) Нуклотрона представляет собой блок из четырех магнитов. В различных вариантах МПК будут входить дипольные, квадрупольные, секступольные и октупольные обмотки. Общее количество МПК в Нуклотроне 28 штук, следовательно, магнитов с индивидуальными электропитанием и защитой 112. МПК скрепляется в жесткий блок со штатной сильноточной квадрупольной линзой (64 шт. в Нуклотроне), блок подвешивается на растяжках в криостате Нуклотрона. С целью отработки технологии изготовления обмоток МПК и проверки возможности его косвенного криостатирования создана модель, основные параметры которой близки к ожидаемым в МПК Нуклотрона.

2. ПАРАМЕТРЫ И КОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛИ МПК.

Модель МПК выполнена согласно Техническому заданию, утвержденному 28.12.84. (см. Приложение № 1), по чертежам СПМС-7-01-00, арх. № 12854 (см. Приложение № 2). Модель ^(рис. 1а) содержит, считая снаружи, двухслойный прямой секступоль, однослойные косой и прямой диполи, прямой октуполь. Длина модели - 350 мм, внутренний диаметр обмотки (октуполя) - 147 мм. Обмотки окружены шихтованным железным магнитопроводом с внутренним диаметром 160 мм и наружным диаметром 200 мм, толщина листов железа 0,5 мм. Следует подчеркнуть, что из-за несовершенства технологии точность укладки обмоток не соблюдена. Кроме того, отсутствует проставка в обмотках дипольных магнитов, которая необходима для подавления паразитных гармоник магнитного поля. В качестве проводника использован ^{ниобий-титановый} провод мелкодисперсный диаметром 0,5 мм, количество жил 1045, диаметр жил 10 мкм, коэффициент заполнения сверхпроводником 0,42. Провод изолирован полиамидным лаком, диаметр провода в изоляции составляет $0,53 \pm 0,05$ мм. Обмотка пропитана компаун-

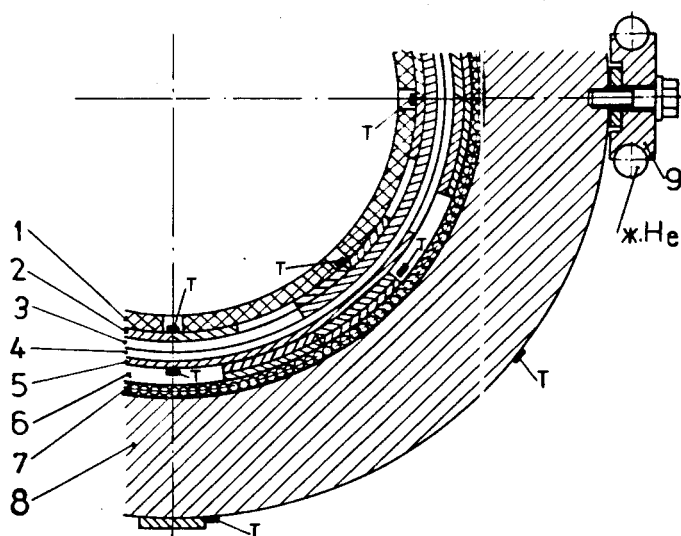


Рис. Iа. Модель сверхпроводящего мультипольного корректора Нуклотрона (поперечное сечение).
1 - каркас из стеклотекстолита; 2 - октуполь;
3 - прямой диполь; 4 - изоляционная проставка;
5 - косой диполь; 6 - секступоль; 7 - фитили из медных проволок; 8 - магнитопровод;
9 - медный фланец; Т - датчики температуры.

дом на основе эпоксидной смолы К-II5 с отвердителем Л-20.

Новизна конструкции связана с использованием косвенного криостатирования. При этом выделяющееся в обмотке при питании переменным током тепло от энергетических потерь в сверхпроводнике отводится через электроизоляционную конструкцию и тепловые мосты в жидкий гелий, который протекает по трубкам. В модели был предусмотрен отвод тепла из обмотки через магнитопровод, к которому в первом варианте она была приклеена силикатным клеем. Первое испытание с жидким гелием показало, что тепловое сопротивление в месте приклейки очень высоко и, следовательно, склеивания на большей части поверхности не произошло. Поэтому, для последующих испытаний силикатный клей был удален и для тепловой связи использована силиконовая вакуумная замазка МНМЗ, СТ380-183-75, партия 1982 г. Кроме того, в конструкцию были введены фитили в виде медных проволок, приклеенных к внешней стороне обмотки и припаянных концами к медным трубкам с жидким гелием. Клей - органосиликоновый компаунд с мусковитом, проволоки диаметром 0,57 мм в изоляции (\varnothing 0,53 мм без изоляции), количество проволок ~ 600. Длина участков проволок от края обмотки до гелиевых трубок равна 5 - 8 см. Для предотвращения наведения токов от импульсного магнитного поля обмоток половина проволок (через одну) припаяна к трубкам с одной стороны МПК, половина - с другой. Противоположные концы проволок приклеены через изоляцию. От магнитопровода тепло отводится через привинченные к нему в нагретом состоянии четыре медные пластины облуженные индием, к двум из которых припаяны трубки с гелием, а к двум остальным - медные фитили.

3. УЗЕЛ КРИОСТАТА.

Модель МПК укрепляется на вставке (черт. Пр-58-00-00 сб., арх. № 12682 - см. Приложение № 3) и размещается в криостате

внутренним диаметром 320 мм. Для энергопитания обмоток созданы оригинальные токовводы, в которых токоведущие шины приклеены через электроизоляционную пленку к охлаждаемому газообразным гелием теплообменнику. Многочисленные потенциальные выводы из обмотки приклеены через электроизоляционные покрытия к бачкам с жидким гелием и азотом. Токовые выводы из обмоток (48 шт.) и их паяные соединения расположены на охлаждаемой жидким гелием медной плате, к которой они приклеены через изолирующую ^{хлопчатобумажную} ткань с помощью клея БФ.

4. ГЕЛИЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

Для криостатирования МПК и измерения расходов гелия создана система, представленная на черт. СКЛ-2-01, арх. № 6365-6366 - см. Приложение № 4.

5. ОБОРУДОВАНИЕ СТЕНДА.

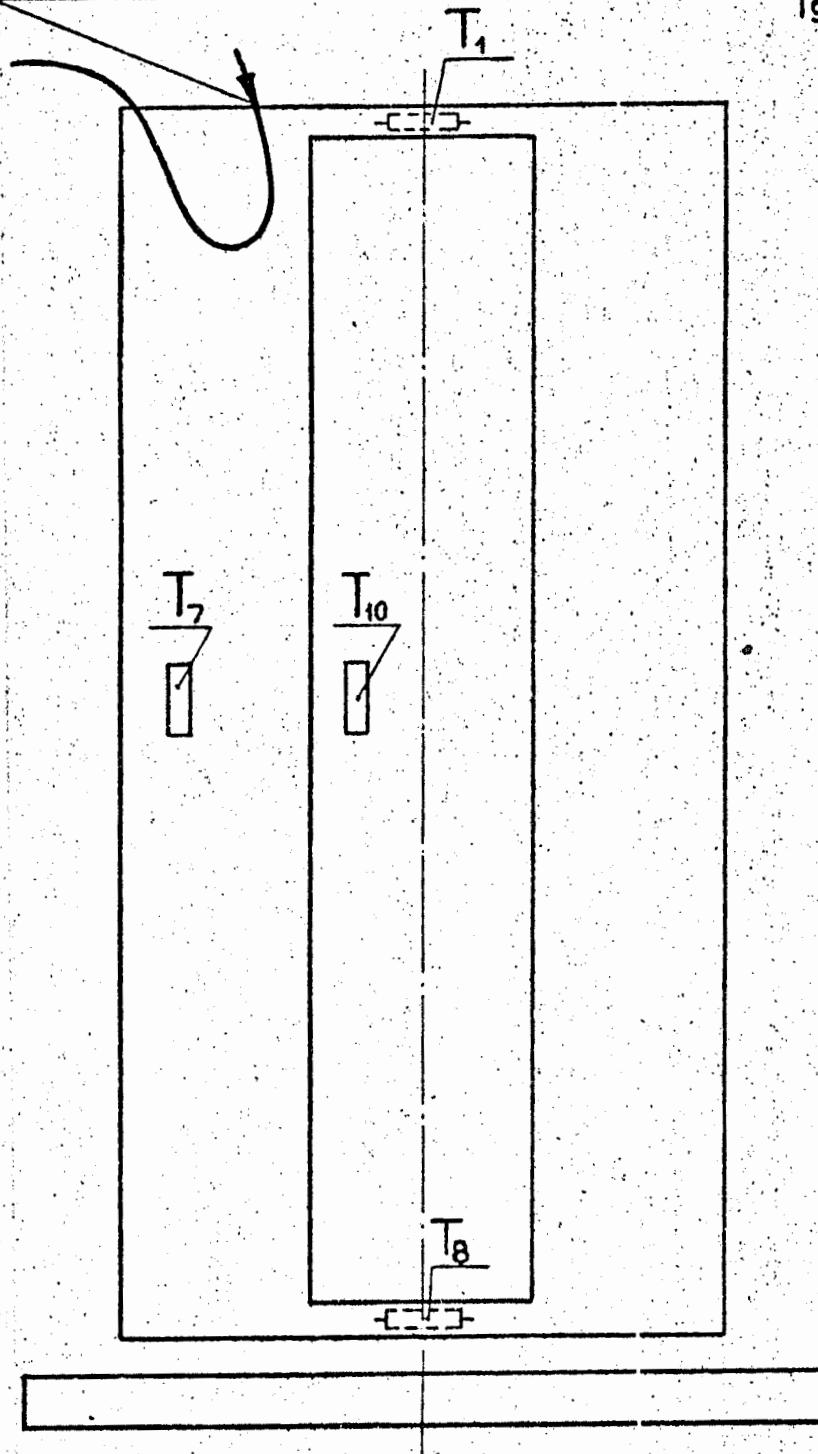
Для измерения температурного поля в МПК укреплено 10 термодатчиков (см. рис. 1^б) типа ТВ0-0,125. На внутренней стороне каркаса обмоток приклеен проволочный нагреватель с сопротивлением 77 Ом, с помощью которого имитируется энерговыделение в обмотках и измеряется её теплопроводность.

Для питания МПК используются два двойных источника типа НБ-234, снабженные разработанным в ОЗЭА программатором токовых импульсов. Защита каждой обмотки осуществлялась с помощью устройства , в котором имеется мостовая схема детекции нормальной зоны и тиристорный коммутатор. При этом запасенная в обмотках энергия отводилась на омическое сопротивление 0,5 Ом. Ток в обмотках измерялся с помощью четырех двухкоординатных самописцев.

Автоматизированная система измерения температуры в интервале 4,2-300 К состоит из ЭВМ типа "МЕРА-60" или "Правец-16" и набора модулей в

Вид А

слив геля из бабки



T_5 - внизу, на лепестке т
в месте перепайки св

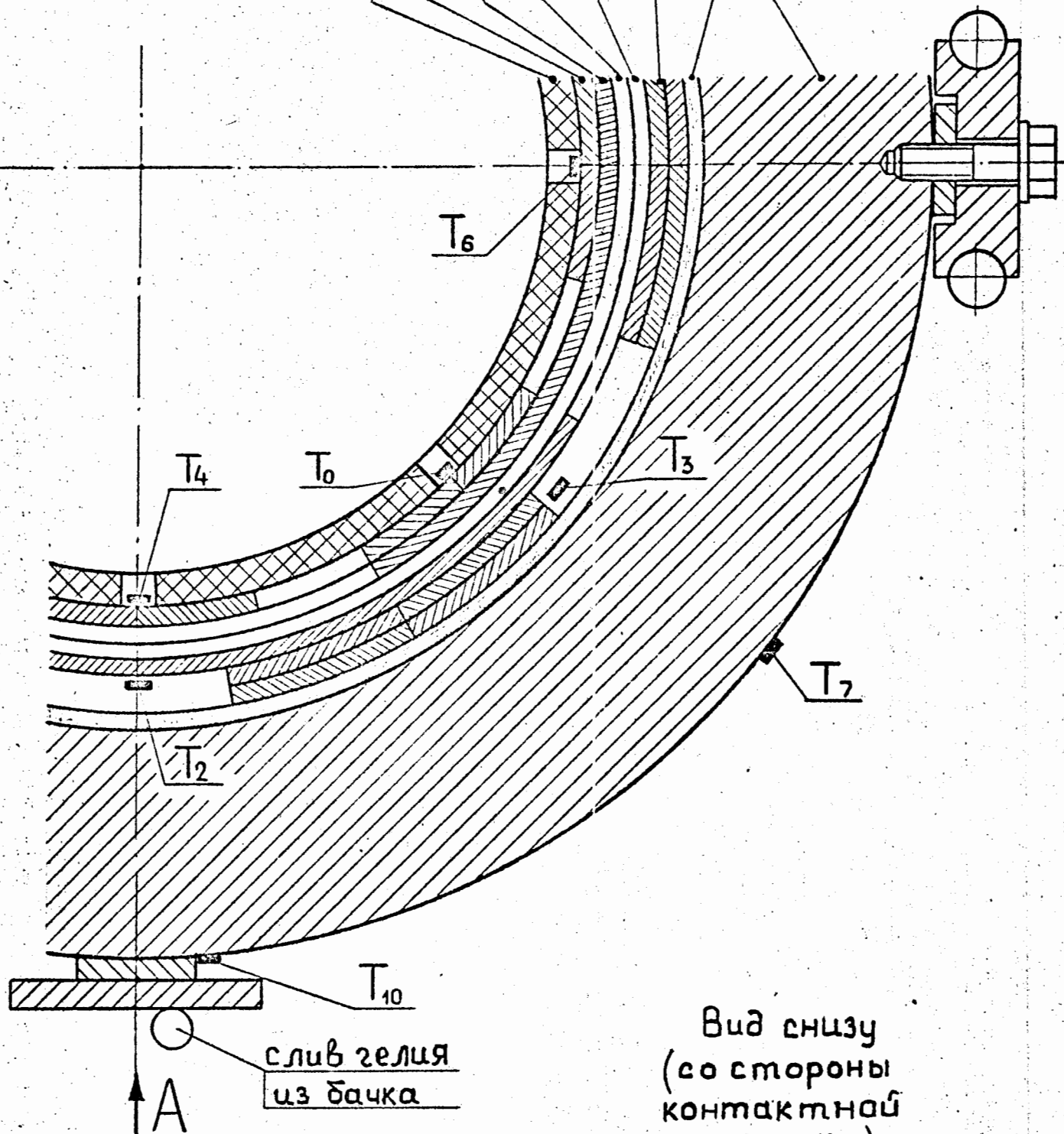
T_9 - вверху, на трубке вы
из МПК

Рис. 1^б

Схема расположения датчиков темп

коввода,
рхнров.(-ПД)
ода гелия

КАРКАС
ОКТУПОЛЬ
ПР.ДИПОЛЬ
ПУСТ.ПРОСТАВКА
КОС.ДИПОЛЬ
СЕКСТУПОЛЬ
КЛЕЙ
ЖЕЛ.ЯРМО



Вид снизу
(со стороны
контактной
тарелки)

ратуры в модели МПК

стандарте КАМАК. Термометры МПК соединены в последовательную цепь и питаются током 10,0 мкА стабильностью не хуже 10^{-4} от модуля термометрии, содержащего также два буферных усилителя с коэффициентами усиления 10 и 100. Сигналы с термометров коммутируются релейным мультиплексором типа КА-004 (производства ОП ОИЯИ), усиливаются буферным усилителем и затем поступают на выход АЦП типа САМ4.05 (12 бит, ВНР). После АЦП сигналы поступают через контроллер типа УКК-608 (производства ЛВЭ) на ЭВМ "МЕРА-60", где обрабатываются с помощью 7 коэффициентов, предварительно записанных для каждого термометра.

Для данного оригинального набора модулей КАМАК написаны 5 программ на языке Ассемблер. Система позволяет выводить на цифропечать все 10 температур за минимальное время ~ 2 сек.

Для регистрации быстрых тепловых и электромагнитных процессов в СП-магнитах при переходных режимах работы создан "Рapid-анализатор" - десятиканальное электронное устройство в крейте КАМАК с выводом информации на индикатор и внешнюю цифропечать. Устройство содержит: 10 буферных усилителей с коэффициентами 10 и 100, быстрый коммутатор на 10 каналов, АЦП на 12 бит с минимальным временем преобразования $\sim 0,3$ мс, оперативную память на 32 Кбит и вспомогательные блоки. "Рapid-анализатор" регистрирует № канала, время в мс и измеряемую величину сигнала с минимальным временем ~ 1 измерение за 1 мс и максимальным временем ~ 1 измерение за 1 сек. Всего регистрируется за 1 цикл 1000 значений измеряемых величин по 10 каналам.

6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ.

6.1. Определение критических токов обмоток МПК.

Связь между критическим током I_c , напряженностью магнитного поля H и температурой T удовлетворительно описывается

уравнением I

$$I_c \approx \frac{2 I_1 H_1}{H + H_1} \left(1 - \frac{T - T_B}{T_c - T_B} \cdot \frac{H_{C2}}{H_{C2} - H} \right), \quad (I)$$

где I_1 - критический ток при $H_1 = 1$ Т и температуре $T = T_B = 4,2$ К. Уравнение приближенно описывает критическую поверхность $I(T, H)$ сплава ниобий - 44 вес.% титана. Диаграммы для этого сплава приведены в ^{/2/}. По нашим расчетам, для $H \leq 6$ Т и $T \leq 0,9 T_c(H)$ ошибка в определении I с помощью уравнения (I) не превышает $\sim 25\%$, по сравнению с величинами, взятыми из ^{/2/}. В проводе МШК используется сплав НТ-50, но различие с НТ-44 для оценочных расчетов допустимо. $T_c(H=0) \approx 9,2$ К; $H_{C2} \approx 10,1$ Т^{/2/}.

По нашим измерениям 136 образцов мелкодисперсного провода $\varnothing 0,5$ мм критические токи при 4,2 К и 2,5 Т находятся в области 162 - 375 А. При этом среднеарифметическая величина

$$\bar{I}_c = \frac{\sum_{i=1}^N I_{ci}}{N} = 267 \text{ А},$$

$$\bar{I}_c = \frac{I_{c \text{ мин.}} + I_{c \text{ макс.}}}{2} = \frac{162 + 375}{2} = 268 \text{ А}$$

Определим I_1

$$267 \approx \frac{2 I_1 \cdot I}{2,5 + I} (I - 0); \quad I_1 \approx 467 \text{ А}.$$

В случае, если индукция во всех обмотках одновременно достигает максимального расчетного значения

$$H_{\text{макс.}} = H_{\text{окт.}} + H_{\text{п.д.}} + H_{\text{к.д.}} + H_{\text{сект.}} = \\ = 0,05 + 0,07 + 0,07 + 0,19 = 0,38 \text{ Т}.$$

Примем $H_{\text{макс.}} \approx 0,4$ Т, тогда при 4,2 К

$$I_c \approx \frac{2 \cdot 467 \cdot I}{0,4 + I} \approx 667 \text{ А}.$$

При $\Delta T = T - T_B = 1$ К и $H = 0,4$ Т комплекс

$$\frac{T - T_B}{T_C - T_B} \cdot \frac{H_C}{H_C - H} = \frac{I}{9,2 - 4,2} \cdot \frac{10,1}{10,1 - 0,4} = 0,21$$

При этом $I_C = (I - 0,21) \cdot 667 = 527$ А.

При $\Delta T = 2$ К $I_C = (I - 0,42) \cdot 667 = 387$ А.

Если допустить $I_C = 100$ А (при $I_{\text{ном.}} = 60$ А), то из уравнения (I) можно определить

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{доп.}} &= \frac{(T_C - T_B) \cdot (H_C - H)}{H_C} \left[I - \frac{I (H + H_1)}{2 I_1 \cdot H_1} \right] = \\ &= \frac{(9,2 - 4,2)(10,1 - 0,4)}{10,1} \left[I - \frac{100 (0,4 + I)}{2 \cdot 467 \cdot I} \right] = 4,08 \text{ К} \end{aligned}$$

и $T_{\text{доп.}} = 4,2 + 4,08 \approx 8,3$ К.

Таким образом, запас по току в модельном МПК довольно велик и допускает повышение рабочего тока или увеличение температуры обмотки.

6.2. Оценка величины энерговыделений в обмотках модели МПК.

Исходные положения. Рассмотрим самые жесткие условия работы МПК:

1. Индукция во всех точках обмоток одновременно достигает максимального расчетного значения $B_{\text{макс.}} \approx 0,4$ Т (см. раздел 6.1).

2. Примем следующий треугольный цикл изменения поля: 0,5 сек. подъем, 0,5 сек. спуск и т.д., т.е. $\dot{B} = 0,8$ Т/с.

3. Для сверхпроводящего провода $\varnothing 0,5$ мм, с IO45 СП-нитей по IO мкм, изолированного лаком и предназначенного для модели МПК, измерения в НИКО полные потери за цикл (при $B_{\text{макс.}} = 0,4$ Т и $\dot{B} = 0,8$ Т/с) составили ≈ 15 мДж/цикл.см³ провода. (Потери завышены из-за того, что шаг твиста оказался ~ 7 мм вместо

обычного 4+5 мм) , причем $W_{\text{гистер.}} \approx 5 \frac{\text{мДж}}{\text{цикл. см}^3}$ и $W_{\text{вихр.}} \approx 10 \text{ мДж/цикл. см}^3$.

Из-за линейного нарастания и спада $B(t)$ мощность вихревых потерь мало меняется в пределах цикла, а мощность гистерезисных потерь заведомо не будет максимальна в середине цикла, где $B = B_{\text{макс}}$ (с учетом падающей зависимости $j_c(B)$). Примем для полных потерь постоянную в пределах цикла удельную мощность энерговыделения $p = \frac{W}{\Delta t_{\text{цикл.}}} \approx 15 \frac{\text{мДж}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}} = 15 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^3}$. Сечение СП-провода $S_{\text{пр.}} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, а длины проводов, необходимые для изготовления соответствующих обмоток, приведены в таблице I вместе с некоторыми другими характеристиками (\dot{q} оценивался, исходя из того, что $\sim 50\%$ бок. поверхности цилиндрич. МПК используется для потока тепла).

Таблица I

номер слоя (от каркаса) и тип обмотки	октуполь	диполь	диполь	секс- ту- поль	Всего
Длина провода, м	180	200	200	450	1030
Объем пров., 10^{-4} м^3	0,36	0,4	0,4	0,9	2,06
Мощность потерь, Р, Вт	0,54	0,6	0,6	1,35	3,1
Уд. плотн. тепл. потока от соотв. слоя к железу $\dot{q}, \text{ Вт/м}^2$	6	6+6,7= =12,7	12,7+ +6,7= =19,4	19,4+ +15= =34,4	34,4

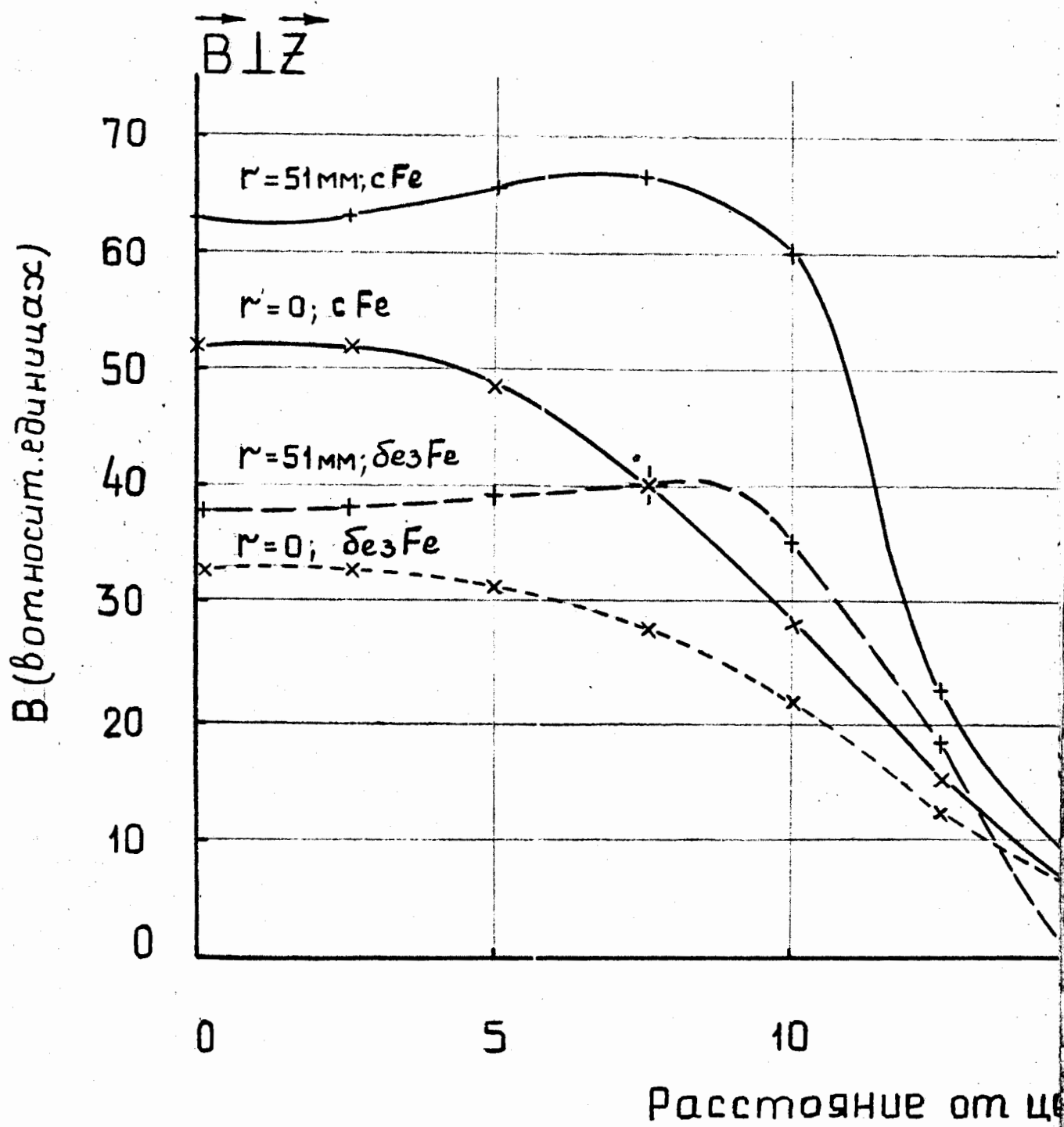
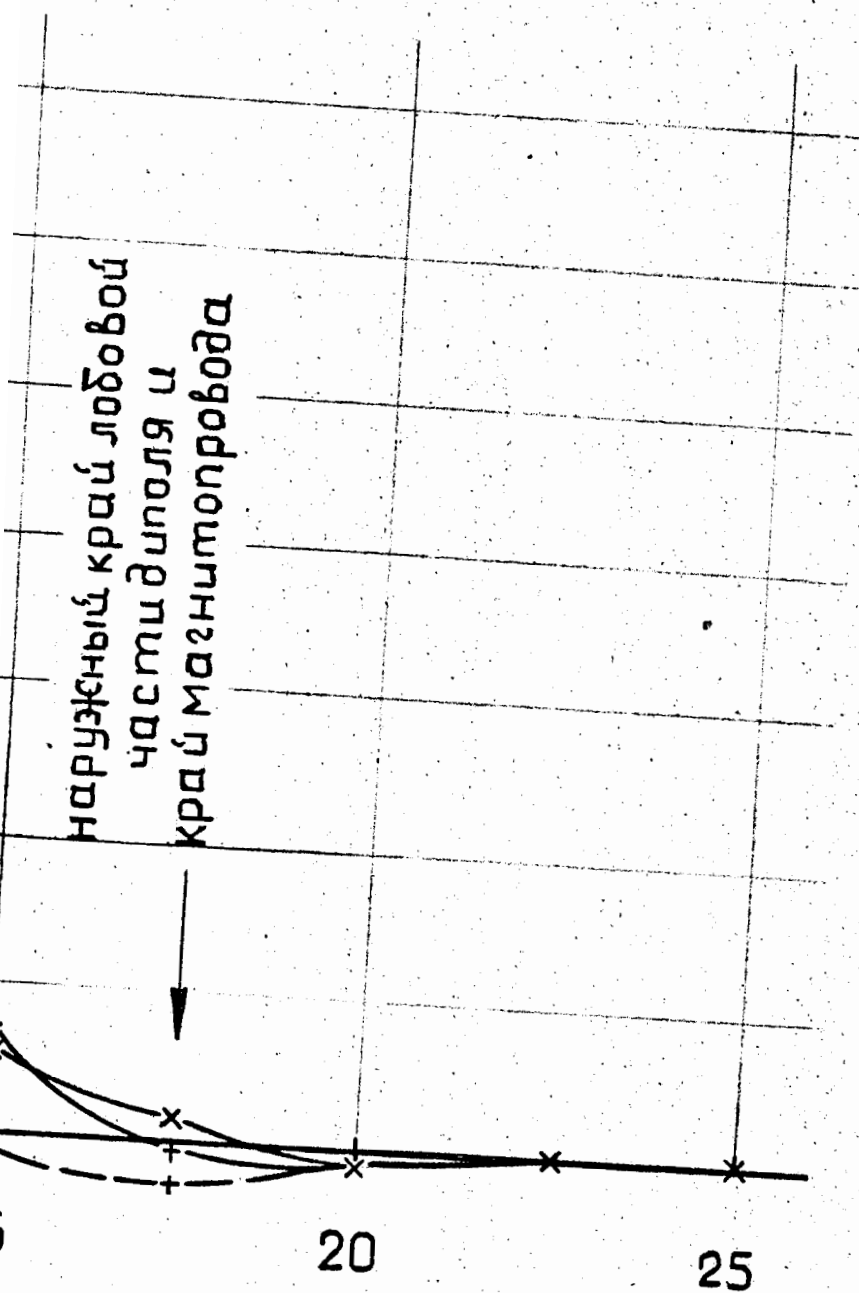


Рис. 2 Распределение индукции B в п
при $I = 0,25\text{A}$ в п



туре модели МПК с магнитопроводом и без него
мом диполе.

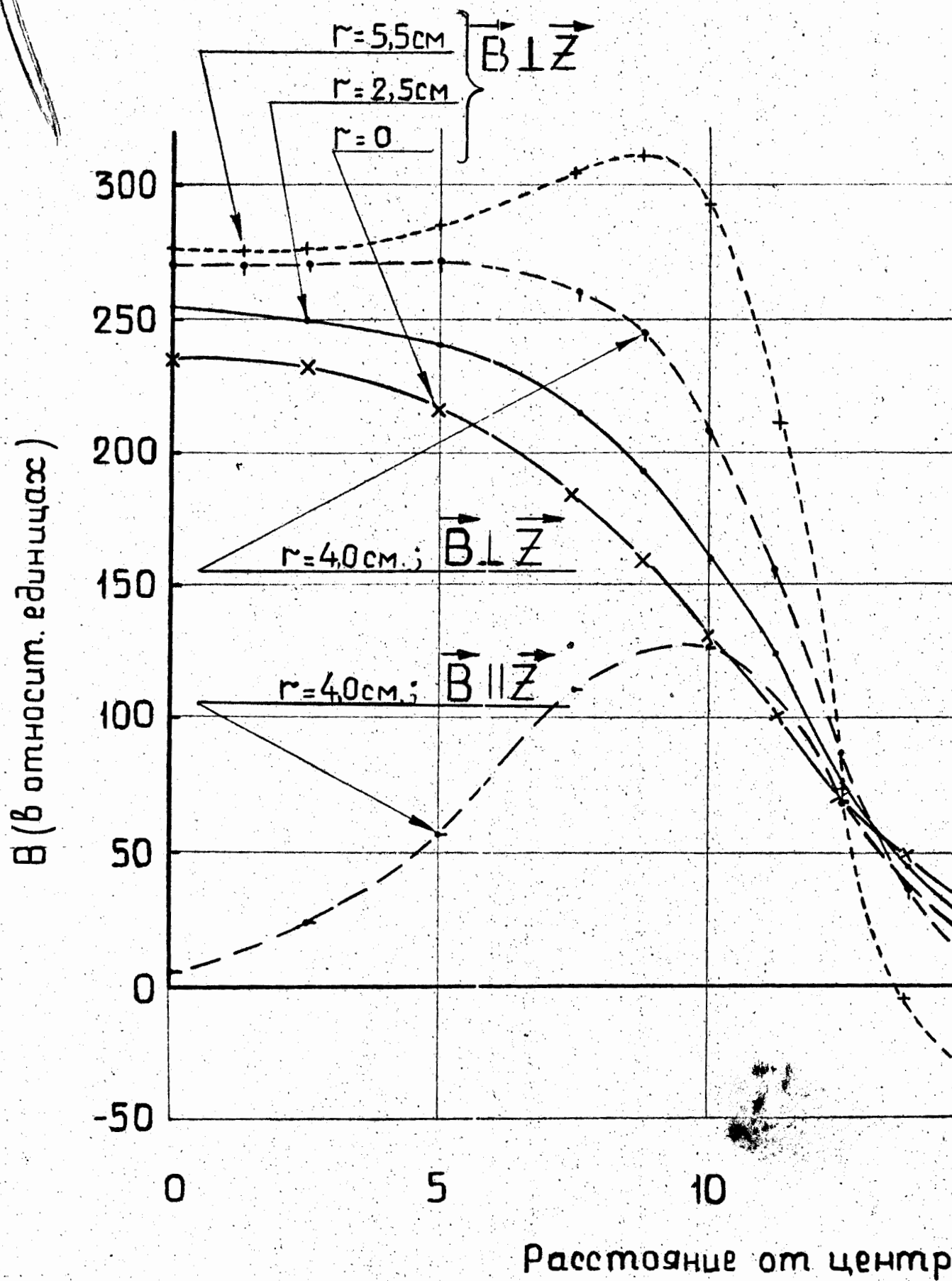
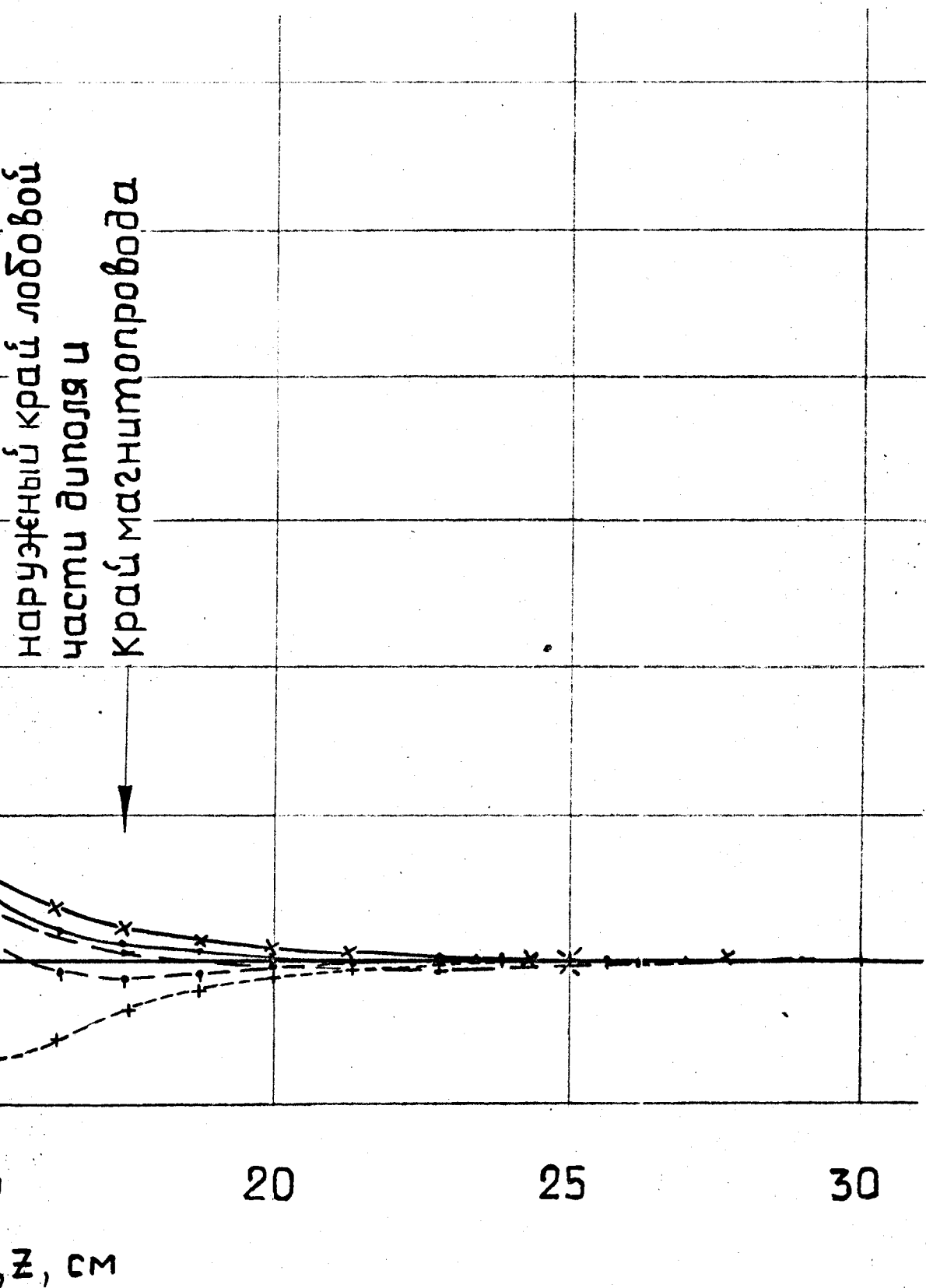


Рис.3 Распределение индукции в апер



уре модели МПК при $I = 1,1 \text{ A}$ в прямом диполе.

7. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

7.1. Измерение теплопроводности стали марки Э-310.

Из листов толщиной 0,5 мм стали Э-310 набран магнитопровод модели МПК. Данные о теплопроводности стали Э-310 при гелиевых температурах в литературе отсутствуют. В 1987 г. в НИКО создана установка для технических измерений величины λ конструкционных материалов, на которой определена для стали Э-310

$$\lambda_{6\text{ К}} = 0,68 \text{ Вт / (м.К)}.$$

Кроме того, измерена поперечная теплопроводность фольгированного стеклотекстолита марки ФДМ толщиной 200 мкм.

$$\lambda_{6\text{ К}} = 0,046 \text{ Вт / (м.К)}$$

Стеклотекстолит фольгированный предполагается использовать в тепловых развязках токовводов в МПК.

7.2. Магнитные измерения модели МПК.

В апреле 1986 г. проведены измерения распределения магнитного поля в апертуре модели с помощью датчика Холла, как в присутствии магнитопровода, так и без него (см. рис. 2 и 3). Вклад магнитопровода в величину индукции в центре МПК велик и составляет 65%. Важно также, что рассеянное поле МПК мало и равно, например, на краю железа $\sim 2\% \frac{H_{\text{макс}}}{H_{\text{макс}}}$ и далее практически равно нулю. Результаты этих измерений позволили определить эффективную длину магнитов МПК.

Кроме того, подготовлены и совместно с ОЭЭА выполнены измерения гармоник магнитного поля МПК при комнатных температурах. Из этих измерений следует, что относительная неточность укладки четырех обмоток по азимуту составила: $0,04^\circ$; $0,27^\circ$; $0,57^\circ$; $1,73^\circ$ (по ТЗ должно быть $\pm 1^\circ$). Определены основные и паразитные гармоники при подаче импульсного тока поочередно во все четыре обмотки МПК.

Оказалось, что по отношению к основной гармонике: в секступоле I; 2; 4; 5 и 6-я гармоники составили соответственно 4; I4; 2; 0,6 и 0,4 %; в октуполе - I; 2; 3; 5 и 6-я гармоники составили 4,5; I,4;

14,5; 1,7 и 0,65 %; в прямом диполе - 2;3; 4;5 и 6-я гармоники составили 2,3; 15,8; 0,54;4 и 1,7 %; а в косом диполе эти же гармоники составили 2; 13; 0,8; 8 и 0,13 %. Что касается сравнительно больших величин 3-й и 5-й гармоник в диполях, то это связано с отсутствием в данной модели специальных пустых проставок, которые в штатных МПК должны заменять (по углу) часть обмотки. Определено также влияние перекоса и сдвига осей датчика поля и МПК на величины низших гармоник.

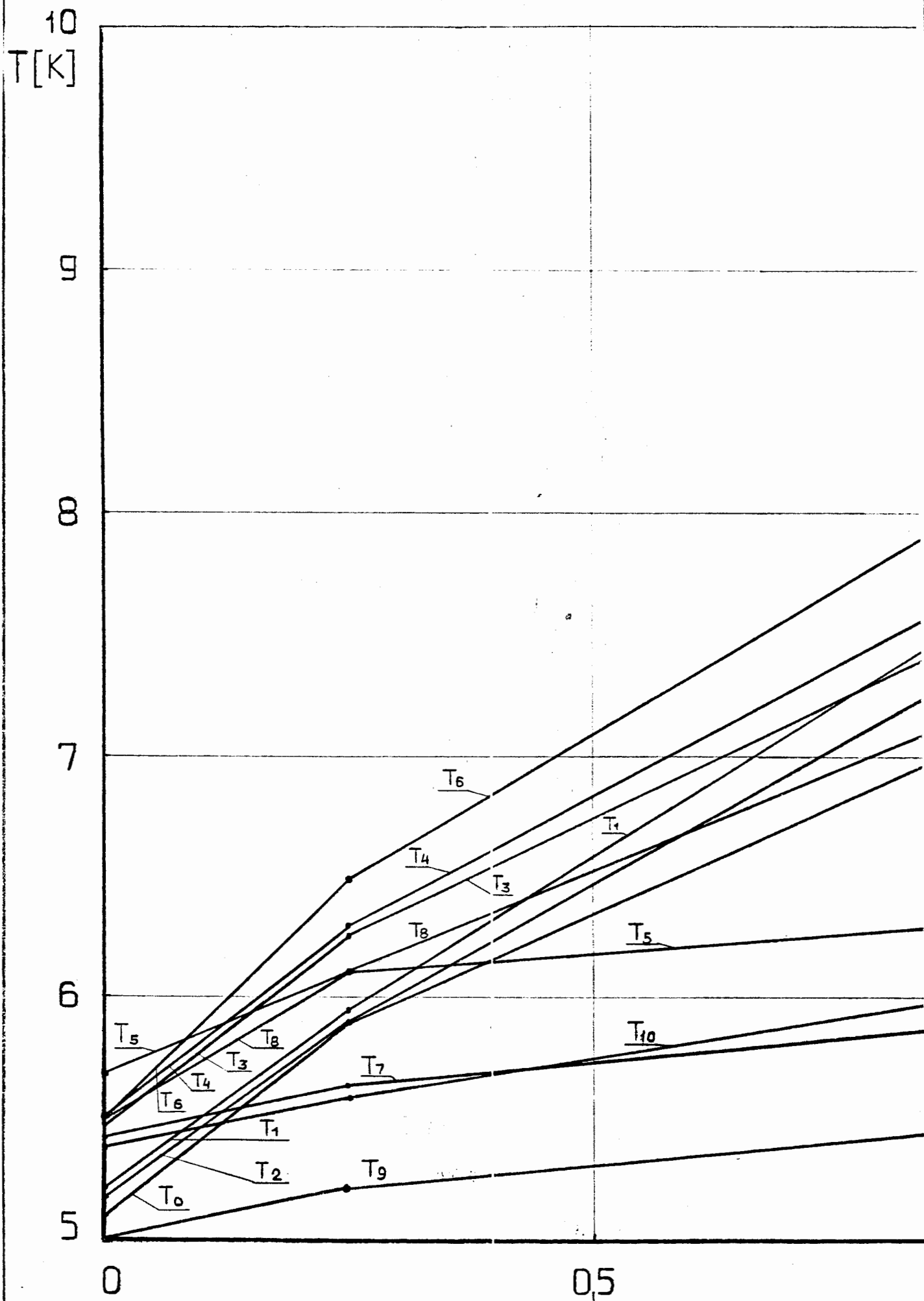
7.3. Испытания МПК 29 - 30.12.86.

Модель МПК охлаждена до 5-9 К, но регулярно (через несколько секунд) возникали колебания температуры до ~ 30-40 К (по термометру на трубке вывода гелия из МПК). Предположительная причина неустойчивости - большой теплоприток к гелиевому бачку по приклеенным к нему восьми токовводам. Программа измерений из-за неустойчивости режима не выполнена.

7.4. Испытания модели МПК 25 - 26.02.87.

Токовые провода отклеены от гелиевого бачка (осталась приклейка их к азотному бачку). В нижней части токовводы (16 медных проводов \varnothing 0,63 мм) навиты на трубку выхода гелия из МПК и приклеены к ней с помощью силикатного клея. Обмотка приклеена к магнитопроводу также силикатным клеем. Расширены проходы в теплых гелиевых коммуникациях. В режиме прогона парожидкостной смеси гелия из сифона через бачок и МПК накопить жидкость в бачке не удалось. После открытия выхода газообразного гелия из бачка в обратный поток и закрытия выхода из МПК получили уровень жидкости в вачке ~ 15 см. Затем открыли выход из МПК и медленно закрыли выход из бачка. Температуры в МПК понизились и стабилизировались.

Измерена зависимость температур МПК от мощности нагревателя, приклеенного к внутренней стороне каркаса обмотки. Анализ распреде-



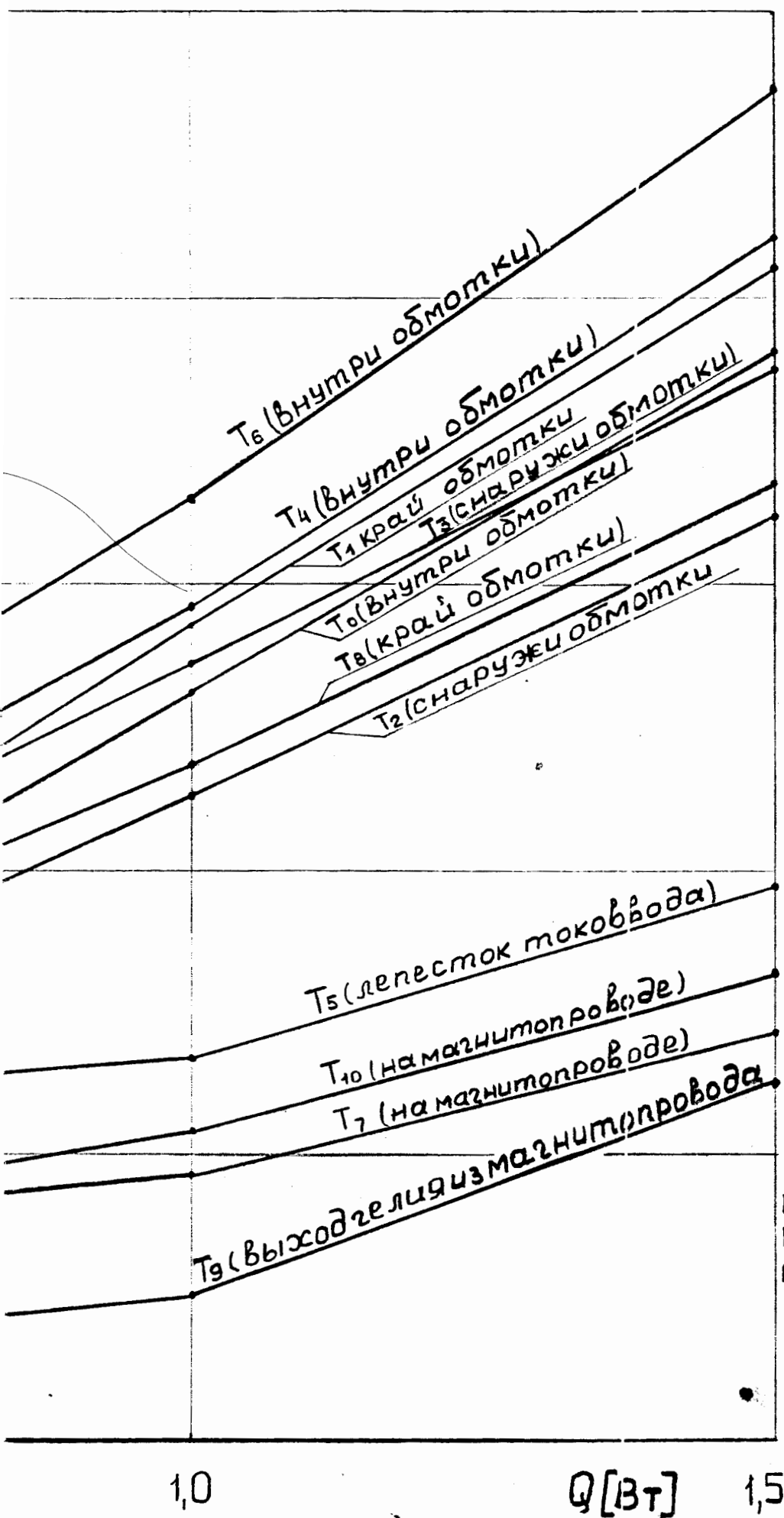


Рис. 4. Распределение температур T в элементе корректора при различных мощностях Q внутреннего нагревателя. 18.12.1940. Начало в 2040.

ления температур показал, что обмотка почти не приклеилась к магнитопроводу.

Ввели ток 10 А (период цикла 1 с) в октуполь. Замечен небольшой нагрев обмотки ($\sim 0,03\text{К}$).

8. ТОКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ МПК.

8.1. Цели и результаты эксперимента.

Модификация модели в основном за счет введения проволочных фитилей описана в разделе 2.

Цели испытаний:

- а) измерение теплопроводности элементов МПК;
- б) определение работоспособности МПК при номинальных импульсных токах;
- в) измерение энерговыделений в обмотках;
- г) отладка стенда.

Испытания проведены 18 - 19. 12. 87 г. Основные результаты:

- а) достигнуто устойчивое криостатирование МПК;
- б) измерено температурное поле МПК при мощности внутреннего нагревателя до 1,5 Вт (см. рис. 4);
- в) в прямой и косой диполи поочередно введены токи до 100 А при длительности треугольного импульса 1,5 с (0,75 с подъем, 0,75 с спад тока); измерено распределение температур в МПК;
- г) в октуполь и секступоль поочередно введены токи до 50 А с длительностью импульса 1,5 с; измерено распределение температур в МПК;
- д) запитаны от четырех источников все магниты МПК с длительностью импульса 1,5 с: ПД - 50 А; КД - 36 А; О - 46 А; С - 45 А; измеренно распределение температур в МПК;
- е) отлажена измерительная аппаратура, в частности, термометрия на основе ЭВМ „МЕРА-60“.

8.2. Обработка результатов эксперимента.

8.2.1. Теплопроводность обмотки.

Радиальная теплопроводность обмотки определялась по уравнению Фурье

$$\lambda = \frac{Q_{\text{нагр.}} \cdot \delta}{S \cdot \Delta T} = q \frac{\delta}{\Delta T},$$

где δ и S - толщина и площадь обмотки; $\delta \approx 0,3$ см,

$$S = \pi l_{\text{ср.}} l = 3,14 \cdot 15,1 \cdot 35 \approx 1600 \text{ см}^2.$$

$$\text{При } Q_{\text{нагр.}} = 1 \text{ Вт} \quad q = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$$

$$\Delta T = T_2 - T_4 \text{ (схема расположения датчиков показана на рис. 1).}$$

$$\text{При } Q_{\text{нагр.}} = 1 \text{ Вт} \quad \Delta T_I = 7,92 - 7,27 = 0,65 \text{ К, но так как при}$$

$$Q_{\text{нагр.}} = 0 \quad \Delta T_2 = 5,5 - 5,17 = 0,33 \text{ К, то действительное}$$

$$\Delta T = \Delta T_I - \Delta T_2 = 0,65 - 0,33 = 0,32 \text{ К и}$$

$$\lambda = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \text{ при } T_{\text{ср.}} = \frac{T_2 + T_4}{2} = 7,6 \text{ К.}$$

$$\text{При } Q_{\text{нагр.}} = 1,5 \text{ Вт} \quad \Delta T_I = 9,2 - 8,2 = 1,0 \text{ К, } \Delta T_2 \approx 0,3 \text{ К,}$$

$$\Delta T = 0,7 \text{ К, } T_{\text{ср.}} = 8,7 \text{ К и } \lambda = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

(величина λ снизилась, а должна бы повыситься с увеличением температуры, это говорит о неточности измерения температур).

$$\text{Примем в среднем } \lambda = \frac{5,9 + 4}{2} \cdot 10^{-4} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{обм. 8К}} = 0,05 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \text{ при } T = \frac{7,6 + 8,7}{2} \approx 8 \text{ К}$$

По данным^{/3/} (рис. 3) для эпоксидированной стеклотенты (в поперечном направлении) $\lambda_{4,2 \text{ К}} \approx 0,035 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, что близко к измеренным нами величинам. По рис. 4^{/3/} для стеклотекстолита СТЭФ-I поперек слоев $\lambda_{4,2 \text{ К}} = 0,06 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Продольная теплопроводность обмотки, естественно, значительно выше поперечной. Это видно из сравнения температур, расположенных на одной образующей в секстугонном датчике T_2 , T_I и T_8 . Значения T_2 и T_8 близки между собой.

Уравнение теплового баланса для элемента Δx развернутого в прямую кривого бруса ($1/8$ длины окружности по $\bar{D}_{\text{ср.}}$)

$$q_{x1} + q_z \Delta x = q_{x2} \quad , \quad \text{где } q_x = \lambda S \frac{dT}{dx}, \quad S = \delta \cdot l.$$

$$\frac{q_{x2} - q_{x1}}{\Delta x} - q_z = 0.$$

При $\Delta x \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение

$$\lambda S \frac{d^2 T}{dx^2} - q_z = 0. \quad \text{Дважды интегрируем}$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{q_z}{\lambda S} x + C_1,$$

$$T = \frac{q_z}{2\lambda S} x^2 + C_1 x + C_2.$$

При $x = 0 \quad T = T_{\text{He}}$, следовательно, $C_2 = T_{\text{He}}$, и из условия симметрии $\left(\frac{dT}{dx}\right)_0 = 0$, следовательно, $C_1 = 0$.

Отсюда при $x = \frac{\pi \bar{D}_{\text{ср.}}}{8}$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{макс.}} &= T_{\text{макс.}} - T_{\text{He}} = \frac{q_z}{2\lambda S} \left(\frac{\pi \bar{D}_{\text{ср.}}}{8}\right)^2 = \\ &= \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14^2 \cdot 17,75^2}{2 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,75 \cdot 1,64} = 1 \text{ К.} \end{aligned}$$

В действительности при $Q_{\text{нагр.}} = 1$ Вт измерено $\Delta T = T_7 - T_{10} \approx -0,15$ К, то-есть в пределах ошибки измерений $\Delta T \approx 0$. Это говорит о том, что тепловой поток от обмотки уходит в основном через фитили, а не через клей и магнитопровод. Таким образом, тепловое сопротивление между обмоткой и магнитопроводом по-прежнему велико.

8.2.3. Фитили.

Как показано в разделе 8.2.2. тепловой поток от обмотки отводится в криоагент в основном через фитили, которые представляют собой медные проволоки диаметром $d \approx 0,5$ мм, в количестве $N = 600$ шт.

Поскольку на участке, где фитили приклеены к обмотке, тепло передается в основном через обмотку, имеющую высокую продольную

теплопроводность, то важно определить тепловое сопротивление свободной части фитилей. На участке между концом обмотки и трубкой с гелием фитили имеют длину 5 - 8 см, для расчетов примем $\ell = 6$ см.

$$\text{нагр.} = \lambda \frac{S}{\ell} \Delta T,$$

$$S = \frac{N}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0,4 \text{ см}^2.$$

По рис. 4 средняя температура фитилей $\sim 7 - 8$ К.

По данным работы^{/4/} (с.25-26) применяющаяся в электротехнике медь по содержанию химических примесей подразделяется на марки МО и МІ. Содержание примесей в МО равно 99,95%, в МІ - 99,9% (см. табл. I^{/4/}).

Теплопроводность меди МІ приведена в табл. I работы^{/5/}.
При 7 К $\lambda = 7,5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ $\Delta T = \frac{I \cdot \ell}{\lambda \cdot S} = 2,0 \text{ К}.$

Измеренные разности температур: $\Delta T_1' = T_8 - T_9 = 7,36 - 5,5 = 1,86 \text{ К}$ с одного конца и $\Delta T_2' = T_1 - T_9 = 7,86 - 5,5 = 2,36 \text{ К}$ с другого конца обмотки.

Учтя ΔT при $Q_{\text{нагр.}} = 0$ $\Delta T_1'' = 5,5 - 5,0 = 0,5 \text{ К}$ и $\Delta T_2'' = 5,2 - 5,0 = 0,2 \text{ К}$, получим действительные $\Delta T_1 = \Delta T_1' - \Delta T_1'' = 1,86 - 0,50 = 1,36 \text{ К},$

$$\Delta T_2 = \Delta T_2' - \Delta T_2'' = 2,36 - 0,20 = 2,16 \text{ К},$$

$$\Delta T_{\text{ср.}} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} = \frac{1,36 + 2,16}{2} = 1,76 \text{ К},$$

что хорошо совпадает с расчетом.

8.2.4. Энергетические потери в обмотках МПК.

Запитка всех магнитов одновременно с треугольным циклом длительностью 1,5 с (0,75 с рост, 0,75 с спад тока):

Щ - 50 А, КД - 37 А, О - 46 А, С - 45 А. Температуры внутренних датчиков, по сравнению с показаниями в отсутствии тока в

магнитах, изменились следующим образом: $\Delta T_0 = 5,42 - 4,48 = 0,94$ К; $\Delta T_4 = 5,28 - 4,42 = 0,86$ К; $\Delta T_6 = 5,20 - 4,39 = 0,81$ К. По рис. 4 находим соответствующие таким величинам ΔT температуры и мощности нагревателя:

$$T_0 = 5,1 + 0,9 = 6 \text{ К}, \quad Q_{\text{нагр.}} \approx 0,3 \text{ Вт};$$

$$T_4 = 5,50 + 0,86 = 6,36 \text{ К}, \quad Q_{\text{нагр.}} \approx 0,29 \text{ Вт};$$

$$T_6 = 5,50 + 0,81 = 6,31 \text{ К}, \quad Q_{\text{нагр.}} \approx 0,23 \text{ Вт}.$$

$$Q_{\text{нагр.}} = \frac{0,30 + 0,29 + 0,23}{3} \approx 0,27 \text{ Вт}, \text{ что соответствует}$$

мощности энергопотерь.

Поскольку для данного проводника в рассматриваемой области индукций и частот потери за цикл не зависят от $B^{5/6}$, мощность потерь обратно пропорциональна длительности цикла и для I с вырастает в 1,5 раза, т.е. $Q = 1,5 \cdot 0,27 \approx 0,4$ Вт.

Эта величина нуждается в проверке путем более тщательного измерения температур и токов, однако, вряд ли она превысит 0,5 Вт.

9. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

Важнейший результат испытаний состоит в том, что импульсный магнит с косвенным криостатированием работоспособен. Обычно такое криостатирование применяется для магнитов с постоянным током. На сверхпроводящем синхротроне в Батавии безжелезные корректоры снабжены гелиевыми трубками, проходящими на радиусе второго слоя^{17/}. Однако, мощность энергетических потерь здесь во много раз меньше, чем в МПК нуклотрона, из-за большой длительности цикла ускорителя.

К преимуществам косвенного криостатирования в условиях Нуклотрона можно отнести отсутствие гелиевого сосуда и охлаждаемых парами гелия тоководов. Поскольку предполагается допускать аварийное давление до 25 - 30 ати, то криостат оказался бы весьма громоздким. Подобные тоководы потребовали бы установки по кольцу ускорителя газосборной системы, вентилях, ротаметров, а также организации соответствующего обслуживания.

Подтверждена правильность выбора проводника диаметром 0,5 мм. Он обладает достаточным запасом по току и технологичен. Проводов меньшего диаметра наша промышленность не выпускает, а доступный, благодаря использованию на УНК, провод \varnothing 0,85 мм усложнил бы технологию, привел к утолщению обмотки и потребовал значительного увеличения рабочего тока, так как на том же диаметре можно расположить меньшее количество витков.

Теплопроводность обмотки в радиальном и осевом направлениях достаточно велика, что свидетельствует о хорошей склейке слоев. Однако, проведенные предварительные испытания показали, что смола К-115 с Л-20 обладает невысокой адгезией и термостойкостью. Поэтому в дальнейшую программу испытаний модели МПК следует включить многократное термоциклирование от комнатной до азотной температуры и последующие измерения теплопроводности и работоспособности обмотки. Необходимо также продолжить поиски более подходящего композита.

Основным термическим сопротивлением для отвода энергопотерь из обмотки в модели МПК является участок фитилей от края обмотки до трубки с гелием. Кроме того, фитили довольно нетехнологичны. Поэтому в новых конструкциях МПК необходимо укорачивать до предела этот участок фитилей или отказываться от них, передавая тепло, например, на внутренний змеевик с гелием.

Теплопроводность магнитопровода достаточна для отвода через четыре медные накладки его собственных энергопотерь и всех потерь в обмотке, если они не будут превышать 0,5 Вт. Однако, теплоотвод из обмотки через магнитопровод связан с трудностью обеспечения их высококачественной склейки и невозможностью их разборки для ремонта или замены обмотки при склейке эпоксидными компаундами.

Расчетные и экспериментально измеренные энерговыделения в обмотке отличаются в несколько раз, повидимому, из-за того, что в расчете принято не реальное распределение индукции, а максималь-

ное расчетное значение отнесено ко всем точкам обмотки. / Необходимо продолжать совершенствование стенда по следующим направлениям:

1. Создать 4 импульсных источника энергопитания, управляемых ЭВМ.
2. Завершить изготовление и наладку устройства электрической защиты 4-х магнитов.
3. Устранить помехи в системе термометрии с целью повышения точности измерения температур.
4. Усовершенствовать систему автоматизации измерений на базе ЭВМ "Правец-16".
5. Обеспечить стенд приборами для точной записи токов в обмотках.
6. Снизить расход жидкого гелия при испытаниях.

10. ВЫВОДЫ.

1. Экспериментально доказана работоспособность импульсных МПК с косвенным криостатированием.
2. Показано, что критические токи магнитов МПК значительно превышают рабочие (60 А).
3. Измерены теплопроводность обмотки и магнитопровода .
4. Показано, что тепловое сопротивление места склейки обмотки с магнитопроводом слишком велико, а температура нагрева обмотки определяется в основном величиной теплового сопротивления участков фитилей, находящихся между краем обмотки и трубкой с гелием.
5. Определен уровень энерговыделений в МПК.
6. К недостаткам испытанной модели МПК можно отнести:
 - а) неточность укладки обмоток;
 - б) большое количество контактных соединений проводов и сложность их коммутации;
 - в) сложность технологии сборки фитилей;
 - г) чрезмерная длина свободных участков

фитилей.

7. Рекомендовать изготовление и испытание опытного МПК с точностью укладки обмотки в соответствии с ТЗ на модельный МПК, причем каждый магнит должен содержать не более 1 - 2 кусков провода, теплоотвод от обмотки осуществить с помощью внутреннего змеевика, для изготовления контактной платы использовать фольгированный стеклотекстолит.

8. Продолжить испытания модельного МПК для доработки устройств электрической защиты МПК и уточнения энерговыделений в обмотках. Для выяснения длительной термостойкости использованной в модели смолы К-II5 провести многократное термоциклирование модели от комнатной до азотной температуры и последующие измерения теплопроводности обмотки и работоспособности МПК.

9. Продолжить совершенствование стенда, в том числе:

- а) создать 5 источников питания с гибким управлением, по возможности, от ЭВМ;
- б) автоматизировать все измерения на базе ЭВМ "Правец-16";
- в) повысить точность измерений.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. M.N.Wilson et al. Experimental and Theoretical Studies of Filamentary Superconducting Composites. RPP/A 73. Rutherford Laboratory, 1969.
2. R.G.Hampshire et al. Effect of Temperature on the Critical Current Density of Nb - 44 wt % Ti Alloy. Supplement an Bulletin I.I.F./I.I.R. Annexe, 1969 - 1.
3. С.С.Козуб, У.Эшер. Теплопроводность изоляционных и конструкционных материалов при низких температурах. Препринт ИФВЭ 8I-6I, Серпухов, 1981.
4. Л.С.Ейльман. Проводниковые материалы в электротехнике. Энергия, М., 1974.
5. Л.А.Новицкий, И.Г.Кожевников. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. Машиностроение, М., 1975.
6. В.М.Дробин, Е.И.Дьячков, Ю.В.Куликов и др. Потери в сверхпроводящих кабелях в импульсных магнитных полях. Препринт ОИЯИ Р8-80-575, Дубна, 1980.
7. D.Giazynski, P.Mantsch. IEEE, vol. NS-28, N 3, 1981, p.3275.

Приложение № 1

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер ЛВЭ СМЭИ

М.С. Макаров
М.С. Макаров
 1988 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на разработку и изготовление модели сверхпроводящего
 мультипольного корректора (МПК) Нуклотрона

Модель МПК должна содержать четыре группы обмоток, создающих следующие магнитные поля: прямой и косой диполи, прямой секступоль и прямой октуполь. Габаритная длина МПК – 350 мм, внутренний диаметр каркаса – 150 мм. Магнитные и электрические характеристики модели мультипольного корректора приведены в таблице:

Тип поля	Нелинейность	Индукция на полюсе (R = 65 мм)	Число ампер- витков
		T	A
Прямой диполь	0,07 T	0,07	$4 \cdot 10^3$
Косой диполь	0,07 T	0,07	$4 \cdot 10^3$
Прямой секступоль	65 T/m^2	0,19	$4,1 \cdot 10^3$
Прямой октуполь	600 T/m^3	0,05	$0,75 \cdot 10^3$

Угловые протяженности каждой группы обмоток даны на прилагаемом рисунке. Точность реализации угловых интервалов не хуже $\pm 1^\circ$.

Обмотки окружены железным ярмом толщиной не менее 20 мм в расчете на пропускание всего магнитного потока. Магнитопровод шихтованный, толщина листов железа 0,35 мм.

Так как каркас МПК не является частью вакуумной системы ионопровода, допускается его сквозное сверление. Охлаждение обмоток – косвенное. Максимальные рабочие токи в каждой группе обмоток не должны превышать 60 А. Должно быть предусмотрено жесткое соединение МПК со структурной квадрупольной линзой.

Желательно конструкцию макета сделать максимально близкой к рабочему варианту.

В процессе проектирования и уточнения расчетов могут быть внесены изменения в конструкцию МПК.

Иссинский
Михайлов

И.Б.Иссинский
В.А.Михайлов

СОГЛАСОВАНО:

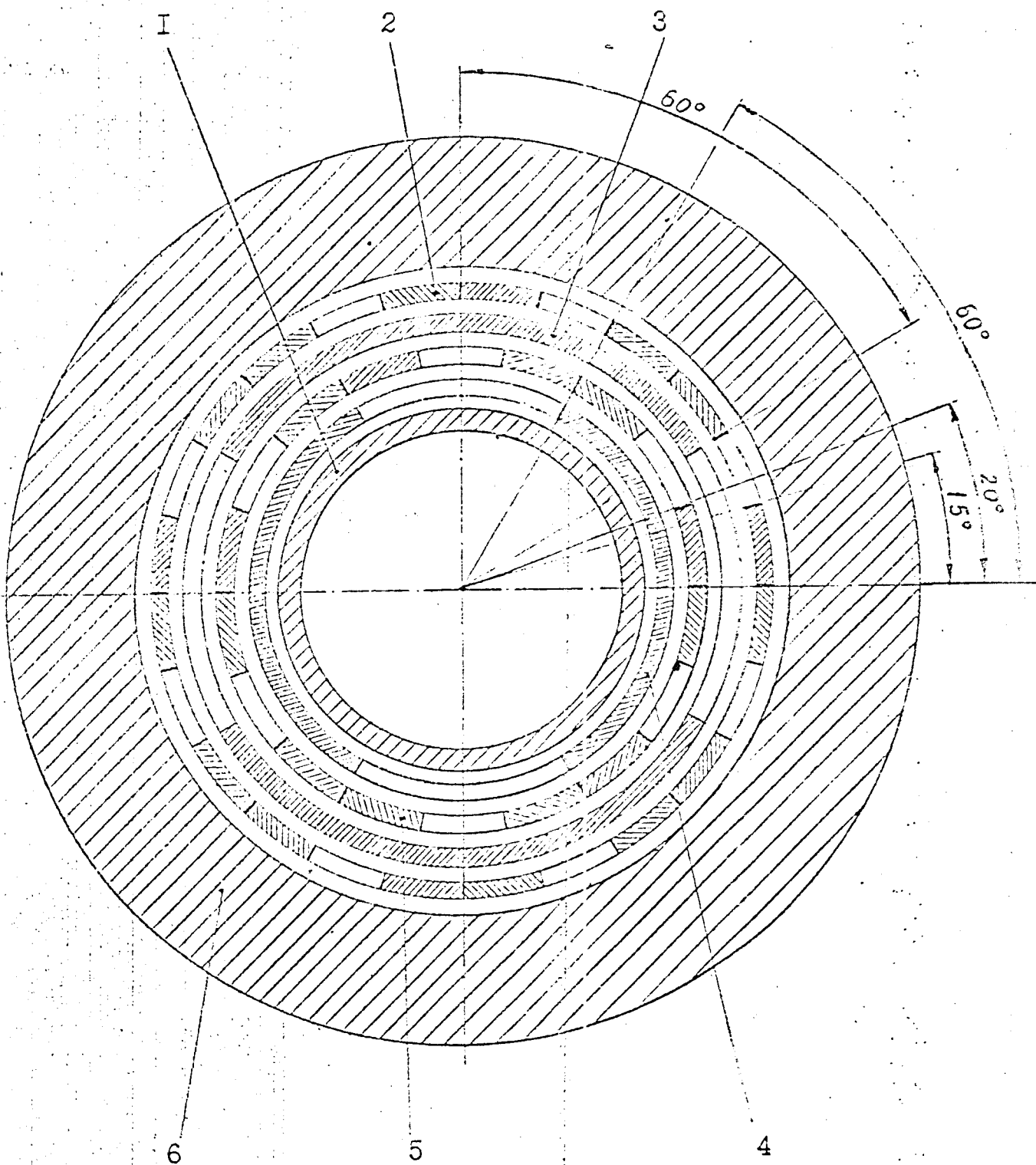
А.А.Смирнов

Ю.К.Пилипенко

С.А.Аверичев

Смирнов
Пилипенко
Аверичев

" 19 " 92 г. 193 / 1



СХЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ МУЛЬТИПОЛЬНОГО КОРРЕКТОРА:
I-каркас, 2-октуполь, 3-косой диполь, 4-диполь,
5-секступоль, 6-железное ярмо.