

3206

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P8 - 3206



А.Г. Зельдович, Ю.А. Шишов

КРИОГЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ,
СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КРУПНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1967.

Р8 - 3206

А.Г. Зельдович, Ю.А. Шишов

**КРИОГЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ,
СВЯЗАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КРУПНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ**

Применение обмоток, в которых сверхпроводник стабилизируется нормальным металлом ^{/1/}, делает совершенно реальной инженерной задачей создание крупных сверхпроводящих соленоидов. Сооружения такого рода предполагается использовать для исследований по физике плазмы. для защиты от радиации в космическом пространстве и для ядерных исследований ^{/2/}. В Арагоне, Брукхейвене, Черне ^{/3/} и ОИЯИ намечается строительство нескольких многометровых водородных пузырьковых камер.

Рассмотренный нами соленоид для пятиметровой водородной камеры ОИЯИ характеризуется следующими основными параметрами:

магнитное поле в центре	- 40 кгс,
внутренний диаметр	- 6 м,
наружный диаметр	- 6,8 м,
высота	- 3,9 м,
вес сверхпроводника	- 2,5 тн,
вес стабилизирующей меди	- 55 тн,
вес конструкционных и силовых элементов	- 80 тн.
накопленная энергия	- $1,65 \cdot 10^8$ дж,
число вводов и выводов тока	- 10

(соленоид по высоте разбит на 5 секций с независимым электропитанием).
ток в одном вводе - 5000 а.

На этом примере видно, что у крупных соленоидов беспрецедентно велика масса металла, которую надо охладить до температуры жидкого гелия. Можно также ожидать значительных теплопритоков к жидкому гелию через подвески, стенки дьюара, вводы тока. Ниже оценивается холодопроизводительность и рассматриваются схемы соответствующих гелиево-ожижительных установок.

Рассмотрим с криогенной точки зрения четыре режима работы соленоида:

- 1) установившийся режим,
- 2) охлаждение до температуры жидкого гелия,
- 3) заполнение жидким гелием,
- 4) накачка и удаление энергии.

Установившийся режим

В этом режиме имеются следующие источники теплопритока к соленоиду:

- а) через теплоизоляцию,
- б) по подвескам и мостам,
- в) от вводов тока.

Снимаются теплопритоки с помощью жидкого гелия. Как известно, жидкий гелий обладает малой величиной скрытой теплоты испарения. Поэтому чрезвычайно важно помимо теплоты кипения использовать также нагрев испаренного гелия. Испаренный гелий можно возвращать в ожижитель или охлаждать им подвески и вводы тока и тем самым снижать количество тепла, притекающее к соленоиду. Как показывают расчёты, возврат испаренного гелия в ожижитель повышает его холодопроизводительность в 4-5 раз. Термодинамически безразлично, как использовать холодный пар: возвращать его в ожижитель или применять для охлаждения подвесок и вводов тока. Однако охлаждение подвесок и вводов снижает их среднюю температуру и соответственно понижает теплопроводность и повышает электропроводность, что дополнительно уменьшает теплоприток через них. Кроме того, нижняя часть охлаждаемых вводов тока может быть шунтирована сверхпроводником или сделана из него. Таким образом, ясно, что испаренный гелий следует в первую очередь направлять на охлаждение подвесок и вводов и только оставшуюся часть возвращать в ожижитель.

а) Приток тепла через изоляцию может быть существенно ограничен. Например, через многослойную изоляцию поток тепла в интервале $300 \pm 4^\circ\text{K} - 0,05 \pm 0,1 \text{ вт/м}^2$ (см. работу ^{14/} стр.229), что для соленоида пятиметровой камеры при поверхности изоляции около 200м^2 составит $Q_{\text{из}} \leq 20 \text{ вт}$.

б) Подвески надо делать минимального сечения из малотеплопроводного

материала. У соленоида пятиметровой камеры подвески из нержавеющей стали должны выдерживать вес соленоила $G = 150$ тонн. Принимая допустимое напряжение $\sigma_{\text{доп}} = 1500 \text{ кг/см}^2$, находим площадь сечения подвесок $S = 100 \text{ см}^2$.

Теплоприток к жидкому гелию по неохлаждаемым подвескам длиной $l = 100 \text{ см}$:

$$Q_H = \frac{\lambda_H}{l} \cdot S \cdot \Delta T = \frac{0,11}{100} \cdot 100 \cdot 296 = 32,6 \text{ Вт}$$

Здесь $\Delta T = 300 - 4,2 = 296^\circ \text{ К}$ - разность температур на концах подвески.
 $\lambda_H = 0,11 \text{ Вт/см} \cdot \text{град.}$ - средняя теплопроводность нержавеющей стали в интервале температур $300 - 4,2^\circ \text{ К}^{1/4}$.

Для охлаждаемых подвесок можно применить частный случай формулы (3) работы /5/:

$$Q_0 = \frac{\lambda_0 \cdot r \cdot S}{c \cdot l} \cdot \ln \left(1 + \frac{c \Delta T}{r} \right). \quad (1)$$

(На охлаждение подвесок идет гелий, испаренный только самими подвесками.)

Здесь c - удельная теплоёмкость газообразного гелия (слабо зависит от температуры),

r - теплота парообразования жидкого гелия.

Оценим уменьшение теплопритока через охлаждаемые подвески по сравнению с неохлаждаемыми:

$$\frac{Q_0}{Q_H} = \frac{\lambda_0}{\lambda_H} \cdot \frac{\ln(1 + c \Delta T / r)}{c \Delta T / r}. \quad (2)$$

Если даже принять $\lambda_0 = \lambda_H$ (на самом деле средняя температура охлаждаемой подвески и соответственно λ ниже, чем неохлаждаемой), то

$$Q_0 = Q_H \frac{\ln(1 + c \Delta T / r)}{c \Delta T / r}. \quad (3)$$

$$c \Delta T = i_{300} - i_{4,2} = 360 \text{ ккал/кг} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$r = 20 \cdot 10^3 \text{ лж/кг};$$

$$c \Delta T / r = \frac{1,5 \cdot 10^6}{20 \cdot 10^3} = 75 ;$$

$$Q_0 = Q_H \frac{2,3 \ell_{\text{г}} 76}{75} = 0,058 Q_H ,$$

т.е. теплоприток по охлаждаемым подвескам уменьшается приблизительно в 17 раз.

$$Q_0^{\text{под.}} = 0,058 \cdot 32,6 \approx 1,9 \text{ вт.}$$

Большим тепловым мостом являются внутренние стенки дьюара в случае дьюарной системы теплоизоляции. Приняв толщину стенки $\delta = 2$ мм, получим

$$S \approx 2 \pi D_{\text{ср}} \delta = 2 \cdot 3,14 \cdot 640 \cdot 0,2 = 800 \text{ см}^2.$$

Теплоприток по стенкам дьюара при охлаждении их газом, по (1) равен:

$$Q_0^{\text{д}} \approx 15,2 \text{ вт}$$

$$/ \ell = 100 \text{ см} , \Delta T = 296^\circ \text{ К} / .$$

в) Теплоприток по вводам тока.

Согласно ^{/5/} приток по оптимизированным вводам (с рядом упрощений):

$$Q_I = r I \sqrt{\frac{\rho \lambda}{c r}} . \quad (4)$$

Результаты расчёта по уравнению (4) совпадают с экспериментом, если параметры в (4) берутся при $T_{\text{эф}} = 30^\circ \text{ К}$.

По данным тех же авторов, теплоприток мало зависит от геометрических размеров и температуры верхнего конца вводов. Из уравнения (4) видно также, что теплоприток по вводам мало зависит от материала ввода. т.к. $\rho \lambda$ чистых металлов близки между собой по закону Видемана-Франца. Для меди $\rho \lambda^{30^\circ \text{ К}} = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ вт} \cdot \text{ом} / \text{град}$. В рассматриваемом примере соленоид состоит из 5 секций с 10 вводами на ток 5000 а каждый. Таким образом ,

$$Q_I = 10 \cdot 20 \cdot 5000 \sqrt{\frac{0,45 \cdot 10^{-6}}{5,25 \cdot 20}} = 65 \text{ вт.}$$

Следует также оценить теплоприток по обесточенным вводам. (Вводы обесточиваются при охлаждении соленоида и заливке дьюара гелием, а также при работе соленоида в короткозамкнутом режиме).

После ряда упрощений и преобразований формул (3) и (4) работы /5/ :

$$Q_{I=0} = Q_I \cdot \frac{\lambda_{I=0}}{\lambda_I} \cdot \frac{\ln(1 + c \Delta T / r)}{1 + c \Delta T / r}.$$

Приняв

$$\lambda_{I=0} = \lambda_I \quad ;$$

$$Q_{I=0} = Q_I \cdot \frac{\ln(1 + c \Delta T / r)}{1 + c \Delta T / r} \approx 0,058 Q_I \quad .$$

$$Q_{I=0} = 0,058 \cdot 65 = 3,8 \text{ вт.}$$

Этот расчёт показывает, что нет серьезной необходимости в сложных отключающихся вводах, так как теплоприток по неотключающимся обесточенным вводам относительно мал.

Компенсация теплопритоков по охлаждаемым подвескам, стенкам дьюара и тоководам эквивалентна работе ожижителя гелия на слив (холодный пар не возвращается в ожижитель). Компенсация теплопритока через изоляцию эквивалентна рефрижераторному режиму. Оба эти режима работы ожижителя можно осуществлять одновременно. Однако для оценки величины ожижителя удобнее свести оба режима к одному превалирующему, в рассматриваемом примере - к режиму на слив. Таким образом, необходимая холодопроизводительность ожижителя гелия в установившемся режиме для соленоида пятиметровой камеры:

$$Q = Q_0^{\text{под. Д.}} + Q_0^{\text{Д.}} + Q_I + \frac{Q_{\text{из}}}{4} = 1,9 + 15,2 + 65 + 20 = 87 \text{ вт.}$$

Здесь "4" показывает, во сколько раз уменьшается холодопроизводительность ожижителя в режиме работы на слив по сравнению с рефрижераторным режимом.

Расчёты показывают, что такой холодопроизводительностью обладает дроссельный ожижитель, на который подается около 400 нм³ / час сжатого гелия.

Охлаждение до температуры жидкого гелия

Крупные сверхпроводящие соленоиды обладают большими массами, охлаждать которые за счёт теплоты испарения гелия неразумно. Так, в рассматрива-

емом примере с целью охлаждения 150 тн металла от 300°K до $4,2^{\circ}\text{K}$ надо отвести 3189 квт.ч тепла, а холодопроизводительность гелиевого ожижителя, необходимая для поддержания установившегося режима, — 87 вт. Возможны два более рациональных способа охлаждения. Первый из них — последовательное заполнение дьюара соленоида рядом жидких хладагентов с понижающейся температурой кипения, например, азотом, водородом или неонем, гелием. Осуществление этого способа вызывает значительные затруднения из-за необходимости полного удаления вышекипящего компонента при переходе на охлаждение нижекипящим. Как известно, достаточно очень небольших примесей азота или водорода, чтобы вызвать закупорку соответственно водородного или гелиевого ожижителей. Высокие коэффициенты теплоотдачи от кипящих хладагентов, позволяющие быстрее охладить соленоид, являются преимуществом этого способа. Второй способ охлаждения соленоида — охлаждение холодным гелием. При использовании этого способа устраняется опасность закупорки, но для охлаждения соленоида за короткое время приходится увеличивать количество циркулирующего гелия по сравнению с установившимся режимом работы и развивать поверхности теплообмена в ожижителе.

Режим охлаждения соленоида тесно связан с его конструкцией. Возможны следующие предельные случаи:

а) Соленоид выполнен в виде массивного блока с малой поверхностью теплоотдачи и высокой теплопроводностью обмотки. В этом случае скорость охлаждения лимитируется поверхностью теплоотдачи обмотки. Примером такой конструкции может служить проволочный соленоид на 32,8 кгс с внутренним диаметром 27,6 см, характеризующийся плотной навивкой проволоки и малыми проходами для гелия /6/.

б) Соленоид обладает развитой поверхностью теплоотдачи и высокой теплопроводностью обмотки. Такой соленоид в период охлаждения будет иметь примерно одинаковую температуру во всех точках. По мере охлаждения обмотки температура газа, выходящего из соленоида, тоже будет понижаться, т.к. при развитой поверхности теплоотдачи разность температур между обмоткой и выходящим газом мала. К такому случаю приближаются соленоиды с горизонтальной осью, выполненные из ленты.

в) Соленоид обладает развитой поверхностью и имеет малую теплопроводность вдоль расположенной вертикально оси вращения. В этом случае

во всех точках соленоида сохраняется малая разность температур между хладоагентом и обмоткой. Если в нижнюю часть такого соленоида подать холодный газ, то уже на небольшой высоте от низа температура газа поднимается до исходной температуры обмотки. В дальнейшем температурный фронт будет перемещаться вверх по соленоиду и, если протяженность фронта температур мала по сравнению с высотой соленоида, то практически все время газ из соленоида будет выходить нагретым до исходной температуры обмотки. Конструкция соленоида, обладающая развитой поверхностью обмотки, наиболее благоприятна при аварийном сбросе поля, т.к. позволяет быстрее отвести выделившееся тепло и вернуть соленоид в рабочие условия.

Следует отметить, что малая теплопроводность вдоль обмотки легче всего осуществляется, если соленоид с вертикальной осью набирать из ряда дисков ленты, подобно насадке регенераторов воздухо-разделительных установок, со слабым тепловым контактом между дисками. Если ось соленоида располагается горизонтально, то нельзя устранить выравнивающее действие теплопроводности вдоль ленты к периметру соленоида. К варианту в) конструкции приближаются соленоиды, описанные в /1,7,8/.

Оценим для соленоида, который взят в качестве примера, время охлаждения от комнатной до азотной температуры (основная часть времени охлаждения):

$$t_1 = \frac{Q}{V \cdot \Delta i} = \frac{2,54 \cdot 10^6}{640 \cdot 274} = 14,5 \text{ ч.}$$

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta T = 150 \cdot 10^3 \cdot 0,0789 (293 - 78) = 2,54 \cdot 10^6 \text{ кал}$$

количество отводимого тепла.

$V = 3600 \text{ м}^3/\text{ч} = 640 \text{ кг/ч}$ - количество охлаждающего гелия, принятое за необходимое на основании предварительных расчётов.

$$\Delta i = i_{290} - i_{78} = 375 - 101 = 274 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$$

разность теплосодержаний газообразного гелия.

Заполнение дьюара соленоида жидким гелием

Свободный объём дьюара определяется особенностями конструкции соленоида. Для оценки порядка величин примем, что у рассматриваемого соленоида площадь зазоров составляет 50% площади сечения, занимаемого обмоткой и конструктивными элементами. Тогда свободный объём:

$$V = 0,5 \frac{G}{\gamma} \frac{M}{M} = 0,5 \frac{150000}{8000} = 10 \text{ м}^3.$$

Такое количество жидкого гелия может произвести за разумное время - 25 часов - гелиевый ожижитель с холодопроизводительностью 250 вт.

Накачка и удаление энергии из соленоида

Изменение магнитного поля при накачке и удалении энергии вызовет выделение тепла в массивных элементах конструкции за счёт токов Фуко. Однако в плановом порядке эти операции можно производить достаточно долго без значительных тепловых нагрузок рефрижераторной системы. Серьёзную опасность представляет аварийное выделение всей накопленной энергии внутри соленоида, например, при поломке ленточного проводника. Так, в рассматриваемом примере, накопленная энергия $1,65 \cdot 10^9$ дж может вызвать испарение 600 м^3 жидкого гелия. Фактически может быть выпарен только тот жидкий гелий, который находится внутри соленоида (в примере - 10 м^3). Остальная часть энергии (в примере - около 98%) пойдёт на нагревание соленоида. Подсчёты показывают, что при равномерном распределении этой энергии только в стабилизирующем медном проводнике он нагреется до 180°K , что не слишком опасно. Если вся энергия выделится только в проводнике одной из двадцати секций (конструктивных), то он нагреется до 1500°K , что уже не допустимо. Эти подсчёты ещё раз подчёркивают необходимость надёжной стабилизации сверхпроводника.

Аварийный сброс магнитного поля - явление столь быстрое, что нет надежды весь испарившийся гелий удалить с помощью предохранительных устройств. Поэтому дьюар соленоида должен обладать таким объёмом и прочностью, которые позволяют удержать в нём весь испаренный гелий при температуре кипения. Удаление гелия, которое понадобится в дальнейшем при нагревании газа, можно

производить любым обычным способом, т.к. нагревание газа — процесс относительно медленный.

Схемы гелиевых рефрижераторов

Анализ различных режимов работы соленоида показал, что с криогенной точки зрения наиболее сложной операцией является охлаждение. Рассмотрим несколько схем рефрижераторной установки для охлаждения холодным гелием соленоида с вертикальной осью, обладающего развитой поверхностью теплопередачи и малой теплопроводностью вдоль обмотки (лучший вариант, по нашему мнению).

1. Дроссельный гелиевый рефрижератор с предварительным охлаждением жидкими азотом и водородом (см. рис. 1). Процесс охлаждения идет следующим образом. Сжатый гелий подается компрессорами К или специальной газодувкой, проходит все теплообменники и ванны и поступает в сверхпроводящий соленоид СПС. На первой стадии охлаждения соленоида сжатый гелий охлаждается в теплообменнике I азотом и ванне жидкого азота II. Все нижележащие теплообменники и ванны на этой стадии в теплообмене не участвуют. В рассматриваемом варианте соленоида, как отмечалось выше, температура гелия на очень коротком участке повышается до температуры, близкой к температуре обмотки. Поэтому гелий из СПС направляется прямо в обратный поток по линии 1. На этой стадии тепловая нагрузка на ванну жидкого азота II значительно выше, чем при установившемся режиме, т.к. в теплообменник I не поступают холодные обратные потоки гелия и водорода. С течением времени холодный температурный фронт перемещается к выходу из обмотки, и через время τ , температура гелия, выходящего из СПС, быстро снижается до температуры гелия за ванной жидкого азота II (см. рис. 2). В этот момент обратный поток гелия переключается с линии 1 на линию 2, по которой направляется в теплообменник I, и включается подача жидкого водорода в ванну IV. Аналогично производится переключение с линии 2 на линию 3 и включение откачки жидкого водорода. Когда температура гелия на выходе из СПС понизится до температуры вакуумного жидкого водорода, обратный гелий переключается на линию 4, давление сжатого гелия

повышается до рабочей величины, дросселирование его дает дальнейшее понижение температуры, и соленоид охлаждается еще на одну ступеньку (см. рис.2). После пяти таких ступенек начинается ожигение гелия. Соленоид окончательно охлаждается, включается линия 5, и дьюар соленоида заполняется жидким гелием. Основная часть испаренного в соленоиде гелия направляется на охлаждение подвесок и вводов и возвращается по линии 6 на всасывание компрессора К, часть гелия возвращается в рефрижератор по линии 4.

В первый период охлаждения, как уже говорилось, тепловые нагрузки теплообменника I и ванны жидкого азота II значительно выше, чем при установившемся режиме. Возможно, окажется целесообразным по предложению Ю.К.Пилипенко иметь самостоятельные теплообменник и ванну жидкого азота, включаемые на период охлаждения (см. рис.3), с тем чтобы, сохраняя нормальные размеры рефрижератора, увеличить его универсальность. Такая же возможность имеется в отношении ванны жидкого водорода. Другая возможность — не делать дополнительных аппаратов, а вместо этого в период охлаждения по секции обратного гелия теплообменника I пускать испаренный азот.

Для рассматриваемого соленоида подсчеты показывают, что при циркуляции $3600 \text{ м}^3 / \text{ч}$. гелия длительность отдельных ступеней охлаждения (рис.2)

$$t_1 = 14,5 \text{ ч}, \quad t_2 = 6,7 \text{ ч}, \quad t_3 = 0,4 \text{ ч}, \quad t_4 = 0,7 \text{ ч},$$

Таким образом, приемлемое время охлаждения получается в том случае, когда количество охлаждающего гелия в 1,5 раза превышает количество, необходимое для ожигения в период заполнения дьюара, и примерно в 4 раза превышает потребность для установившегося режима (см. выше). (Количества циркулирующего гелия, кратные 1200 м^3 , берутся применительно к одному из типов выпускаемых компрессоров.)

Следует отметить, что для вариантов конструкции соленоида, при которых температура охлаждающего гелия на выходе из соленоида постепенно понижается, утилизация холода обратного потока гелия несколько усложнена. В этом случае теплообменник тепловой зоны (I, рис.1) надо выполнять в виде двухсек-

повышается до рабочей величины, дросселирование его дает дальнейшее понижение температуры, и соленоид охлаждается еще на одну ступеньку (см. рис.2). После пяти таких ступенек начинается ожижение гелия. Соленоид окончательно охлаждается, включается линия 5, и дьюар соленоида заполняется жидким гелием. Основная часть испаренного в соленоиде гелия направляется на охлаждение подвесок и вводов и возвращается по линии 6 на всасывание компрессора К, часть гелия возвращается в рефрижератор по линии 4.

В первый период охлаждения, как уже говорилось, тепловые нагрузки теплообменника I и ванны жидкого азота II значительно выше, чем при установившемся режиме. Возможно, окажется целесообразным по предложению Ю.К.Пилипенко иметь самостоятельные теплообменник и ванну жидкого азота, включаемые на период охлаждения (см. рис.3), с тем чтобы, сохраняя нормальные размеры рефрижератора, увеличить его универсальность. Такая же возможность имеется в отношении ванны жидкого водорода. Другая возможность — не делать дополнительных аппаратов, а вместо этого в период охлаждения по секции обратного гелия теплообменника I пускать испаренный азот.

Для рассматриваемого соленоида подсчеты показывают, что при циркуляции $3600 \text{ м}^3 / \text{ч}$. гелия длительность отдельных ступеней охлаждения (рис.2)

$$t_1 = 14,5 \text{ ч}, \quad t_2 = 6,7 \text{ ч}, \quad t_3 = 0,4 \text{ ч}, \quad t_4 = 0,7 \text{ ч},$$

Таким образом, приемлемое время охлаждения получается в том случае, когда количество охлаждающего гелия в 1,5 раза превышает количество, необходимое для ожижения в период заполнения дьюара, и примерно в 4 раза превышает потребность для установившегося режима (см. выше). (Количества циркулирующего гелия, кратные 1200 м^3 , берутся применительно к одному из типов выпускаемых компрессоров.)

Следует отметить, что для вариантов конструкции соленоида, при которых температура охлаждающего гелия на выходе из соленоида постепенно понижается, утилизация холода обратного потока гелия несколько усложнена. В этом случае теплообменник теплой зоны (I, рис.1) надо выполнять в виде двухсек-

пионных теплообменников для сжатого гелия и одного из обратных потоков - гелия, азота, водорода. По мере понижения температуры гелия, выходящего из соленоида, сжатый гелий придется перераспределять между теплообменниками, постепенно увеличивая подачу на теплообмен с обратным гелием и уменьшая подачу на теплообмен с обратным азотом.

2. Детандерный гелиевый рефрижератор с предварительным охлаждением жидким азотом (рис.4).

Отличие этого детандерного ожижителя от дроссельного (рис.1) заключается по существу в том, что ванна жидкого водорода заменяется детандером. При охлаждении соленоида детандер включается в тот момент, когда гелий, возвращающийся в ожижитель по линии 2, будет иметь температуру, близкую к температуре жидкого азота. В первое время через детандер пропускается весь сжатый гелий, который затем направляется в соленоид по линии 9. Когда температура гелия на выходе из соленоида снизится до температуры за детандером, гелий будет направлен в рефрижератор по линии 3. После этого вступит в работу теплообменник III, температуры до и после детандера снизятся, и так будет происходить до тех пор, пока температура за соленоидом не понизится до температуры за детандером, соответствующей установившемуся режиму. В этом случае производится переключение на схему для установившегося режима - гелий после детандера идет по линии 10, часть сжатого гелия идет через дроссель 7. Когда температура гелия за соленоидом понизится еще на одну ступень, включается линия 4. Возможно использование рефрижератора с двумя детандерами и т.д. по известным схемам гелиевых ожижителей. Для соленоида многометровой водородной камеры целесообразно использовать более простой дроссельный гелиевый рефрижератор, т.к. криогенная система камеры все равно содержит водородный ожижитель большой производительности. Расход энергии для дроссельного варианта в установившемся режиме несколько выше, чем для детандерного, но и в том и в другом случае он составляет очень малую долю от общего расхода энергии. В установках, где нет необходимости работать с жидким водородом, целесообразно использовать детандерные гелиевые рефрижераторы, главным образом по соображениям взрывобезопасности.

Проверенный анализ позволяет заключить, что при создании крупногабаритных и тяжелых сверхпроводящих соленоидов не возникают неразрешимые криогенные проблемы. Современные масштабы и уровень криогенной техники позволяют уверенно проектировать необходимое криогенное оборудование.

Л и т е р а т у р а

1. A.R.Kantrowitz and Z.J.J.Stekly. A New Principle for the Construction of Stabilized Superconducting Coil, Appl. Phys. Letters, 6, 56 (1965).
2. C.Laverick. Superconducting Magnet Technology, Advances in Electronics and Electron Physics, July 1966.
3. E.G.Pewitt. Innovations in Bubble Chamber Devices. Presented at the Instrumentation Conference held at Purdue University May, 11-14, 1965.
4. М.П.Малков, И.Б.Данилов, А.Г.Зельдович, А.Б.Фрадков. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения, ГЭИ, 1963.
5. V.E.Keilin and E.Yu.Klimenko, Investigation into high current leads in liquid helium applications, Cryogenics, vol. 6, N4, 1 966.
6. Z.J.J.Stekly, C.Laverick. The Rev.Sci. Instr., vol. 36, N9, 1965.
7. Z.J.Stekly and J.L.Zar. IEEE Transactions on Nuclear Science, June 1965, vol. NS-12, N3, pp. 367.
8. J.C.Laurence and W.D.Coles. Design, construction, and performance of cryogenically cooled and superconducting electromagnets, NASA TM X-52121, Sept. 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел

9 марта 1967г.

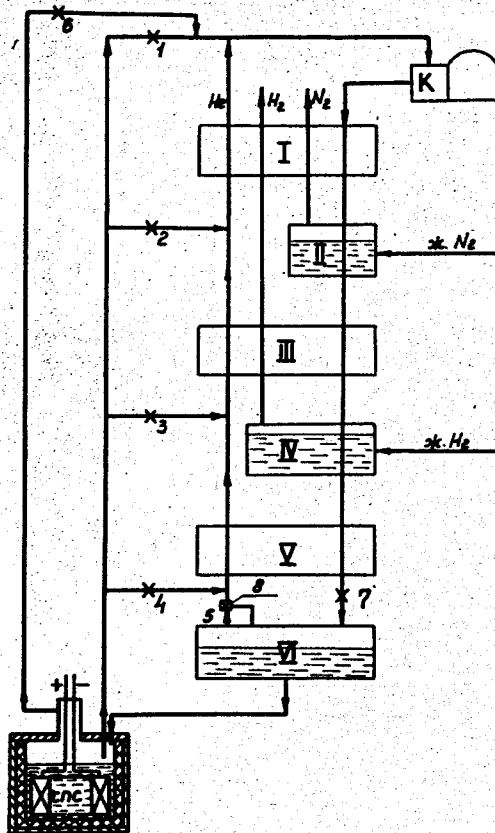


Рис. 1. Дроссельный гелиевый рефрижератор с предварительным охлаждением жидкими азотом и водородом.
 СПС - сверхпроводящий соленоид; К - компрессор или газодувка;
 I, III, V - теплообменники; II - ванна жидкого азота; IV - ванна жидкого водорода; VI - сборник жидкого гелия; 1,2,3, 4,6, - линии для обратного потока гелия из соленоида; 7 - дроссельный вентиль; 8 - регулятор давления.

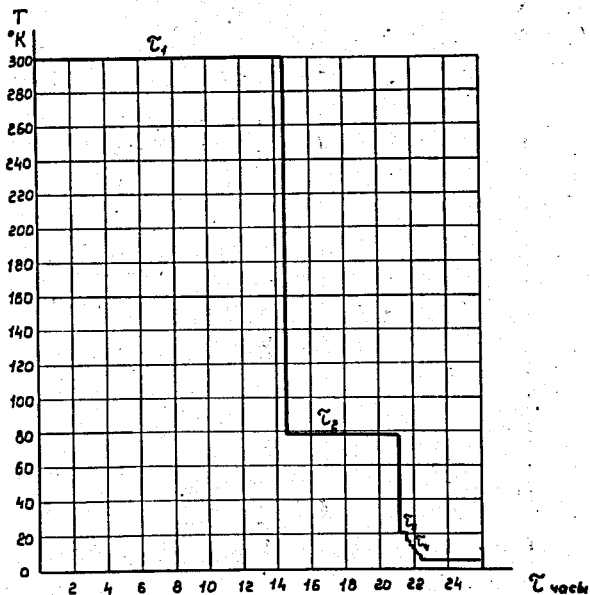


Рис. 2. Схематизированная зависимость температуры гелия на выходе из обмотки от времени охлаждения соленоида.

τ_1 - время охлаждения соленоида от 300 до 78°K, τ_2 - время охлаждения соленоида от 78 до 20°K, τ_3 - время охлаждения соленоида от 20 до 15°K, τ_4 - время охлаждения соленоида от 15 до 4°K (включает 5 промежуточных ступенек, в примере: 15-13,2; 13,2-11,2; 11,2-8,8; 8,8-6,2; 6,2-4,2°K).

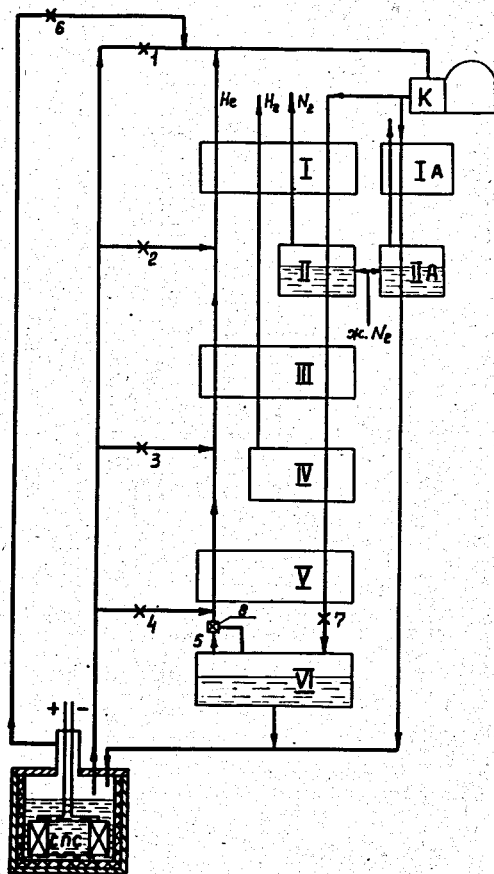


Рис. 3. Дроссельный гелиевый рефрижератор с дополнительными теплообменником IA теплой зоны и ванной PA жидкого азота.

Обозначения см. рис. 1.

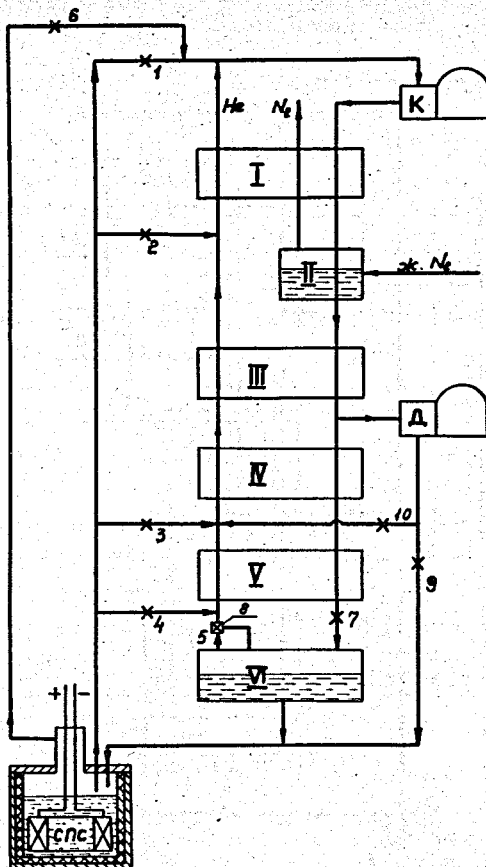


Рис. 4. Детапдерный гелиевый рефрижератор с предварительным охлаждением жидким азотом. Д - детапдер; I, III, IV, V - теплообменники; 9, 10 - линии за детапдером. Остальные обозначения см. рис. 1.