



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

8 - 3316

Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера

Часть вторая

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД

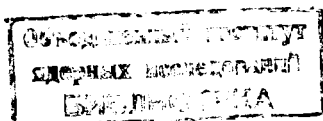
Дубна 1987

8 - 3316

Пятиметровая
жидководородная
пузырьковая камера

Часть вторая

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД



Авторский коллектив

Н.Г. Анищенко, В.А. Белушкин, А.А. Белушкина,
В.А. Васильев, Л.Б. Голованов,
Е.И. Дьячков, А.Г. Зельдович, Н.К. Зельдович,
Ю.К. Пилипенко, Ю.А. Шишов

Рукопись поступила в издательский отдел
10 мая 1967 года.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	5
ГЛАВА I. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ КАМЕРЫ	5
§ 1. Описание системы стабилизации режима работы камеры	5
§ 2. Система аварийных сбросов и заполнения камеры	7
ГЛАВА II. СИСТЕМА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ	7
§ 3. Система теплоизоляции камеры	7
§ 4. Выбор системы теплоизоляции	8
ГЛАВА III. СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД	10
Введение	10
§ 5. Описание конструкции СПС	11
§ 6. Геометрия соленоида	12
§ 7. Стабилизированный сверхпроводник	12
§ 8. Пондеромоторные силы	13
§ 9. Электропитание, контроль и безопасность	15
§ 10. Охлаждение соленоида	18
§ 11. Установившийся режим	18
§ 12. Охлаждение до температуры жидкого гелия	20
§ 13. Заполнение дьюара соленоида жидким гелием	21
§ 14. Накачка энергии в соленоид	21
§ 15. Рефрижератор	21
ГЛАВА IV. ОЖИЖИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВОДОРОДА, ДЕЙТЕРИЯ И НЕОНА С ВОДОРОДНЫМ ХОЛОДИЛЬНЫМ ЦИКЛОМ	23
Введение	23
§ 16. Краткое описание технологической схемы	23
§ 17. Выбор схемы	23
§ 18. Тепловые и материальные балансы ожижителя	25
§ 19. Детандер	33
ГЛАВА V. ГЕЛИЕВАЯ ОЖИЖИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА	36
Введение	36
§ 20. Принципиальная схема гелиевого ожижителя	36

ГЛАВА УІ. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЖИЖИТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ВОДОРОДА, ДЕЙТЕРИЯ, НЕОНА И ГЕЛИЯ	39
§ 21. Назначение	40
§ 22. Условия работы аппаратуры	41
§ 23. Система автоматического управления и сигнализации ...	41
§ 24. Система аварийной сигнализации	42
§ 25. Система регистрации рабочих параметров с записью на ленте	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Пятиметровая водородная камера предназначена для работы на пучках ускорителя 70 Гэв в г.Серпухове.

Основные параметры камеры:

1. Диаметр - 5 метров.
2. Геометрический объем - 60м^3 .
3. Частота срабатывания - 1 цикл за 5 сек , в каждом цикле 2-5 резонансных расширений.
4. Заполняющие жидкости: водород, дейтерий, водородо-неоновая смесь с содержанием неона до 30%.
5. Магнитное поле:
 - а) вариант с обычным магнитом не менее 20 кэ;
 - б) вариант со сверхпроводящим магнитом 40 кэ.

ГЛАВА I

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ КАМЕРЫ

§ I. Описание системы стабилизации режима работы камеры

Пятиметровая камера (Рис. I) может быть наполнена жидким водородом, или жидким дейтерием, или жидкой водородно-неоновой смесью.

Стабилизировать режим - значит, держать камеру при заданных значениях давления и температуры.

Для термостатирования камеры предусмотрены змеевики, расположенные на внешней поверхности и внутри камеры, через которые пропускается жидкий водород [1], [2].

Необходимая холодопроизводительность охладителя водорода определяется динамическим тепло-

притоком за счёт необратимости работы расширения, сжатия рабочей жидкости в камере и статическим теплопритоком к камере. У 80-сантиметровой Британской камеры при I имп/сек необходимая холодопроизводительность составляет 1,2 вт/литр. По нашим опытам со 100-сантиметровой водородной камерой динамический теплоприток равен 1 дж/литр цикл, что эквивалентно 1 вт/литр при I имп/сек. В задании на 14 футовую камеру [3] предусматривается динамический теплоприток 0,6 вт/литр.

Поскольку динамический теплоприток вызывается необратимостью процессов расширения и сжатия, а необратимость сильно зависит от длительности этих процессов и от конструкции камеры и механизма расширения, то рассчитать динамический теплоприток не представляется возможным. Ориентируясь на имеющийся опыт, мы принимаем величину динамического теплопритока к камере 1 вт/литр.

Жидкий водород из охладителя подаётся во внешние змеевики камеры через регулятор расхода PP1 и во внутренние змеевики через регулятор расхода PP2. Регуляторы расхода на обоих ветвях сдублированы; это делает возможным смену вышедшего из строя регулятора расхода, не прекращая подачи водорода к термостатирующим змеевикам.

В схеме предусмотрена система доконденсации жидкости в камеру. Сжатый газ (водород, неон или дейтерий) проходит через РД2 в конденсатор 7, в нём конденсируется и через регулировочный вентиль ВЗ1 стекает в камеру в том случае, когда уровень в камере недостаточен. Когда камера переполняется, жидкость из камеры идёт обратным ходом по этой же линии в соответствующие обратные потоки через расходомер РЗ и регулятор давления РДЗ.

Таким образом, система обеспечивает отсутствие пузыря в камере. Кроме того, система из РД2 и РДЗ поддерживает постоянным давление в камере.

Во всех режимах регулировки давления в камере, регулятор РД2 пропускает избыточное количество газа, а РДЗ - поддерживает постоянным давление в камере, срабатывая избыток газа.

Конденсатор 7 представляет из себя дьвар, в котором кипит жидкий водород, отдавая теплоту испарения проходящему по змеевику газу. Испарившийся холодный водород проходит обратным потоком теплообменник; в нём отдаёт свой холод газу, поступающему на доконденсацию, и направляется в обратный поток водорода.

Жидкий водород в конденсатор подаётся из охладителя водорода через регулятор расхода PP3. Регулятор расхода PP3 работает от датчика уровня жидкого водорода в дьваре конденсатора.

На наружной стенке камеры имеются змеевики для подогрева сжатым водородом и для охлаждения жидким азотом.

Водород из змеевика подогрева через расходомер P5 поступает в обратный поток водорода

Азот из охлаждающего змеевика через расходомер Р6 направляется в линию обратного азота.

В схеме предусмотрены водородный и азотный газгольдеры, которые позволяют держать систему под давлением одного из этих газов.

Внутри камеры размещены платиновые и конденсационные термометры.

§ 2. Система аварийных сбросов и заполнения камеры

Система аварийных сбросов и заполнения камеры представлена на рис. I.

Рабочая жидкость к камере подаётся из ожижителя по теплоизолированному трубопроводу.

Заполнение камеры жидкостью происходит через вентиль В30 и фильтр I4.

В схеме предусмотрена регенерация фильтра. При этом фильтр отсекается вентилями и продувается чистым рабочим газом после блока очистки; газ после фильтра направляется в соответствующий грязный газгольдер блока очистки. Во время регенерации фильтр греется снаружи подогревателем. После окончания регенерации выключается подогреватель и продувочный поток газа.

Во время работы камеры дьвар сообщается с газгольдерами рабочего газа через вентиль В10, либо остаётся запёртым под небольшим избыточным давлением рабочего газа.

Камера освобождается от водорода или дейтерия путём выпаривания жидкости.

В случае аварии предусмотрен паро-жидкостной сброс из камеры и дьвара через клапаны ПК1+ПК6 в шаровые ёмкости из нержавеющей стали.

Во избежание резкого повышения температуры выбрасываемой паро-жидкостной смеси, трубопроводы аварийного сброса должны быть изнутри теплоизолированы.

Во время работы камеры задвижка В32 должна быть обязательно открыта.

Г Л А В А П СИСТЕМА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

§ 3. Система теплоизоляции камеры

Система теплоизоляции камеры включает:

1. Изоляцию камеры от теплопритоков из окружающей среды. Температура камеры 25°К.
2. Изоляцию сверхпроводящего соленоида от теплопритоков из окружающей среды. Температура соленоида 4°К.

При расчёте системы теплоизоляции камеры рассматривались теплопритоки к камере и

сверхпроводящему соленоиду при 2-х состояниях системы теплоизоляции: рабочем и аварийном.

Для поддержания камеры в рабочем состоянии необходимо: компенсировать тепловыделения, вызванные расширением-сжатием водорода в камере (динамический теплоприток) $Q_{\text{дин.}} = 60 \text{ квт.}$ из расчёта 1вт/лит. (см.стр. 6) и компенсировать теплоприток из окружающей среды (статический теплоприток). Принимаем, что теплоприток к камере из окружающей среды в рабочем состоянии системы теплоизоляции должен быть не больше 2% от динамического теплопритока, т.е. $Q_{\text{ст.}} = 1,2 \text{ квт.}$

В существующих камерах при аварийных ситуациях водород из камеры сбрасывается в специальные аварийные ёмкости или через огнепламяпреградитель в атмосферу. Для того, чтобы не делать дополнительных ёмкостей и избавиться от возможных неприятностей при сбросе водорода в атмосферу, необходимо, чтобы теплопритоки при аварийных ситуациях не превышали мощности ожигателя. Тогда весь водород может быть закачан в шаровые ёмкости. Таким образом, теплоприток к камере в аварийном состоянии не должен быть более 85 квт.

Сверхпроводящий соленоид, создающий магнитное поле в камере, работает совместно с гелиевым ожигателем мощностью 255вт. Принимаем, что суммарный теплоприток к сверхпроводящему соленоиду не должен превышать 50% холодопроизводительности ожигателя.

§ 4. Выбор системы теплоизоляции

Выбор системы теплоизоляции зависит:

1. От допустимых теплопритоков из окружающей среды к камере и сверхпроводящему соленоиду в рабочем и аварийном состояниях системы теплоизоляции.
2. От конструктивного решения узлов камеры: механизма расширения, подвески камеры и т.п.

В настоящее время существует три системы теплоизоляции низкотемпературных пузырьковых камер: первая система-высоковакуумная с азотным экраном, вторая система-высоковакуумная с многослойной изоляцией, третья система изоляции -дъварная. Дъварная система изоляции [4], с нашей точки зрения, обладает рядом преимуществ перед другими системами, поэтому она была выбрана для пятиметровой камеры. Основными её преимуществами являются: во-первых, значительное снижение требований к герметичности корпуса камеры и всех её соединений; во-вторых, повышение безопасности работы, т.к. в случае поломки одного из элементов камеры, жидкий водород выливается не на тёплые стенки, как при других типах изоляции, а в дъвар.

На рис.2 приведена схема конструкции одного из вариантов дъварной системы теплоизоляции камеры и сверхпроводящего соленоида. Камера (1) с помощью подвески (2) прикреплена к крышке (3) дъвара камеры. Дъвар камеры состоит из жёсткого несущего кожуха (4), внутрь

которого вставлена обечайка (5) . Пространство между кожухом и обечайкой заполнено многослойной изоляцией (6) и отвакуумировано. Пространство (7) между обечайкой (5) и камерой (I) заполнено газообразным водородом, имеющим газгольдерное давление. В дьваре камеры между его стенкой и самой камерой находится кольцевой дьвар (8) сверхпроводящего соленоида (9), который подвешен к крышке дьвара камеры. Дьвар сверхпроводящего соленоида состоит из жёсткого кожуха (I0), внутрь которого вставлена обечайка (II). Пространство между кожухом и обечайкой заполнено многослойной изоляцией (I2) и отвакуумировано.

Теплопритоки к камере и сверхпроводящему соленоиду, подсчитанные для различных вариантов состояния системы теплоизоляции, приведены в таблица I и 2.

Таблица I

Теплоприток к камере при различных состояниях системы теплоизоляции.

Состояние системы		Теплоприток, Q ватт
Рабочее		1060
Аварийное	В изоляции воздух	2220
	В изоляции водород	4600
	Жидкий водород в дьваре	22650

Теплоприток к сверхпроводящему соленоиду складывается из: теплопритока от кожуха дьвара сверхпроводящего соленоида, теплопритока от крышки вакуумного кожуха сверхпроводящего соленоида (20 вт.), теплопритока через электровводы (84 вт.) и теплопритока по внутренней стенке дьвара и подвескам (18 вт.).

Таблица 2

Теплоприток к сверхпроводящему соленоиду.

Состояние системы		Теплоприток, Q ватт	
		Без водородного экрана	С водородным экраном
Рабочее		470	122
Аварийное	Дьюар камеры заполнен воздухом	485	-
	Дьюар камеры заполнен водородом	492	-
	Дьюар соленоида заполнен гелием	1520	1127,2

Г Л А В А Ш

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД

Введение

Точность измерения импульса частицы в пузырьковой камере прямо пропорциональна напряженности магнитного поля. При использовании обычных электромагнитов не удается получить в большом объеме напряженность выше 20-25кгс. Дальнейшее увеличение напряженности может быть достигнуто с помощью соленоидов. Появившиеся в последнее время стабилизированные нормальным металлом сверхпроводники открыли путь к созданию крупных сверхпроводящих соленоидов (СПС). Сейчас уже нет сомнения, что в ближайшие годы будут построены СПС с полем на 30-50кгс в объеме нескольких десятков кубических метров. Рассматриваемый

СПС в сравнении с охлаждаемыми водой и криогенными соленоидами находится вне конкуренции по следующим причинам:

Во-первых, СПС расходуют сравнительно небольшое количество энергии. Например, для

поддержания поля 40кгс в объеме диаметром 6м с помощью охлаждаемого водой медного соленоида необходима мощность более 50 Мвт , алюминиевый соленоид, охлаждаемый жидким водородом, потребляет в 2-3 раза меньше (в основном на охлаждение), в то время как СПС потребляет менее 1 Мвт (на поддержание гелиевой температуры).

Во-вторых, вес и толщина обмоток СПС в несколько раз меньше, чем у соленоидов, работающих при комнатной температуре.

Капитальные затраты на крупные СПС и обычные соленоиды в настоящее время примерно равны из-за высокой стоимости сверхпроводящего материала, но ожидается значительное снижение последней.

На основании этих соображений для 5-метровой водородной камеры предложен и рассмотрен СПС с напряженностью поля в центре 40кгс.

§ 5. Описание конструкции СПС

Соленоид состоит из двух катушек, раздвинутых на расстояние, необходимое для прохода пучка ускоренных частиц. На рис.3 дан один из возможных вариантов криостата для соленоида. Криостат представляет из себя дьвар с толстой наружной и тонкой внутренней стенками, между которыми расположена многослойная изоляция. Криостат в свою очередь погружен в дьвар камеры. Благодаря низкой температуре наружной стенки гелиевого дьвара (около 30°К), теплоприток через изоляцию невелик. Объем магнитного поля используется эффективно, поскольку толщина изоляции мала. Изоляция выполнена из материала, применение которого снижает требования к вакуумной плотности. При полной порче вакуума скорость испарения гелия не слишком велика и позволяет вести закачку гелия в газгольдеры. В будущем предполагается рассмотреть вариант с независимыми вакуумными кожухами СПС и камеры. В CERN предложена конструкция с двумя независимыми криостатами для СПС, но она сравнительно сложна и требует высоковакуумной изоляции.

Каждая катушка СПС состоит из набора одинаковых дисков, намотанных из стабилизированного ленточного сверхпроводника. Диски помещены между внутренней и наружной цилиндрическими обечайками и разделены прокладками с отверстиями для прохода гелия. Более подробное описание элементов СПС приведено в последующих разделах.

В отличие от обычных электромагнитов СПС на 40 кгс не нуждается в железном ярме, т.к. вклад последнего в напряженность поля относительно невелик, а стоимость и вес весьма значительны. Кроме того, ярмо ограничило бы свободу в выборе конструкции и размеров камеры и СПС. Но соленоид без ярма создает большое рассеянное магнитное поле, которое может оказать вредное влияние на работу близлежащих приборов. Внешнее магнитное поле может быть

поддержания поля 40кгс в объеме диаметром 6м с помощью охлаждаемого водой медного соленоида необходима мощность более 50 Мгвт, алюминиевый соленоид, охлаждаемый жидким водородом, потребляет в 2-3 раза меньше (в основном на охлаждение), в то время как СПС потребляет менее 1 Мгвт (на поддержание гелиевой температуры).

Во-вторых, вес и толщина обмоток СПС в несколько раз меньше, чем у соленоидов, работающих при комнатной температуре.

Капитальные затраты на крупные СПС и обычные соленоиды в настоящее время примерно равны из-за высокой стоимости сверхпроводящего материала, но ожидается значительное снижение последней.

На основании этих соображений для 5-метровой водородной камеры предложен и рассмотрен СПС с напряженностью поля в центре 40кгс.

§ 5. Описание конструкции СПС

Соленоид состоит из двух катушек, раздвинутых на расстояние, необходимое для прохода пучка ускоренных частиц. На рис.3 дан один из возможных вариантов криостата для соленоида. Криостат представляет из себя дьвар с толстой наружной и тонкой внутренней стенками, между которыми расположена многослойная изоляция. Криостат в свою очередь погружен в дьвар камеры. Благодаря низкой температуре наружной стенки гелиевого дьвара (около 30°К), теплоприток через изоляцию невелик. Объем магнитного поля используется эффективно, поскольку толщина изоляции мала. Изоляция выполнена из материала, применение которого снижает требования к вакуумной плотности. При полной порче вакуума скорость испарения гелия не слишком велика и позволяет вести закачку гелия в газгольдеры. В будущем предполагается рассмотреть вариант с независимыми вакуумными кожухами СПС и камеры. В CERN предложена конструкция с двумя независимыми криостатами для СПС, но она сравнительно сложна и требует высоковакуумной изоляции.

Каждая катушка СПС состоит из набора одинаковых дисков, намотанных из стабилизированного ленточного сверхпроводника. Диски помещены между внутренней и наружной цилиндрическими обечайками и разделены прокладками с отверстиями для прохода гелия. Более подробное описание элементов СПС приведено в последующих разделах.

В отличие от обычных электромагнитов СПС на 40 кгс не нуждается в железном ярме, т.к. вклад последнего в напряженность поля относительно невелик, а стоимость и вес весьма значительны. Кроме того, ярмо ограничило бы свободу в выборе конструкции и размеров камеры и СПС. Но соленоид без ярма создает большое рассеянное магнитное поле, которое может оказать вредное влияние на работу близлежащих приборов. Внешнее магнитное поле может быть

экранировано с помощью железного экрана толщиной 0,5м, установленного на расстоянии 3-4 метров от камеры.

§ 6. Геометрия соленоида

Размеры соленоида, приводимые в настоящем разделе, являются результатами предварительных расчетов. Необходима большая работа по моделированию, конструированию и расчету узлов и элементов СПС, прежде чем можно будет приступить к созданию рабочего проекта.

Внутренний диаметр обмотки определяется в основном размерами и конструкцией камеры и гелиевого криостата.

Минимальная высота соленоида ограничивается требованиями к однородности магнитного поля в фотографируемом объеме камеры, максимальная — конструктивными соображениями. Неоднородность не должна превышать 10-15% в связи с требованием к точности определения импульсов частиц с помощью ЭВМ. В этом случае вклад в ошибку от неточности в напряженности поля может быть сделан меньшим 0,3%. Зависимость неоднородности от относительных размеров соленоида представлена на рис.4 [16].

Расстояние между обмотками двух катушек в области пучка определяется требованиями физического эксперимента и конструкцией гелиевого криостата.

Толщина обмотки найдена из условия размещения между витками электрической изоляции и проходов для жидкого гелия. В настоящее время не имеется достаточного количества экспериментальных данных для вполне обоснованного выбора этих размеров.

Основные параметры соленоида приведены в табл.4, картина напряженности магнитного поля дана на рис.5.

Соленоид состоит из 30 совершенно одинаковых дисков, навитых из стабилизированной сверхпроводящей ленты на ток 5000 ампер. Размеры сечения ленты — 1х100мм.

§ 7. Стабилизированный сверхпроводник

Материалом сверхпроводника могут служить $Nb-Zr$, $Nb-Ti$ и Nb_3Sn . Расчет соленоида проводится по характеристике хорошо освоенного сплава $Nb-50\%Zr$, выпускаемого в виде проволоки диаметром 0,25мм (рис.6). Перспективным является сплав $Nb-75\%Zr$ (рис.7), отличающийся технологичностью и стабильностью в работе [5], [6]. Для полей выше 40-50кГс наиболее подходит Nb_3Sn (рис.8) [7], который, по-видимому, может стать значительно дешевле после широкого освоения технологии плазменного напыления олова

на ниобиевую ленту. Сплав $Ti - 22\% Nb$ обладает характеристикой $J(H)$, близкой к характеристике сплава $Nb-Zr$, но не зависящей от размеров сечения [8].

В соленоиде используется лента большого сечения, что диктуется, помимо технологических, также конструктивными соображениями. Длина ленты на 5000а в одном диске сравнительно невелика - около 3000 метров, это позволяет изготовить ее с минимальным количеством стыков. Элементы межслоевой изоляции просты в изготовлении. Каналы для жидкого гелия достаточно широки, чтобы не возникли газовые пробки.

Выбор больших токов также связан с требованием снижения индуктивности соленоида. Малая индуктивность упрощает внешнюю электрическую цепь - источник питания, устройство для аварийной эвакуации энергии из соленоида и др. (см. раздел "Электропитание").

Вес проволоки из $Nb - 50\% Zr$ по расчету составляет около 2,5 тонн. Эта цифра верна при условии, что количество сверхпроводников уменьшается от внутренних слоев обмотки к внешним. Быстрое падение напряженности магнитного поля по сечению обмотки и крутопадающая характеристика $J(H)$ для $Nb - 50\% Zr$ позволяют расположить сверхпроводящие проволоки, как показано на рис.9. Этим достигается экономия сверхпроводника в 2,5 раза по сравнению с случаем, когда количество сверхпроводника определяется по максимальному полю. Если число сверхпроводящих проволок в ленте оставлять неизменным по толщине обмотки, то возможен и другой способ экономии сверхпроводника - отдельная запитка наружных слоев большими токами. Такой путь усложнит конструкцию соленоида и электрическую схему.

Ориентировочные расчеты показывают, что потери на испарение гелия от джоулева тепла, вызванные переходом тока через нормальный металл в ленте с переменным количеством сверхпроводящих проволок, не будут значительны.

Вес стабилизирующей меди оценен в 80 тонн. Эта цифра требует уточнения, так как не известны условия охлаждения ленты в реальной конструкции, качество нормального материала (тепло-и электропроводность), качество его контакта со сверхпроводником и многое другое. Исходными данными для расчёта стабилизации в настоящее время служат следующие величины: допустимый тепловой поток от ленты к жидкому гелию составляет не более $0,4 \text{ вт/см}^2$ [9], удельное электросопротивление меди в магнитном поле составляет величину порядка 10 номсм [9]; омывается гелием только одна сторона ленты.

§ 8. Пондеромоторные силы

Пондеромоторные силы в соленоиде могут быть разделены на радиальные и осевые.

Оценим веса конструктивных элементов соленоида, необходимых для противодействия пондеромоторным силам.

Радиальные силы в обмотке соленоида (при равномерном распределении плотности тока в ней) падают приблизительно линейно от внутренних витков к наружным - также, как

напряженность поля (рис.9). Связь между радиальной силой и напряженностью магнитного поля для бесконечно длинного соленоида может быть выражена в виде эквивалентного магнитного давления на стенки соленоида:

$$P_M = \frac{H_0^2}{8\pi}$$

С достаточной для оценочного расчета точностью можно принять, что средняя величина P_M в коротком соленоиде мало отличается от подсчитанной по этой формуле.

Для $H_0 = 40$ кэс $P_M \approx 64$ кг/см².

Обмотка под действием радиальных сил испытывает разрывающее усилие, стремящееся растянуть каждый виток. Механические напряжения в обмотке пропорциональны диаметру соленоида. Расчет показывает, что магнитное давление создаст в стабилизированной ленте напряжение 2500 кг/см². Электропроводность меди высокой чистоты под действием такого напряжения падает почти в 3 раза по сравнению с ненапряженным состоянием [10], что ухудшает степень стабилизации проводника. Таким образом, необходимо бандажирование ленты. Конструктивно бандаж может быть оформлен либо в виде массивных колец, надетых на обмотку, либо в виде ленты из достаточно прочного материала, наматываемой вместе с проводником. Вес бандажа в обоих случаях примерно одинаков и составляет около 40 тонн, если материалом служит нержавеющей сталь типа X18H10T с допустимым напряжением, составляющим половину предела текучести при -253°С, - 3850 кг/см² [11].

Осевые ponderomotorные силы вызывают взаимное притяжение верхней и нижней половин соленоида с силой $1,25 \cdot 10^4$ тонн. Осевые силы, возникающие на отдельном диске, передаются на промежуточный фланец, который опирается на внутреннюю и внешнюю цилиндрические обечайки. В области пучка силы между катушками замыкаются через распорки. Одиночные расчеты на прочность показывают, что общий вес внутренних обечайек, фланцев, распорок и других опорных элементов соленоида не превышает 20 тонн (при допустимом напряжении 3850 кг/см²).

Таким образом, вес соленоида складывается из следующих весов:

Сверхпроводник	2,5 тонн
Стабилизирующая медь	80 тонн
Бандажи	40 тонн
Остальные элементы опорной конструкции	20 тонн
Электрическая изоляция	8 тонн
Общий вес соленоида	<hr/> 150 тонн

§ 9. Электропитание, контроль и безопасность

В установленном режиме сверхпроводящий соленоид не потребляет электрической энергии, если не считать потерь во внутренних контактах. Однако для создания магнитного поля СПС и покрытия потерь энергии в токопроводе и токовводах необходим низковольтный источник питания сравнительно небольшой мощности.

Выбор аппаратуры, электрической изоляции, а также характер процессов, связанных с изменением тока, зависят от индуктивности СПС. Расчетное значение индуктивности одного из 30 дисков $L_g = 4,4$ генри, индуктивность L всей обмотки составляет 132 генри, запасенная магнитным полем энергия $E_{\text{магн}} = \frac{L \cdot I_{\text{раб}}^2}{2} = 1,65 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 460 \text{ кВт. час}$, где $I_{\text{раб}} = 5000 \text{ а}$ - рабочий ток в ленте.

Большая индуктивность обмотки затрудняет процессы закачки тока и в особенности эвакуации запасенной энергии в аварийных случаях, усложняет выбор аппаратуры и электрической изоляции. Индуктивность можно уменьшить за счет либо выбора больших $I_{\text{раб}}$, либо разбивки СПС на группы.

Таблица № 3 иллюстрирует зависимость напряжений на концах обмоток СПС при переходных процессах от числа групп и величины $I_{\text{раб}}$ (для расчетов принято $\frac{di}{dt} = \text{const}$).

По нашему мнению, в первом приближении считаются приемлемыми:

а) время зарядки СПС до полной энергии $T_z = 10^4$ секунд;

б) время эвакуации энергии $T_z = 10$ секунд

(уменьшение T_z ограничено уровнем возникающих при эвакуации на концах обмоток групп перенапряжений и величиной токов Фуко, наводимых в массивных конструкциях соленоида и камеры);

в) электрическая прочность изоляции токовводов и концов обмоток, корпусной изоляции группы равна 10 киловольт, витковая изоляция может иметь значительно меньшую электрическую прочность. В качестве изоляции может быть использован нейлон с электрической прочностью 4 кв/мм [8].

Для рассматриваемого сверхпроводящего соленоида выбран вариант с $I_{\text{раб}} = 5000$ ампер и числом групп с отдельными источниками питания, равным 6. Теплоприток по 12 токовводам в этом случае составляет около 90 вт, что считается приемлемым; суммарная номинальная мощность источников питания - 450 квт.

Источники питания должны быть снабжены автоматическим устройством группового регулирования, уменьшающим при выходе на рабочий режим напряжения источников питания до $U_{\text{раб}}$. Величина $U_{\text{раб}}$ (в данном случае порядка 6 вольт) определяется падением напряжения на токопроводах и токовводах при $I_{\text{раб}} = 5000$ ампер.

Таблица 3

Зависимость номинального напряжения источников питания, индуктивности группы и уровня перенапряжений, возникающих при эвакуации энергии, от рабочего тока и числа групп СПС.

Число групп		Рабочий ток обмотки СПС, ампер		
		1000	5000	10000
1	Индуктивность группы, генри	3300	132	33
	Номинальное напряжение источников, вольт	300	67	39
	Перенапряжение $L \frac{di}{dt}$, вольт	330000	66000	33000
2	Индуктивность группы, генри	1650	66	16,5
	Номинальное напряжение источников, вольт	170	36	23
	Перенапряжение $L \frac{di}{dt}$, вольт	165000	33000	16500
6	Индуктивность группы, генри	550	22	5,5
	Номинальное напряжение источников, вольт	55	15	14
	Перенапряжение $L \frac{di}{dt}$, вольт	55000	11000	5500
10	Индуктивность группы, генри	330	13	3,3
	Номинальное напряжение источников, вольт	33	10	12
	Перенапряжение $L \frac{di}{dt}$, вольт	33000	6500	3300

Соответственно снижению напряжения при закачке энергии уменьшается и необходимая для работы соленоида мощность источников питания.

СПС может быть переведен в "замкнутый режим" с помощью выключателей замкнутого режима (ВЗР на рис.10).

Однако есть опасность, что из-за тепловыделения в контактах ВЗР индукция магнитного поля будет снижаться, что потребует периодической "подкачки" поля от источника питания. Этот процесс необходимо автоматизировать, допустив разумный диапазон колебаний индукции.

Источниками питания могут служить генераторы постоянного тока (мотор-генераторы) или управляемые полупроводниковые выпрямители. Последние имеют ряд преимуществ перед мотор-генераторами (простота и надежность устройства и обслуживания, длительный срок службы, высокий КПД и т.д.). Возникающие при эвакуации перенапряжения столь велики, что необходимо предусматривать защиту от них источников питания, например, с помощью шунтирующих разрядников Р (см.рис.10).

Схема электрического контроля работы источников питания и СПС включает:

- а) высокочувствительное устройство измерения напряжений вдоль обмотки СПС (на соединениях между дисками, на местах изменения числа сверхпроводников в ленте);
- б) постоянную регистрацию тока;
- в) измерение поля в нескольких точках датчиками Холла, работающими при низкой температуре;
- г) наблюдение по осциллографу за изменениями потока в СПС и напряжения источников питания.

Кроме этого, должен быть обеспечен контроль уровня жидкого гелия и температуры в нескольких точках объема СПС.

Обмотка СПС выполнена из стабилизированного сверхпроводника, обладающего хорошей самозащитой от срыва сверхпроводящего состояния. Тем не менее, возможны такие аварийные ситуации, когда требуется максимально возможная скорость эвакуации энергии из сверхпроводящего соленоида:

- 1) разрыв сверхпроводящей ленты;
- 2) нарушение тепловой изоляции криостата;
- 3) аварийный выпуск значительной части гелия.

Аварийное выделение запасенной энергии внутри СПС почти целиком пошло бы на нагрев соленоида: испарение 10 м^3 гелия, находящегося в СПС, поглощает менее $2\% E_{\text{магн}}$. Расчеты показывают, что при условии быстрой эвакуации жидкого гелия и равномерном поэтому распределении энергии в стабилизирующей меди всего СПС, последняя нагреется приблизительно до 130°К . Если же вся $E_{\text{магн}}$ выделится в меди одного из 30 дисков, то нагрев может

составить 1600°K . При авариях с поломкой сверхпроводящей ленты возможно образование электрической дуги и выплавление значительной части обмотки.

На рис.10 приведена принципиальная электрическая схема питания группы. В качестве источника используется генератор постоянного тока Γ . Внешние активные сопротивления R_1 и R_2 обеспечивают получение двух скоростей эвакуации энергии: аварийной и нормальной. При нормальной скорости после отключения ВЗР и автомата A_1 обмотка каждой группы СПС остается замкнутой на R_1 и R_2 . Время нормальной эвакуации при таком способе может составлять несколько десятков минут. Можно применить и другой способ - эвакуацию путем отдачи запасенной энергии в питающую сеть переменного тока.

В аварийных случаях датчик регистрирует появление напряжения на концах обмотки. Его сигнал, пройдя через усилитель $У$, отключает ВЗР и A_1 , а затем и автомат A_2 в цепи сопротивления R_1 . В этом случае энергия рассеивается в сопротивлении R_2 ($R_2 \gg R_1$).

Выше было принято время эвакуации $T_{\text{э}} = 10$ сек при постоянной скорости ($\frac{di}{dt} = \text{const}$) уменьшения тока. Если для гашения $E_{\text{магн}}$ используются постоянные активные сопротивления (см. рис.10) и допустимо $L \frac{di}{dt} = 10$ киловольт, то время $T_{\text{э}}$ составит около 40 секунд (при экспоненциальном характере спада тока). Можно уменьшить $T_{\text{э}}$ или снизить $L \frac{di}{dt}$ (при том же $T_{\text{э}}$), если применить принцип гашения $E_{\text{магн}}$ на нелинейные сопротивления ($T_{\text{э}}$ уменьшается \sim в 3 раза) или дугогасительную решетку ($T_{\text{э}}$ уменьшается \sim в 5 раз) [12]. Однако примеров устройств быстрой эвакуации такого большого запаса $E_{\text{магн}}$ при столь больших токах в инженерной практике не существует.

§ 10. Охлаждение соленоида

Рассматриваемый соленоид имеет беспрецедентно большую массу металла, которую необходимо охлаждать до температуры жидкого гелия. Можно также ожидать значительных теплопритоков к жидкому гелию через подвески, стенки дьвара, вводы тока и др.

С криогенной точки зрения работу системы охлаждения можно разделить на четыре этапа:

1. Установившийся режим.
2. Охлаждение до температуры жидкого гелия.
3. Заполнения криостата жидким гелием.
4. Накачка энергии в соленоид.

§ II. Установившийся режим

В этом режиме имеются следующие источники теплопритока:

- а) через теплоизоляцию,

- б) по подвескам и мостам,
- в) от вводов тока,
- г) от дефектов сверхпроводника и контактов, находящихся в жидком гелии.

Снимаются теплопритоки с помощью жидкого гелия. Испаренный гелий можно или сразу возвращать в охладитель, или охлаждать им подвески и вводы тока и тем самым снижать количество тепла, притекающее к соленоиду. Возврат испаренного гелия в охладитель повышает холодопроизводительность в 4-5 раз. Термодинамически безразлично, как использовать холодный пар — путём возврата в охладитель или на охлаждение 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.

а) Приток тепла через изоляцию может быть существенно ограничен. Например, через многослойную изоляцию поток тепла в интервале $300 \pm 4^\circ\text{K} - 0,05 \pm 0,1 \text{ вт/м}^2$ [12], что для соленоида пятиметровой камеры, при поверхности изоляции около 200 м^2 , составит $Q_{из} \leq 20 \text{ вт}$.

б) Подвески должны выдержать вес соленоида 150 тонн. При допустимом для нержавеющей стали напряжении 1500 кг/см^2 площадь сечения подвесок равна 100 см^2 .

Теплоприток по неохлажденным подвескам длиной 100 см $Q_n = 32 \text{ вт}$.

Расчёты показывают, что охлаждение подвесок испарившимся гелием может снизить теплоприток по ним примерно в 16-20 раз. То же самое относится к внутренним стенкам дьбара, площадь сечения которых при толщине стенки 2мм равна 800 см^2 . Теплоприток по охлаждаемым подвескам и стенкам дьбара составляет соответственно $Q_{охл.} = 2$ и $Q_{ох.д.} = 16 \text{ ватт}$.

в) Теплоприток по охлаждаемым гелием оптимизированным тоководам Q_j достигает $1,3 \pm 1,4 \text{ вт}$ на каждые 1000 ампер [13].

Обмотка соленоида разделена на 6 групп с отдельными вводами на ток 5000а каждый (см.раздел "Электропитание"). Общий теплоприток по 12 вводам равен 84вт.

г) Оценка тепловыделений от дефектов сверхпроводника и электрических контактов, находящихся в жидком гелии, затруднительна ввиду отсутствия опыта работы с такими большими системами.

Компенсация теплопритоков по охлаждаемым: подвескам, стенкам дьбара и тоководам эквивалентна работе охладителя гелия на слив (холодный пар не возвращается в охладитель), компенсация теплопритока через изоляцию и тепловыделений в соленоиде эквивалентна рефрижераторному режиму. Оба эти режима работы охладителя можно осуществить одновременно.

Однако для оценки величины охладителя удобнее свести оба режима к одному, превалирующему, в рассматриваемом примере - к режиму на слив. Таким образом, необходимая холодопроизводительность охладителя гелия в установившемся режиме

$$Q = Q_{ох.п.} + Q_{ох.д.} + Q_j + \frac{Q_{из} + Q_{вн}}{4} = 2 + 16 + 84 + \frac{20 + ?}{4} > 107 \text{ вт.}$$

Здесь "4" - уменьшение холодопроизводительности охладителя в режиме работы на слив по сравнению с рефрижераторным режимом. Холодопроизводительностью 107вт обладает дроссельный охладитель, на который подается около 500 нм³/час сжатого гелия.

§ 12. Охлаждение до температуры жидкого гелия

Возможны два способа охлаждения соленоида. Первый - последовательное заполнение дьюара соленоида рядом жидких хладагентов с понижающейся температурой кипения, например: азотом, водородом или неоном, гелием. Осуществление этого способа вызывает значительные затруднения из-за необходимости полного удаления выкипающего компонента при переходе на охлаждение нижекипящим. Достаточно очень небольших примесей азота или водорода, чтобы вызвать закупорку охладителя. Второй способ - охлаждение холодным гелием. В этом способе устраняется опасность закупорки, но для охлаждения соленоида за короткое время приходится увеличивать количество циркулирующего гелия по сравнению с необходимым для работы в установившемся режиме и развивать поверхности теплообмена в охладителе. Этот способ предпочтительнее.

Режим охлаждения соленоида тесно связан с его конструкцией. Рассматриваемый соленоид обладает развитой поверхностью и имеет сравнительно малую теплопроводность вдоль вертикально расположенной оси вращения. В этом случае во всех точках соленоида сохраняется малая разность температур между хладагентом 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.

Время охлаждения соленоида от комнатной до азотной температуры (основная часть времени охлаждения) при количестве охлаждающего гелия, принятом на основании предварительных расчетов,

$$3600\text{нм}^3/\text{час} = 640 \text{ кг/час}, \text{ равно } \tau_1 = 14,5 \text{ час.}$$

Длительность последующих ступеней охлаждения (рис. II)

$$\tau_2 = 6,7 \text{ часа}, \quad \tau_3 = 0,4 \text{ часа}, \quad \tau_4 = 0,7 \text{ часа.}$$

Таким образом, приемлемое время охлаждения получается, когда количество охлаждающего гелия в 1,5 раза превышает количество, необходимое для охлаждения в период заполнения дьюара, и примерно в 4 раза превышает потребность для установившегося режима (см. выше). (Количества циркулирующего гелия, кратные 1200м³, берутся применительно к одному из типов выпускаемых компрессоров).

§ 13. Заполнение дьвара соленоида жидким гелием

Количество жидкого гелия в дьваре определяется особенностями конструкции соленоида и самого дьвара. Для оценки порядка величин примём, что у рассматриваемого соленоида площадь зазоров составляет 50% площади сечения, занимаемого обмоткой и конструкционными элементами. Тогда свободный объем:

$$V = 0,5 \frac{G_M}{\gamma_M} = 0,5 \frac{150000}{8000} \approx 10 \text{ м}^3.$$

Такое количество жидкого гелия может произвести за разумное время - 25 часов - гелиевый ожижитель с холодопроизводительностью 250вт (~ 400 л/час жидкого гелия).

§ 14. Накачка энергии в соленоид

Изменение магнитного поля при накачке энергии вызовет выделение тепла за счет скачков потока в сверхпроводнике и за счет токов Фуко. Однако в плановом порядке эти операции можно производить достаточно долго без значительных тепловых нагрузок рефрижераторной системы.

§ 15. Рефрижератор

Для соленоида многометровой водородной камеры целесообразно использовать дроссельный гелиевый рефрижератор, т.к. криогенная система камеры содержит водородный ожижитель большой производительности. Холодопроизводительность выбранного рефрижератора составляет 250вт при работе на слив.

Возможно также использование рефрижератора с одним, двумя детандерами и т.д. по известным схемам гелиевых ожижителей.

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.

Более подробно схемы рефрижераторов рассмотрены в главе У.

Проведенный анализ позволяет заключить, что при создании такого крупногабаритного и тяжелого соленоида не возникают неразрешимые криогенные проблемы. Современные масштабы и уровень криогенной техники позволяют уверенно проектировать необходимое криогенное оборудование.

Таблица 4

Параметры сверхпроводящего соленоида

Напряженность магнитного поля в центре соленоида	40 кгс
Внутренний диаметр	6000 мм
Высота	3900 мм
Толщина обмотки	390 мм
Расстояние между обмотками в области пучка	600 мм
Ток в ленте	5000 а
Размеры сечения ленты	$1 \times 100 \text{ мм}^2$
Число витков в одном диске	156 шт
Длина ленты в диске	3200 м
Индуктивность диска	8,6 гн
Число дисков в соленоиде	30
Полное число ампер-витков	$2,34 \cdot 10^7$
Средняя плотность тока по сечению соленоида	1800 а/см^2
Число групп дисков с независимым электропитанием	6
Индуктивность группы	43 гн
Запасенная энергия	$3,25 \cdot 10^9 \text{ Дж}$
Полная длина ленты	96 км
Материал сверхпроводника	Nb-50% Zr
Вид сверхпроводника	проволока 0,25мм
Вес сверхпроводника	2,5 тонн
Вес стабилизирующей меди	80 тонн
Общий вес соленоида	150 тонн
Максимальное поле	60 кгс
Напряжение источников питания при запитке (установившийся режим)	25/6 вольт
Суммарная мощность источников питания; при запитке (установившийся режим)	750/180 квт
Время запитки соленоида	10^4 сек
Время аварийной эвакуации запасенной энергии	10 сек
Допустимый уровень перенапряжений при эвакуации энергии	20 кв

Г Л А В А IY

ОЖИЖИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВОДОРОДА, ДЕЙТЕРИЯ И НЕОНА С ВОДОРОДНЫМ ХОЛОДИЛЬНЫМ ЦИКЛОМ

Введение

Ожижительная установка предназначена: для термостатирования камеры в установившемся режиме работы; для ожижения водорода в парамодификации, дейтерия в ортомодификации или неона при заполнении камеры; для снабжения жидким водородом гелиевого ожижителя.

Схемой предусматривается выдача ожиженных газов на сторону.

Холодопроизводительность ожижителя, необходимая для термостатирования камеры, $N = 60$ квт.

Гелиевый ожижитель потребляет в установившемся режиме $G_{\text{He}} = 25$ кг/ч. жидкого водорода.

§ 16. Краткое описание технологической схемы

Газообразный водород, полученный в электролизном отделении, освобождается от примесей влаги и компонентов воздуха в отделении очистки и направляется к компрессорам, которые сжимают водород до давления 150 ати.

Сжатый и очищенный от масла и кислорода водород направляется в холодообразующий блок ожижителя (см.рис.12). Жидкий водород из сборника XV холодообразующего блока может сливаться в пузырьковую камеру, постороннему потребителю или в сборник XVI ожижительного блока, когда в нём происходит или ожижение неона, или ожижение водорода с получением параводорода, или ожижение дейтерия с получением ортодейтерия.

В блок ожижения водород, неон или дейтерий подаются под небольшим избыточным давлением из шаровых емкостей, в которые соответствующий газ после очистки затягивается своими компрессорами.

§ 17. - Выбор схемы

Известные крупные ожижители водорода, см, например, [14], предназначены для выполнения только одной функции - получения жидкого параводорода. Ожижительная установка многомерной камеры предназначена для выполнения нескольких функций. Основную часть времени она должна работать на термостатирование камеры, при пусках камеры - на заполнение ее рабочими жидкостями. Термостатирование камеры осуществляется в рефрижераторном режиме. В этом

режиме жидкий водород тут же испаряется в термостатирующих устройствах камеры и холодный пар водорода возвращается в оживитель. Рефрижераторный режим примерно удваивает холодопроизводительность оживителя по сравнению с режимом работы без возврата холодных паров.

Как известно, имеются две модификации водорода и дейтерия - орто и пара. При температуре камеры равновесными являются параводород и ортодейтерий. Переход к этим состояниям от равновесных при комнатной температуре вызывает большое выделение тепла. Камеру целесообразно заполнять равновесными модификациями с тем, чтобы уже с самого начала она находилась в стабильном тепловом состоянии. Однако охлаждать и термостатировать камеру выгоднее неконвертированным водородом, т.к. конвертирование снижает холодопроизводительность оживителя на 1/3.

Заполнение камеры различными рабочими жидкостями и термостатирование её можно было бы осуществлять заменяя в цикле оживителя один газ другим. При этом термостатирование велось бы тем же веществом, которым заполнена камера. В случае заполнения камеры дейтерием или неон-водородной смесью такая схема повела бы к большим расходам на пополнение утечек дорогостоящих газов. Учитывая все вышесказанное, было решено выполнить оживитель в виде двух блоков - холодообразующего и оживительного. В холодообразующем блоке оживляется нормальный водород, который может быть направлен на термостатирование и охлаждение камеры, в блок оживления и в оживитель гелия в качестве хладагента.

В блоке оживления охлаждаются и конденсируются под небольшим избыточным давлением водород, дейтерий или неон.

В блоке оживления предусмотрены конверторы для орто-пара превращения. Жидкий водород выдаётся из него в пара-форме, а жидкий дейтерий в орто-форме.

Для холодообразующего блока могут быть использованы различные холодильные циклы. С целью выбора наиболее рационального из них было рассчитано несколько вариантов. В таблице 5 приведен результат этих расчетов. Как видно из таблицы, наилучший результат в рефрижераторном режиме (основной режим работы) дает вариант VI. Мало отличается от него вариант XI. Вариант VI, помимо малого расхода энергии, обладает тем дополнительным преимуществом, что у нас выпускается промышленностью необходимое для него компрессорное оборудование. Кроме того, подобная схема проверена нами на крупнолабораторном оживителе ВО-2 [15]. На основании вышесказанного к исполнению принимается вариант VI.

Для блока оживления было рассмотрено несколько вариантов схемы.

В одном из них предусматривалось проведение орто-пара конверсии водорода в конверторах, расположенных в ванне атмосферного азота, в ванне вакуумного азота и в сборнике жидкого водорода. Расчёт показал, что при такой схеме получается отрицательная разность температур в одном из теплообменников холодной зоны холодообразующего блока или блока оживления.

В другом варианте блок оживления состоял из теплообменника-реактора и конвертора,

устанавливаемого в сборнике жидкого водорода. В этом варианте в теплообменнике-реакторе получалась отрицательная разность температур на уровнях 55 и 235°К.

В принятом варианте орто-пара конверсия производится последовательно в конверторе ванны атмосферного азота, в теплообменнике-реакторе и в конверторе сборника жидкого водорода (см.рис.12). Часть обратного водорода за теплообменником-реактором X перебрасывается в теплообменник теплой зоны У холодообразующего блока с тем, чтобы избежать отрицательного температурного напора в теплообменнике УП тепловой зоны оживительного блока.

Рассматривался также вариант замены теплообменника УП и ванны атмосферного жидкого азота I блока оживления на теплообменник-реактор. Этот вариант дает либо отрицательный температурный напор, либо недопустимо высокую недорекуперацию в указанном теплообменнике-реакторе. Такой результат легко объясним, так как существенное выделение тепла орто-пара-конверсии начинается только ниже 100°К.

В результате принята схема оживителя, состоящего из холодообразующего блока с детандером и блока оживления.

§ 18. Тепловые и материальные балансы оживителя

Тепловые и материальные балансы оживителя составлены для пяти вариантов его работы:

- I. Слив жидкого нормального водорода из холодообразующего блока в камеру или на сторону.
- II. Работа холодообразующего блока оживителя в рефрижераторном режиме с одновременной подачей жидкого нормального водорода на оживитель гелия.
- III. Работа оживителя на слив жидкого параводорода.
- IV. Работа оживителя на слив жидкого ортодейтерия.
- V. Работа оживителя на слив жидкого неона.

Результаты расчетов приводятся в таблицах 6, 7, 8, 9, 10.

Таблица 5

№ п.п.	Схема холодильного цикла	Давление водорода до детандера, Р ата	Рефрижераторный режим			Слив жидкого нормального водорода			Слив жидкого параводорода		
			Давление детандера оптим., Р ата	Степень ожигения	Расход энергии на 1 кг. ж/водорода, сливаемого в камеру	Давление после детандера (оптим.), Р ата	Степень ожигения	Расход энергии на 1 кг. ж/водорода, сливаемого в камеру	Давление после детандера (оптим.), Р ата	Степень ожигения	Расход энергии на 1 кг. ж/водорода, квтч
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I.	Дросселирование водорода. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением	150	-	0,363	10,9	-	0,147	35,2	-	0,1	47,8
II.	Дросселирование водорода. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением и под вакуумом	150	-	0,5	8,34	-	0,256	24,63	-	0,154	35,9
III.	Детандирование всего потока водорода. После детандера водород дросселируется в сборник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением.	150	16	0,584	6,8	12	0,294	21,6	16	0,181	30,0
IV.	Детандирование всего потока водорода. После детандера водород дросселируется в сборник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением и под вакуумом	150	16	0,69	6,0	12	0,39	19,8	16	0,235	26,5
V.	Детандирование всего потока водорода. После детандера водород подается в теплообменник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением	150	16	0,675	5,85	16	0,336	19,9	16	0,21	27,0

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

VI. Детандирование всего потока во-

У. Детандирование всего потока водорода. После детандера водород подается в теплообменник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением

150 16 0,675 5,85 16 0,336 19,9 16 0,21 27,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

УI. Детандирование всего потока водорода. После детандера водород подается в теплообменник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением и под вакуумом

150 16 0,77 5,4 16 0,423 18,65 16 0,256 25,2

УII. Детандирование части потока водорода. После детандера водород дросселируется в сборник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением

150 2 0,644 6,13 2 0,363 19,13 8,5 0,197 28,2

УIII. Детандирование части потока водорода. После детандера водород дросселируется в сборник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением и под вакуумом

150 8,5 0,678 6,1 8,5 0,41 19,0 8,5 0,24 26,2

IX. Детандирование части потока водорода. После детандера водород подается в теплообменник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением

150 1,3 0,66 5,97 1,3 0,378 18,56 1,3 0,23 25,4

X. Детандирование части потока водорода. После детандера водород подается в теплообменник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением и под вакуумом

150 12 0,671 6,2 12 0,4 19,3 12 0,235 26,5

XI. Детандирование части потока водорода. После детандера водород подается в теплообменник. Охлаждение азотом, кипящим под атмосферным давлением и под вакуумом

65 1,3 0,592 5,5 1,3 0,367 17,76 1,3 0,21 24,3

Таблица 6

1. Слив жидкого нормального водорода из холодообразующего блока в камеру или на сторону

№ точек	Давление, Рата	Т-ра, T°K	Теплосодержание, ккал/кг	Вещество	Количество, кг/час
1	150	300	966,7	г. водород	$G_v = 53$ $G_v = 653$ $G_{v1} = 294$ <hr/> 1000
2	150	127,5	381,1	г. водород	$G_v = 653$ $G_{v1} = 294$ <hr/> 947
3	150	81	218,75	г. водород	947
4	150	74,5	194,35	г. водород	947
5	150	66	164,85	г. водород	1000
6	150	56,1	121,93	г. водород	1000
7	16	35	83,11	г. водород	1000
8	1,3	21,3	3,2	ж. водород	423
9	1,3	21,3	106	г. водород	577
10	1,3	63	216	г. водород	577
11	1,2	78,8	256	г. водород	577
12	1,0	290	918,7	г. водород	577
13	1,2	78,8	7,65	ж. азот	3248
14	1,2	78,8	55	г. азот	3248
15	1,0	290	108	г. азот	3248
16	0,17	65	2,5	паро-ж. смесь азота	$ж. = 620$ $п. = 90$ <hr/> 710
17	0,17	65	50,5	г. азот	710
19	0,17	290	108	г. азот	710
20	16	34	62,5	г. водород	1000
21	1,3	34	141,7	г. водород	577
44	150	75	197,7	г. водород	53

Таблица 7

II. Работа холодообразующего блока ожижителя в рефрижераторном режиме с одновременной подачей жидкого нормального водорода на ожижитель гелия

№# точек	Давление, Рата	Т-ра T°K	Теплосодержание, ккал/кг	Вещество	Количество, кг/час
1	150	300	966,7	г. водород	$G_{IV} = 25,6$ $G_V = 912,8$ $G_{VI} = 61,6$ <hr/> 1000
2	150	91,84	258,85	г. водород	$G_V = 912,8$ $G_{VI} = 61,6$ <hr/> 974,4
3	150	81	218,75	г. водород	974,4
4	150	70	178,75	г. водород	974,4
5	150	66	164,85	г. водород	1000
6	150	47,4	90	г. водород	1000
7	16	34,1	62	г. водород	1000
8	1,3	21,3	3,2	ж. водород	-
9	1,3	21,3	106	г. водород	975
10	1,3	63	216	г. водород	975
11	1,2	78,8	256	г. водород	975
12	1,0	290	918,7	г. водород	975
13	1,2	78,8	7,65	ж. азот	825
14	1,2	78,8	55	г. азот	825
15	1,0	290	108	г. азот	825
16	0,17	65	2,5	паро-ж. смесь азота	$ж. = 300$ $п. = 43,5$ <hr/> 343,5
17	0,17	65	50,5	г. азот	343,5
19	0,17	290	108	г. азот	343,5
20	16	29	29,44	г. водород	1000
21	1,3	33,1	139,4	г. водород	975
22	16	22,3	6,3	ж. водород	768
40	16	29	29,44	г. водород	232

№ точек	Давление Рата	Т-ра Т°К	Теплосодержание ккал/кг	Вещество	Количество кг/час
41	16	29	29,44	г. водород	768
42	16	22,33	6,3	ж. водород	743
43	16	22,3	6,3	ж. водород	25
44	150	75	197,7	г. водород	25,6

Таблица 8

Ш. Работа охладителя на слив жидкого параводорода

№ точек	Давление Рата	Т-ра Т°К	Теплосодержание ккал/кг	Вещество	холодообр. блок	Количество, кг/час блок охижения
1	150	300	966,7	г. водород	$G_{IV} = 53$ $G_V = 719$ $G_{VI} = 228$ <hr/> 1000	-
2	150	113,5	334,25	г. водород	$G_V = 719$ $G_{VI} = 228$ <hr/> 947	-
3	150	81	218,75	г. водород	947	-
4	150	74,5	194,35	г. водород	947	-
5	150	66	164,85	г. водород	1000	-
6	150	56,1	121,93	г. водород	1000	-
7	16	35	83,11	г. водород	1000	-
8	1,3	21,3	3,2	ж. водород	423	423
9	1,3	21,3	106	г. водород	577	423
10	1,3	63	216	г. водород	577	-
11	1,2	78,8	256	г. водород	686	314
12	1,0	290	918,7	г. водород	686	314
13	1,2	78,8	7,65	ж. азот	2310	410
14	1,2	78,8	55	г. азот	2720	-
15	1,0	290	108	г. азот	2720	-
16	0,17	65	2,5	паро-ж. смесь азота	$ж. = 620$ $п. = 90$ <hr/> 710	-
17	0,17	65	50,5	г. азот	710	-

№ точек	Давление, Рата	Т-ра, T°K	Теплосодержание, кккал/кг	Вещество	холодооб. блок	Количество, кг/час блок ожижения
19	0,17	290	108	г.азот	710	-
20	16	34	62,5	г.водород	1000	-
21	1,3	34	141,7	г.водород	577	-
31	2	300	950,3	г.водород	-	312
32	2	90	285	г.водород	-	312
33	2	81	223	г.водород	-	312
36	2	33	19,14	г.водород	-	312
37	2	22	-120,06	ж.пароводород	-	312
44	150	75	197,7	г.водород	53	-

Таблица 9

IV. Работа ожижителя на слив жидкого ортодейтерия

№ точек	Давление, Рата	Т-ра, T°K	Теплосодержание, ккал/кг	Вещество	холодообр. блок	Количество, кг/час блок ожижения
1	150	300	966,7	г.водород	$G_v = 53$ $G_v = 713$ $G_n = 234$ <hr/> 1000	-
2	150	117,4	346,75	г.водород	$G_v = 713$ $G_n = 234$ <hr/> 947	-
3	150	81	218,75	г.водород	947	-
4	150	74,5	194,35	г.водород	947	-
5	150	66	164,85	г.водород	1000	-
6	150	56,1	121,93	г.водород	1000	-
7	16	35	83,11	г.водород	1000	-
8	1,3	21,3	3,2	ж.водород	423	423
9	1,3	21,3	106	г.водород	577	423
10	1,3	63	216	г.водород	577	-
11	1,2	78,8	256	г.водород	667	333
12	1,0	290	918,7	г.водород	667	333
13	1,2	78,8	7,65	ж.азот	2550	200
14	1,2	78,8	55	г.азот	2750	-
15	1,0	290	108	г.азот	2750	-
16	0,17	65	2,5	паро-ж.смесь азота	$ж. = 620$ $п. = 90$ <hr/> 710	-

№ точек	Давление, Рата	Т-ра, T°K	Теплосодержание, ккал/кг	Вещество	холодообр. блок	Количество, кг/час блок ожижения
17	0,17	65	50,5	г.азот	710	-
19	0,17	290	108	г.азот	710	-
20	16	34	62,5	г.водород	1000	-
21	1,3	34	141,7	г.водород	577	-
31	2	300	475,15	г.дейтерий	-	664
32	2	90	142,8	г.дейтерий	-	664
33	2	81	128,5	г.дейтерий	-	664
36	2	26,3	32,87	г.дейтерий	-	664
37	2	26,3	-32,63	ж.дейтерий	-	664
44	150	75	197	г.водород	53	-

Таблица 10

У. Работа ожижителя на слив жидкого неона

№ точек	Давление, Рата	Т-ра, T°K	Теплосодержание, ккал/кг	Вещество	холодообр. блок	Количество, кг/час блок ожижения
1	150	300	966,7	г.водород	$G_v = 53$ $G_v = 681$ $G_n = 266$ <hr/> 1000	-
2	150	121,3	361,45	г.водород	$G_v = 681$ $G_n = 266$ <hr/> 947	-
3	150	81	218,75	г.водород	947	-
4	150	74,5	194,35	г.водород	947	-
5	150	66	164,35	г.водород	1000	-
6	150	56,1	121,93	г.водород	1000	-
7	16	35	83,11	г.водород	1000	-
8	1,3	21,3	3,2	ж.водород	423	423
9	1,3	21,3	106	г.водород	577	423
10	1,3	63	216	г.водород	577	-
11	1,2	78,8	256	г.водород	722	278
12	1,0	290	918,7	г.водород	722	278

№ точек	Давление, Рата	Т-ра, Т°К	Теплосодержание, ккал/кг	Вещество	холодообр. блок	Количество кг/час блок ожижения
13	1,2	78,8	7,65	ж.азот	2854	184
14	1,2	78,8	55	г.азот	3038	-
15	1,0	290	108	г.азот	3038	-
16	0,17	65	2,5	паро-ж.смесь азота	ж.=620 п.= 90 <u>710</u>	-
17	0,17	65	50,5	г.азот	710	-
19	0,17	290	108	г.азот	710	-
20	16	34	62,5	г.водород	1000	-
21	1,3	34	141,7	г.водород	577	-
31	2	300	88,5	г.неон	-	3950
32	2	90	36,6	г.неон	-	3950
33	2	81	34,4/29,5	г.неон	-	3950
36	2	29,6	13,4	г.неон	-	3950
37	2	29,6	2,4	ж.неон	-	3950
44	150	75	197	г.водород	53	-

§ 19. Детандер

В таблице 5 показано, что схемы УІ и ХІ холодообразующего цикла дают минимальный и очень близкий друг к другу расход энергии на получение 1 кг.жидкого водорода. Сравнение этих схем с точки зрения условий работы и конструкции детандера показало, что в этом отношении они не равнозначны.

В таблице II приведены основные параметры работы детандеров по схемам УІ и ХІ. Из таблицы видно, что детандер по схеме УІ имеет следующие преимущества перед детандером по схеме ХІ:

- 1) меньше степень падения давления;
- 2) меньший перепад температур между входящим и выходящим газом;
- 3) меньшие размеры цилиндра при большем количестве перерабатываемого газа и примерно одинаковой холодопроизводительности.

Таким образом, в детандере по схеме УІ можно ожидать уменьшения тепловых потерь от неполноты расширения, внутреннего теплообмена, теплопритока из окружающей среды и по тепловым мостам, а, следовательно, и более высокого к.п.д.

Ниже рассматривается детандер только для схемы УІ.

В таблице І2 приведён ориентировочный расчёт детандера для двух основных режимов работы охидителя: режима слива жидкого нормального водорода (І) и рефрижераторного режиме с выдачей 25 кг/час жидкого водорода на гелиевый охидитель (ІІ).

Общие исходные данные для расчёта:

1. Количество перерабатываемого газа $G = 1000$ кг/час
2. Давление перед детандером $P_1 = 150$ ата
3. Давление за детандером $P_5 = 16$ ата
4. Давление в конце расширения $P_3 = 20$ ата
5. Адиабатический к.п.д. $\eta = 0,7$
6. Относительно мёртвый объём $\epsilon_m = 0,2$
7. Относительный объём цилиндра после закрытия выпускного клапана $\epsilon_5 = 0,2$
8. Число цилиндров $Z = 2$.

Следует отметить, что принятые здесь величины P_3 , ϵ_m , ϵ_5 и т.д. носят ориентировочный характер. При окончательном расчёте детандера следует определить оптимальные их значения с целью получения максимального к.п.д.

В настоящее время в криогенном отделе ЛВЭ проводится экспериментальное исследование детандера, работающего совместно с охидителем ВО-2 по такой же схеме, какая принята здесь. Общий вид детандера представлен на рис.І3.

Таблица ІІ

№ п.п.	Обозначение	Размеры	Схема УІ	Схема ІІ
1. Количество перерабатываемого газа	G	кг/час	1000	610
2. Давление перед детандером	P_1	ата	150	60,65
3. Давление за детандером	P_5	ата	16	1,3
4. Степень падения давления	P_1/P_5	-	9,36	46,1
5. Температура перед детандером	T_1	$^{\circ}K$	56	66
6. Температура за детандером	T_5	$^{\circ}K$	35	21
7. Падение температуры	ΔT	$^{\circ}K$	21	45
8. Холодопроизводительность	Q	ккал/час	3880	4400
9. Давление в конце расширения (расчётное)	P_3	ата	20	5
10. Удельный объём в конце расширения	V_3	m^3/kg	0,0357	0,220
11. Относительный объём цилиндра	V	-	1	3,76

Таблица 12

№ пп	Обознач.	Размеры	Способ определ.	Режим работы		
				I	II	
1	Температура газа перед детандером	T_1	$^{\circ}\text{K}$	см. расчёт цикла [16]	56	47,4
2	Температура газа за детандером	T_5	$^{\circ}\text{K}$	T - S диагр.	35	34,1
3	Энтальпия газа за детандером	i_k	ккал/кг	"-	83,11	62
4	Энтальпия газа перед детандером	i_n	"-	"-	121,9	90
5	Действительный теплоперепад	Δi_g	"-	"-	38,8	28
6	Адиабатический теплоперепад	Δi_{ag}	"-	"-	55,5	40
7	Суммарная холодопотеря	$\Delta i_{пот}$	"-	"-	16,7	12
8	Удельный объём в конце наполнения	V_2	$\text{м}^3/\text{кг}$	T - S диагр.	0,018	0,016
9	Удельный объём в конце расширения	V_3	"-	"-	0,0357	0,0222
10	Удельный объём в конце выхлопа	V_5	"-	"-	0,04	0,025
11	Степень наполнения	δ_2			0,504	0,720
12	Отсечка впуска	ϵ_2			0,405	0,665
13	Число оборотов	n	об/мин.	для режима I принято, для режима II	300	-187
14	Объём цилиндра	V	м^3	$\frac{G V_3}{60 n \pi [1 + \epsilon_m - \frac{V_3}{V_5} (\epsilon_m + \delta_2)]}$		$1,18 \cdot 10^{-3}$
15	Отношение хода поршня к диаметру	λ		задаётся		2,5
16	Диаметр цилиндра	D	мм			85
17	Ход поршня	λD	мм			210
18	Средняя скорость поршня	C_m	м/сек		2,1	1,31
19	Максимальное поршневое усилие по ряду	P	кг			8500

Г Л А В А У

ГЕЛИЕВАЯ ОЖИЖИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Введение

Гелиевая ожижительная установка предназначена для термостатирования жидким гелием сверхпроводящего соленоида многометровой камеры при $T = 4,5^{\circ}\text{K}$.

Ожижительная установка предусматривает возможность работы сверхпроводящего соленоида при пониженной температуре $T = 2+2,5^{\circ}\text{K}$ за счёт кипения жидкого гелия под вакуумом.

Холодопроизводительность ожижителя при работе на слив в установившемся режиме составляет около 110 ватт без учёта тепловыделений в соленоиде за счёт дефектов в сверхпроводниках и внутренних контактов, величину которых оценить трудно.

Кроме того, в период заполнения соленоида, необходимо ожижить 10м^3 жидкого гелия.

Приемлемое время заполнения около суток.

Поэтому принимаем холодопроизводительность ожижителя $N = 250$ ватт (400 л/час жидкого гелия), что даёт в рефрижераторном режиме около 1000 ватт.

Для охлаждения сверхпроводящего магнита за 24 часа необходимо $3600\text{м}^3/\text{час}$ циркулирующего гелия.

Ожижитель должен отличаться большой надёжностью и работать непрерывно в течение трёх-четырёх недель, после чего допускается производить кратковременный отогрев ожижителя для удаления накопленных примесей.

Время отогрева и последующего охлаждения не должно превышать 6 часов во избежание сильного нагрева сверхпроводящего соленоида.

В период отогрева ожижителя соленоид будет термостатироваться за счёт испарения жидкого гелия, накопленного в полости магнита.

В установке предусматривается возможность слива жидкого гелия на сторону.

В качестве холодильного цикла для гелиевого ожижителя может быть применён любой из существующих.

§ 20. Принципиальная схема гелиевого ожижителя

Так как в комплекс многометровой камеры входит крупная установка для ожижения водорода, то целесообразно в ожижителе гелия применить наиболее надёжный цикл дросселирования с предварительным охлаждением водородом, кипящим под вакуумом (рис.14). Необходимое для этого количество жидкого водорода поступает из водородного ожижителя.

На схеме работы ожижителя во время охлаждения соленоида указывается конструкция соленоида.

Предполагается, что проектируемый соленоид будет обладать развитой поверхностью теплообмена и малой теплопроводностью вдоль оси.

В таком случае во время охлаждения температура холодного гелия будет на очень коротком участке повышаться до температуры обмотки. Поэтому в начальный период из соленоида выходит тёплый гелий, который направляется прямо в обратный поток.

Процесс охлаждения идёт следующим образом (рис.14). Сжатый гелий подаётся 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 и IA азотом и ванне жидкого азота II и ПА. Все нижележащие теплообменники и ванны на этой стадии в теплообмене не участвуют. В этот период тепловая нагрузка на ванны жидкого азота II и ПА 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, температура гелия, выходящего из СПС, быстро снижается до температуры гелия за ванной жидкого азота. 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 IU. 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 даёт дальнейшее понижение температуры, и соленоид охлаждается ещё на одну ступеньку. После пяти таких ступенек начинается ожигение гелия. Соленоид окончательно охлаждается, включается линия 5 и дьюар соленоида заполняется жидким гелием. Основная часть испарённого 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 тёплой зоны и ванны жидкого азота значительно выше, чем при установившемся режиме. Поэтому целесообразно иметь самостоятельные теплообменник IA и ванну жидкого азота ПА, включаемые на период охлаждения с тем, чтобы, сохраняя нормальные размеры рефрижератора, увеличить его универсальность. Такая же возможность имеется в отношении ванны жидкого водорода.

Принципиальная схема ожигителя представлена на рис.15.

Результаты расчётов материальных и тепловых балансов приводятся в таблице I3.

Исходные данные и результаты расчетов материальных и тепловых балансов гелиевого рефрижератора

№ точек	Вещество	Давление, Р атм.	Работа охладителя на слив жидкого гелия			Работа охладителя в рефрижераторном режиме-термостатирование магнита		
			Кол-во, кг/час	Температура, Т°К	Теплосодержание, ккал/кг	Кол-во, кг/час	Температура, Т°К	Теплосодержание, ккал/кг
1	Гелий газообразный	30	428,5	300	377,8	428,5	300	377,8
2	Гелий газообразный	30	428,5	101,3	130,72 ^{х)}	428,5	89,6	116,52 ^{х)}
3	Гелий газообразный	30	428,5	81	105,32	428,5	81	105,32
4	Гелий газообразный	30	428,5	19,6	25,32 ^{х)}	428,5	17,5	21,98 ^{х)}
5	Гелий газообразный	30	428,5	16	19,75	428,5	16	19,75
6	Гелий газообразный	10 ^{хх)}	428,5	7,25	6,75 ^{х)}	428,5	6,15	5,07 ^{х)}
7	Гелий жидкий	1,3	48,8	4,4	2,7	-	4,4	2,7
8	Гелий газообразный	1,3	379,7	4,4	7,2	428,5	4,4	7,2
9	Гелий газообразный	1,3	379,7	15	21,88	428,5	15	21,88
10	Водород вакуумный	0,08	25	78,6	320,5	10	78,6	320,5
11	Гелий газообразный	1,1	379,7	78,6	101,54	428,5	78,6	101,54
12	Гелий газообразный	1	379,7	280	350,8	428,5	280	350,8
13	Азот газообразный	1,2	228	78,8	55	101,2	78,8	55
14	Азот газообразный	1	228	280	105,8	101,2	280	105,8
15	Азот жидкий	1,2	228	78,8	7,65	101,2	78,8	7,65
16	Водород жидкий	1,2	25	21	67,1	10	21	67,1
17	Водород вакуумный	0,125	25	15	162,7	10	15	162,7

х) Значения теплосодержаний, полученные расчётным путем.

хх) В расчётах принято, что давление сжатого гелия в теплообменнике Ш изменяется равномерно по длине теплообменника от 30 до 10 атм.

Технологическая схема гелиевой ожижительной установки предусматривает очистку гелия, поставляемого в баллонах. Очищенный гелий из отделения очистки поступает в два компрессора производительностью 1200 м³/час каждый и сжимается в них до 30 атм. Стабилизация давления во всасывающем коллекторе компрессора обеспечивается газгольдером. Сжатый гелий проходит через блок маслоочистки. На время охлаждения магнита включается также и третий резервный компрессор. Поэтому блок первоначального охлаждения соленоида рассчитан на 3600 м³/час гелия.

Затем сжатый гелий направляется в ожижитель гелия.

В схеме предусмотрена возможность охлаждения сверхпроводящего соленоида гелием, кипящим под вакуумом. Откачка гелия из дьюара соленоида производится вакуумным насосом. В этом случае дьюар соленоида пополняется жидким гелием из сборника.

Когда ожижитель гелия работает на слив гелия, то жидкость, накопленная в сборнике, сливается в дьюары потребителя.

В схеме предусмотрены два компрессора, которые позволяют:

- 1) очищать системы от примесей циркуляцией гелия через блок очистки;
- 2) закачивать гелий в шаровую ёмкость и в баллоны.

Отогрев гелиевого ожижителя и дьюара соленоида производится горячим гелием. Для греющего гелия в схеме предусмотрена печка.

Блоки маслоочистки периодически регенерируются горячим азотом. Азот из блоков маслоочистки удаляется откачкой вакуумным насосом с 3- + 4- разовым заполнением чистым гелием.

Для промывки различных систем и откачки изоляционных пространств предусмотрены вакуумные насосы.

Управление процессами ожижения и термостатирования автоматизируется.

Г Л А В А У I

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЖИЖИТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ ВОДОРОДА, ДЕИТЕРИЯ, НЕОНА И ГЕЛИЯ

Криогенными процессами камеры управляют следующие системы:

1. Система управления производством жидкого водорода в зависимости от его потребления, т.е. система автоматического регулирования ожижительной установки.
2. Система автоматического управления гелиевой ожижительной установкой.
3. Система регулирования количества жидкого водорода, подаваемого к камере для поддержания её температурного режима в рабочих условиях (система термостатирования).

§ 21. Назначение

Система автоматического управления ожижительной установкой многометровой камеры предназначается:

1. Для управления ожижительной установкой в режиме термостатирования камеры.
2. Для управления ожижительной установкой в режиме максимальной холодопроизводительности (заполнение камеры и слив ожиженных газов на сторону).
3. Для сигнализации об аварийных нарушениях режима и отключениях соответствующей аппаратуры.
4. Для регистрации рабочих параметров с записью на ленте.

Первый режим соответствует рабочему режиму камеры. В это время работает только холодообразующий блок ожижительной установки (блок ожижения не работает). В камеру поступает нормальный жидкий водород в количестве, необходимом для её термостатирования. Регулирование холодопроизводительности установки осуществляется автоматическим подбором давления сжатого водорода на входе в ожижитель (при заданном количестве циркулирующего водорода).

Второй режим включает:

- а) заливку камеры нормальным жидким водородом;
- б) заливку камеры параводородом, ортодейтерием или неоном;
- в) слив жидкого параводорода постороннему потребителю.

Варианты второго режима а), б), в) несколько различаются между собой. В случае а) работает только холодообразующий блок, а в случаях б) и в) — как холодообразующий, так и блок ожижения.

Исходным условием этого режима является поддержание оптимального давления сжатого водорода на входе в ожижитель в заранее заданном интервале.

Система автоматического управления гелиевой ожижительной установкой пятиметровой камеры предназначается:

1. Для управления работой ожижительной установкой в режиме термостатирования сверхпроводящего соленоида.
2. Для управления ожижительной установкой в режиме максимальной холодопроизводительности.
3. Для сигнализации об аварийных нарушениях режима и отключениях соответствующего оборудования.
4. Для регистрации рабочих параметров с записью на ленте.

В режиме термостатирования в соленоид поступает жидкий гелий в количестве, необходимом для поддержания рабочего уровня жидкого гелия в дьларе соленоида. Регулирование осуществляется подбором необходимой холодопроизводительности установки, определяемой давлением

сжатого гелия на входе в ожижитель (при заданном количестве циркулирующего гелия).

В режиме максимальной холодопроизводительности производится:

- а) заполнение дьвара соленоида жидким гелием;
- б) слив жидкого гелия постороннему потребителю.

Исходным условием этого режима является поддержание оптимального давления сжатого гелия на входе в ожижитель в заранее заданном интервале.

§ 22. Условия работы аппаратуры

Исполнительные устройства и датчики системы автоматического управления должны работать во взрывоопасных помещениях категории ВIа. Некоторые датчики и исполнительные устройства могут быть размещены дистанционно в специальном помещении с пониженной категорией взрывоопасности.

§ 23. Система автоматического управления и сигнализации

Логическая система регулирования установкой ожижения
водорода, дейтерия или неона

1. Система увязывает между собой регулятор числа оборотов детандера или (если детандер не работает) дроссельный вентиль, вентиль закачки водорода в ресивер и вентиль пополнения водорода из ресивера в систему.

Независимые системы регулирования установкой ожижения
водорода, дейтерия или неона

2. Регулирование уровня жидкого азота в атмосферной ванне холодообразующего блока.
3. Регулирование уровня жидкого азота в вакуумной ванне холодообразующего блока.
4. Распределение потоков сжатого водорода в холодообразующем блоке.
5. Регулирование давления за детандером.
6. Сброс водорода из газгольдера при его переполнении.
- 7,9. Регулирование уровня жидкого водорода в сборнике холодообразующего блока.
8. Регулирование недорегулерации на тёплом конце теплообменника тёплой зоны блока
ожижения.
10. Регулирование уровня жидкого азота в атмосферной ванне блока ожижения.
- 11,12. Регулирование уровня жидкого водорода в сборнике блока ожижения.
13. Регулирование давления в стационарных емкостях жидкого азота.

14. Регулирование давления и температуры в печи на линии греющего азота к блокам очистки; предусматривается отключение печи при отсутствии расхода газа.
15. Регулирование уровней жидкого азота в блоках очистки.
16. Регулирование уровней жидкого азота в ловушках перед вакуумными насосами.
17. Пополнение газгольдера дейтерия или неона из ресиверов при предминимальном значении уровня.
18. Автоматическая закачка водорода из газгольдера в шаровые ёмкости.
19. Автоматическая закачка дейтерия или неона из газгольдера в шаровые ёмкости.

Логическая система регулирования установкой
ожижения гелия

20. Система увязывает между собой дроссельный вентиль перед соленоидом или перед сборником жидкого гелия, байпас, вентиль закачки гелия в ресивер, вентиль пополнения гелия из ресивера в систему.

Независимые системы регулирования установкой
ожижения гелия

21. Регулирование уровня жидкого азота в атмосферной ванне гелиевого ожижителя.
22. Регулирование уровня жидкого водорода в вакуумной ванне ожижителя.
23. Распределение потоков сжатого гелия на входе в ожижитель.
24. Сброс гелия из газгольдера при его переполнении.
25. Регулирование давления и температуры в печи на линии греющего азота; предусматривается отключение печи при отсутствии расхода газа.
26. Автоматическая закачка гелия из газгольдера в шаровые ёмкости.

§ 24. Система аварийной сигнализации

Система аварийной сигнализации выдаёт звуковой и световой сигналы при достижении предельных значений регулируемых рабочих параметров.

§ 25. Система регистрации рабочих параметров
с записью на ленте

Записи на ленте подлежат значения давлений ожижаемых газов, уровни жидкого азота и водорода в ваннах, жидкого водорода, дейтерия, неона и гелия в сборниках, точки замера температур внутри ожижителя, расходов газа, концентрации жидкого параводорода и

ортодейтерия, концентрации суммы примесей и кислорода в водороде, дейтерии и неоне, и концентраций суммы примесей в технологическом гелии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже приводятся основные параметры криогенных систем, полученные в результате проработки задания на проектирование.

1. Водородный охладитель (высокого давления с детандированием всего потока водорода)

а) холодопроизводительность в рефрижераторном режиме	86 квт
б) производительность по жидкому нормальному водороду,	423 кг/час
по жидкому параводороду	312 кг/час
в) производительность по жидкому ортодейтерию	664 кг/час
г) производительность по жидкому неону	3950 кг/час
д) производительность компрессоров	12000 м ³ /час
е) давление сжатия	150 атм.
ж) расход жидкого азота (максимальный)	3900 кг/час

2. Водородный детандер

а) число цилиндров	- 2
б) диаметр цилиндра	- 85 мм
в) ход поршня	-210 мм
г) число оборотов	-310 об/мин
д) поршневое усилие	-8500 кг.

3. Гелиевый охладитель (дроссельный с предварительным охлаждением жидким водородом под вакуумом).

а) холодопроизводительность в рефрижераторном режиме	1060 вт
б) количество жидкого гелия, сливаемого на сторону	48,8 кг/час
в) холодопроизводительность без возврата испаряемого гелия в охладитель	255 вт
г) производительность компрессоров	2400 м ³ /час
д) давление сжатия	30 ат
е) максимальный расход жидкого азота (при работе на слив жидкого гелия)	228 кг/час
ж) максимальный расход жидкого водорода (при работе на слив жидкого гелия)	25 кг/час

4. Сверхпроводящий соленоид	
а) магнитное поле в центре камеры	40 кгс
б) внутренний диаметр	6 м
в) количество сверхпроводника (Nb-75% Zr или Nb-50% Zr в медной ленте - лента Стекли)	2500 кг
г) вес медной ленты	80 тн
д) вес конструктивных элементов	68 тн
5. Теплоизоляция	
а) тип-многослойная, система-дьюарная	
б) толщина изоляции водородного дьюара	50 мм
в) теплоприток через изоляцию водородного дьюара	1,06 квт
г) толщина изоляции гелиевого дьюара (вариант с водородным экраном)	25 мм
д) теплоприток через изоляцию	122 вт
е) вес водородного дьюара	120 тн
6. Хранение газа	
а) рабочее давление в хранилищах (равно максимальному давлению в камере)	10 ат
б) запас водорода	50000 нм ³
в) запас дейтерия	55000 нм ³
г) запас неона	35000 нм ³
7. Потребность в жидком азоте	
а) на охлаждение камеры и магнита (время охлаждения около 3-х суток)	80 тн
б) текущее потребление (без потерь при хранении и в трубопроводах)	4,2 тн/час

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Т.Д.Блохинцева, А.Т.Василенко, В.Т.Гребинник, В.А.Жуков, Г.Либман, Л.Л.Неменов, Г.И.Селиванов, Дань Жун Фан. Восьмиметровая водородно-дейтериевая пузырьковая камера в магнитном поле. ПТЭ, т. 7, № 5, стр. 51-59, 1962.
2. E.I.Djatschkow und A.G.Seldowitsch. Stabilisierungssystem für die 100-cm Blaskammer des Vereinigten Institutes für Kernforschung. Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. B 7, 10/11, S.812, 1965.
3. Proposal for construction of a 14-foot diameter Liquid Hydrogen Bubble Chamber for use at the Brookhaven National Laboratory Associated Universities. Inc., Upton, L.S.N.Y.G.
4. Е.И.Дьячков. Система теплоизоляции пузырьковых камер. Авторское свидетельство № 153486.
5. И.А.Баранов и др. Определение оптимального режима термообработки сверхпроводящего сплава Nb-75% Zr, препринт ОИЯИ 2612, 1966.
6. И.Н.Гончаров. Сверхпроводящий магнит из Nb-75% Zr на 85 кгс, препринт ОИЯИ Р-2533, 1965.
7. Supercon, General catalog and specification sheets, 1965.
8. C.Laverick, Superconducting magnet technology. Advances in electronics and electron physics, July, 1966.
9. F.Pawlek and D.Rogalla. The electrical resistivity of silver, copper, aluminium, and zinc as a function of purity in the range 4-298 °K, Cryogenics, vol.6, N 1, p.p. 14-20, 1966.
10. I.M.Brooks and I.R.Purcell, Stress Versus Resistivity at Liquid Helium Temperature, 1966 11R Commission 1 Conference. 11R-16.
11. М.П.Малков и др. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения, Госэнергоиздат, 1963.
12. О.Б.Брон. Автоматы гашения магнитного поля, ГЗИ, 1961.
13. Y.E.Keilin and E.Yu.Klimenko. Investigation into high current Leads in liquid helium applications. Cryogenics, vol. 6, N 4, 1966.
14. Technology and uses of Liquid Hydrogen, Edited by R.B.Scott, W.H.Deuton, C.M.Nicholls Pergamon press, 1964.
15. W.A. Beluschkin, A.G.Seldowitsch, Yu.K.Pilipenko. Wasserstoff verflüssiger mittlerer Leistung mit Detander. Monatsberichte der Deutschen Akademie zu Berlin. Band 7, Heft 10/11, S.807, 1965.
16. R.W.Boom, R.S.Livington. Superconducting Solenoids, Proc. I.R.E. 50, 274 (1962).

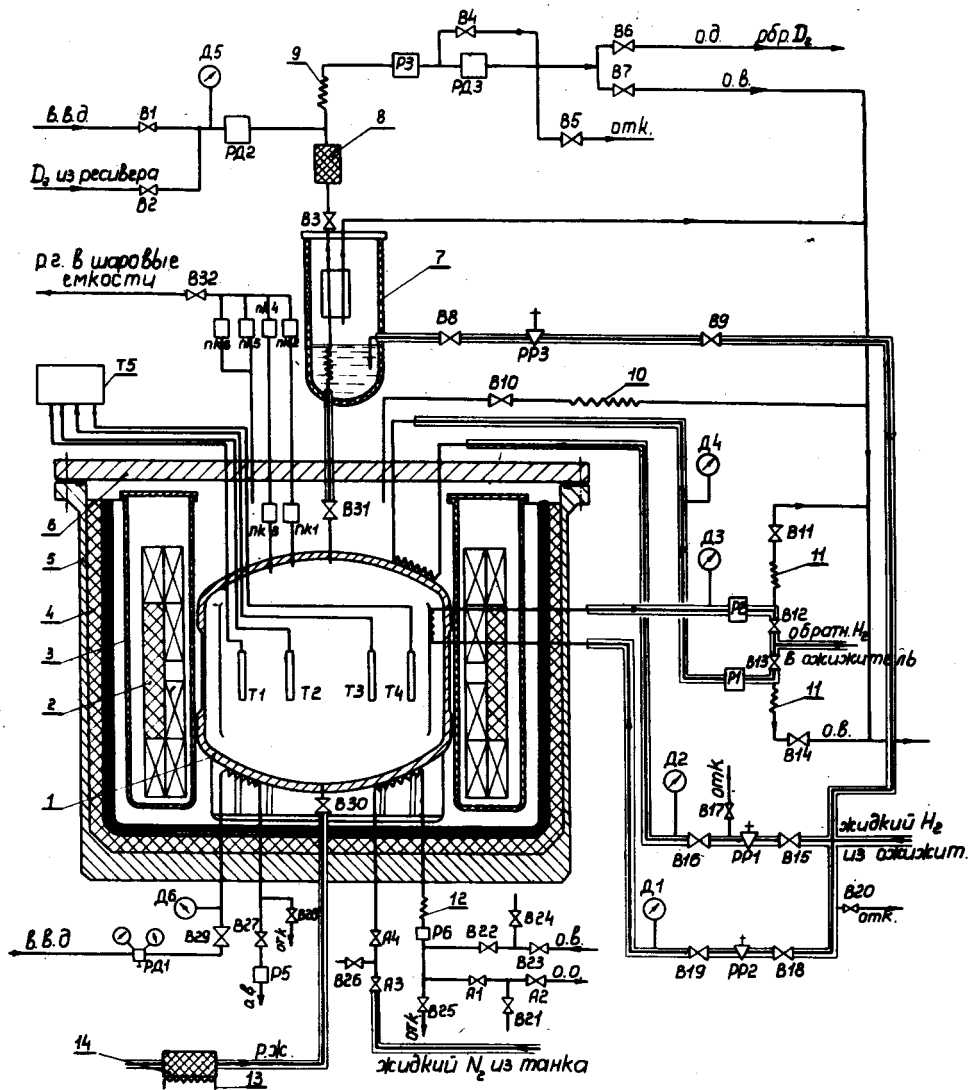


Рис. I. Схема стабилизации режима работы камеры.

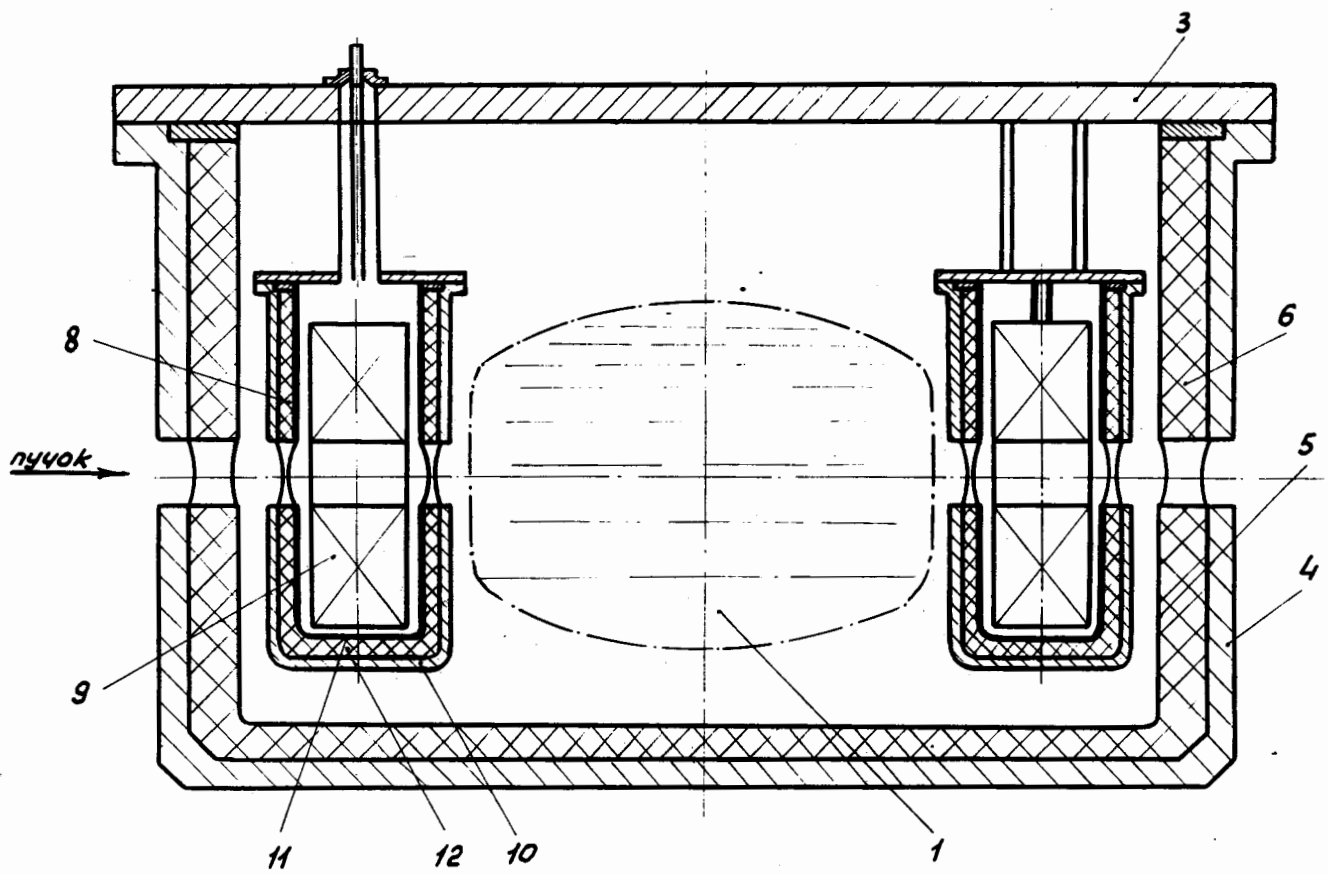
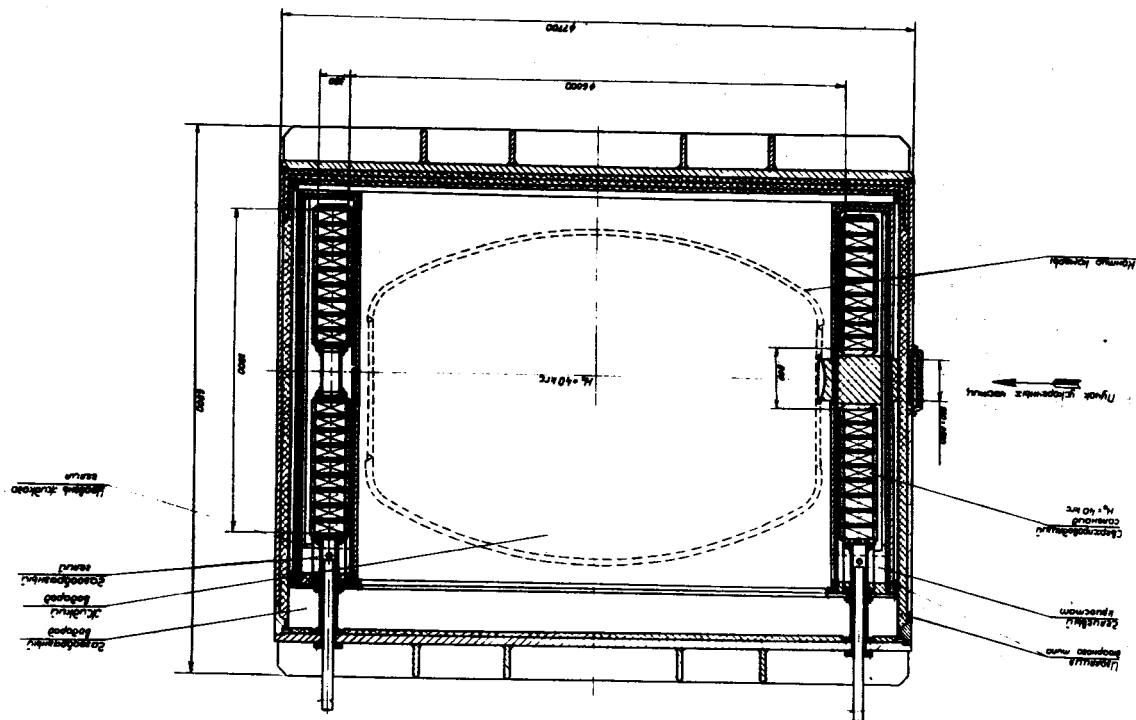


Рис.2. Схема системы теплоизоляции камеры и сверхпроводящего соленоида.

Рис. 3. Цилиндрическая водородная плавильная камера со сверхпроводящим соленоидом. Ваянт с углеродной изоляцией.



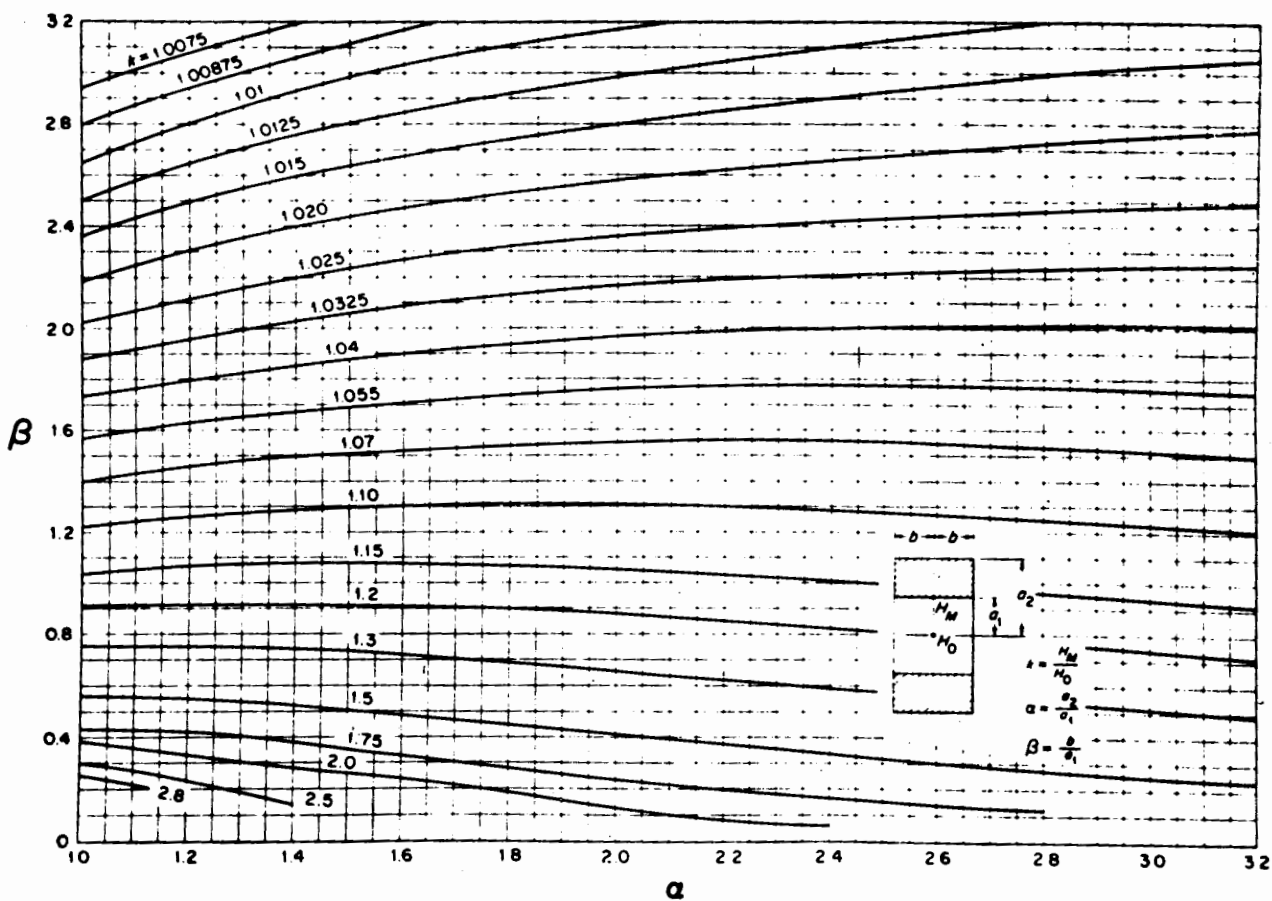


Рис.4. Зависимость неоднородности магнитного поля от относительных размеров соленоида.

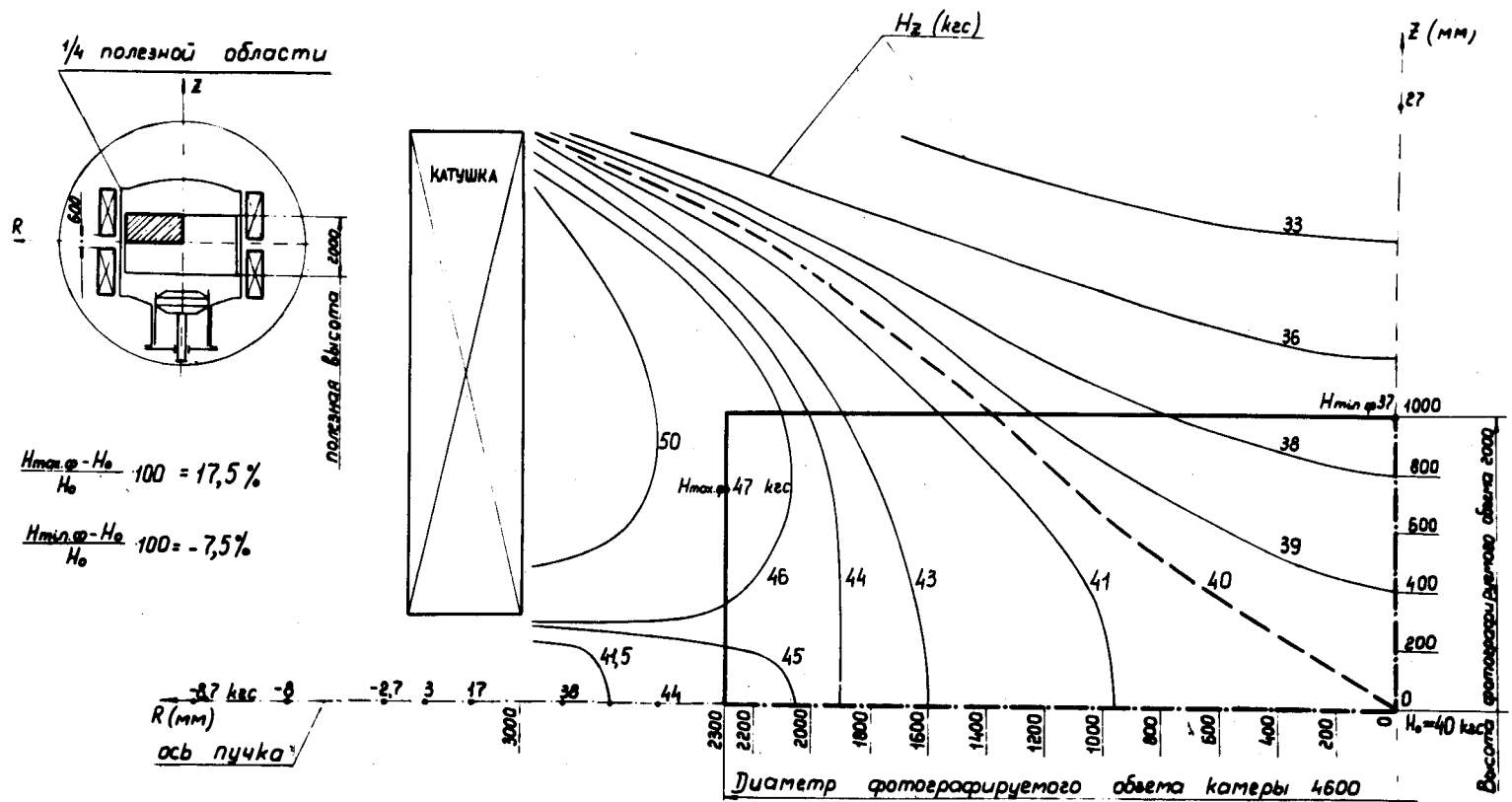


Рис.5. Распределение осевой составляющей напряженности магнитного поля камеры.

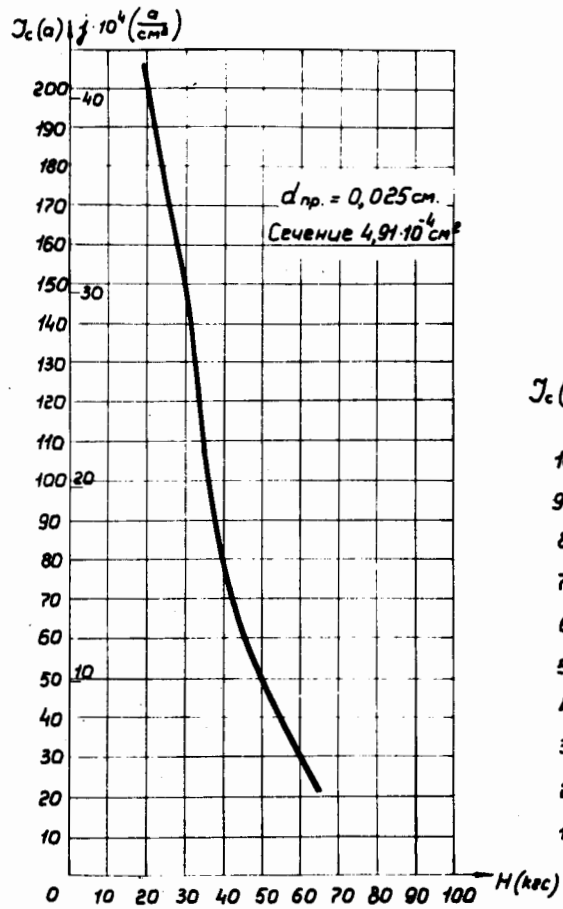


Рис.6. Критический ток короткого образца из проволоки Nb - 50% Zr.

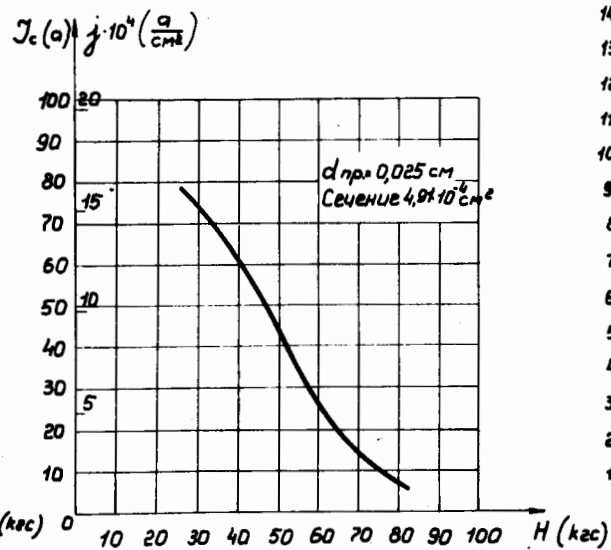


Рис.7. Критический ток короткого образца из проволоки Nb - 75% Zr.

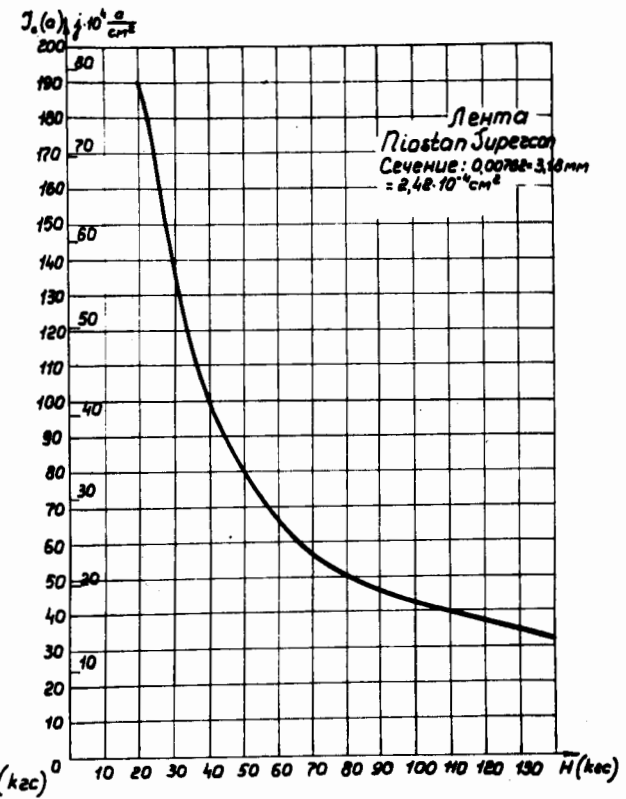
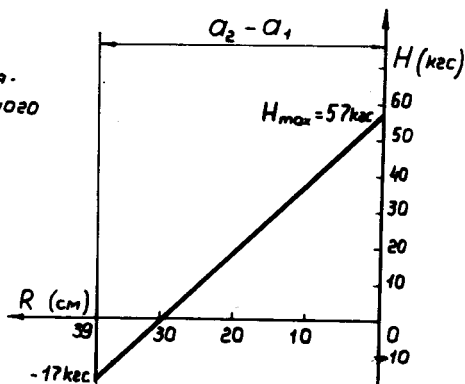
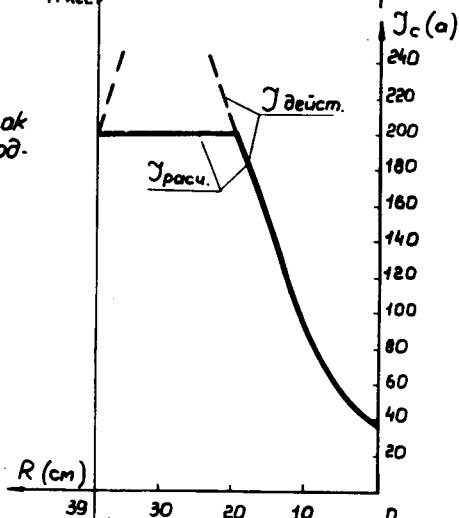


Рис.8. Критический ток короткого образца из ленты Nb₃Sn.

а) Распределение напряженности магнитного поля $H = f(R)$



б) Критический ток одного сверхпроводника $J_{пр} = f(R)$



в) Количество сверхпроводников $N_{пр} = f(R)$

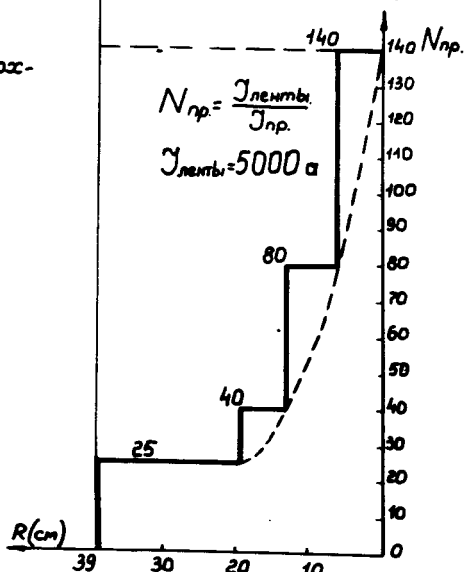


Рис.9. Соленоид без зазора для пучка. Зависимости $H = f(R)$, $J_c = f(R)$ и $N_{пр} = f(R)$ по толщине обмотки соленоида в его средней плоскости.

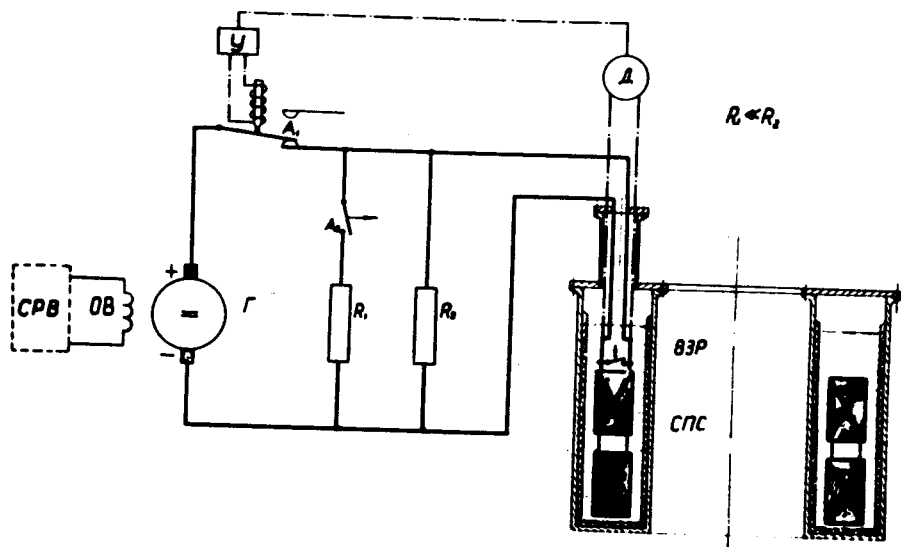


Рис.10. Принципиальная схема эвакуации энергии, запасенной сверхпроводящим соленоидом.

- Г - генератор постоянного тока,
- ОВ - обмотка возбуждения генератора,
- СРВ - схема регулирования возбуждения,
- A_1 - автомат в цепи питания СПС,
- A_2 - автомат в цепи гасительного сопротивления R_1 ,
- R_1, R_2 - гасительные сопротивления,
- ВЗР - выключатель замкнутого режима,
- СПС - сверхпроводящий соленоид,
- Д - датчик срыва сверхпроводящего состояния СПС,
- У - усилитель,
- Р - защитный шунтирующий разрядник.

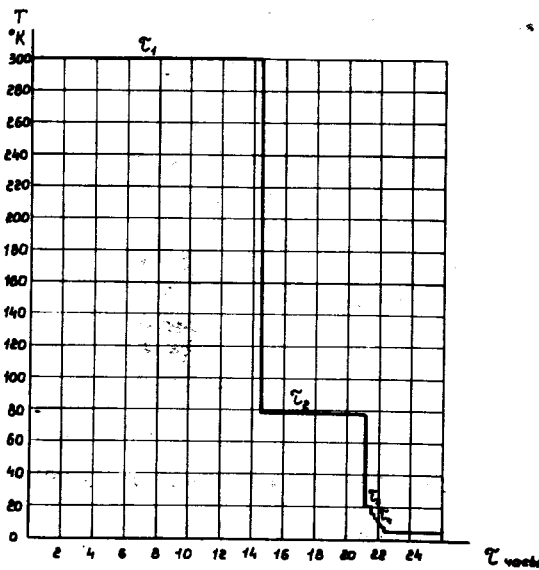


Рис. II. Схематизированная зависимость температуры гелия на выходе из обмотки от времени охлаждения соленоида.

- 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).

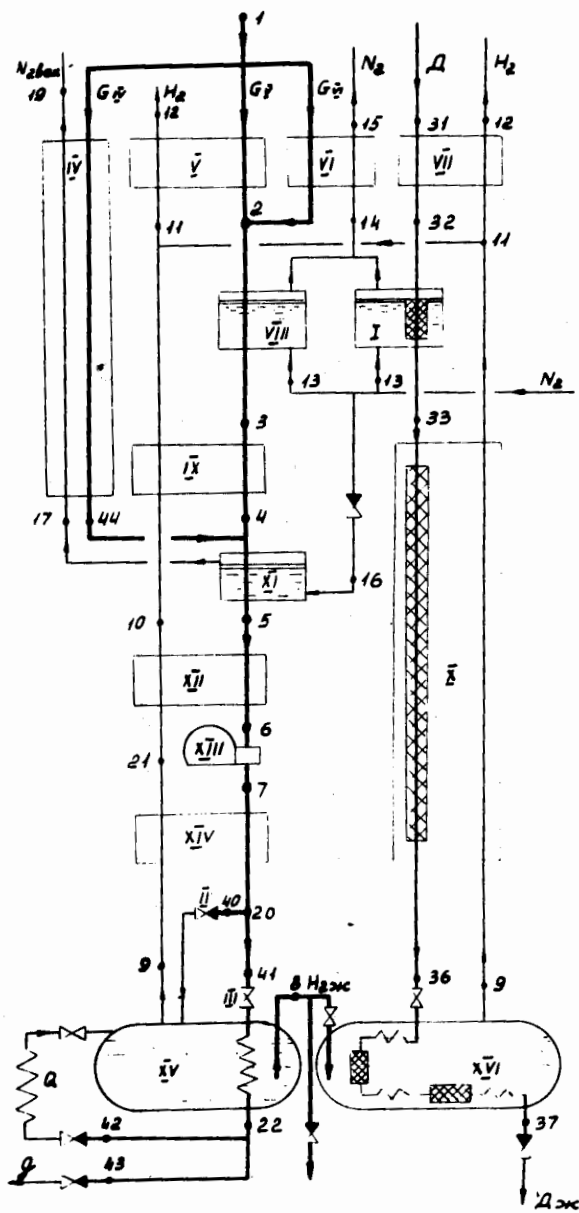


Рис.12. Холодообразующий блок охжителя.

IV - теплообменник тёплой зоны вакуумного азота, V - теплообменник тёплой зоны обратного водорода, VI - теплообменник тёплой зоны обратного азота, VII - ванна нормального азота, VIII - теплообменник средней зоны, IX - ванна вакуумного азота, X - теплообменник холодной зоны, XI - детандер, XII - теплообменник холодной зоны, XIII - детандер, XIV - теплообменник холодной зоны, XV - сборник жидкого нормального водорода.

Блок охжителя.

VI - теплообменник тёплой зоны обратного водорода, I - ванна нормального азота, X - теплообменник -реактор, XVI - сборник жидкого нормального водорода,

N_{2vac} - обратный вакуумный азот,

G_{IV} - водород высокого давления в теплообменнике,

G_V - водород высокого давления в теплообменнике,

G_{VI} - водород высокого давления в теплообменнике,

N_2 - обратный азот,

D - охлаждаемый газ: водород или дейтерий, или неон,

H_2 - обратный водород,

g - жидкий нормальный водород, поступающий на гелиевый охжитель,

$H_{2ж}$ - нормальный жидкий водород,

$D_{ж}$ - жидкие параводород или ортодейтерий, или неон.

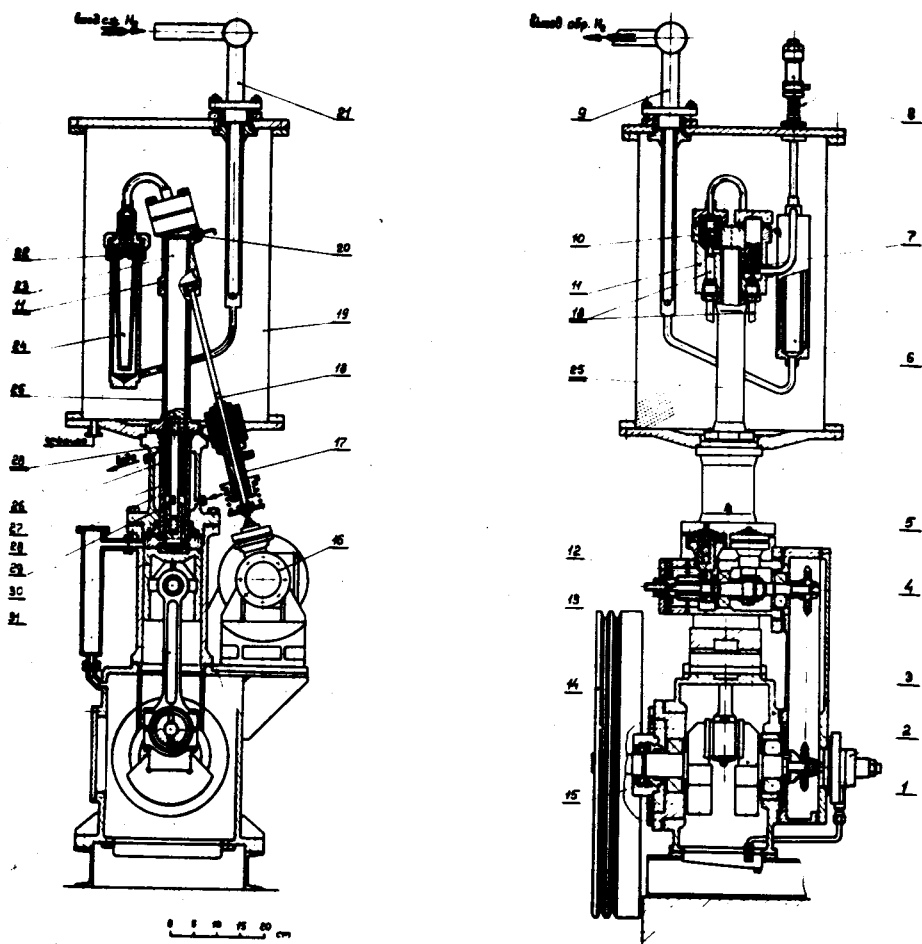


Рис.13. Детандер.

1. Коленчатый вал. 2. Масляный насос. 3. Картер. 4. Цепная передача.
5. Кулачки выпуска. 6. Фильтр-ресивер выпускной. 7. Клапан выпускной.
8. Предохранительный клапан. 9. Трубопровод обратного водорода.
10. Клапан впускной. 11. Головка цилиндра. 12. Кулачки впуска.
13. Механизм изменения отсечки впуска. 14. Маховик. 15. Сальник.
16. Механизм распределения. 17. Сальник толкателя. 18. Толкатели.
19. Вакуумный кожух. 20. Пьезоэлектрический датчик давления. 21. Трубопровод сжатого водорода. 22. Клапан-захлопка. 23. Текстолитовый вытеснитель. 24. Фильтр-ресивер впускной. 25. Тепловой мост. 26. Поршневые кольца. 27. Кожаная манжета. 28. Направляющие. 29. Цилиндр.
30. Крейцкопф. 31. Шатун.

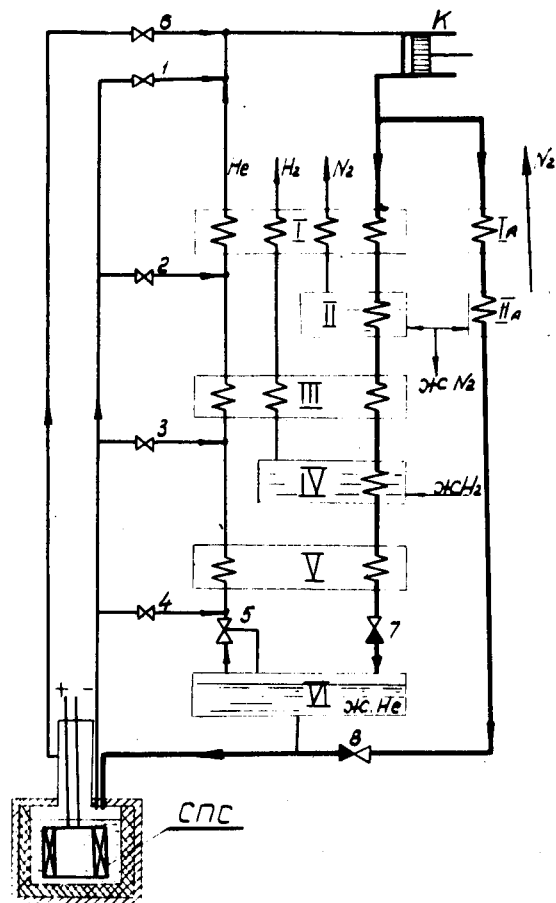


Рис.14. Схема дроссельного гелиевого рефрижератора с блоком предварительного охлаждения сверхпроводящего соленоида.

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, 5 - линия обратного потока гелия из сборника, 7, 8 - дроссельные вентили, 9 - регулятор давления.

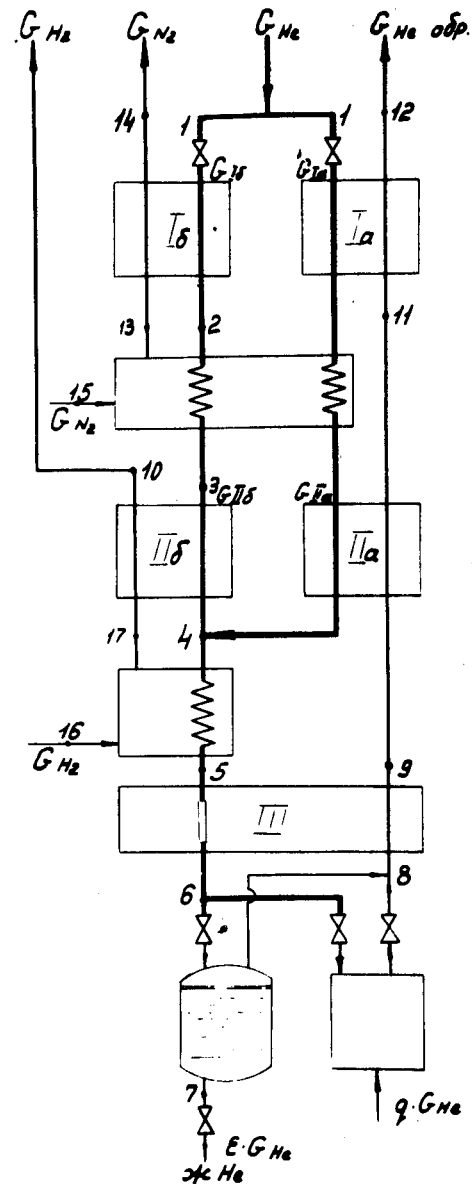


Рис.15. Принципиальная схема гелиевого рефрижератора.