

СЗ45е4

М-152

13/7-69

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4582



Л. Г. Макаров

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СОЛЕНОИДА
ВОЗДУХОМ, ВОДОЙ И ЖИДКИМ АЗОТОМ

1969

13 - 4582

Л.Г.Макаров

ОХЛАЖДЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СОЛЕНОИДА
ВОЗДУХОМ, ВОДОЙ И ЖИДКИМ АЗОТОМ

4999/2 чр

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Вступление

В настоящей работе изложены результаты тепловых испытаний, которые были проведены на рабочем высоковольтном соленоиде, предназначенном для получения сильных импульсных магнитных полей в большом объеме. Его конструкция, характеристики и схема питания описаны в работах /5,6/.

Посредством замеров выявлено, что при температуре меди соленоида, равной 20°C, за один импульс магнитного поля в 140 кэВ, в катушках соленоида выделяется 14 ккал. тепла.

Тепловые испытания выполнены при следующих условиях:

- а) соленоид не имел принудительного охлаждения,
- б) соленоид обдувался окружающим воздухом,
- в) соленоид охлаждался протоком дистиллированной воды,
- г) соленоид охлаждался жидким азотом.

Во время тепловых испытаний через определенные промежутки времени замерялась температура меди катушек и изоляции соленоида как прямым, так и косвенным образом. Для случаев охлаждения соленоида воздухом и водой были проведены оценочные тепловые расчёты по определению внутреннего перепада температуры в катушках соленоида и температуры наиболее нагретого витка. В расчётах использованы следующие выражения:

$$\Theta = \frac{P a^2}{8 \lambda} [^\circ \text{C}] , \quad (1)$$

$$\Theta_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \Theta [^{\circ}\text{C}] , \quad (2)$$

$$R_2 \leq R_1 [1 + \alpha (t_2^0 - t_1^0)] \text{ ом}. \quad (3)$$

В указанных выражениях принято:

Θ - разность температур между наиболее нагретой точкой соленоида и температурой витка, лежащего посередине наружной поверхности катушки (внутренний перепад температуры в катушке), $^{\circ}\text{C}$; p - потери, выделяющиеся в 1 см^3 общего объема катушек соленоида, вт/см^3 ; a - толщина катушки по радиусу, см ; $\lambda_{\text{ср}}$ - средняя теплопроводность обмотки, $\text{вт/см}^{\circ}\text{C}$; $\Theta_{\text{ср}}$ - среднее значение внутреннего перепада температур, $^{\circ}\text{C}$; R_2 - электросопротивление соленоида при температуре t_2^0 , ом ; R_1 - электросопротивление соленоида при температуре t_1^0 , ом ; α - температурный коэффициент удельного электросопротивления, град^{-1} .

В расчётах и при испытаниях для случаев охлаждения соленоида воздухом и водой использованы следующие данные:

- а) температура окружающего воздуха 20°C ;
- б) температура дистиллированной воды 28°C ;
- в) электросопротивление меди катушек при $t^0 = 20^{\circ}\text{C}$ - $0,422 \text{ ом}$.
- г) $\alpha = 0,0043 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;
- д) $\lambda_{\text{ср}} = 0,0545 \text{ вт/см}^{\circ}\text{C}$;
- е) коэффициент теплопроводности для изоляции из эпоксиды и стеклотенты $\lambda_{\text{из}} = 0,0053 \text{ вт/см}^{\circ}\text{C}$;
- ж) объем катушек соленоида 12200 см^3 ;
- з) толщина катушки по радиусу $10,5 \text{ см}$;
- и) суммарная толщина изоляции по радиусу от витка со средним радиусом до наружной поверхности катушек - $0,9 \pm 1 \text{ см}$. 50% этой толщины изоляции приходится на витковую изоляцию ($0,314 \times 16 = 5,024 \text{ мм}$), а остальные 50% - на бандажу катушек, которые выполнены из стеклотенты и эпоксиды.

Для выполнения некоторых расчётов построения графиков тепловых режимов введен коэффициент K_R . Коэффициент K_R есть отношение значения сопротивления катушек соленоида при некоторой средней температуре меди этих катушек к значению сопротивления при нуле градусов (по стоградусной шкале), которое равно 0,391 ом. Для удобства при воздушном и водяном охлаждении использована стоградусная шкала температур, а при азотном охлаждении – шкала Кельвина.

Для измерения омического сопротивления катушек применялся прибор типа УМВ № 080307, а для измерения температур по стоградусной шкале – ртутные лабораторные термометры, в которых одно деление соответствует 1°C.

Охлаждение воздухом

В качестве источника воздуха использован центробежный вентилятор №3, который смонтирован на сварной раме из уголка и приспособлен для переноски. Схема обдува соленоида показана на рис. 1. По направлению стрелок I и II воздух от вентилятора подавался через гофрированные

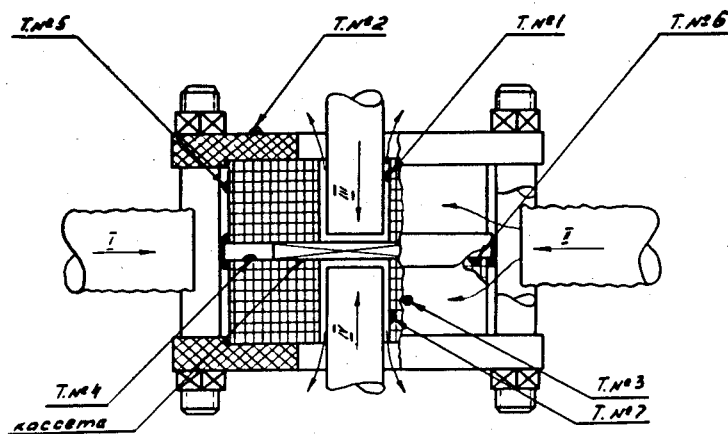


Рис. 1. Схема расположения термометров и шлангов при обдуве соленоида воздухом.

ные шланги диаметром 100 мм. Расстояние от бандажей соленоида до среза шланга – 40–50 мм. По направлению стрелок III и IV воздух подавался через резиновые шланги диаметром 52x36 мм. Срезы этих шлангов не доходили на 8–10 мм до кассеты, находящейся между катушками соленоида. Расположение термометров также показано на рис. 1. Термометры в точках №№4,5 и 6 находились под углом 90° относительно воздухопроводов I, II. В точках №6 и №7 замерялась температура непосредственно на меди катушек. Для этого витки в указанных точках были оголены. В остальных точках замеры производились на поверхности изоляции. Точка №2 расположена на гетинаксовой плите толщиной 40 мм. Результаты замеров и расчетов по тепловым испытаниям сведены в табл. 1. Температура наиболее нагретого витка есть сумма средней температуры катушек соленоида, которая определена по омическому сопротивлению, и $1/3$ температуры от перепада температур в катушках Θ /7/. Это удовлетворительно подтверждается замерами. Температуру в точках №№6 и 7 можно рассматривать как температуру крайних витков соленоида. Значение температуры в точках №№6 и 7, сложенное с вычисленным перепадом (графа 11, табл. 1), является также значением температуры наиболее нагретого витка.

Как видно из табл. 1, результаты опытов удовлетворительно совпадают с расчетом. Суммарная толщина изоляции наиболее нагретого витка к торцовым поверхностям катушек меньше, чем толщина изоляции того же витка до наружных поверхностей бандажей. Этим и объясняется, что в точке №4 температура выше, чем в точках 1,3 и 5. Разница в показаниях термометров №6 и №7 обусловлена различными условиями охлаждения.

По данным табл. 1 на рис. 2 построен график тепловых режимов работы соленоида при воздушном охлаждении с дутьем в зависимости от K_R .

Охлаждение водой

Для охлаждения электротехнических устройств наиболее широко применяется проточная вода. Чтобы обеспечить максимальное обтекание поверхностей катушек соленоида водой с наибольшей скоростью, в конструк-

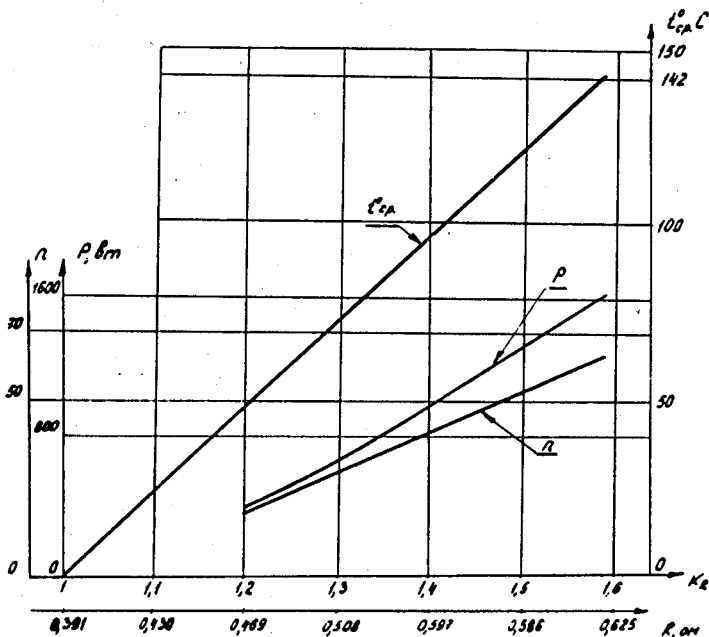


Рис. 2. График тепловых режимов работы соленоида при воздушном охлаждении. t_{cp}° - средняя температура меди катушек; p - мощность теплоотбора; n - допустимое количество импульсов за 1 час.

цию последнего были внесены некоторые дополнения. Конструкция системы водоохлаждения и путь охлаждающей воды показан на рис. 3. Вода под давлением поступает в нижний мундштук (9), ударяется о перегородку (3), омывает внутренние поверхности нижней катушки, выходит, омывая частично нижний торец нижней катушки, на наружную ее поверхность. Через отверстия, которые имеются в перегородке (3), вода омывает сначала наружную, а потом внутреннюю поверхности верхней катушки и поступает в верхний мундштук и на сброс из соленоида.

Тепловые испытания были проведены при давлении на входе, равном 1,5 атм. Проток воды через соленоид по замеру составил $27 \text{ м}^3/\text{час}$.

Ввиду того, что конструктивные элементы водоохлаждения соленоида затрудняют использование лабораторных термометров для контроля температур в различных точках, определение основных температур катушек соленоида проведено по изменению электрического сопротивления соленоида. Было установлено только два лабораторных термометра в пазу меж-

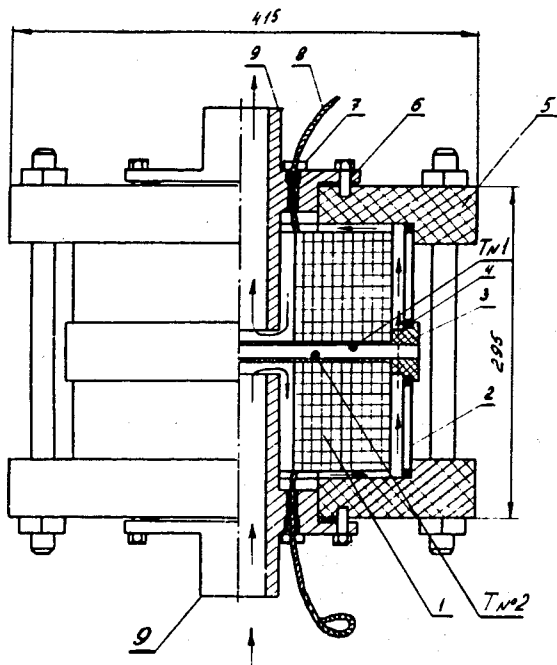


Рис. 3. Конструктивные элементы водоохлаждения соленоида и схема расположения термометров. 1 - катушка соленоида, 2 - кольцо из оргстекла, 3 - межкатушечная прокладка из лингафоля, 4 - уплотнение из резины, 5 - верхняя крышка из лингафоля, 6 - крепежная шпилька, 7 - салгица токопровода, 8 - токопровод, 9 - мундштуки из оргстекла.

катушечной прокладки, т.е. в том месте, где будет находиться эмульсия или другой материал, предназначенный для работы в магнитном поле. Термометр №1 измерял температуру "потолка" межкатушечного пространства, а термометр №2 - температуру "пола". Результаты измерений и расчётов сведены в табл. 2. Температура более нагретого витка определена в этой таблице (графа 9) так же, как при воздушном обдуве: к температуре графы 7 приплюсована $1/3$ температуры графы 8. На основании данных табл. 2 на рис. 4 построен график тепловых режимов работы соленоида при водяном охлаждении в зависимости от K_R .

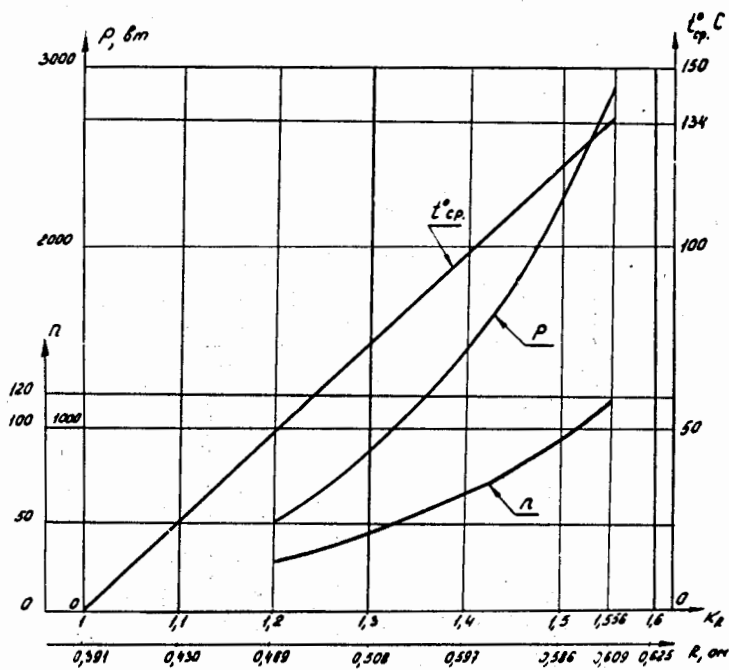


Рис. 4. График тепловых режимов работы соленоида при водяном охлаждении. t_{cp}° - средняя температура меди катушек; p - мощность теплоотбора; n - допустимое количество импульсов за 1 час.

Охлаждение жидким азотом

На рис. 5 показан азотный дьюар, в котором охлаждался высоковольтный соленоид. Дьюар изготовлен из пенопласта. Его стенки с обеих сторон оклеены 3 слоями стеклоткани на эпоксидном клее. Жидкий азот подавался в дьюар шлангом из азотного танка. При охлаждении соленоида через каждые 5 минут замерялось омическое сопротивление меди соленоида. На рис. 6 показана кривая снижения омического сопротивления меди соленоида в зависимости от времени охлаждения. Эта кривая построена по данным, полученным в результате трехкратного охлаждения соленоида. Результаты измерений во всех трех опытах совпали с удовлетворительной точностью.

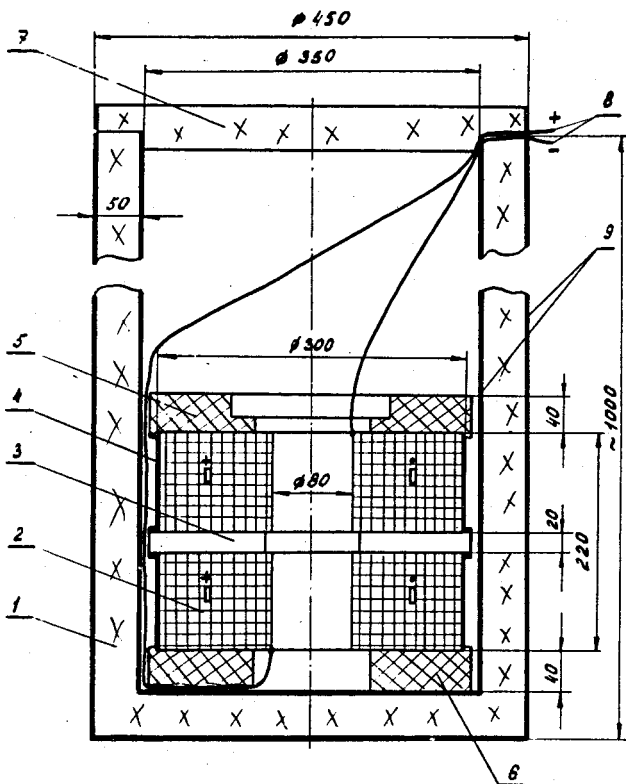


Рис. 5. Азотный дьюар. 1 - корпус дьюара, 2 - катушка соленоида, 3 - межкатушечная прокладка из текстолита, 4 - бандаж катушек из стеклоэпоксида толщиной 5-6 мм, 5 - верхняя крышка, 6 - нижняя крышка, 7 - крышка дьюара из пенопласта, 8 - токоподводы, 9 - обклейка из стеклополотна на эпоксидном клее.

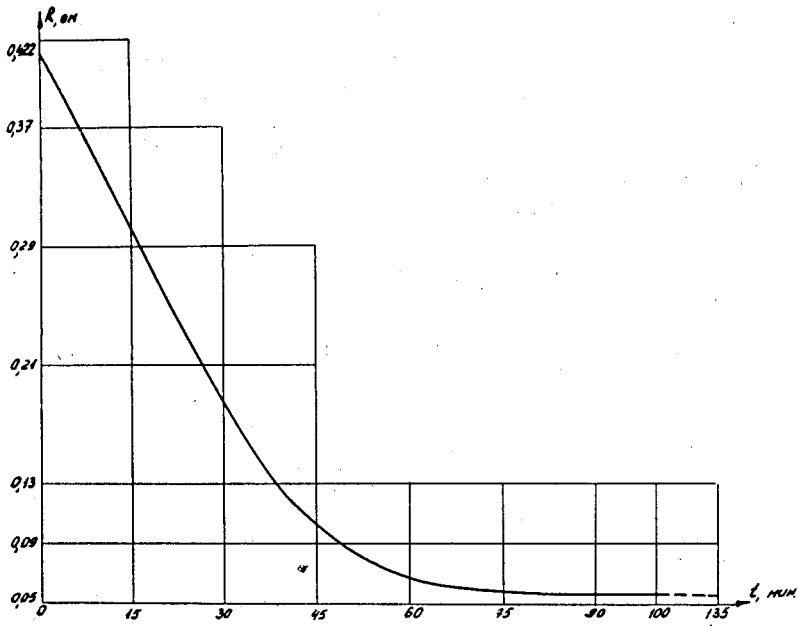


Рис. 6. Зависимость омического сопротивления меди катушек от времени охлаждения соленоида жидким азотом.

При визуальном наблюдении за азотом в дьюаре во время охлаждения соленоида отмечены следующие условные периоды "поведения" азота, которые указаны в табл. 3.

Через 80-85 минут от начала заливки азота сопротивление меди соленоида снизилось с $R_H = 0,422$ ом до установившейся величины $R_K = 0,00552$ ом. Снижение сопротивления меди соленоида в любой момент охлаждения можно характеризовать величиной $1/K_{Ra}$:

$$1/K_{Ra} = \frac{R_H}{R_K}, \quad (4)$$

где R_H - сопротивление меди соленоида, равное 0,422 ом при $T_1 = 293^\circ\text{K}$; R_K - сопротивление меди соленоида при T_2 , ом.

Опытным путем установлено, что для поддержания сопротивления меди соленоида на уровне $R_K = 0,0552$ ом (температура меди соленоида $T_2 = 78^\circ\text{K}$) без подачи тока на соленоид тратится за один час 1,5 литра жидкого азота. Кривая спада сопротивления на рис. 6 характеризует скорость отбора тепла из меди соленоида в разные моменты охлаждения. Эта скорость за первые 30-35 минут охлаждения соленоида приблизительно постоянна. Далее она уменьшается и на 80-85 минуте становится весьма малой. К этому моменту медь соленоида приобретает температуру жидкого азота, и теплообмен между медью и жидким азотом прекращается.

При использовании опытной кривой, данных по снижению сопротивления меди соленоида (рис. 6) и данных по зависимости теплоемкости и сопротивления меди от температуры^{/9/}, которые приведены на рис. 7, на рис. 8 построена кривая изменения мощности теплоотбора от меди соленоида к жидкому азоту в функции от $1/K_{Ra}$. На рис. 8 также построена кривая допустимого количества импульсов магнитного поля напряженности в 140 кэВ за 1 час по условиям теплоотбора в зависимости от $1/K_{Ra}$. Расчёты для кривых рис. 8 сведены в табл. 4. Расчёты

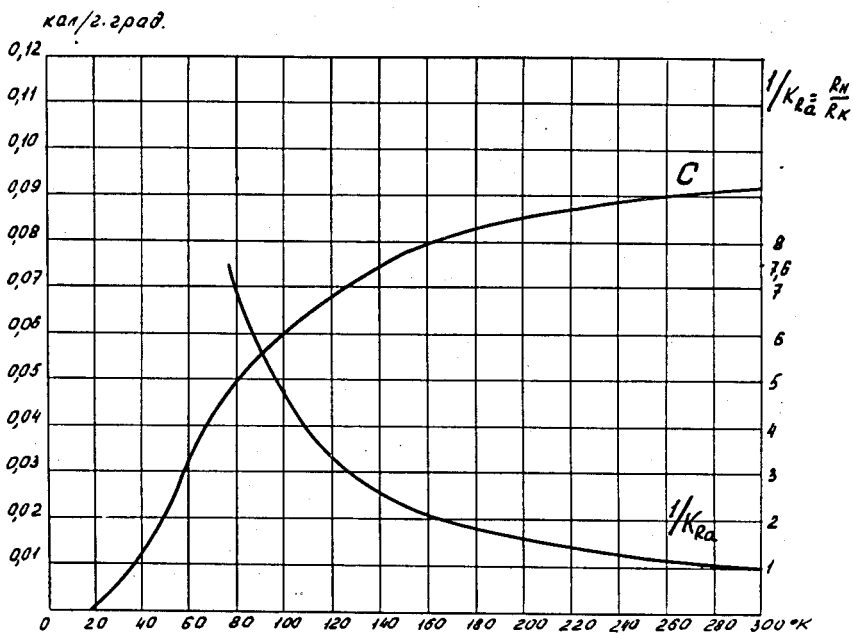


Рис. 7. Зависимость теплоемкости меди (C) и коэффициента снижения сопротивления меди катушек ($1/K_{Ra}$) от температуры.

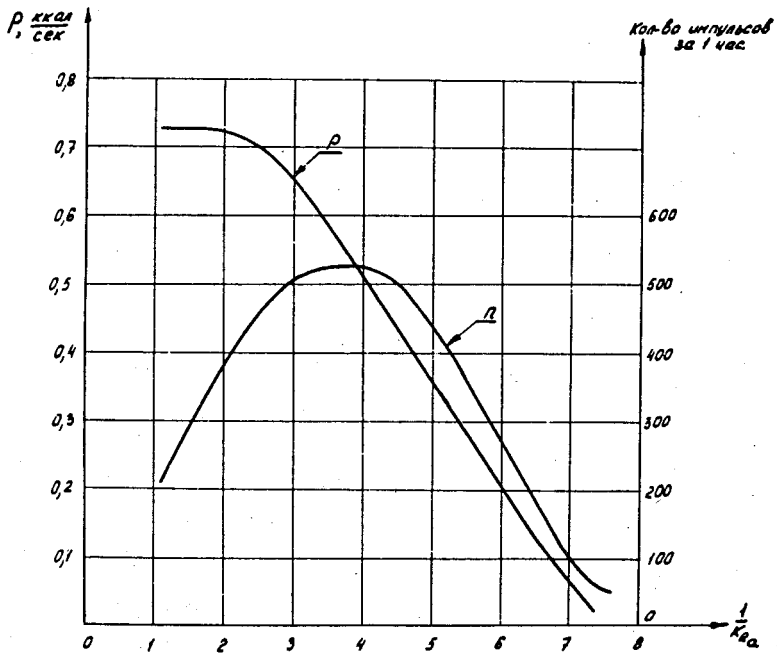


Рис. 8. График тепловых режимов работы соленоида при азотном охлаждении. p - мощность теплоотбора; n - допустимое количество импульсов за 1 час.

выполнены с некоторым усреднением. Кроме того, в них учтен только вес меди соленоида, который равен 80 кг. По кривым рис. 8 можно производить оценки с удовлетворительной точностью для практических целей о способности соленоида нести тепловые нагрузки и определять количество импульсов за 1 час работы при различных значениях охлажденного сопротивления меди соленоида. По указанным кривым можно также ориентировочно определять расход азота при соответствующих тепловых нагрузках.

Для проверки правильности оценочных расчётов, приведенных в табл. 4, и построенных кривых на рис. 8 были проведены опыты по пропусканию постоянного тока через охлажденный соленоид. Результаты опытов сведены в табл. 5 и 6.

Из сравнения указанных таблиц видно, что и расход азота, и средняя мощность за время протекания тока, и рост сопротивления, и другие факты этих опытов удовлетворительно подтверждают правильность оценочных расчётов, приведенных в табл. 4, и кривых рис. 8.

Заключение

1. Способ охлаждения высоковольтного соленоида - воздушное, водяное и с помощью жидкого азота - следует выбирать сообразуясь с потребностью количества импульсов магнитного поля в единицу времени. Потребность количества импульсов вытекает из конкретной физической задачи. Важным фактором при выборе вида охлаждения являются технические возможности для его осуществления.

Наиболее простой и дешевый вид охлаждения - обдув воздухом.

Наиболее эффективное охлаждение - охлаждение жидким азотом. В выполнении азотного варианта охлаждения всегда имеются технические трудности. Нами для постоянной работы высоковольтного соленоида принят оптимальный вариант охлаждения для наших условий - водяное охлаждение. В табл. 7 приведены для сравнения по эффективности характеристики всех видов охлаждения.

2. При определении количества импульсов за 1 час (см. табл. 7) принято, что катушки соленоида в номинальном режиме его работы нагреваются не более чем до 120°C в первых трех видах охлаждения, а в четвертом виде охлаждения – не более чем до 100°C .

3. Эпоксидная смола допускает длительный нагрев до 150°C . Учитывая, что в высоковольтном соленоиде эпоксидная смола в номинальном режиме его работы подвергается большим механическим ударным нагрузкам, рекомендуется допускать постоянный нагрев изоляции с эпоксидом не более чем на 120°C .

4. При выборе режима работы высоковольтного соленоида с азотным охлаждением необходимо учесть следующее:

а) для работы в длительном режиме рекомендуется использовать участок кривой рис. 8 в пределах $1/K_{Ra} = 4,75 \div 7$;

б) участок кривой при $1/K_{Ra} = 1,1 \div 4,75$ для практических целей мало пригоден из-за бурного кипения азота,

в) участок кривой $1/K_{Ra} = 3,0 \div 4,75$ следует рассматривать как предельную возможность высоковольтного соленоида по тепловой нагрузке при азотном охлаждении.

5. Производство контрольных замеров величины омического сопротивления меди катушек соленоида во время его эксплуатации больших технических трудностей не представляет. По контрольным замерам электросопротивления, пользуясь приведенными графиками тепловых режимов при соответствующем виде охлаждения, можно всегда с точностью, достаточной для практических целей, судить о тепловом состоянии конкретного соленоида. Это наиболее простой и удобный вид контроля за тепловым режимом высоковольтного соленоида.

Автор выражает благодарность Н.И.Павлову, Л.Н.Беляеву, А.Г.Зельдовичу за полезные советы, Н.К.Соболеву, М.А.Невзорову, А.С.Филиппову за помощь в работе, а Г.Г.Романову, В.Ф.Орлову, Е.С.Баскакову, И.М.Семенову и А.С.Виноградову за активное участие в изготовлении узлов установки и в работах по тепловым испытаниям.

Л и т е р а т у р а

1. В.Р.Карасик. Физика и техника сильных магнитных полей. Изд. "Наука", 1964.
2. В.В.Михайлов. Расчёт и конструирование высоковольтной аппаратуры. ГЭИ, 1955.
3. К.И.Черник. Эпоксидные компаунды и их применение. Судпромгиз, 1959.
4. Н.И.Бачурин. Литая изоляция высокого напряжения. ГЭИ, 1963.
5. Л.Г.Макаров. Препринт ОИЯИ, 13-4186, Дубна, 1968.
6. Л.Г.Макаров, А.А.Смирнов. Препринт ОИЯИ, 13-4187, Дубна, 1968.
7. П.М.Тпхомиров. Расчёт трансформаторов. ГЭИ, 1963.
8. К.А.Андреанов, Н.П.Богородицкий, Ю.В.Корицкий и Б.М.Тареев. Справочник по электротехническим материалам. Том I, ГЭИ, 1958 и том II, ГЭИ, 1960.
9. М.П.Малков, И.Б.Данилов, А.Г.Зельдович, А.Б.Фрадков. Справочник по физико-техническим основам глубокого холода, ГЭИ, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел

3 июля 1969 года.

Таблица 1

№ Потребл. пп мощность, Вт.	Замеры по прибор. и датчикам										Расчетные величины				Примечание
	Вре- мя от вкл. до уст. темп., мин	Устан. знач. темп., °C	сопр. и сопрот. соп. сопрот. соп.	темп. и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	и сопрот. соп.	Сред. темп. по со- прот., °C	Пере- пад темп. по со- кату- шк., °C	Час. от- бор тепла, ккал имп.в 140 кэ, ккал	
1. 240 Вт	240	64	68	40	96	93	0,554	1,416	100	5,0	102	206,0	20,0	10	без обдува
2. 400 Вт	140	28	38	22	43	41	0,469	1,2	49	6,0	51	344,0	16,6	20	с обдувом
3. 800 Вт	135	32	46	28	70	68	0,529	1,353	85	16,5	87	688,0	19,0	36	с обдувом
4. 1200 Вт	132	40	69	30	95	93	0,572	1,462	111	25,0	119	1032,0	20,5	49	с обдувом
5. 1600 Вт	130	47	80	36	118	115	0,623	1,593	142	33,0	152	1376,0	22,3	62	с обдувом

18

Таблица 2

№ Потребл. пп мощность, Вт	Замеры по прибор. и датчикам										Расчетные величины				Допуст. колич. имп. за 1 час
	Вре- мя от вкл. нагруз. до уст. темпер., мин.	Устан. знач. темпер. и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	и сопротив. сопрот. сопр.	Средн. темп. по сопр., °C	Перепад темпер. в катуш., °C	Часов. отбор тепла, ккал. имп.по- ля, ккал.	
1. P=510 В (I=33 а)	90	32	29	0,469	1,2	49	10,5	52,5	440,0	16,6	26				
2. P=946 В (I=43 а)	60	34	30	0,512	1,308	75	19,7	82,0	814,0	18,3	44				
3. P=1294 В (I=49 а)	42	37	32	0,539	1,377	92	27,7	101,0	1130,0	19,3	58				
4. P=2173 В (I=61 а)	25	40	34	0,584	1,492	120	45,0	135,0	1670,0	21,0	89				
5. P=2818 В (I=68 а)	16	42	35	0,609	1,556	134	58,3	153,0	2423,0	21,8	112				

19

Таблица 3

Условный период охлаждения.	Величина сопротивления меди, ом	Состояние жидкого азота в дьваре
I	0,422 - 0,153	Сильно бурлит, сильно парит
II	0,153 - 0,0998	Бурлит и парит медленней
III	0,0998 - 0,0804	Бурлит мало
IV	0,0804 - 0,0671	Бурлит совсем мало
V	0,0671 - 0,0571	Не бурлит, зеркало азота переливается
VI	0,0571 - 0,056	Зеркало азота только колыхается, азот парит мало
VII	0,056 - 0,0552	Зеркало азота спокойное, обмотка хорошо просматривается через толщу азота, азот слегка парит

Таблица 4

№ пп	№ периода охлаждения (5-минутка)	Время от и до минут	Знач. велич. Сопрот. / К Р а меди, ом	к концу периода охл. соленоида	Темпер. меди, °С	Теплоемкость меди, ккал/кг, град.	Теплоемкость держ. меди, ккал.	Разница на тг-плоско-держ., ккал.	Мощ. тепл-добра за период, ккал/сек.	Часов. расход холода без потерь дьвара, ккал.	Выделен. тепла за 1 час имп.	К-во имп. за 1 час	Примечание
I	1	0	0,422	1,0000	293	0,0925	2439,2	161,4	0,538	1936,8	14,0	152	
2	2	0-5	0,384	1,0989	276	0,0915	2272,8	220,3	0,734	2642,2	12,7	234	
3	3	5-10	0,342	1,2391	252	0,0905	2052,5	219,2	0,730	2628,0	11,3	257	
4	4	10-15	0,308	1,3956	230	0,0885	1833,5	219,8	0,722	2599,2	10,2	289	
5	5	15-20	0,271	1,5972	208	0,0863	1635,3	231,2	0,705	2538,0	7,7	358	
6	6	20-25	0,233	2,2328	186	0,080	1173,6	211,7	0,655	2358,0	5,1	404	
7	7	25-30	0,189	3,7581	163	0,077	977,1	195,5	0,620	2233,0	4,1	465	
8	8	30-35	0,153	5,4308	141	0,0716	721,0	188,1	0,476	1713,6	3,3	547	
9	9	35-40	0,123	8,2285	123	0,0655	525,5	143,0	0,408	1468,8	2,8	513	
10	10	40-45	0,0998	12,8842	97	0,0602	437,6	122,5	0,226	816,6	2,4	336	
11	11	45-50	0,0864	19,7571	90	0,0565	415,6	67,9	0,14	504,0	2,2	227	
12	12	50-55	0,0733	29,7571	86	0,0537	392,2	44,0	0,078	280,8	2,1	136	
13	13	55-60	0,0671	44,7736	83	0,0526	376,89	23,4	0,051	183,6	2,0	93	
14	14	60-65	0,0623	67,1404	81	0,0517	376,89	15,3	0,043	151,8	1,9	82	
15	15	65-70	0,0591	97,3905	80	0,0505	352,89	11,0	0,0366	131,76	1,8	70	
16	16	70-75	0,0571	139,5	79,5	0,0493	342,9	10,0	0,0333	119,88	1,8	65	
17	17	75-80	0,0560	197,6449	78	0,04884	342,9	0	-	-	-	-	
18	18	80-85	0,0552	277,6449	78	0,04884	342,9	0	-	-	-	-	
19	19	85-90	0,0552	384,6449	78	0,04884	342,9	0	-	-	-	-	
20	20	90-100	0,0552	527,6449	78	0,04884	342,9	0	-	-	-	-	
21	21	100-135	0,0552	777,6449	78	0,04884	342,9	0	-	-	-	-	

Таблица 5

№ п/п	Наименование измерений, расчетов	Ток нагрузки, а			Примечание
		52,5	82,5	120	
а) <u>результаты измерений:</u>					
1.	Время протекания тока, мин.	60	45	60	
2.	Сопротивление меди перед включением тока, ом	0,0552	0,0556	0,059	
3.	Значение сопротивлений, ом:				
	а) через 15 минут	0,0556	0,06	0,067	
	б) через 30 минут	0,0556	0,0605	0,07	
	в) через 45 минут	0,0556	0,061	0,073	
	г) через 60 минут	0,0556	-	0,076	
4.	Израсходовано азота с потерями на дьвар по замеру, л	4,2	6,6	19,5	
б) <u>результаты расчетов:</u>					
1.	Израсходовано всего холода, ккал	163	259	759	
2.	Израсходовано холода без потерь на дьвар, ккал	104	215	700	Потери дьвара
3.	Среднее сопротивление, ом	0,0556	0,0605	0,0704	за 1 час ра-
4.	Средняя мощность за время протекания тока, квт	0,150	0,412	1,01	боты состав-
5.	Выделилось тепла в меди от тока, ккал	102	210	690	ляют 1,5 л.,
6.	Среднее значение величины $I/K_{\text{р}} \text{ а}$	7,5	6,97	5,99	~ 59 ккал.
7.	Мощность теплоотбора по кривой рис. 8, $\frac{\text{ккал}}{\text{сек}}$	0,03	0,062	0,2	
8.	Расход холода по кривой рис. 8, ккал	108	223,2	720	

Таблица 6

№ пп	Наименование измерений, расчетов	Первый опыт. Ток - 280 а, время - 5 мин.	Второй опыт. ток - 280 а, время - 5 мин.
---------	-------------------------------------	--	--

а) результаты измерений:

1.	Сопротивление меди перед включением тока, ом	0,0552	0,0575
2.	Сопротивление после отключения тока, ом	0,137	0,13
3.	Расход азота, л	14	14

б) результаты расчетов:

1.	Среднее сопротивление, ом	0,096	0,0937
2.	Средняя мощность за время протекания тока, квт	7,50	7,34
3.	Выделение тепла в соленоид от тока, к.кал	538	525
4.	Расход холода от испарения азота	546	546

Таблица 7

№ пп	Способы охлаждения	Мощность теплоотбора, ккал/час	Выделение тепла за I импульс, за I час ккал.	Кол-во импуль. за I час	Примечание
1.	Воздух, без обдува	252	21,00	12	
2.	Обдув воздухом	1092	21,00	52	
3.	Проточная вода	2058	21,00	98	
4.	Жидкий азот I/K _{pa} = ~ 5,0	1294	3,0	480	

К ВХ. 6451 ЖЕН. ОТ 5/11/84