1968 г. Май *Том 95, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

538.244.2

СОЛЕНОИД, СОЗДАЮЩИЙ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДО 30 *кэ* В ОБЪЕМЕ 5 *л* И ПОТРЕБЛЯЮЩИЙ 500 *квт*

П. Л. Капица, С. И. Филимонов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТАНОВКИ

При исследовании некоторых свойств плазмы для получения постоянного магнитного поля нами был осуществлен соленоид с параметрами, указанными в заголовке. Поскольку соленоид хорошо и надежно работает и в конструкции его обмотки и системе охлаждения имеются некоторые оригинальные решения, мы даем здесь краткое описание всей установки и конструкции соленоида и приводим расчеты.

Конструкция соленоида изображена на рис. 1, а схема всей установки — на рис. 2. Обмотка соленоида состоит из катушек-галет, расположенных по 6 штук симметрично по обе стороны от среднего сечения, посередине имеется свободный зазор в 3 *см*, который позволяет производить наблюдения в поперечном магнитном поле. Соленоид имеет железное ярмо, которое увеличивает однородность и интенсивность магнитного поля внутри соленоида, а снаружи уменьшает рассеянное поле. Питание соленоида производится генератором постоянного тока на 500 *квт* при 500 *в* (рис. 2). Сила тока в соленоиде устанавливается возбуждением генератора, которое стабилизируется самим током.

Основная конструкторская задача, требовавшая продуманного решения, связана с самой обмоткой соленоида. Она, как известно, должна удовлетворять следующим требованиям: первое — иметь высокий коэффициент заполнения медью; второе — иметь эффективное охлаждение; третье — быть достаточно прочной, чтобы при достигаемых магнитных полях противостоять силам, возникающим в обмотке от взаимодействия тока и поля.

Мы применяем ленточную обмотку, состоящую из ряда последовательно соединенных галет. Аналогичный тип обмотки уже применялся в конструкции соленоида, описанного в работе С. П. Капицы[1]. Охлаждение обмотки осуществляется радиальным потоком жидкости, протекающим между галетами, но вместо масла мы применяем дистиллированную воду, которая при турбулентном потоке дает возможность осуществить во много раз более эффективное охлаждение, чем то, которое реализуется при ламинарном потоке масла. Использование чистой воды для охлаждения стало теперь значительно проще и надежнее благодаря применению фильтров, заполненных зернами ионно-активной смолы. Как показано на рис. 2, часть охлаждающей воды ответвляется и проходит через ионный фильтр; таким образом, она непрерывно очищается и ее электропроводность поддерживается на весьма низком уровне (меньше 10^{-7} *ом/см*$^{-1}$). Несмотря на то, что наружный край ленты в галетах не имеет изоляционного слоя и непосредственно омывается водой, паразитный ток через воду практически отсутствует.

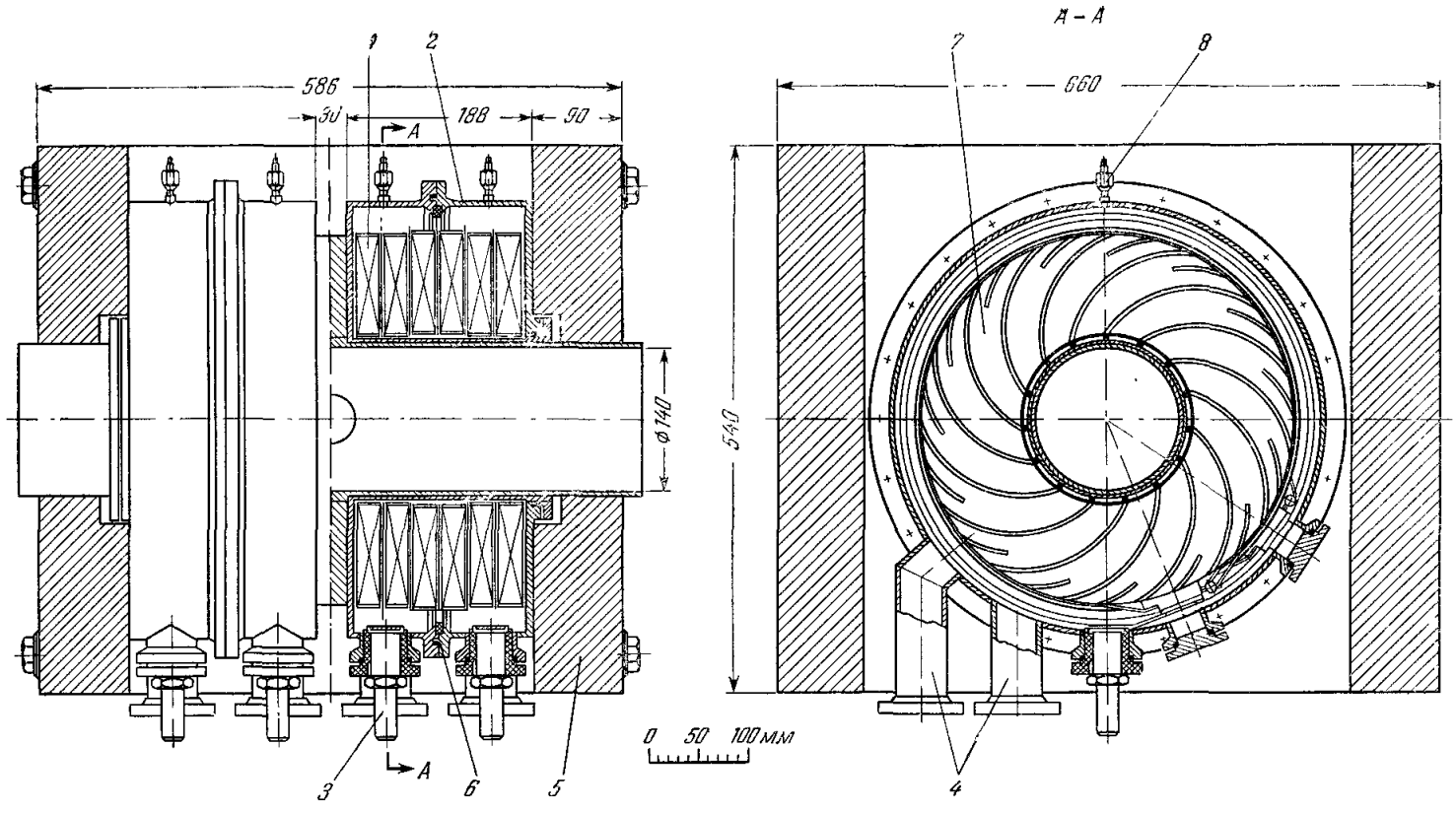

Рис. 1. Конструктивный чертеж соленоида.

1 — галета; *2* — кожух; *3* — токоввод; *4* — патрубки для подвода и отвода воды; *5* — ярмо; *6* — перегородка, разделяющая поток воды; *7* — прокладка со спиралями, направляющими поток воды; *8* — отверстие для спуска воздуха.

Вся система охлаждения, по которой циркулирует чистая вода, выполнена из меди или нержавеющей стали. Циркуляционные насосы также сделаны из нержавеющей стали. Циркуляционная схема охлаждения дана на рис. 2. Следует обратить внимание на то, что в выбранной нами системе охлаждения весьма существенно отсутствие изоляционного слоя на наружной поверхности галет, так как таким путем обеспечивается эффективный отвод тепла от меди к воде. При такой системе изоляции

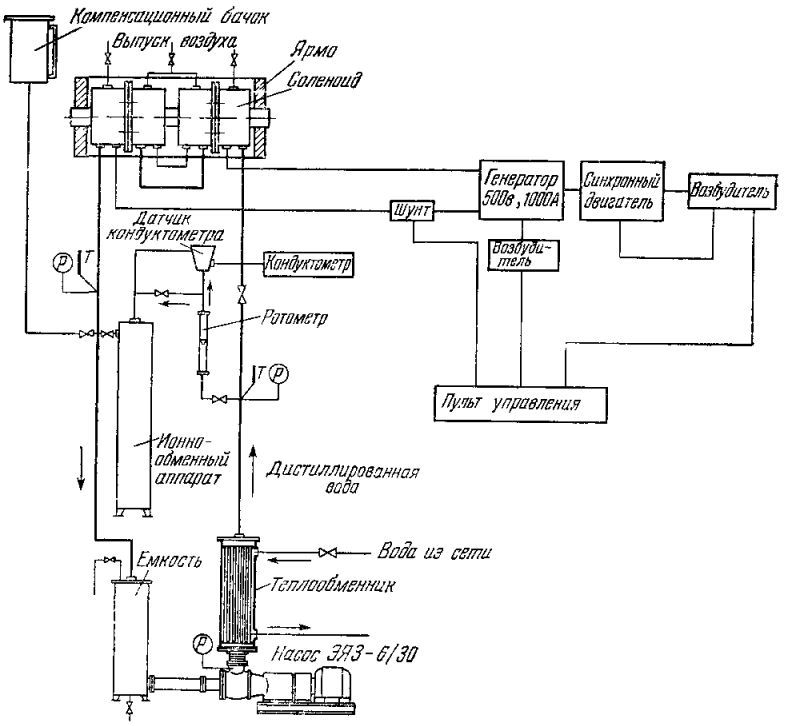

Рис. 2. Схема установки.

витков обмотку следует тщательно оградить от перенапряжений, которые могут возникнуть при резком размыкании питания. Поэтому в качестве меры предосторожности обмотка присоединена к генератору без рубильника и для полного прекращения тока нужно останавливать генератор.

2. РАСЧЕТ ОБМОТКИ

Примем следующие обозначения: ширина ленты $2b$, внутренний радиус галеты R_0, наружный R_1, число галет $2n$, полная длина соленоида L, подводимая мощность W, ток I, напряжение V. В нашем соленоиде $R_0 = 8{,}0$ *см*, $R_1 = 18{,}0$ *см*, $L = 40{,}6$ *см*, $n = 6$, $W = 5 \cdot 10^5$ *вт* и $I = 10^3$ *а*.

Расчетные формулы для обмотки просто выводятся из закона Ома и геометрических соображений, и мы их даем только в окончательном виде.

Площадь торцевой поверхности галет

$$S = \pi (R_1^2 - R_0^2); \tag{1}$$

объем всей обмотки

$$O = 4nbS; \tag{2}$$

удельная тепловая нагрузка обмотки

$$w = \frac{W}{O} \tag{3}$$

(в нашем соленоиде $w = 20{,}5$ *вт/см*^{3}); площадь сечения ленты

$$C = I\sqrt{\frac{\mu}{w}}, \tag{4}$$

где

$$\mu = \frac{\mu_0}{\eta} \tag{5}$$

— удельное сопротивление ленты, η — коэффициент заполнения галеты медью, μ_0 — удельное сопротивление меди при рабочей температуре T_1. Эта температура определяется условиями охлаждения, она будет вычислена в следующем разделе (см. формулу (24)). В нашем соленоиде $T_1 = 40-50°$ и $\eta = 0{,}9$, так что в расчетах мы брали $\mu = 2\cdot10^{-6}$ *ом/см*. Толщина ленты с изоляционной прокладкой

$$d = \frac{C}{2b}. \tag{6}$$

Преимущество принятой нами обмотки в том, что ее можно делать из тонких лент в несколько слоев. Многослойную обмотку не только легче мотать, но также значительно надежнее и проще присоединять новые куски лент, поскольку это можно делать без заметного нарушения сечения ленты. Намотка галет производится в оправке на специальном станке, который обеспечивает ровную натяжку лент, так что катушки получаются плотные, с ровными поверхностями торцов. Каждая из галет имеет свой наружный крепежный бандаж.

Мы брали две параллельные ленты, каждая сечением $25 \times 0{,}6$ *мм*^{2}; изоляцией служила лавсановая лента толщиной 0,14 *мм* той же ширины, что и медная. Число витков в каждой галете

$$N = \frac{R_1 - R_0}{d}; \tag{7}$$

длина ленты в одной галете

$$\mathscr{L} = \pi N (R_1 + R_0); \tag{8}$$

в нашем соленоиде $N = 73$ и $\mathscr{L} = 60$ *м*.

3. ОХЛАЖДЕНИЕ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ОБМОТКИ

Теплоотвод производится водой, омывающей торцевую поверхность галет. Температурный напор, обеспечивающий теплоотвод, является суммой двух перепадов температур: ΔT_1 (перепад температур в меди) и ΔT_2 (перепад температур между охлажденной водой и торцевой поверхностью галет). Перепад температур от среднего сечения к торцам определяется следующим выражением:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{2}\frac{b^2}{4{,}18k_{\text{м}}}w, \tag{9}$$

где $k_{\text{м}}$ — теплопроводность меди, которую мы примем равной $k_{\text{м}} = 0{,}96\ \frac{\text{кал}}{\text{см}\cdot\text{сек}}$. В нашем соленоиде при взятой нами нагрузке на медь $w = 20{,}5$ *вт/см*^{3} и $2b = 2{,}5$ *см* перепад температур в меди составляет только 4°.

Основной перепад температур происходит между водой и торцевой поверхностью галет. Расчет показывает, что для его осуществления необ-

ходим интенсивный поток жидкости, причем течение должно быть турбулентным, скорость течения воды должна быть достаточна велика, так как теплопередача увеличивается со скоростью. При радиальном течении воды между галетами скорость потока будет падать по мере приближения к периферии обмотки. Чтобы обеспечить по всей поверхности галет одинаковый теплообмен, нужно сохранять постоянной скорость течения воды по поверхности, что достигается с помощью прокладок, помещенных в зазоре между галетами и направляющих поток воды. Это делается так: посередине зазора между галетами ставят тонкий стеклотекстолитовый диск, с каждой стороны которого прикреплены узкие тефлоновые полоски, согнутые по спирали (см. рис. 1 и 7); эти полоски не только направляют поток жидкости так, чтобы он протекал по торцу с одинаковой скоростью, но они также служат прокладками, которые сжимаются между галетами и обеспечивают прочность всей обмотки.

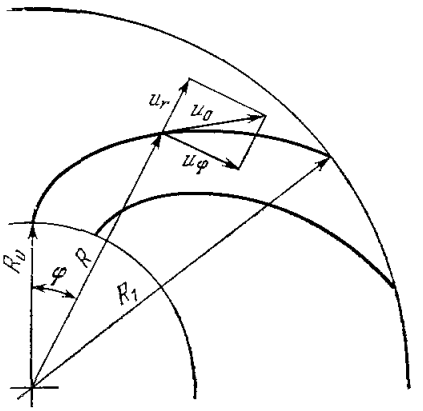

Рис. 3. К вычислению профиля прокладок.

Вычислим кривую, по которой должны быть изогнуты прокладки, чтобы обеспечить постоянную скорость течения воды. Обозначим среднюю скорость воды в зазоре через u_0. Координаты R и φ определяют профиль спирали-прокладки между катушками, при котором $u_0 = \text{const}$. На рис. 3 дан профиль прокладок и изображено разложение скорости на составляющие u_r и u_φ.

Для сохранения величины расхода воды нужно, чтобы между радиальными и тангенциальными составляющими скорости были следующие соотношения:

$$u_r R = u_0 R_0, \qquad u_0 = \text{const}, \qquad u_r^2 + u_\varphi^2 = u_0^2, \tag{10}$$

откуда получаем

$$u_\varphi = u_r \left(\frac{R^2}{R_0^2} - 1\right)^{1/2}. \tag{11}$$

Уравнение профиля направляющей спирали имеет вид

$$R\,\frac{d\varphi}{dR} = \frac{u_\varphi}{u_r} = \left(\frac{R^2}{R_0^2} - 1\right)^{1/2}. \tag{12}$$

Интегрируя это уравнение при условии $u_\varphi = 0$ $(R = R_0)$, получаем уравнение спиральной кривой, по которой должны быть вырезаны прокладки, в виде

$$\varphi = \left(\frac{R^2}{R_0^2} - 1\right)^{1/2} - \arccos\frac{R_0}{R}\,. \tag{13}$$

Для вычислений удобно выразить это уравнение в параметрическом виде, а именно:

$$\frac{R_0}{R} = \cos x, \qquad \varphi = \operatorname{tg} x - x. \tag{14}$$

Длина потока определяется выражением

$$D = \int\limits_{R_0}^{R} \sqrt{dR^2 + R^2\,d\varphi^2} = \frac{R_0}{2}\left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1\right)\,. \tag{15}$$

На рис. 1 изображено сечение соленоида; видно, что число направляющих прокладок больше у наружного края галеты. Это сделано по конструктивным соображениям: во-первых, для прочности; во-вторых, для уменьшения расстояния между прокладками, чтобы эффективно направлять поток воды вдоль спирали. Из рис. 1 также видно, что в трех крайних галетах вода идет от периферии к центру, а в трех следующих — в обратном направлении. Замыкаются эти потоки в зазорах между отверстиями в галетах и внутренней трубкой, на которой помещена обмотка. Дисковые прокладки из стеклотекстолита помещены в зазорах между галетами и простираются за пределы обмотки; это делается для того, чтобы в тех местах, где между соседними галетами имеется значительная разность потенциалов, увеличить путь возможным утечкам тока через воду. Чтобы не было утечек тока через воду к внутренней поверхности кожуха, его покрывают эмалью *).

Расчет перепада ΔT_2 температур между водой и стенкой галеты мы проводим обычными методами (см. [2]). Нам будут нужны следующие постоянные, определяющие свойства воды при 20° С: вязкость воды $\psi = 0{,}01$ пуаза, удельная теплоемкость $c_0 = 1$ *кал/г*, плотность $\rho = 1$ *г/см*^{3}, теплопроводность $k_0 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ *кал·см/сек*, кинематическая вязкость $\nu = \psi/\rho = 0{,}01$, число Прандтля $\mathsf{Pr} = \nu\rho c_0/k_0 = 6{,}6$. Средняя скорость потока воды между галетами

$$u_0 = \frac{Q}{4\pi n R_0 a}, \tag{16}$$

где Q — расход воды, n — половина числа галет, a — высота зазора между галетами, по которому течет вода. Число Рейнольдса равно

$$\mathsf{Re} = \frac{d_e u_0}{\nu}, \tag{17}$$

где

$$d_e = 2a \tag{18}$$

— эквивалентный диаметр для щелевого зазора высоты a. Тогда

$$\mathsf{Re} = \frac{Q}{2\pi n \nu R_0}. \tag{19}$$

Для обеспечения турбулентного течения жидкости нужно, чтобы выполнялось условие $\mathsf{Re} > 2500$; таким образом определяется нижний предел для расхода воды Q. Q определяет разность температур ΔT_3 между входящей и выходящей дистиллированной водой, служащей для охлаждения обмотки соленоида. Из теплового баланса мы имеем

$$\Delta T_3 = \frac{W}{4{,}18 C\rho Q}. \tag{20}$$

В нашем соленоиде при полной мощности и расходе $Q = 1{,}2 \cdot 10^4$ *см*^{3}*/сек* перепад температур ΔT_3 имел величину 10°. При этом получается $\mathsf{Re} = 8000$, и турбулентность потока полностью обеспечена. Для определения перепада ΔT_2 проведем вычисление теплообмена между медью и водой. Для этого определим число теплопередачи (см. [2]); оно дается следующим выражением:

$$K_0 = 0{,}04\,\mathsf{Re}^{-0{,}25}\,\mathsf{Pr}^{-0{,}6}. \tag{21}$$

Коэффициент теплопередачи между медью и жидкостью равен

$$\alpha = c_0 \rho K_0 u_0, \tag{22}$$

*) Поскольку кожух изготовлен из нержавеющей стали, покрыть его эмалью обычным методом нельзя. Мы благодарим институт НИИХИММАШ в Харькове и заведующего лабораторией А. Я. Матяш за эту работу, выполненную специально для нас.

откуда получаем перепад температур между водой и поверхностью галет в виде

$$\Delta T_2 = \frac{bw}{4{,}18\alpha} = \frac{bw}{4{,}18 c_0 \rho K_0 u_0}. \qquad (23)$$

Этот перепад температур между галетами и водой ставит наиболее жесткие условия при осуществлении системы охлаждения. На практике перепад ΔT_2 нежелательно делать больше 20—30°. Поэтому при заданной ширине ленты $2b$ и заданной удельной тепловой нагрузке обмотки w, учитывая слабую зависимость числа теплопередачи K_0 от скорости, для понижения величины ΔT_1 можно только увеличивать скорость течения u_0. В нашем случае скорость u_0 лежит в пределах 2,5—3 *м/сек*. Таким образом, получаем среднюю температуру меди T_1 в обмотке соленоида; она выше температуры входящей в соленоид воды T_0 и равна

$$T_1 = T_0 + \frac{2}{3}\Delta T_1 + \Delta T_2 + \frac{1}{2}\Delta T_3. \qquad (24)$$

Как уже указывалось, в нашем соленоиде $\Delta T_3 \approx 10°$; температура воды, поступающей из теплообменника, составляет 20—30° С, а температура меди T_1 достигает 45—55° С, соответственно которой вычисляется среднее омическое сопротивление обмотки.

Перепад давлений Δp, необходимый для циркуляции воды, вычисляется обычным путем (см. [2]); он равен

$$\Delta p = 8 \cdot 10^{-8} \rho \frac{u_0^2}{a} \mathrm{Re}^{-0{,}25} D \text{ атм}, \qquad (25)$$

где D — длина спиралей, определяемая выражением (15). Величина Δp, вычисленная таким путем, занижена, так как не учтена шероховатость стенок и значительные входные и выходные сопротивления. В нашем соленоиде полный перепад давлений между входом и выходом жидкости равен $\Delta p = 1{,}3$ *атм* при $Q = 12$ *л/сек*, $a = 0{,}15$ *см* и $D = 16{,}3$ *см*.

4. РАСЧЕТ ЯРМА И ПОЛЯ В ЦЕНТРЕ СОЛЕНОИДА

Поле в центре соленоида при идеально замыкающем ярме с учетом отверстий на концах обмотки определяется формулой

$$H_0 = 0{,}4\pi \frac{A}{L}\left(1 - 2\frac{R_0^2}{L^2}\right) \text{ э}, \qquad (26)$$

где

$$A = 2\pi N I \qquad (27)$$

— ампер-витки соленоида. У нашего соленоида $A = 9 \cdot 10^5$ и $H_0 = 29{,}5 \cdot 10^3$.

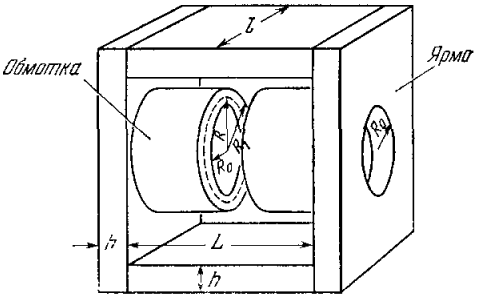

Рис. 4. Ярмо соленоида.

Форма ярма дана на рис. 4. Для определения размеров ярма надо вычислить величину магнитного потока в ярме Ф. Его можно рассматривать как сумму двух потоков:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_1. \qquad (28)$$

Поток Φ_0 создается магнитным полем, выходящим из отверстия соленоида. С достаточным для наших целей приближением примем

$$\Phi_0 = \pi R_0^2 H_0. \qquad (29)$$

Поток Φ_1 создается магнитным полем, пронизывающим обмотку соленоида. Для расчета потока Φ_1 вводим координаты

$$x = R - R_0, \qquad x_0 = R_1 - R_0. \tag{30}$$

Тогда поле H в обмотке при $R_0 < R < R_1$ и поле H_0 на границе ярма и обмотки соленоида будут определяться выражениями

$$H = 4\pi j\,(x_0 - x), \qquad H_0 = 4\pi j x_0, \tag{31}$$

где j — средняя плотность тока в обмотке. Мы получаем

$$\Phi_1 = \int_0^{x_0} 2\pi H\,(R_0 + x)\,dx. \tag{32}$$

Подставляя поле H из предыдущей формулы и интегрируя, получаем

$$\Phi_1 = \pi H_0 \left(R_0 + \frac{1}{3}x_0\right) x_0. \tag{33}$$

Из выражений (28), (29) и (33) находим полный поток через ярмо:

$$\Phi = \frac{\pi}{3} R_0^2 H_0 \left[1 + \frac{R_1}{R_0} + \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2\right]. \tag{34}$$

Расчет ярма сводится к тому, что его сечение не должно представлять заметное магнитное сопротивление при замыкании внешнего магнитного потока. Так будет, если магнитная индукция B всюду в ярме будет значительно ниже индукции при насыщении железа. В наших расчетах мы считаем, что должно быть $B < 17$ *кгс*. Как видно на рис. 4, ярмо собирается из плит толщиной h; они вырезаны из листов малоуглеродистой стали. Толщина h должна быть достаточной, чтобы не было насыщения железа в ярме у концов обмотки. Для этого должны быть выполнены два условия

$$h > \frac{\Phi_0}{2\pi R_0 B} \quad \text{и} \quad h > \frac{\Phi}{2\pi R_1 B}. \tag{35}$$

Ширина плит l определяется формулой

$$l = \frac{\Phi}{2hB}. \tag{36}$$

В нашем соленоиде $h = 9$ *см* и $l = 55$ *см*. Вес ярма получился равным 800 *кг*, вес обмотки 210 *кг*, так что весь соленоид весил несколько более одной тонны.

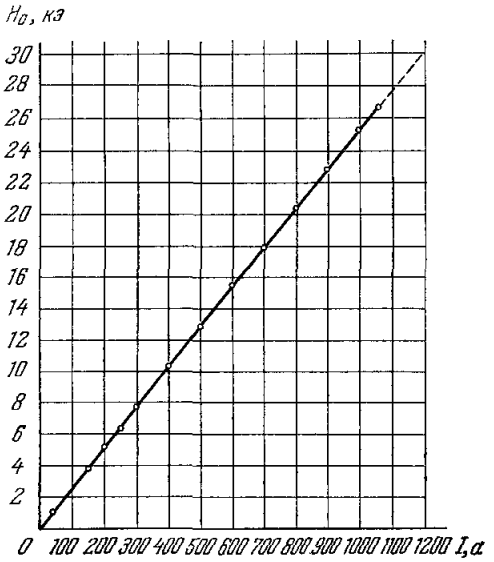

Рис. 5. Зависимость поля H_0 в центре соленоида от тока I.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приводимые в этой работе расчеты соленоида являются приближенными, но, как показывают его испытания, эти расчеты дают результаты, достаточно близкие (в пределах 5—10%) к действительности. Окончательные параметры соленоида должны определяться экспериментально.

Зависимость поля H_0 в центре нашего соленоида от силы тока I, полученная на опыте, дана на рис. 5. Распределение поля по оси соле-

ноида дано на рис. 6. Эти кривые были получены магнитометром, работающим на ядерном резонансе в воде. Тепловой режим тоже достаточно хорошо согласуется с расчетами.

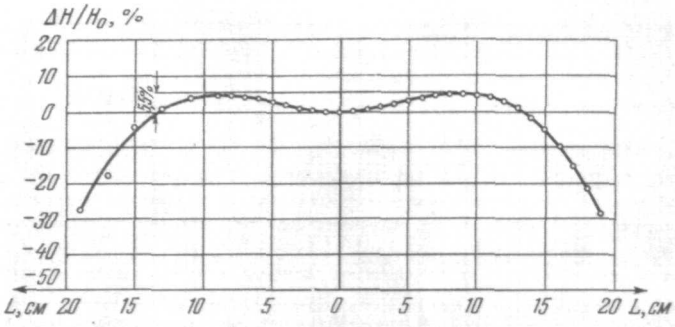

Рис. 6. Распределение поля по оси соленоида при $H_0=255$ *э*.

На основании приведенного метода расчета можно показать, что соленоид такой конструкции можно осуществить и для мощности во много раз большей, чем 500 *квт*.

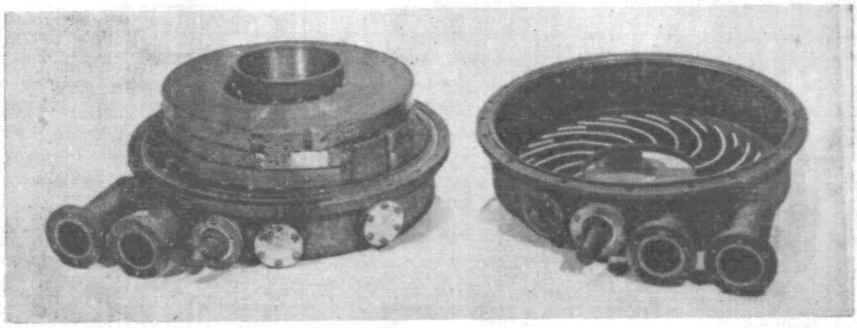

Рис. 7. Фотография обмотки соленоида.

Детальные конструкции соленоида и теплообменников были разработаны конструкторами А. И. Дегальцевым и Ю. Е. Сапрыкиным, которым мы выражаем благодарность. Установка была изготовлена в мастерских Института физических проблем АН СССР.

Институт физических проблем
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. П. Капица, в сб. «Электроника больших мощностей», сб. 2-й, М., Изд-во АН СССР, 1963, стр. 107.
2. П. Л. Капица, ДАН СССР 55 (7), 595 (1947).