

Н-994



# ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Камерный отдел Лаборатории ядерных проблем

13 - 3322

## Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера

Часть первая

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

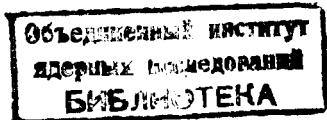
13 - 3322

5100/1 №1

# Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера

Часть первая

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**



АВТОРСКИЙ КОЛЛЕКТИВ

Г.М. Александров, М.П.Баландин, С.К.Багдасаров, В.А.Богач,  
Л.С.Вертоградов, В.И.Ганичев, Е.В.Гераскин, В.Г.Гребинник,  
В.А.Жуков, А.Заплетаев, Б.В.Иванов, Э.Киши, Б.А.Кленин,  
В.В.Куликов, У.Кундт, В.С.Курбатов, А.Г.Лаврук, В.И.Лепилов,  
Г.Либман, А.П.Маныч, Ю.П.Мереков, В.А.Моисеенко, Ю.Б.Османов,  
А.В.Плескач, И.Полах, Б.М.Понтекорво, М.Салок, Г.И.Селиванов,  
В.И.Смирнов, Л.Г.Ткачев, А.И.Филиппов, Ю.Н.Харжеев, Б.Шмидтке.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 мая 1967 года.

## А Н Н О Т А Ц И Я

В настоящем сборнике материалов представлена эскизная проработка пятиметровой жидколоводородной пузырьковой камеры, предназначеннной для использования в пучках частиц протонного синхротрона на энергию 70 Гэв, сооружаемого в г. Серпухове. В нем излагаются результаты предварительного рассмотрения основных систем и устройств камеры, проведенного в течение 1966 г. группой специалистов Объединенного института ядерных исследований.

Сборник состоит из двух частей. Часть первая, посвященная физико-техническому обоснованию отдельных узлов и механизмов собственно камеры, подготовлена камерным отделом Лаборатории ядерных проблем. Часть вторая, охватывающая комплекс вопросов, связанных с разработкой криогенных систем установки, подготовлена криогенным отделом Лаборатории высоких энергий и публикуется отдельным препринтом.

В представленных материалах содержатся рекомендации относительно целесообразного исполнения камеры и отдельных ее узлов, которые могут быть приняты за основу при составлении технологической части проектного задания на всю установку в целом.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

	стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА I. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАМЕРЫ.....</b>	<b>10</b>
§ 1. Сильные взаимодействия.....	II
§ 2. Слабые взаимодействия.....	13
§ 3. Электромагнитные взаимодействия.....	13
<b>ГЛАВА II. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 70 ГЭВ.....</b>	<b>15</b>
§ 4. Ошибки в определении кинематических параметров.....	15
а) Измерение импульсов электронов.....	16
б) Влияние турбулентности.....	18
§ 5. Идентификация частиц.....	20
а) Измерение ионизации.....	20
б) Дельта-электроны.....	21
в) Радиационные потери.....	21
г) Нейтроны.....	22
§ 6. Большая жидколоводородная камера как детектор $\gamma$ -квантов...	24
а) Металлические пластины.....	24
б) Водород-неоновая смесь.....	27
§ 7. Интенсивность первичного пучка.....	28
§ 8. Размеры и форма камеры.....	29
<b>ГЛАВА III. КОНСТРУКЦИЯ КАМЕРЫ.....</b>	<b>32</b>
§ 9. Сравнительная оценка вариантов.....	34
§ 10. Некоторые элементы конструкции.....	37
а) Корпус камеры.....	37
б) Внешний вакуумный кожух.....	37
в) Тонкостенные оболочки окон.....	38
г) Вакуумная система.....	38
д) Аварийная линия.....	40
<b>ГЛАВА IV. СИСТЕМА РАСШИРЕНИЯ.....</b>	<b>42</b>
§ 11. Конструкция узла изменения давления.....	43
а) Поршень.....	43
б) Тороидальный сильфон.....	45
в) Подвижное днище.....	45
§ 12. Схема гидравлического привода.....	48
а) Принцип действия.....	48
б) Следящая система.....	50
§ 13. Силовой узел гидропривода.....	53

<u>ГЛАВА У.</u>	ОПТИКА.....	56
	§ 14. Характеристики скотчлайта.....	57
	§ 15. Параметры осветительной системы.....	57
	§ 16. Контраст изображения.....	60
	§ 17. Параметры фотографической системы.....	63
	§ 18. Варианты конструктивного исполнения.....	65
<u>ГЛАВА УІ.</u>	МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.....	71
	§ 19. Соленоид с водяным охлаждением.....	72
	§ 20. Электромагнит.....	74
	§ 21. Соленоид из сверхпроводника.....	76
<u>ГЛАВА УІІ.</u>	РАЗВЕРТЫВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ.....	79
	§ 22. Импульсная развертывающая система.....	79
	§ 23. Комбинированная развертывающая система.....	79
	§ 24. Отклоняющие магниты.....	81
	§ 25. Источники питания.....	82
<u>ГЛАВА УІІІ.</u>	КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ, СИНХРОНИЗАЦИЯ.....	84
	§ 26. Блок-схема установки.....	85
	§ 27. Центральный пульт управления.....	85
	§ 28. Функциональные блоки.....	87
	а) Управление гидроприводом.....	87
	б) Управление вакуумной системой.....	87
	в) Управление системами освещения, фотографирования и телевизионного контроля.....	88
	г) Управление системой наполнения и эвакуации водорода.....	88
	д) Контрольные приборы терmostатирующей системы...	88
	е) Ввод пучка и контроль интенсивности.....	88
	ж) Синхронизирующее устройство.....	89
	з) Управление сверхпроводящим магнитом.....	89
	и) Устройства аварийной защиты.....	89
	к) Световое табло.....	89
	л) Мнемоническая схема установки.....	90
	§ 29. Синхронизация камеры с ускорителем.....	90
<u>ГЛАВА ІХ.</u>	МОДЕЛИРОВАНИЕ .....	94
	§ 30. Конструкция 50-санитметровой водородно-дейтериевой пузырьковой камеры.....	95
	§ 31. Расширительное устройство.....	97

§ 32. Система освещения и фотографирования.....	I00
§ 33. Сверхпроводящий соленоид.....	I02
<b>ГЛАВА X. РАЗМЕЩЕНИЕ НА ПУЧКАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ..</b>	<b>I05</b>
§ 34. Строительный комплекс.....	I05
§ 35. Программа научно-методических и конструкторских разработок.....	I09
§ 36. Оценка стоимости сооружения.....	II4
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....</b>	<b>II6</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>II7</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>II9</b>

## В В Е Д Е Н И Е

Грандиозный прогресс в развитии ускорительной техники, достигнутый в последнее десятилетие, стимулировал создание и совершенствование существующих методов исследования процессов, протекающих при высоких энергиях.

В арсенале экспериментальных средств, которыми располагают ядерные физические лаборатории в настоящее время, трековым приборам принадлежит особое место. Это место значительно упрочилось с момента появления такого замечательного инструмента, каким является пузырьковая камера. Огромный прогресс в изучении самих камер, а также возможностей их использования совместно с ускорителями заряженных частиц, выдвинул пузырьковую камеру в число наиболее важных приборов, значение которых сегодня трудно переоценить. Возникнув как настольные приборы, пузырьковые камеры вскоре переросли в мощные промышленные установки, по габаритам и сложности экспериментального оборудования сравнимые с крупными ускорителями. Выдающаяся роль камер в физике нашего времени обусловлена целым рядом присущих им уникальных качеств, среди которых документальная точность и полнота сведений, получаемых о каждом отдельном взаимодействии, играют, пожалуй, определяющую роль.

Особенно большие успехи были связаны с освоением жидкого водорода в качестве рабочей среды для пузырьковых камер. Эти успехи в существенной мере обязаны выдающимся достижениям последних лет в развитии инженерных методов криогенной техники. Результатом этого явилось создание ряда больших камер, используемых в настоящее время на ускорителях с энергиями пучков до 30 Гэв и ставших прообразами еще более крупных установок, проблемы сооружения которых в настоящее время всесторонне изучаются в связи со строительством новых гигантских ускорителей.

Первое обсуждение физических задач, решение которых оказывается доступным с помощью водородной пузырьковой камеры, имеющей протяженность рабочей области в направлении пучка более двух метров, было сделано Чиновски<sup>(1)</sup> в 1962 г. Он рассмотрел возможности изучения событий, происходящих в пучках частиц с энергиями в интервале 10-20 Гэв, даваемых Стенфордским электронным ускорителем, и пришел к выводу о необходимости сооружения камеры, имеющей размеры, приблизительно равные  $3 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$ . Такую пузырьковую камеру предполагалось использовать, главным образом, для наблюдения неупругих процессов, связанных с изучением сильных взаимодействий, протекающих с участием нейтральных частиц, а также для исследования взаимодействий гиперонов с протонами. При этом, в целях повышения эффективности регистрации частиц, рабочий объем камеры окружался кольцом из искровых камер.

В 1964 г. опубликованы проекты многометровых жидкостных пузырьковых камер, разработанные в Аргонской и Брукхевенской национальных лабораториях США<sup>(2) и (3)</sup>. В качестве

одного из наиболее важных аргументов, способствовавших появлению и реализации этих проектов, выдвигалась необходимость создания водородной пузырьковой камеры для проведения исследований по физике нейтрино.

Конструирование больших жидководородных пузырьковых камер потребовало принципиально иного подхода к решению некоторых технических задач. В частности, проблема фотографирования большого рабочего объема камеры, долгое время остававшаяся перешенной, приобрела вполне реальный смысл после первых успешных опытов по применению в пузырьковых камерах в качестве рефлектора специального светоотражающего материала (скотчлайта), который в сочетании с широкоугольной оптикой и светлопольной системой освещения в первом приближении позволяет устранить целый ряд принципиальных трудностей.

Американские проекты предусматривают выполнение рабочего объема в виде вертикального цилиндра, имеющего диаметр, приблизительно равный 4 метрам<sup>\*)</sup>, и высоту 3 метра. Рассмотрев возможности исследования сильных взаимодействий, изучение распадных свойств частиц, а также постановку экспериментов по физике слабых взаимодействий, проектные группы пришли к заключению, что указанные выше размеры камер будут достаточны для проведения большинства экспериментов в области энергий до 30 Гэв. Аналогичные выводы были также сделаны в ЦЕРН<sup>е</sup>(4).

Наряду с этим оба американских проекта предлагают использование камер в качестве эффективных детекторов  $\gamma$ -лучей, образующихся при ядерных превращениях, или являющихся следствием развития вторичных процессов, происходящих в камерах. Для этого внутрь камер предусматривается помещение конверсионных пластин с таким расчетом, чтобы пространство между ними можно было свободно фотографировать несколькими фотоаппаратами, установленными в верхней части камеры.

В недавнее время Стивенсон<sup>(5)</sup> провел предварительное рассмотрение возможности сооружения сферической водородной пузырьковой камеры диаметром 6 м, которую имеется намерение использовать совместно с проектируемым в США ускорителем на энергию 200 Гэв.

В ходе всестороннего изучения проблем, связанных с созданием крупных камер, стало ясно, что некоторые недостатки больших камер могут оказать серьезное влияние на точность получаемых результатов. Фотографирование следов частиц через толстый слой водорода с помощью широкоугольной оптики на светлом фоне оказывается возможным только в том случае, когда пузырьки имеют размеры более одного миллиметра. С другой стороны, время роста пузырьков до указанных размеров оказывается достаточно большим, что влечет за собой появление искажений, обусловленных нестационарными процессами, протекающими в рабочем объеме камеры и, как следствие этого, увеличение погрешности измерений.

<sup>\*)</sup> Диаметры камер Аргоннской и Брукхевенской национальных лабораторий США соответственно равны 3,7 и 4,3 метра.

Пятиметровая водородная пузырьковая камера, эскизная проработка вариантов которой проведена в течение 1966 г., основывается на критическом анализе всех известных зарубежных проектов и является дальнейшим развитием представлений о путях создания в достаточной мере совершенного прибора, способного в течение длительного времени служить эффективным средством получения информации в новой энергетической области, освоение которой начнется с пуском протонного синхротрона в г. Серпухове. Публикуемые материалы отражают краткое содержание проведенной работы.

ГЛАВА I  
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАМЕРЫ

Водородная пузырьковая камера является универсальным прибором, с помощью которого можно измерять все кинематические параметры частиц, и в этом отношении она не может быть заменена ни одним из таких новых приборов, как стримерные и искровые камеры. Правда, если некоторое явление качественно известно, то для его количественного изучения можно найти иногда более подходящий прибор, чем водородная камера. Однако, используя такие приборы, как правило, невозможно обнаружить совершенно неизвестные или неожиданные явления, которые могут возникать в новой области энергий (например, при энергиях частиц от Серпуховского ускорителя).

С момента появления первой водородной пузырьковой камеры, имевшей размеры порядка нескольких сантиметров, был совершен скачок к созданию камер масштаба одного-двух метров, которые успешно используются в настоящее время в экспериментах на ускорителях. Однако уже на данном этапе ощущается настоятельная необходимость в сооружении водородных камер еще больших размеров. Это связано с тем, что возможности применения существующих камер для экспериментальных исследований в наиболее интересных сейчас областях физики элементарных частиц весьма ограничены. Во-первых, в жидколоводородных камерах малых размеров крайне неэффективно регистрируются вторичные нейтральные частицы. Поэтому с помощью таких камер нельзя изучать взаимодействия, в которых образуется более одной нейтральной частицы. Во-вторых, целая область физики слабых взаимодействий – физика нейтрино – остается вне границ применения современных жидколоводородных камер, хотя именно здесь использование жидколоводородной пузырьковой камеры было бы очень желательным. Эти трудности в значительной мере были бы устранены в результате создания жидколоводородной пузырьковой камеры с рабочим объемом, существенно превышающим рабочие объемы камер, действующих в настоящее время. Таким образом, необходимость создания водородных пузырьковых камер больших размеров является естественным требованием сегодняшнего дня.

Поскольку затраты на сооружение такого прибора быстро увеличиваются с ростом его габаритов, необходимо внимательно изучить вопрос о размерах камеры в связи с конкретными задачами предстоящих исследований в области высоких энергий.

Проведенное ниже детальное рассмотрение различных факторов, определяющих размеры рабочей области и геометрию жидколоводородной пузырьковой камеры, со всей очевидностью показало, что камера диаметром 5м при глубине 3м компромиссно удовлетворяет целому ряду противоречивых требований, вытекающих из различных физических задач, интересных для рассматриваемой области энергий.

Широкие перспективы для проведения экспериментов с помощью жидковоородной пузырьковой камеры размером 5 метров в основном обусловлены удачным сочетанием в одном приборе чистой протонной (или дейтериевой) мишени больших размеров с детектором излучения, который при соответствующем исполнении (например, путем помещения в рабочий объем конверсионных пластин), способен также эффективно регистрировать  $\gamma$ -кванты.

Такая камера может быть использована в целом ряде экспериментальных исследований, из которых принципиально новыми являются следующие:

1. Изучение в чистых условиях взаимодействия нейтрино высоких энергий с нуклонами.

2. Исследование взаимодействий адронов, в которых рождается более одной нейтральной частицы.

3. Изучение электромагнитных распадов резонансов.

4. Исследование гиперон-нуклонных взаимодействий.

5. Наблюдение редких распадов адронов.

Ниже на примере конкретных экспериментов рассмотрены несколько подробнее возможные использования многометровой камеры в исследованиях по физике высоких энергий.

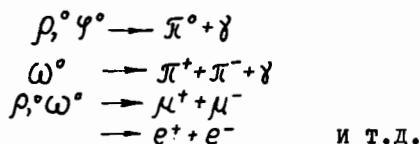
### § I. Сильные взаимодействия

В области сильных взаимодействий могут представлять интерес следующие проблемы:

1. Поиск резонансов, распадающихся на две и более нейтральных частиц, определение квантовых чисел этих резонансов и изучение механизма их генерации. Примером такого резонанса является  $\mathcal{E}^0$ -мезон с предполагаемыми спином и четностью  $0^+$ , который распадается по схеме  $\mathcal{E}^0 \rightarrow \pi^0 + \bar{\chi}^0$ .

Реакции рождения  $\mathcal{E}^0$  (например,  $\pi^- + p \rightarrow \mathcal{E}^0 + n$ ) невозможно изучать с помощью обычных водородных пузырьковых камер, так как в таких камерах плохо регистрируются фотоны. В пятиметровой же камере реакции такого типа станут наблюдаемыми. Во-первых, будет зарегистрирована значительная доля вторичных нейтронов (см. § 5г, гл.П). Во-вторых, появится возможность эффективно детектировать  $\gamma$ -кванты, поскольку в большом объеме камеры можно оптимальным образом разместить достаточное количество конверсионных пластин (см. рис. 7, § 6). Применение конверсионных пластин в пятиметровой камере позволит также изучать резонансы, распадающиеся на 3-4  $\Pi^0$ -мезона, на нейtron и  $\Lambda^0$ -мезоны или даже на короткоживущие странные частицы. Возможно, нонет  $0^+$  до сих пор не найден только потому, что распады компонентов нонета нельзя было обнаружить в обычных камерах.

### § 2. Изучение электромагнитных распадов резонансов вида:



Исследования этих процессов позволяют, например, получить данные о характеристиках резонансов (положении резонансного пика, его ширине и т.д.), не искаженных сильным взаимодействием. При изучении распадов, в которых конечными продуктами являются  $\mu$ -мезоны или электроны, измерения и идентификация электронов могут выполняться с помощью методов, описанных в §§ 4 и 5 гл.П.

3. Поиск многочастичных резонансов. С ростом энергии первичных частиц увеличивается относительный вес конечных состояний с большим числом частиц. В связи с этим, при высоких энергиях появляется возможность изучения резонансов, у которых доминируют каналы распада с образованием более трех частиц в конечном состоянии.

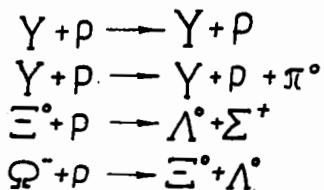
Для обнаружения многочастичных резонансов и для определения их квантовых чисел необходимо значительно большее количество анализируемых событий, чем при изучении двух- и трехчастичных резонансов. Большой объём "мишени" и возможность увеличения загрузки пучком первичных частиц (см. § 7, гл.П) позволяют получить на многометровой водородной камере значительно большее число исследуемых событий, чем на обычных водородных камерах, при одинаковом времени работы ускорителя.

При изучении многочастичных резонансов преимущества многометровой камеры проявляются также в возможности регистрации нейтральных П-мезонов (см. §6, гл.П).

4. Детальное сравнение экспериментальных данных с теоретическими моделями. Есть основания надеяться, что в ближайшие годы будут получены более детальные теоретические предсказания относительно механизма сильных взаимодействий при высоких энергиях. Чтобы проверить эти предсказания, может потребоваться вся экспериментальная информация о данном процессе. В принципе, эта информация полностью содержится в дифференциальных сечениях вида  $\frac{d^n \sigma}{ds_1 \dots ds_n}$ , где  $n \leq 3K-10$ ; К - число частиц, участвующих во взаимодействиях, а  $S_1, S_2, \dots, S_n$  - кинематические инварианты, образованные из четырехмерных импульсов первичной и вторичных частиц. При сравнении с теоретическими предсказаниями каждое экспериментальное сечение должно быть статистически хорошо обеспечено.

Очевидно, что повышение эффективности регистрации событий в камере и регистрация нейтральных частиц необходимы для проведения подобного рода исследований.

5. Изучение взаимодействий гиперонов. В настоящее время не представляется возможным получить пучки гиперонов<sup>(6)</sup>. Поэтому многометровая водородная пузырьковая камера является единственным детектором, с помощью которого можно изучать гиперон-нуклонные взаимодействия, например, такие как:

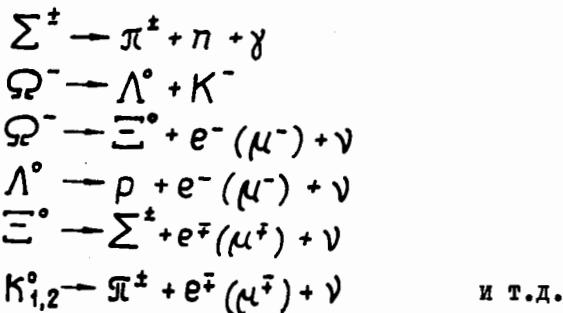


и т.д.

## § 2. Слабые взаимодействия

Пятиметровая жидкокислородная пузырьковая камера будет незаменима также при проведении целого ряда исследований в области слабых взаимодействий.

I. Редкие распады странных частиц. С достаточно большой эффективностью могут быть изучены различные каналы распада гиперонов и  $K^0$  - мезонов:



2. Опыты с нейтрино. Пятиметровая водородная пузырьковая камера является, в принципе, идеальным детектором для нейтринных экспериментов. При заполнении камеры жидким водородом представляется возможным изучить в чистом виде "упругие" ( $\bar{\nu} - p$ ) и "неупругие" ( $\bar{\nu} - p$ ) - взаимодействия ( $\bar{\nu} + p \rightarrow \mu^- + \pi^+ + p$  и т.д.). Исследование неупругих ( $\bar{\nu} - p$ ) - взаимодействий представляет большой интерес. При этом особенно важным является получение сведений об этих взаимодействиях на Серпуховском ускорителе, нейтринный спектр которого будет более "жестким", чем нейтринные спектры существующих ускорителей. Для исследования "упругих" ( $\bar{\nu} - n$ ) - взаимодействий камера должна заполняться жидким дейтерием. В указанных экспериментах в качестве "мишени" может использоваться свыше  $30 \text{ м}^3$  рабочего объема камеры. При интенсивности первичного пучка  $10^{12}$  протонов/цикл и частоте циклов 8 цикл/мин (предполагаемые условия работы Серпуховского ускорителя) можно ожидать не менее двух нейтринных событий в час. При этом предполагается, что системы вывода протонного пучка и фокусировки мезонов, распадающихся с образованием нейтрино, аналогичны тем, которые используются в ЦЕРН'е.

Такая частота нейтринных событий позволяет провести на камере целый ряд экспериментов по физике нейтрино, таких, например, как проверка справедливости правила  $\Delta T = I$  в слабых взаимодействиях путем изучения реакций с образованием нуклонных изобар, проверка правила отбора  $\Delta Q = \Delta S$  в реакциях с образованием  $\Sigma$  - гиперонов, поиски гипотетического промежуточного бозона  $W^+$  (при заполнении камеры неоном, см § 6, гл. II) и т.д.

## § 3. Электромагнитные взаимодействия

В этой области представляют интерес, например, следующие эксперименты:

I. Изучение рассеяния  $\Pi^{\pm}$  - мезонов высокой энергии на электронах в жидким водороде с целью измерения форм-фактора  $\Pi$ -мезона.

2. Исследование взаимодействия фотонов высокой энергии с протонами. При распаде  $\Pi^0$ -мезонов, рожденных в мишени Серпуховского протонного ускорителя, могут возникать  $\gamma$ -кванты, энергия которых превышает энергию  $\gamma$ -квантов, получаемых на существующих электронных ускорителях. Для проведения экспериментов по изучению ( $\gamma$ - $p$ ) -взаимодействий на пятиметровой водородной камере необходимо, чтобы интенсивность пучка  $\gamma$ -квантов составляла 50-100 фотонов за цикл и фон нейтронов не был слишком велик. Согласно приближенной оценке, эти условия выполняются вплоть до энергий  $\gamma$ -квантов 15-20 Гэв.

oooooooo

Все сказанное выше свидетельствует о том, что с помощью пятиметровой пузырьковой камеры можно получить много новой информации о взаимодействиях элементарных частиц в области высоких энергий. Такие ценные свойства пятиметровой камеры, как возможность регистрировать остановки большинства заряженных частиц с импульсами до 1 Гэв/с, высокая эффективность регистрации нейтронов и нейтральных странных частиц в широком интервале энергий, большая вероятность наблюдения вторичных и даже третичных взаимодействий частиц и, наконец, возможность установки в камере пластин для конверсии  $\gamma$ -квантов имеют огромное значение, в особенности, при идентификации уникальных событий. Существенное увеличение вероятности идентификации таких событий является, на наш взгляд, наиболее важной характеристикой пятиметровой камеры, предназначеннной для новой области энергий, где следует ожидать возникновения новых явлений. В связи с этим достаточно вспомнить, что  $\Omega$ -гиперон был впервые обнаружен на снимках с 80-дюймовой пузырьковой камеры, самой большой из существующих в настоящее время водородных камер. Первое  $\Omega$ -событие удалось однозначно идентифицировать благодаря тому, что на снимке, кроме других вторичных частиц, были зарегистрированы также оба  $\gamma$ -кванта от распада  $\Pi^0$ -мезона. Число "удачных" случаев в пятиметровой камере значительно увеличится.

## ГЛАВА II

### ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 70 ГЭВ

#### § 4. Ошибки в определении кинематических параметров

Погрешность в определении импульсов частиц складывается из ошибки, обусловленной неточностью восстановления пространственных координат следа, ошибки, возникающей вследствие многократного рассеяния частиц, и ошибки, связанной с неточностью знания магнитного поля в камере. В существующих камерах ошибка  $\varepsilon$  в определении координат обычно не превышает 50 мк. Для проектируемых же многометровых камер величина ошибки, по-видимому, будет в несколько раз больше. Действительно, по ряду причин (использование светлопольной системы освещения, применение широкоугольных объективов и т.д.) фотографирование пузырьков в многометровых камерах возможно только в том случае, если пузырьки будут иметь диаметр не менее 1 мм. При таких диаметрах пузырьков только вклад от дисторсий оптической системы в измерительную ошибку составит около 100 мк (примерно 10 % от размеров пузырька). Кроме того, будет заметным вклад, который вносят в ошибку нерегулярные смещения пузырьков, вызываемые турбулентным движением рабочей жидкости и всплыvанием пузырьков. В результате этого, величина  $\varepsilon$  в многометровых камерах может достигать нескольких сот микрон.

Среднеквадратичные ошибки в определении кривизны  $K$ , азимутального угла  $\Psi$  и полярного угла  $\lambda$  (угол между направлением импульса частицы и плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля) вычисляются по известным<sup>(7)</sup> формулам:

$$(\Delta K)^2 (\text{см}^{-2}) = \frac{61,5}{\rho^4} \cdot \varepsilon^2 + \frac{9,04}{\ell \cdot \rho^2} \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

$$(\Delta \Psi)^2 (\text{рад}^2) = \frac{16,6}{\ell^2} \cdot \varepsilon^2 + \frac{1,13}{\rho^2} \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

$$(\Delta \lambda)^2 (\text{рад}^2) = \frac{35,3}{\ell^2} \cdot \varepsilon^2 + \frac{2,26 \ell}{\rho^2} \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

где  $\ell$  - длина отрезка трека, используемого при измерениях (длина измерения), в см,  
 $\varepsilon$  - ошибка в определении координат в см,  $\rho$  - импульс частицы в Мэв/с.

Как показала приближенная оценка, для камеры, имеющей полезный объем  $V = 30 \text{ м}^3$  и диаметр рабочей области 5 м, относительная ошибка в определении импульса частиц, возникающая из-за неточности знания напряженности магнитного поля, не превышает 0,3 % даже при фактической неоднородности поля, достигающей 13 % по оси камеры и 18 % по радиусу. При этом предполагается, что абсолютная величина напряженности поля определена с точностью не хуже 0,1 %, относительные измерения топографии поля проведены с точностью 0,05 %, а значения поля в каждой точке находятся линейной интерполяцией измерений, выполненных с шагом 30 см (матрица измерений поля занимает 10–15 тыс. ячеек в памяти машины).

Поэтому при оценке погрешности в определении импульса можно пренебречь неточностью в напряженности магнитного поля по сравнению с другими источниками ошибок.

На рис.1 показана зависимость относительной ошибки в импульсе частицы от величины импульса для ряда значений  $\varepsilon$  и  $\ell$  при напряженности магнитного поля 30 кгс. Из рис.1 видно, что при проведении измерений на снимках с больших камер, в которых длина треков может составлять несколько метров, можно без большой потери точности в определении импульса ограничиться длинами измерения  $l=1,5m$ . Это справедливо также и в отношении измерений углов  $\varphi$  и  $\lambda$ , поскольку ошибки этих углов зависят от длины  $\ell$  более слабо, чем ошибка в импульсе (см.формулы I-3). На рис.2 показана зависимость ошибки угла  $\lambda$  от длины измерения при импульсе частицы, равном 10 Гэв/с. Видно, что для длин измерения, превышающих  $1,5m$ , уменьшение ошибки в угле  $\lambda$  с увеличением длины измерения не велико. Такая зависимость ошибок в углах от длины измерения сохраняется и при более высоких энергиях частиц, поскольку точность определения углов частиц с импульсами более 10 Гэв/с практически не зависит от импульса частицы.

При напряженности магнитного поля 30 кгс, длине измерения  $l=1,5m$  и величинах ошибок в пространственных координатах, не превышающих 200 мк, относительные ошибки в определении импульса будут сравнимы с соответствующими ошибками, характеризующими измерения в существующих водородных камерах, где величина  $\varepsilon$  не превышает 50 мк, а длина измерения близка к 50 см.

При обработке данных с пузырьковых камер очень часто рассчитывают эффективные массы систем из двух или более вторичных частиц. Поэтому представляет интерес оценить ошибки, которые могут возникнуть при определении этих величин. Для этого моделировались трех- и пятилучевые ( $\pi$ - $p$ )-события и рассчитывались относительные ошибки в определении эффективной массы системы двух вторичных П-мезонов, образованных в этих событиях. Расчет был выполнен для нескольких значений энергии первичных П-мезонов в области энергий от 10 до 60 Гэв при различных предположениях относительно величины ошибок в определении координат и длины измерения.

При длинах измерений около  $1,5m$ , напряженности поля 30 кгс и при  $\varepsilon$ , равном 100-200 мк, точность определения эффективной массы,  $\Delta m/m$ , в многометровых камерах составляет 1-6% (см.рис.3), что сравнимо с величинами  $\Delta m/m$  в малых камерах (0,7-6 %).

а) Измерение импульсов электронов. При оценке точности измерений импульсов электронов необходимо учитывать влияние радиационных потерь. Электроны с начальным импульсом  $P_0$  после прохождения пути  $\Delta L$  в среде с радиационной длиной  $X_0$  будут иметь распределение импульсов, описываемое формулой Гайтлера<sup>(8)</sup>:

$$W(y)dy = \frac{e^{-y}}{\Gamma(x)} e^{x-1} dy, \quad (4)$$

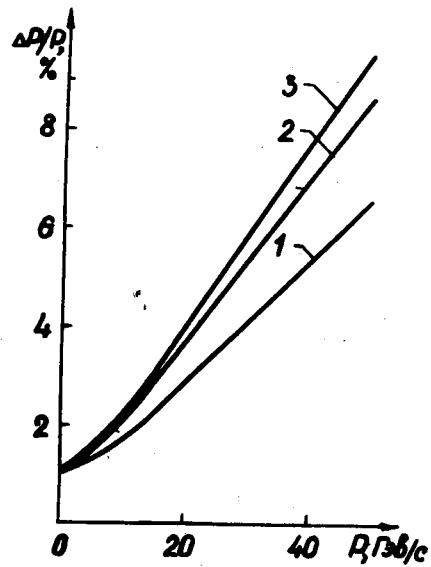


Рис. 1. Зависимость относительной ошибки в импульсе от величины импульса для различных значений ошибки  $\epsilon$  в определении координат и длины измерения  $\ell$ . Напряженность магнитного поля  $H = 30$  кгс. 1 -  $\epsilon = 150$  мк,  $\ell = 100$  см; 2 -  $\epsilon = 200$  мк,  $\ell = 100$  см и  $\epsilon = 50$  мк,  $\ell = 50$  см; 3 -  $\epsilon = 500$  мк,  $\ell = 150$  см.

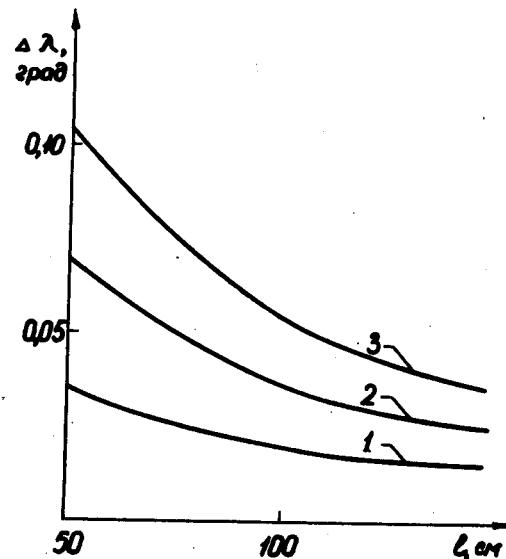


Рис. 2. Зависимость ошибки в угле  $\lambda$  от длины измерения при различных значениях ошибки  $\epsilon$  в определении координат. Импульс  $P = 10$  Гэв/с.  
1 -  $\epsilon = 50$  мк; 2 -  $\epsilon = 100$  мк;  
3 -  $\epsilon = 150$  мк.

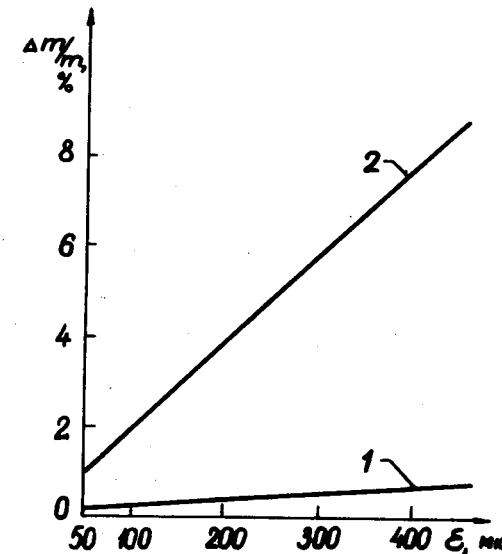


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки в эффективной массе от погрешности в определении координат. Напряженность магнитного поля  $H = 30$  кгс, длина измерения  $\ell = 100$  см; кривая 1 относится к  $P = 750$  Мэв, а кривая 2 соответствует  $P = 5600$  Мэв.

$$\text{где } y = \ln \frac{P_0}{P}, \quad x = \frac{\Delta L}{X_0 \ln 2},$$

$P$  - импульс электрона после прохождения длины  $\Delta L$ ,

$\Gamma$  - гамма-функция.

С целью увеличения точности определения импульса можно отбирать для измерения отрезки треков, на которых потери энергии на излучение меньше заданных:  $y < y_0$ . ( $y_0$ -коэффициент "обрезания", обычно принимаемый равным  $0,5 \pm 1,0^{(9)}$ ). Дисперсия  $D$  распределения импульсов, вычисленная по формуле (4), с учетом "обрезания" имеет вид:

$$D = \frac{\langle \Delta P^2 \rangle}{P_0^2} = \exp(-x \ln 3) \frac{I(3y_0, x)}{I(y_0, x)} - \exp(2x \ln 2) \left[ \frac{I(2y_0, x)}{I(y_0, x)} \right]^2, \quad (5)$$

где  $I$  - неполная гамма-функция.

Относительная ошибка измерения импульсов электронов,  $\delta_{\text{рад.}}$ , обусловленная разбросом радиационных потерь, дается выражением  $\delta_{\text{рад.}} = K_0 D$ , где коэффициент  $K_0$  зависит от метода определения импульса из измерений координат на треке. Например, при параболической аппроксимации проекции трека на плоскость, перпендикулярную направлению магнитного поля,  $K_0 \approx 0,5^{(10)}$ .

Так как с возрастанием длины  $\Delta L$ , ошибка  $\delta_{\text{рад.}}$  увеличивается, а погрешность измерения кривизны трека уменьшается, то при заданном значении импульса  $P_0$  существует оптимальная длина  $\Delta L_{\text{опт.}}$ , при которой ошибка в определении импульса будет наименьшей ( $\frac{\Delta P_0}{P_0} = \delta_{\text{min}}$ ). На графике (рис.4 и 5) показаны зависимости величин  $\delta_{\text{рад.}}$  и  $L_{\text{опт.}}$  от значений импульсов электронов  $P_0$  для различных точностей определения координат.

Из совместного рассмотрения этих рисунков можно видеть, что даже при сравнительно больших ошибках в измерениях пространственных координат в пятиметровой камере достигается точность в определении импульсов электронов с энергией до 50 Гэв, близкая к величине  $\delta_{\text{min}}$ , не превышающей  $5 \pm 6\%$  при  $\Delta L = 0,75 \pm 2$  м.

б) Влияние турбулентности. Рейнхард<sup>(II)</sup> рассмотрел задачу о турбулентности

для жидкокристаллической пузырьковой камеры с диаметром 3,5м и высотой 3,15 м с помощью некоторой довольно грубой, но поддающейся расчету модели. Турбулентное движение приводит, во-первых, к случайному смещению пузырьков на величину  $\Delta_1 = U \cdot t$  ( $U$ -скорость турбулентных вихрей,  $t$  - время роста пузырька до размеров порядка 1 мм, приемлемых для фотографирования в многометровых камерах), и, во-вторых, к ошибке в определении центра пузырька из-за флуктуаций показателя преломления  $\Delta_2 = Z \cdot \Delta \Psi$ . Согласно модели Рейнхарда, ошибка  $\Delta \Psi$  в угле, под которым объектив фотоаппарата видит точку на глубине  $Z$  в жидкости, определяется из соотношения:

$$\Delta \Psi = 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot Z^{3/2} \cdot Q^{7/8},$$

где  $Q$  - тепловой поток, переносимый турбулентным движением. На основе этой модели нами был проведен расчет ошибок в определении координат пузырьков и импульсов частиц при двух

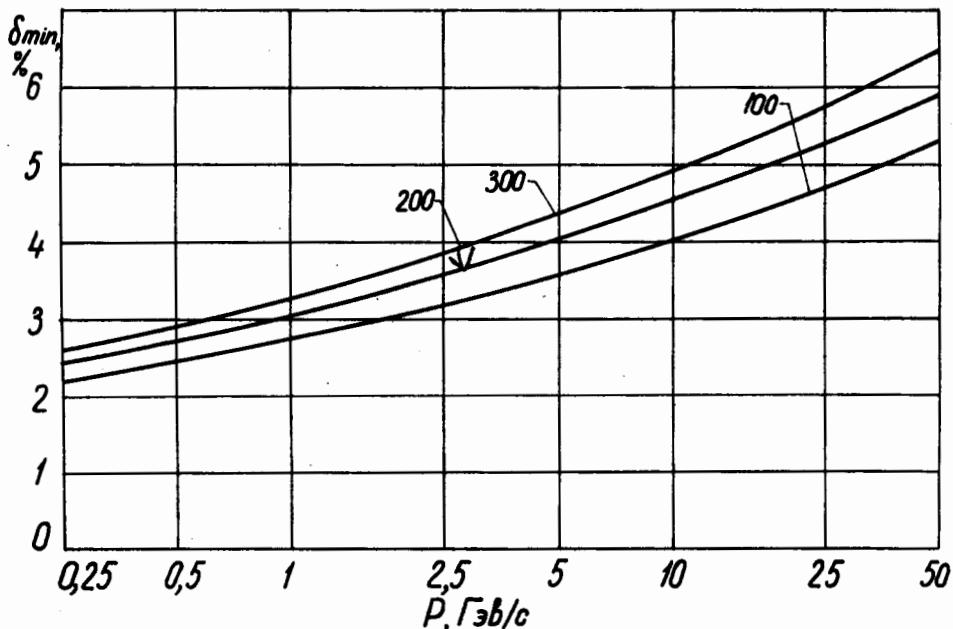


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки импульса электрона от величины импульса при различных значениях ошибки  $\epsilon$  в определении координат и при оптимальной длине измерения. Напряженность поля - 30 кгс; цифрами указаны значения  $\epsilon$  в мк.

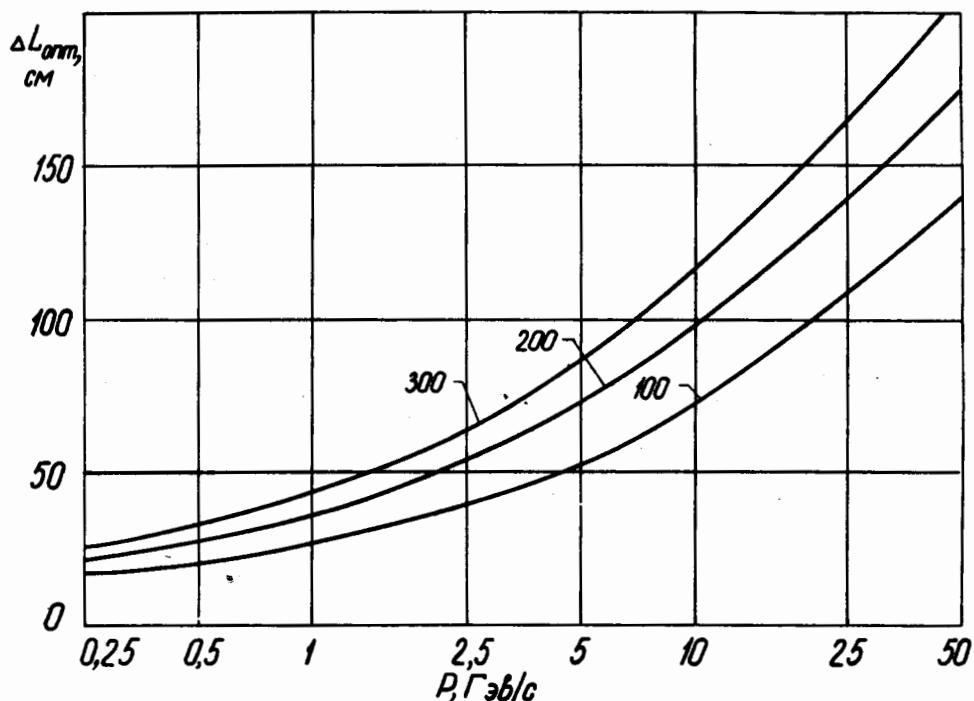


Рис. 5. Зависимость оптимальной длины измерения от величины импульса электрона при различных значениях ошибки  $\epsilon$  в определении координат. Напряженность поля 30 кгс; цифрами указаны значения  $\epsilon$  в мк.

значениях разности температур между дном и верхней частью камеры,  $T=0,05$  и  $0,10^0$ . Таким разностям температур в модели Рейнхарда соответствуют тепловые потоки, равные 80 и 210 вт. При расчете использовались следующие данные:

диаметр камеры  $D = 5$  м, напряженность магнитного поля  $H = 30$  кгс,  
высота камеры  $h = 3$  м, глубина  $Z = 100$  и 200 см,  
длина измерения  $\ell = 1$  м, время роста пузырька  $t = 10$  мсек.

Результаты расчета приведены в таблице I.

Таблица I

$Q$ , вт	$Z$ , см	Ошибка, мм				$\Delta P/P, \%$ при $P$ , Гэв/с		
		$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\varepsilon$	$\delta s$ <sup>x)</sup>	I	10	20
80	100	0,65	0,29	0,71	0,350	0,31	3,1	6,2
	200	0,65	0,78	1,01	0,495	0,44	4,4	8,8
210	100	0,92	0,64	1,13	0,495	0,44	4,4	8,8
	200	0,92	1,80	2,02	0,890	0,79	7,9	15,8

x)  $\delta s = 3,44 \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{m}}$  — ошибка в измерении стрелы прогиба,  
 $m$  — число независимых измерений координат на следе,  $\varepsilon = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}$ .

Хотя в этих расчетах величина ошибки, по-видимому, сильно завышена, они показывают, что необходимо обратить серьезное внимание на проблемы, связанные с возникновением турбулентного движения в камере. В частности, необходимо тщательно рассмотреть вопросы термостатирования и термоизоляции рабочего объема камеры.

### § 5. Идентификация частиц

a) Измерение ионизации. В больших жидколовородных камерах можно ожидать уменьшения статистической ошибки в определении плотности следа по сравнению с ошибкой этой величины в малых камерах, поскольку относительная погрешность измерения плотности следа обратно пропорциональна длине измеряемого следа:  $\frac{\Delta q}{q} = \frac{1}{\sqrt{qL}} e^{q(L+d)/2}$  ( $L$  — длина следа,  $d$  — диаметр пузырька). Для предполагаемых условий в пятиметровой камере ( $L = 2,5$  м;  $d = 1$  мм) минимальное значение  $\frac{\Delta q}{q}$  составляет 4%. Такой ошибке соответствует верхняя граница области импульсов, в которой возможно отделение  $\Pi^+$ -мезонов от протонов, равная примерно 2,2 Гэв/с.

Приведенная оценка учитывает только ошибку, связанную с пуассоновским распределением пузырьков. Если полная ошибка измерения плотности следа не превосходит более, чем вдвое, чисто статистическую ошибку, то точность измерения ионизации в многометровой камере будет не хуже точности измерений, получаемой на малых камерах.

б) Дельта-электроны. В принципе, для идентификации частицы с известным импульсом достаточно определить импульс и угол вылета любого  $\delta$ -электрона, найденного на её следе. Однако, чтобы отделить таким методом  $\Pi^+$ -мезоны от протонов в области импульсов до 3 Гэв/с, необходимо измерить угол вылета  $\delta$ -электрона с точностью порядка  $1^\circ$ . К сожалению, такой точности достичь трудно из-за того, что точка вылета  $\delta$ -электронов определяется с большой ошибкой, обусловленной малым углом (не превышающим  $0,2^\circ$ ) отклонения первичной частицы при рассеянии на электроне<sup>(12)</sup>. Увеличение размеров фотографируемых пузырьков в многометровых камерах ухудшает точность измерения угла вылета  $\delta$ -электрона.

Для идентификации частиц можно также использовать измерение числа  $\delta$ -электронов на единице длины следа частицы. Однако даже в больших жидколоводородных камерах при длине следа 2,5 м число  $\delta$ -электронов на следе частиц весьма мало, так что статистические ошибки не позволяют разделить  $\Pi^+$ -мезоны и протоны, если импульсы частиц превышают 1 Гэв/с. В области импульсов, меньших 1 Гэв/с, метод счета  $\delta$ -электронов может оказаться полезным, когда невозможны измерения плотности пузырьков.

Другой способ идентификации основан на сравнении энергий  $\delta$ -электронов, образованных идентифицируемой частицей, с значениями их максимальных энергий, вычисленных при различных предположениях о массе этой частицы. Когда энергия частицы много меньше величины  $M^2/2m_e$  (где  $M$  - масса частицы, а  $m_e$  - масса электрона), то максимальная кинетическая энергия образованных ею  $\delta$ -электронов обратно пропорциональна квадрату массы частицы. Учитывая это обстоятельство, можно, например, сказать, что, если на следе имеется хотя бы один  $\delta$ -электрон с энергией большей, чем максимальная кинетическая энергия  $\delta$ -электрона от протона, то масса идентифицируемой частицы меньше массы протона. При отделении  $\Pi$ -мезонов от протонов этот метод пригоден для импульсов частиц, не превышающих 1,3 Гэв/с, когда на следе  $\Pi$ -мезона длиной 2,5 м имеется в среднем не менее одного  $\delta$ -электрона с энергией, большей максимальной энергии  $\delta$ -электрона от протона.

Отметим, что в области импульсов до 1,3 Гэв/с частицы достаточно надежно различаются по плотности их следов. Поэтому измерения энергии  $\delta$ -электронов в этом интервале импульсов дают только дополнительные сведения, помогающие идентификации. В редких случаях измерения энергий  $\delta$ -электронов позволяют идентифицировать частицы с импульсами, значительно превышающими 1 Гэв/с; при этом число таких удачных случаев растет пропорционально увеличению размеров камеры.

в) Радиационные потери. В принципе, измеряя изменение кривизны следа заряженной частицы при прохождении частицей пути  $L$ , можно отделить электроны от других частиц, скажем, от  $\mu$ -мезонов. Однако наличие ошибок измерений и разброса потерь энергии на излучение приводит к тому, что часть электронов может быть при этом принята за  $\mu$ -мезоны

и наоборот.

Можно показать, что доля  $\mu$ -мезонов, ошибочно принимаемых за электроны, не превысит 2 %, если относительное изменение измеряемого импульса частицы удовлетворяет соотношению:

$$\Delta = \frac{P - P_1}{P} > 2\sqrt{2} \delta_\mu ,$$

где  $P$  и  $P_1$  - значения импульса частицы соответственно в начале и конце отрезка, на котором измеряются потери энергии, а  $\delta_\mu = (\frac{\Delta P}{P})_\mu$  - величина относительной ошибки измерения импульса  $\mu$ -мезона. При этом процент идентифицированных электронов равен:

$$W_e(\Delta > 2\sqrt{2} \delta_\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y}}{\Gamma(\tau)} y^{\tau-1} \Phi\left[\frac{1-e^{-y}-2\sqrt{2} \delta_\mu(P)}{\sqrt{2} \delta_e(P)}\right] dy ,$$

где  $y = \ln \frac{P}{P_1}$ ,  $\tau = \frac{L-\ell}{X_0}$ ,  $L$  - полная длина треков,  $\ell$  - длина, на которой измеряется импульс,  $X_0$  - радиационная длина,  $\delta_e$  - относительная ошибка импульса электрона,  $\Gamma$  - гамма-функция,  $\Phi$  - интеграл ошибок.

На рис.6 приведена зависимость процента идентифицированных электронов,  $W_e$ , от импульса электрона для разных длин  $L$  при длинах измерения  $\ell$ , равных 50 и 100 см. Предполагалось, что коэффициент  $K_0$  равен 0,5, а коэффициент "обрезания"  $Y_0$  равен  $\infty$  (см. § 4а). Из рисунков видно, что при длинах  $L$ , равных около 2 м, доля идентифицированных электронов составляет 40–60 % вплоть до энергий порядка 50 Гэв. Таким образом, в многометровой камере можно достаточно эффективно идентифицировать электроны.

г) Нейтроны. Зависимость эффективности регистрации нейтронов,  $W$ , от размеров камеры представлена в таблице 2.

Таблица 2

Тип взаимодействия	$\ell$ , см	$W$ , %, при $Z$ , см.			
		100	200	300	400
Упругие взаимодействия	50	5	8	8	8
	100	5	10	13	14
	150	5	10	14	18
	200	5	10	14	18
Упругие и неупругие взаимодействия (суммарно)	50	14	22	22	22
	100	14	26	35	36
	150	14	26	37	45
	200	14	26	37	46

Здесь  $Z$  - расстояние точки образования нейтрона от задней стенки камеры, отсчитываемое вдоль пучка частиц,  $\ell$  - расстояние границы пучка от боковых стенок камеры. Значения эффективности регистрации в таблице 2 вычислены для нейтронов, образующихся в (pp)-соударениях при энергии 50 Гэв. При этом распределения нейтронов по импульсам и углам вы-

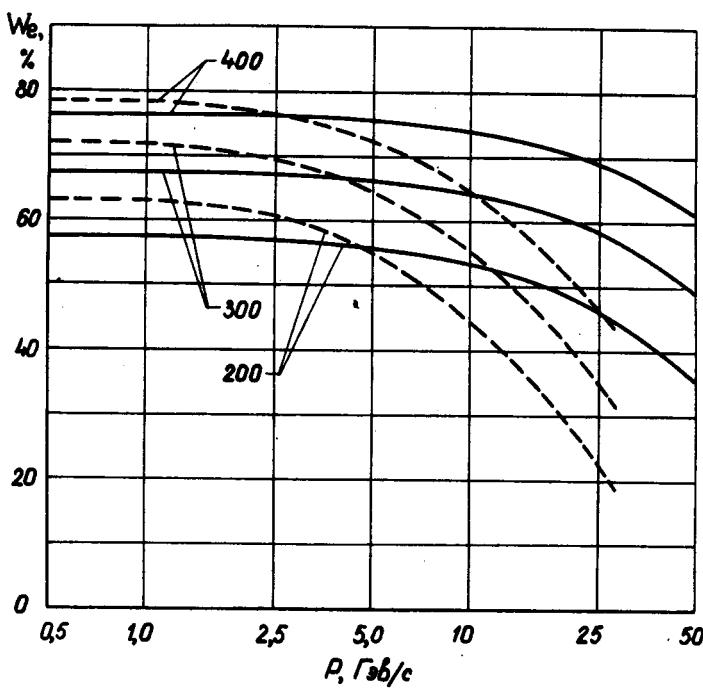


Рис. 6. Вероятность идентификации электронов в водородной пузырьковой камере. Напряженность поля — 30 кгс; ошибка в определении координат  $\mathcal{E} = 100 \text{ мк}$ ; сплошные кривые соответствуют длине измерения  $\ell = 100 \text{ см}$ , пунктирные относятся к  $\ell = 50 \text{ см}$ ; цифрами указаны полные длины треков в см.

лата взяты согласно статистической модели множественного рождения. Из таблицы видно, что эффективность регистрации нейтронов, рожденных во взаимодействиях частиц высокой энергии, существенно увеличивается с увеличением длины камеры. При увеличении поперечных размеров камеры выше 3 м эффективность регистрации заметно не меняется.

### § 6. Большая жидкокристаллическая камера как детектор $\gamma$ -квантов.

a) Металлические пластины. Как впервые было указано Д. Триллингом<sup>(13)</sup>, в больших жидкокристаллических камерах целесообразно устанавливать набор металлических пластин для конверсии  $\gamma$ -квантов, возникающих в рабочем объеме камеры. Эта идея используется в проектах многометровых камер<sup>(2-4)</sup>. Если  $\gamma$ -квант конвертирует в одной из пластин, то величину и направление импульса  $\gamma$ -кванта можно определить, измеряя координаты точки конверсии и кривизны следов электрона и позитрона на длине  $d$  между пластинами. Будем считать, что пластины располагаются на равном расстоянии друг от друга. Пусть число пластин будет  $V$ , толщина пластин —  $t$ , длина области регистрации —  $S$  ( $S = V \cdot d$ , поскольку  $t$  пренебрежимо мало по сравнению с  $d$ ). Предполагая, что ошибка в определении координат  $\delta = 200$  мк, и напряженность магнитного поля составляет 30 кГс, для относительной ошибки импульса фотона имеем:

$$\left( \frac{\Delta P}{P} \right)_\gamma = \left\{ \left( \frac{0.6t}{X_0} \right)^2 + \left( \frac{1.3 \cdot 10^{-3}}{d^2} \cdot P \right)^2 \right\}^{1/2}$$

где  $X_0$  — радиационная длина материала пластин,  $P$  — импульс частицы (ГэВ/с),  $t$  и  $d$  в м. Относительная ошибка в определении импульса фотона при фиксированных значениях  $S$  и полной вероятности конверсии  $\gamma$ -квантов  $W_\gamma$  оказывается минимальной при толщине пластин

$$t_{min} = 0.15 P^{1/3} \left[ \frac{9/7 \ln(1 - W_\gamma)}{S} \right]^{2/3} X_0 .$$

В таблице 3 приведены параметры оптимального набора пластин для  $\gamma$ -квантов с энергией 8 ГэВ.

При заданной эффективности регистрации  $W_\gamma$  увеличение длины области регистрации от 2 до 3 м не приводит к существенному уменьшению ошибки в определении импульса фотона. Поэтому целесообразно ограничиться длиной набора пластин, не превышающей 2 м.

Приемлемыми, как с точки зрения точности определения энергии  $\gamma$ -квантов, так и с точки зрения эффективности их регистрации, являются следующие возможные наборы пластин:

1)  $S = 2\text{м}; V = 5; t = 0.19 X_0; \left( \frac{\Delta P}{P} \right)_\gamma = 14\%; W_\gamma = 54\%.$

2)  $S = 2\text{м}; V = 6; t = 0.25 X_0; \left( \frac{\Delta P}{P} \right)_\gamma = 18\%; W_\gamma = 69\%.$

При этом точность определения импульса  $\gamma$ -кванта получается не хуже точности, достичь которой с помощью пропановой камеры, а фон от электронно-фотонных ливней не слишком велик. Грубый расчет показал, что для рассматриваемой области энергий вероятность генерации электромагнитного каскада в одной пластине не превышает 4%, если толщина  $t \leq 0.2 X_0$ .

Таблица 3

S, м	W <sub>T</sub> , %	t/x <sub>0</sub>	V	d, см	(ΔP/P) <sub>T</sub> %
I	32	0,19	3	33	14
	54	0,30	3	33	22
	69	0,39	4	25	29
	79	0,48	4	25	35
	90	0,62	5	20	46
2	32	0,12	4	50	9
	54	0,19	5	40	14
	69	0,25	6	33	18
	79	0,30	7	29	22
	90	0,39	8	25	29
3	32	0,09	6	50	7
	54	0,14	7	43	11
	69	0,19	8	38	14
	79	0,23	9	33	17
	90	0,30	10	30	22

Соответствующие ошибки в импульсе  $\Pi^0$ -мезона будут равны:

для 5 пластин  $(\Delta P/P)_{\Pi^0} = 2 \pm 10 \%$ ,

для 6 пластин  $(\Delta P/P)_{\Pi^0} = 4 \pm 12 \%$ .

На рис.7 приводится схема расположения набора из 5 пластин. По бокам и сзади помещаются толстые свинцовые пластины ( $\sim 2$  см Pb) для поглощения электронов низкой энергии, треки которых могли бы создать значительный фон.

По-видимому, установка в камере больших тонких пластин составит серьезную техническую задачу. Очевидно, сохранив суммарную толщину пластин прежней, первые пластины, имеющие сравнительно небольшие размеры, можно сделать более тонкими<sup>(4)</sup> ( $1/3 \pm 1/2 t_{min}$ ), а последние пластины, имеющие большие размеры, - более толстыми.

Вероятность регистрации  $\Pi^0$ -мезонов, разлет  $\gamma$ -квантов от распада которых происходит в конусе с углом  $60^\circ$  (из точки, указанной на рис.7), равна 30% (при 5 пластинах) или 50% (при 6 пластинах).

Как отмечено в работе<sup>(4)</sup>, вольфрам оказывается наиболее подходящим материалом для пластин, т.к. у него низкий коэффициент теплового расширения (при  $25^\circ K$ ,  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ) и высокая жесткость. К тому же вероятность сильного взаимодействия вторичных частиц в наборе вольфрамовых пластин достаточно низкая (эквивалентна вероятности взаимодействия в слое жидкого водорода толщиной 1,8 м). Как отмечалось выше, при этом возникают технические трудности, связанные с установкой в камере больших пластин малой толщины ( $\sim 1$  мм).

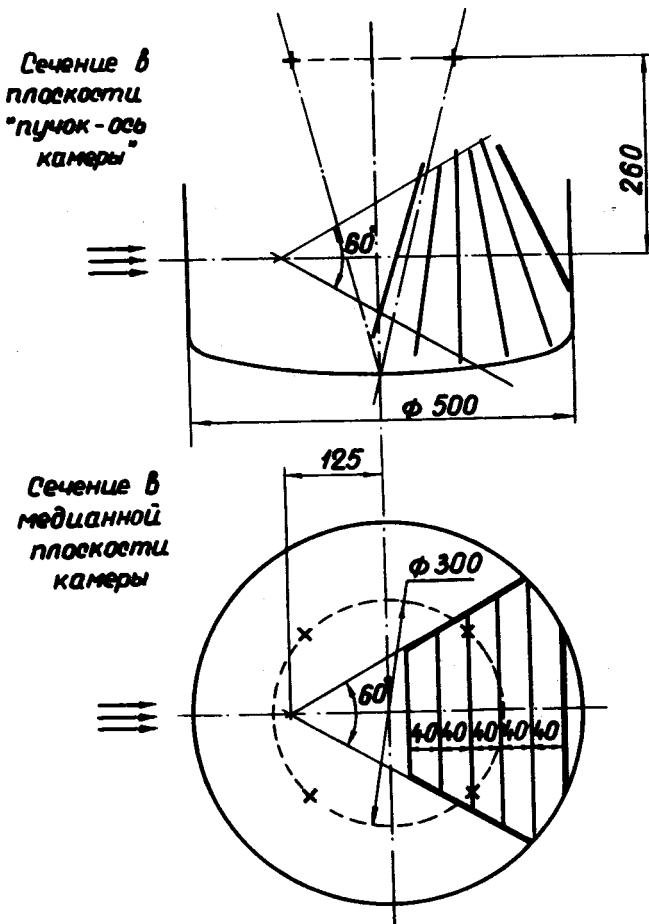


Рис. 7. Расположение пластин в рабочем объеме пузырьковой камеры.

Свойства алюминия не столь хороши, как вольфрама ( $\alpha = 0,25 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> и теплоемкость значительна). Из-за большей толщины алюминиевых пластин ( $t = 23$  мм) будет сильнее сказываться многократное рассеяние электронов. Кроме того, вероятность сильного взаимодействия на толщине одной пластины в четыре раза выше, чем в случае вольфрамовых пластин. Однако, очевидно, что задача установки алюминиевых пластин в объеме камеры решается более просто, чем для W.

Что касается железа и свинца, то здесь, по-видимому, имеются достаточно серьезные конструктивные трудности, особенно в случае с Pb ( $t = 1,5$  мм).

Наконец, следует заметить, что для проведения исследований при более низких энергиях первичных частиц необходимо установить также боковые пластины, чтобы охватить больший телесный угол.

б) Водород-неоновая смесь. Для регистрации  $\gamma$ -квантов можно использовать составную пузырьковую камеру, часть которой заполнена жидким водородом, а другая часть — тяжелой жидкостью или ее смесь с жидким водородом. Продел<sup>(14)</sup> показал, что смесь водорода с неоном, как рабочая жидкость для пузырьковой камеры, работает вполне удовлетворительно. Область чувствительности смеси к излучению лежит в интервале температур 26–29°K, т.е. в том же интервале, что и у жидкоговодородной пузырьковой камеры. Для такой составной камеры с размерами  $\phi 2,5 \times 5$  м была сделана грубая оценка эффективности регистрации  $\Pi^0$ -мезонов, рождающихся в части камеры, заполненной водородом.

Предполагалось, что объемная концентрация Ne в смеси может составлять 20, 28 и 50%. Таким концентрациям соответствуют значения радиационных длин  $X_0$ , равные 1,38; 1,00 и 0,55 м. Для простоты точка рождения  $\Pi^0$ -мезона фиксировалась в центре первой половины камеры. Принималось, что длина, на которой измеряются следы электронов и позитронов, составляет 1 м.

Результаты расчета представлены в таблице 4. Вероятность регистрации  $\Pi^0$ -мезонов вычислена для нескольких значений углов их вылета,  $\theta$ , и различных концентраций неона в смеси.

Таблица 4

$X_0$ , м	$W$ , % при $\theta$ , град.					
	2	10	15	20	25	30
0,55	78	79	80	60	30	0,5
1,02	46	48	50	40	12	0,2
1,38	33	33	35	30	7	0,1

Из таблицы видно, что в рассматриваемой камере вероятность регистрации  $\Pi^0$ -мезонов, углы вылета которых не превышают 20–25°, весьма высока (от 30 до 80% в зависимости от

концентрации неона). По-видимому, рассмотренная здесь составная камера будет достаточно эффективным детектором  $\Pi^0$ -мезонов при проведении многих экспериментов в области высоких энергий.

Требуют дополнительного изучения вопросы, связанные с увеличением концентрации неона в смеси, термодинамическими условиями работы смеси и их влиянием на рост пузырей, а также выбором материала, пригодного для использования в качестве стенки, разделяющей две части камеры. Ряд проблем возникает также в связи с генерацией электронно-фотонных ливней в неон-водородной смеси.

### § 7. Интенсивность первичного пучка

Для оптимального использования большого объема многометровой водородной пузырьковой камеры кажется целесообразным увеличить полную загрузку камеры первичными частицами за счет увеличения площади поперечного сечения пучка.

При условии сохранения возможности обработки событий такое увеличение интенсивности пучка обеспечило бы несомненные преимущества в постановке физических экспериментов, выражающиеся в уменьшении времени работы ускорителя, снижении затрат на фотопленку и уменьшении числа срабатываний камеры в расчете на одно событие. В этой связи представляется важным изучение зависимости условий просмотра и измерения событий от числа первичных частиц на снимке и поперечных размеров пучка.

Увеличение числа первичных частиц существенно удлинит время просмотра снимков и затруднит работу измерительных приборов из-за ухудшения фоновых условий. Однако эти трудности, по-видимому, могут быть преодолены с помощью быстродействующих сканирующих и измерительных автоматов. Поэтому, пожалуй, самая серьезная опасность, возникающая при увеличении интенсивности пучка, заключается в возможности потери информации о событиях. В этой связи необходимо выяснить, насколько сильно многочисленные взаимные пересечения и наложения треков могут повлиять на измерения углов вылета частиц, кривизны их следов и ионизации.

На основании результатов предварительных оценок можно ожидать, что при статистическом распределении пучка по площади  $\approx 10^3 \text{ см}^2$  в камеру можно вводить 50–100 первичных частиц. При этом доля совмещенных изображений первичных и вторичных следов не будет превышать 2%, а случайные пересечения пучка посторонними следами практически не повлияют на возможность измерения трека.

Таким образом, есть основания надеяться, что при интенсивности пучков  $\Pi$ -мезонов, протонов и антипротонов, достигающей 50–100 частиц на один снимок, еще окажется возможным получить всю необходимую информацию о зарегистрированных событиях.

При прохождении через входное окно камеры частицы первичного пучка могут испытывать соударения с ядрами в материале окна, что должно привести к увеличению фона в камере. Если потребовать, чтобы число взаимодействий в окне не превышало 10 % от количества налетающих частиц, то эффективная толщина окна (толщина, измеренная вдоль направления полета частиц) должна быть не более 4 см в случае исполнения окон из бериллия или алюминия и не более 2 см в случае применения стали.

Конструктивные соображения относительно формы и толщины окна для ввода пучка в камеру приводятся в главе II.

### § 8. Размеры и форма камеры

Можно ожидать, что при соударениях частиц, происходящих при энергиях несколько десятков Гэв, углы вылета большинства вторичных частиц не будут превышать  $30^\circ$ . Так, согласно статистической теории множественного рождения, в (P-P)-столкновениях при энергии 40 Гэв под углами более  $30^\circ$  вылетает  $2 \cdot 10^{-4}$  %, а при 70 Гэв — менее  $10^{-5}$ % рожденных П-мезонов. Если пучок первичных частиц на входе камеры имеет поперечное сечение  $I \times 0,2 \text{ м}^2$ , а длина измерения равна 1,5 м, то для поперечных размеров камеры можно дать следующую оценку:

$$\text{ширина} - 2 \times I,5 \cdot \sin 30^\circ + I = 2,5 \text{ м},$$

$$\text{высота} - 2 \times I,5 \cdot \sin 30^\circ + 0,2 = 1,7 \text{ м}.$$

Длина камеры должна составлять по меньшей мере 3,5 м, так как, кроме длины измерения (1,5 м), необходимо учесть длину "области мишени" (1,5-2 м). При размерах  $2,5 \times 1,7 \times 3,5 \text{ м}^3$  рабочий объем камеры оказывается почти таким же, как и для французской камеры "Мирабель". Однако с помощью камеры "Мирабель" нельзя эффективно регистрировать  $\gamma$ -кванты, а также взаимодействия и распады странных частиц высоких энергий. Пространство, необходимое для размещения конверсионных пластин (см. § 6а), связанных с регистрацией  $\gamma$ -квантов, дополнительно составит около 2-х метров.

В интересующей нас области энергий большинство длин распада короткоживущих странных частиц лежит в интервале от 0,5 до 2 м (см. таблицу 5). Следовательно, в камере с указанными поперечными размерами и длиной 5 м можно будет с эффективностью от 60 до 95 % регистрировать все распады короткоживущих К-мезонов и гиперонов, возникающих в соударениях частиц высоких энергий.

При рассмотрении экспериментов, в которых с помощью пузырьковой камеры изучаются взаимодействия и распады гиперонов, можно считать, что передняя часть камеры ( $\sim 1 \text{ м}$ ) является областью генерации гиперонов, тогда как взаимодействия гиперонов происходят во второй части ( $\sim 2 \text{ м}$ ), а  $\gamma$ -кванты от П<sup>0</sup>-мезонов, образованных при распаде гиперонов, конвертируют в области размещения пластин ( $\sim 2 \text{ м}$ ). Тогда длина камеры в направлении пучка будет равняться приблизительно 5 м.

Таблица 5

P, Гэв/с	Средняя длина распада, см						
	$\Sigma^+$	$\Omega^-$	$\Xi$	$\Sigma^-$	$K_1^\circ$	$\Lambda^\circ$	$\Xi^\circ$
I	2	3	4	4	5	7	7
5	10	14	20	21	27	34	34
10	20	27	40	41	53	68	69
20	41	54	80	83	106	136	137
40	82	108	160	165	212	273	274
60	123	162	240	248	318	409	410

Таблица 6

Камера	Длина измерения, м	Число снимков	Число первичных частиц на снимке	Число рожденных гиперонов <sup>x)</sup>	Число взаимодействий гиперонов <sup>xx)</sup>
2 м	0,5	$2 \cdot 10^5$	10	$2,4 \cdot 10^4$	270
5 м	1	$2 \cdot 10^5$	20	$1,2 \cdot 10^5$	2010

х) вычислено в предположении, что  $\sigma_{pp \rightarrow \gamma + \dots} = 3 \text{ мб}$ .

xx) для импульсов гиперонов I Гэв/с в предположении, что  $\sigma_{\gamma p} = 15 \text{ мб}$ .

В таблице 6 и на рис.8 приведены результаты оценки числа вторичных взаимодействий гиперонов, образованных при соударениях протонов, имеющих импульс 60 Гэв/с, с протонами в двухметровой и пятиметровой водородных пузырьковых камерах. В расчетах предполагалось, что взаимодействия гиперонов происходят во всем объеме камеры, причем регистрируются лишь такие взаимодействия гиперонов, в которых длина следов вторичных частиц превышает длину измерения (1 м в пятиметровой и 0,5 м в двухметровой камере).

Импульсный спектр гиперонов рассчитывался для реакций  $p p \rightarrow p \Sigma^+ K^+ \bar{p} p \rightarrow p \Sigma^+ K^+ \pi^+ \pi^-$  по статистической модели множественного рождения с учетом периферических взаимодействий (квадрат переданного четырехмерного импульса не более  $0,2 (\text{Гэв}/\text{с})^2$ ).

Предполагается, что указанные на рис.9 размеры видимой области будут достаточны для наблюдения большинства мыслимых в настоящее время событий. Имея огромные преимущества перед малыми камерами в смысле эффективной регистрации событий со сложной генетикой процессов, пятиметровая камера вместе с тем способна обеспечить, как об этом говорилось в § 4, возможность определения большинства параметров событий с точностями, не худшими, чем достигаются на лучших камерах меньшего размера.

Для изучения взаимодействий при более низких энергиях конверсионные пластины целесообразно устанавливать также и с боковой стороны пучка с таким расчетом, чтобы

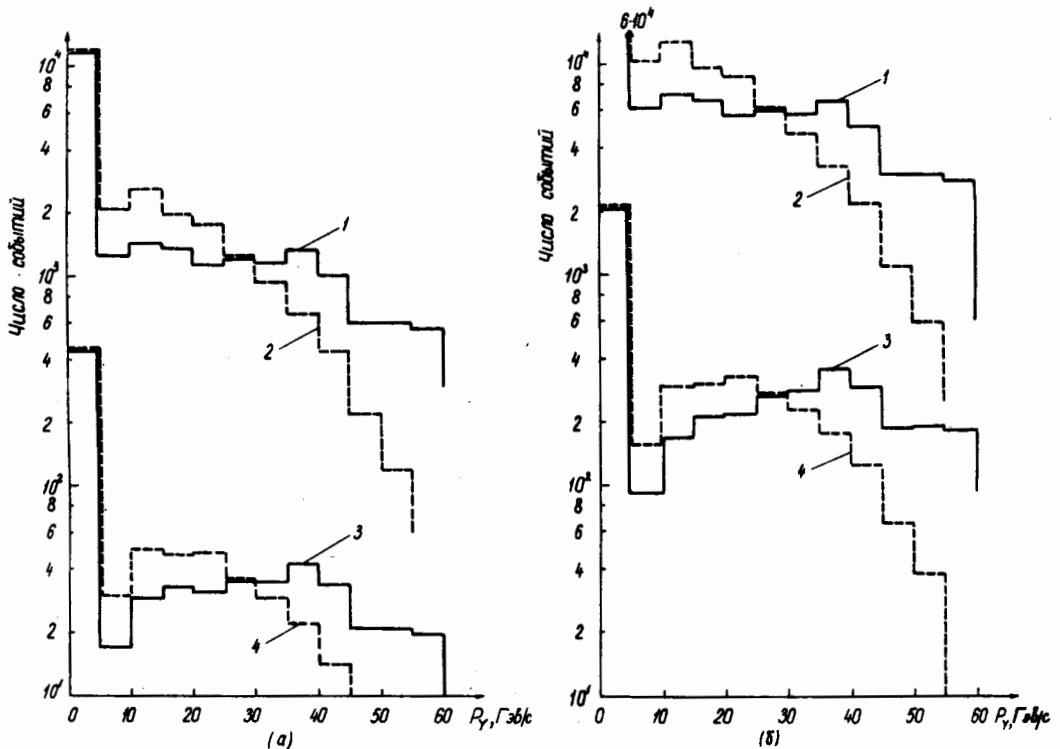


Рис. 8. Импульсные распределения гиперонов в (pp)-столкновениях и число вторичных гиперон - нуклонных взаимодействий: а) - в двухметровой водородной камере, б) - в пятиметровой водородной камере. 1 - число событий типа pp  $\rightarrow \pi\Sigma^+ K^+$  в зависимости от импульса гиперона; 2 - то же для реакции pp  $\rightarrow \pi\Sigma^+ K^+ \pi^+ \pi^-$ ; 3 и 4 - гистограммы числа вторичных взаимодействий гиперонов, образованных соответственно в реакциях pp  $\rightarrow \pi\Sigma^+ K$  и pp  $\rightarrow \pi\Sigma^+ K^+ \pi^- \pi^-$ .

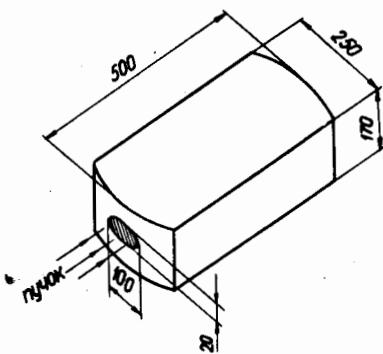


Рис. 9. Минимальные размеры жидколоводородной пузырьковой камеры, необходимые для проведения измерений на ускорителе с nominalной энергией протонов 70 ГэВ.

пространство между пластинами свободно просматривалось соответствующими фотоаппаратами. В этом случае целесообразной формой камеры является цилиндр с осью, направленной вдоль силовых линий поля.

Наиболее сильные аргументы в пользу такого исполнения камеры следует из прочностных характеристик соленоида из сверхпроводника, предназначенного для создания в рабочем объеме камеры магнитного поля высокой напряженности.

Независимо от формы камеры большой пространственный объем необходим для постановки нейтринных экспериментов. И в этом случае наиболее эффективное использование рабочего объема достигается для камеры, форма которой близка к сферической.

### ГЛАВА III

#### КОНСТРУКЦИЯ КАМЕРЫ

Тенденции в развитии методики жидколоводородных пузырьковых камер, наметившиеся в последнее время в связи со все увеличивающимися масштабами вновь создаваемых ускорителей элементарных частиц, а также неизменно возрастающими требованиями к точности и полноте получаемой экспериментальной информации, достаточно наглядно иллюстрируются таблицей 7, в которой собраны основные сведения о крупнейших действующих и разрабатываемых в настоящее время жидколоводородных пузырьковых камерах. Некоторые данные, содержащиеся в этой таблице, заимствованы из аналогичной таблицы, составленной В.Фаулером и приведенной Е.Пьюиттом на методической конференции в *Purdue*(15).

Несмотря на то, что общее направление развития камерной методики и основные требования к такого рода приборам в настоящее время в значительной мере определились, конструкционные проблемы, касающиеся выбора формы, объема и оптимального варианта исполнения до сих пор остаются открытыми. В каждом конкретном случае они решаются самостоятельно на основе компромиссного удовлетворения целому ряду подчас противоречивых требований. Среди наиболее важных требований, которым должна удовлетворять камера, следует отметить следующие:

1. Обеспечение условий для постановки широкой программы экспериментальных исследований, изложенной в главе I.
2. Достижение необходимой точности экспериментальной информации, получаемой с помощью такой установки.
3. Технологичность изготовления основных узлов установки и экономическая целесообразность.
4. Надежность работы всего комплекса сложного экспериментального оборудования и безопасность работы на нем.

Таблица 7

Основные данные по крупнейшим действующим, строящимся и разрабатываемым жидкокводородным пузырьковым камерам

Лаборатория	Ускоритель	Рабочий объем, м <sup>3</sup>	Материал корпуса	Система расширения	Магнит и напряженность поля	Система освещения и фотографирования	Год ввода в эксплуатацию	Общая стоимость (в млн. долларов)
CEN Saclay, (Франция)	Серпуховский ускоритель (70 ГэВ)	6	алюминиевый сплав	поршень	Электромагнит, ~20 кгс	Светлопольная (скотчлайт)	1969	-
CERN	CPS (28 ГэВ)	-	нержавеющая сталь	"	электромагнит, 16,8 кгс	-	1964	-
		20	"	"	Сверхпроводящий соленоид, ~35кгс	Светлопольная (скотчлайт)	1971	19,5
BNL (США)	AGS (33 ГэВ)	0,9	"	"	Электромагнит, 18 кгс	-	1963	6
		25	"	"	Сверхпроводящий соленоид, ~30кгс	Светлопольная (скотчлайт)	1971	16
ANL (США)	ZGS(12,5 ГэВ)	0,2	-	-	-	-	1964	1,7
		20	нержавеющая сталь	подвижное днище	Сверхпроводящий соленоид, 18кгс	-	1970	14
LRL(США)	Беватрон (6,2 ГэВ)	0,3	"	газовая	Электромагнит, ~18кгс	Темнопольная (растр)	1959	3,5
SLAC(США)	"Монстр"(20ГэВ)	-	-	подвижное днище	Электромагнит, 20 кгс	-	1967	2,5
		25	-	-	-	-	1971	15,0
RHEL (Англия)	"Нимрод" (7 ГэВ)	0,16	алюминиевый сплав	газовая	Электромагнит, 11,8 кгс	Темнопольная (напросвет)	1963	-
		2,5	нержавеющая сталь	поршень	Сверхпроводящий соленоид, 70кгс	Светлопольная (скотчлайт)	1971	1,05
Чикаго (США)	200 ГэВ	2	-	-	-	-	1972	5
		100	-	-	-	-	1973	35

## 5. Создание необходимых эксплуатационных удобств.

### § 9. Сравнительная оценка вариантов

Как уже отмечалось выше (см. § 8, гл. II), протяженность рабочей области жидколовородной пузырьковой камеры должна составлять не менее 5 метров для того, чтобы удовлетворить исходным требованиям эффективной регистрации основного класса событий, развивающихся в рабочем объеме камеры при энергиях первичных частиц 70 ГэВ и могущих представлять определенный интерес на стадии завершения сооружения установки. Детальное рассмотрение кинематических особенностей регистрации вторичных процессов, происходящих при этих энергиях в пузырьковой камере, приводит к убеждению, что большинство вторичных частиц заключено в узком конусе с углом при вершине, приблизительно равным  $60^{\circ}$ . Отмеченные обстоятельства, казалось бы, со всей очевидностью свидетельствуют в пользу вытянутой формы рабочего объема камеры. Преимущества камеры, выполненной в виде цилиндра, отмечались, в частности, в работе<sup>(16)</sup>, где одновременно с этим дан схематический набросок возможного конструктивного исполнения установки. Идеи создания такой установки нашли свое воплощение во французском проекте "Мира-бель"<sup>(17)</sup>, который в настоящее время находится в стадии осуществления.

Несмотря на отмеченные явные преимущества цилиндрической камеры с горизонтально направленной осью, большинство современных проектов не идет по этому пути в силу целого ряда присущих ему недостатков. Среди них главнейшим недостатком является трудность создания в протяженном объеме сильного магнитного поля с помощью безжелезных магнитных систем, основанных на использовании явления сверхпроводимости. Последние трудности сравнительно легко преодолимы при масштабах напряженностей магнитных полей, не превышающих 20 кГс. Однако при больших значениях напряженности магнитного поля (30 кГс и более), успешно реализуемых в настоящее время с помощью сверхпроводящих систем, приходится искать иного конструктивного решения.

Представляется, что оптимальной в этом случае будет камера, выполненная в виде вертикально поставленного цилиндра, имеющего диаметр, приблизительно равный 5 м и высоту около 3 м. Следует сразу же заметить, что такая форма камеры в максимальной степени удовлетворяет также требованиям, вытекающим из соображений, связанных с конструктивным исполнением светооптической системы, подробно рассмотренной в главе У, а также отвечает условиям эффективной регистрации нейтральных частиц и  $\gamma$ -квантов с помощью металлических пластин, помещенных в рабочий объем камеры (см. § 6, гл. II).

Достижение предельной точности проведения измерений с помощью пузырьковой камеры в существенной мере зависит от возможности обеспечения равномерного расширения рабочей жидкости по всему рабочему объему, а также от создания благоприятных условий для её термостатирования. Как будет показано ниже, эти требования также наиболее рационально удовлетворя-

ются в камере, выполненной в виде вертикально расположенного цилиндра, имеющего внутренний терmostатирующий экран и подвижное днище, охватывающее в плане весь рабочий объем.

Имеется несколько конструктивных решений, приблизительно с одинаковой степенью полноты удовлетворяющих поставленным выше требованиям. При выборе целесообразного конструктивного решения, помимо основных соображений, изложенных в начале параграфа, мы основывались на ряде дополнительных предпосылок, которые могут быть аргументированы следующим образом.

Известно<sup>(7)</sup>, что до последнего времени большинство крупных камер (более 1 метра) строилось с верхним расположением расширительной системы. Логически это оправдано тем, что при такой компоновке камеры наиболее естественным путем удается избежать влияния на рабочий объем паразитных вскиланий жидкости вблизи поршня. Кроме того, в этом случае легко осуществляется температурный переход от рабочей среды камеры к паровой фазе над поршнем, необходимой для нормального функционирования расширительного механизма. Именно этот путь и был исходным в первоначальных вариантах проектов многокубовых камер<sup>(2,3)</sup>; такое же исполнение принято в окончательном виде для французской камеры "Мирабель".

Наиболее существенным недостатком верхнего расположения расширительной системы в случае её исполнения с открытым поршнем, как это имело место в первоначальных проектах, является загрязнение рабочего объема продуктами истирания поршневого механизма и возникновение осадка на отражающих поверхностях днища камеры. Последующие американские проекты<sup>(18-19)</sup>, так же как и проект, разрабатываемый в ЦЕРН<sup>"e"(20)</sup>, пошли по пути размещения расширительной системы в нижней части камеры.

Действительные преимущества подобного решения в известной мере являются сомнительными, хотя и не исключены некоторые достоинства в связи с удобством размещения оптических устройств в верхней части камеры и созданием холодной зоны в области расширительного механизма, что крайне желательно из соображений исключения появления паразитных вскиланий в районе максимального тепловыделения. Поэтому, прежде чем остановиться на каком-либо конкретном решении, нам представлялось важным проработать несколько вариантов конструктивного исполнения камеры и, в частности, казалось целесообразным рассмотреть совмещенный вариант камеры, который, компромиссно сочетая в себе положительные качества известных методов исполнения, давал бы возможность без существенных затрат перейти от одного варианта к другому. Эскизные проработки нескольких вариантов приведены в Приложении I.

На рис.10 представлен схематический чертеж камеры, конструкция которой основывается на детальном анализе рассмотренных вариантов и, на наш взгляд, с наибольшей полнотой охватывает новейшие достижения в области сооружения многокубовых жидколовородных пузырьковых камер. Отдельные общеконструкционные элементы, связанные с рабочим объемом и вакуумным кожухом камеры, рассмотрены в следующем параграфе. Описание узлов, имеющих самостоятельное

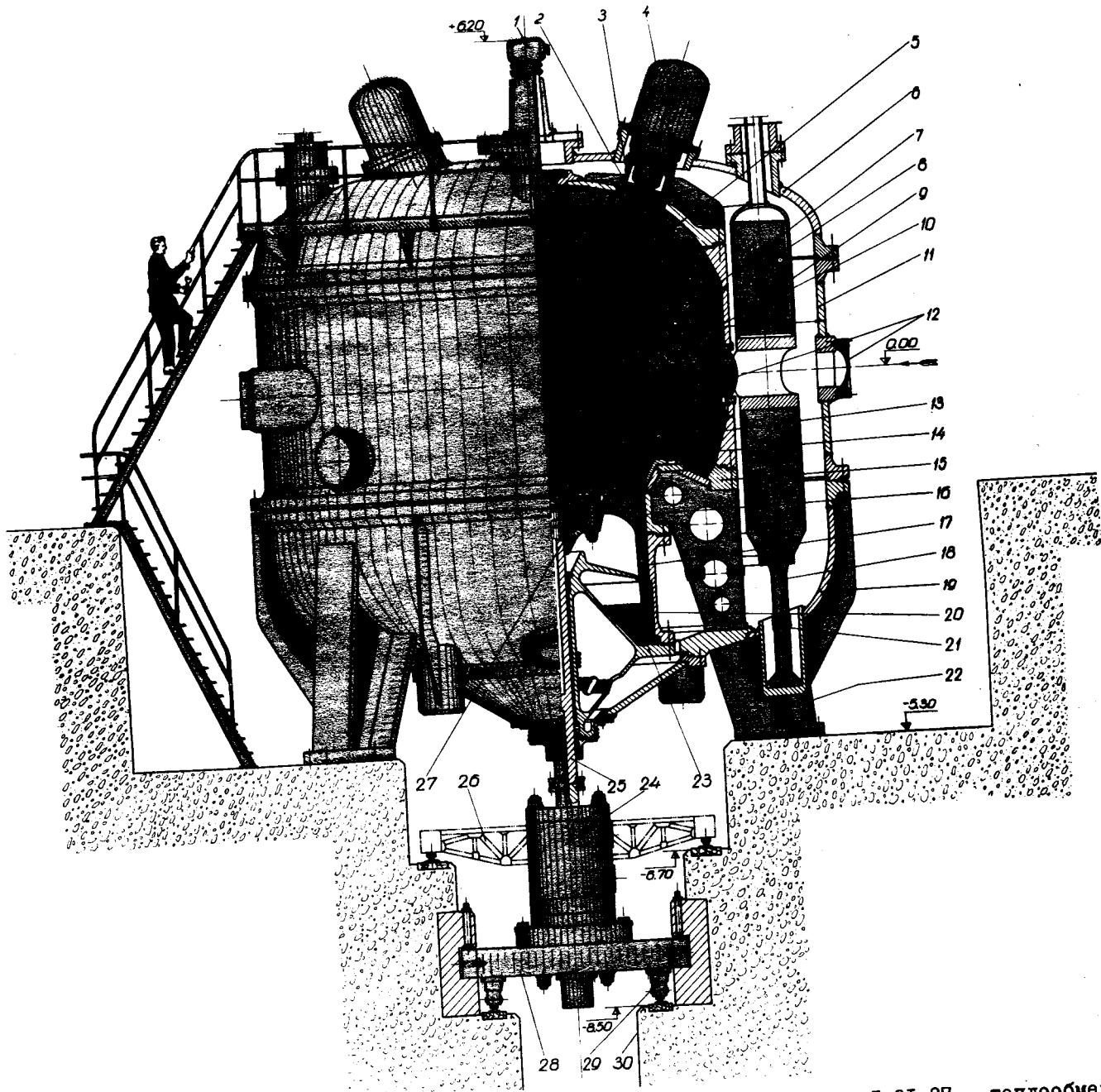


Рис. 10. Схематический чертеж камеры. 1 - перископ; 2 - иллюминатор; 3,21,27 - теплообменники; 4 - защитный кожух фотоаппарата; 5 - днище камеры; 6 - днище вакуумного кожуха; 7 - термостатирующий экран; 8 - соленоид; 9 - гелиевый криостат; 10 - обечайка корпуса; 11 - обечайка вакуумного кожуха; 12 - выпускные окна; 13 - подвижное днище; 14 - тороидальный сильфон; 15 - основание пузырьковой камеры; 16 - поршень; 17 - цилиндр; 18 - опорный сильфон; 19 - основание вакуумного кожуха; 20 - гильза; 22 - опорная колонна; 23 - фланец-лабиринт расширительной системы; 24 - гидропривод; 25 - шток поршня; 26 - монтажно-транспортное устройство; 28 - платформа; 29 - гидроподъемник; 30 - рельсовый путь.

значение и заключающих в себе важные принципиальные особенности, дается в соответствующих разделах.

#### § 10. Некоторые элементы конструкции

а) Корпус камеры (см.рис.10) герметизирует рабочий объем, заполняемый жидким водородом или жидким дейтерием при температурах, соответственно равных 27 и 34<sup>0</sup>К. Он включает в себя шесть основных деталей: 1) цилиндрическую обечайку с впускными окнами и фланцами; 2) верхнее съемное днище с четырьмя иллюминаторами для фотографирования и одним - для визуального наблюдения; 3) переходную горловину расширительного устройства, на которой через посредство тороидального сильфона монтируется подвижное нижнее днище и термостатирующий теплообменник; 4) цилиндр расширительного механизма с гильзой для скольжения поршня; 5) нижнюю крышку расширительного устройства с направляющими штока поршня и гидравлическим затвором подпоршневого пространства и 6) опорный стакан.

Все перечисленные элементы корпуса камеры представляют собой сварные конструкции, выполняемые из немагнитной аустенитной нержавеющей стали марки IX18H9T. Уплотнение разъемных элементов корпуса предусматривается осуществлять с помощью широко используемых в настоящее время на больших криогенных установках уплотнительных элементов, основанных на применении тонких пленок из фторопласта или индия, нанесенных на проволоку или на специальные упругие элементы из нержавеющей стали.

Корпус камеры подвержен внутреннему давлению, в рабочем состоянии равному 10 ат и в нестационарном режиме могущему достигать 14 ат. Он должен быть рассчитан также на избыточное внешнее давление, равное 1 ат. Особые требования предъявляются к чистоте обработки внутренней поверхности, которая не должна иметь царапин, способных вызвать паразитные вскипания жидкости на стенке камеры. Повышенные требования к точности изготовления и чистоте обработки накладываются также на разъемные соединения и поверхности скольжения.

б) Внешний вакуумный кожух заключает в себе все низкотемпературные узлы камеры. Он изготавливается из немагнитной нержавеющей стали марки IX18H9T. Кожух рассчитывается на внутреннее давление 14 ат, которое реализуется в аварийном случае, и на внешнее давление 1 ат, что соответствует нормальным эксплуатационным условиям.

Внешний кожух содержит пять основных крупных элементов: 1) верхнее съемное днище, снабженное горловинами для ввода в камеру осветительных и фотографических устройств, а также для вывода коммуникаций; 2) цилиндрическую обечайку, снабженную фланцами, окнами для прохода пучка и горловинами для подсоединения вакуумной системы и системы аварийной защиты; 3) нижнее съемное днище, являющееся силовым опорным звеном для всех элементов конструкции; 4) коническую крышку нижнего люка, обеспечивающую доступ к механизму расширения; 5) опорные колонны.

Требования к изготовлению вакуумного кожуха являются обычными для сосудов, предназначенных под высокий вакуум. Уплотнение элементов вакуумного кожуха должно осуществляться с помощью резины, имеющей повышенную морозостойкость.

в) Тонкостенные оболочки окон на внешнем вакуумном кожухе и корпусе камеры являются весьма ответственными элементами конструкции камеры. Окна служат для прохода пучка первичных частиц. Чтобы уменьшить число фоновых взаимодействий частиц с материалом стенок камеры, количество вещества на пути пучка частиц должно быть минимальным и, как показывает расчет (см. § 7, гл.П), суммарная толщина материала в направлении движения частиц должна быть не более 4 см в случае применения бериллия и алюминия и не более 2 см в случае - стали. Применение алюминия и бериллия в нашем случае нецелесообразно.

Из конструкционных соображений целесообразно размеры окна на внешнем вакуумном кожухе выбирать большими, чем на кожухе камеры. С учетом этих замечаний для заданной величины расчетного давления  $I_4$  ат и запаса прочности  $\mu = 4,25$  будем иметь:

- а) диаметр внешнего окна - 1000 мм; толщина оболочки - 14 мм;
- б) диаметр внутреннего окна - 600 мм; толщина оболочки - 6 мм.

Для увеличения эффективности использования камеры на её входе предполагается установить специальное шаговое отклоняющее устройство (см.гл.УП), позволяющее равномерно распределить пучок входящих частиц в пределах медианной плоскости камеры. Тогда, для отклонения пучка частиц по диаметру камеры на 3 м, необходимо иметь несколько таких окон.

Возможность исполнения окон продолговатой формы без нарушения прочностных характеристик сосудов требует дополнительного тщательного изучения и последующего моделирования.

г) Вакуумная система.Чтобы ограничить теплоприток через остаточный газ к низкотемпературным узлам камеры, пространство между корпусом камеры и внешним кожухом эвакуируется. В настоящее время в больших криогенных системах применяются два типа теплоизоляции: 1) многослойная суперизоляция, наносимая непосредственно на защищаемый узел и 2) многослойная суперизоляция дьюарного типа, покрывающая внутреннюю поверхность вакуумного кожуха <sup>(21)</sup>.

В обоих случаях пространство, занятое суперизоляцией, нуждается в откачке. Однако в первом случае необходимый вакуум должен быть выше, нежели во втором. С другой стороны, несмотря на существенные преимущества теплоизоляции дьюарного типа, которые полностью реализуются в системах, имеющих односторонний верхний разъем, она трудно применима к конструкции камеры рассматриваемого вида. Поэтому ниже (см.рис.II) показана схема вакуумной системы, предусматривающей откачуку вакуумного кожуха камеры в предположении, что используется суперизоляция первого типа. Необходимое разрежение в этом случае должно быть не хуже  $10^{-5}$  мм  $Hg$ .

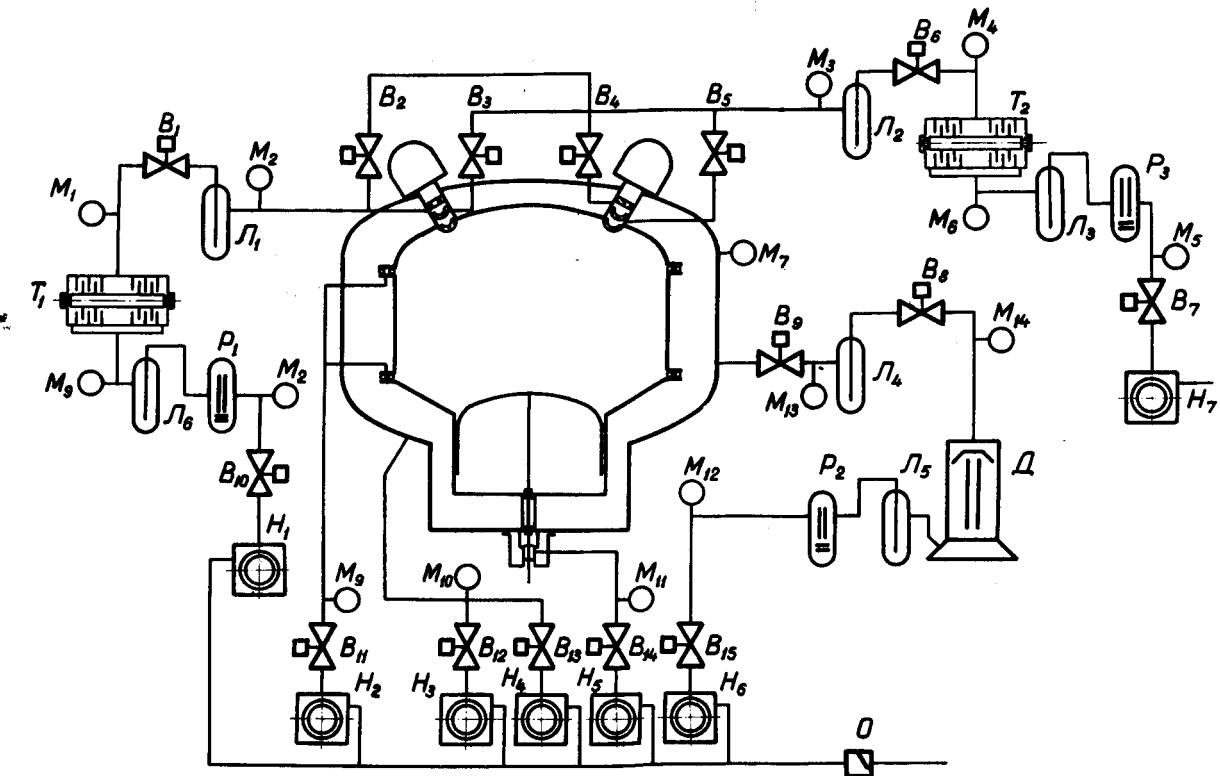


Рис. II. Вакуумная система пятиметровой камеры. В - клапаны; Д - диффузионный паромасляный насос; Л - вымораживающие ловушки; М - вакуумметры; Н - механические вакуумные насосы с масляным уплотнением; Р - двухроторные вакуумные насосы; Т - турбомолекулярные насосы; О - пламепреградитель.

Помимо основного объема вакуумного кожуха с относительно невысокими требованиями к степени "чистоты" вакуума, имеются небольшие полости, разграничивающие оптические элементы иллюминатора камеры (см.рис.26 и 27), которые должны откачиваться до высокого вакуума (лучше  $10^{-6}$  мм  $Hg$ ). Уровень требований к "вакуумной гигиене" этих объемов существенно выше, поскольку они входят в комплекс оптических элементов камеры, которые в течение всего периода работы камеры должны сохранять высокую прозрачность.

Наконец, последний объем, нуждающийся в независимой откачке, заключен между двумя уплотнительными манжетами штока поршня расширительного устройства (см.позиции II и 28 на рис.13). Откачка этого объема должна производиться каждый раз после очередной смены рабочих уплотнительных манжет (позиция II на том же рисунке).

Основные характеристики, касающиеся вакуумной системы, указаны в спецификации в конце главы, а её принципиальная схема показана на рис.II.

Основные требования к вакуумной системе, используемой на жидколовородной пузырьковой камере, обусловлены, главным образом, наличием взрывоопасной среды, находящейся под давлением, доходящим в аварийном случае до 14 ат. Поэтому принимаются максимальные меры предосторожности, направленные на защиту вакуумного оборудования камеры от воздействия этой среды. Аналогично тому, проникновение атмосферы в вакуумное пространство камеры, в случае аварии с вакуумной системой, должно быть полностью исключено.

Для этого на основных магистралях откачки, как указано на схеме, предусматриваются автоматические быстродействующие клапаны и шиберы, перекрывающие линии откачки в случае повышения давления в вакуумном кожухе, а также при любых нарушениях в системе откачки. В последнем случае, чтобы избежать возможности возникновения серьезной аварийной ситуации, предусматривается стопроцентный резерв по всем системам откачки.

д) Аварийная линия диаметром 500 мм предусматривается для быстрой эвакуации водорода из вакуумного кожуха при серьезных нарушениях в работе камеры. Открытый конец этой линии подводится к специальному торшеру, находящемуся на расстоянии 500м от установки. Торшер снабжается постоянно горящим факелом природного газа с электрическим запальником.

Аварийная магистраль должна быть выполнена из нержавеющей стали. Отдельные звенья этой линии соединяются между собой через посредство медных или других уплотнительных элементов, способных противостоять низким температурам. Надежность уплотнения должна быть достаточно высокой, чтобы предотвратить возможность притока воздуха в магистраль и, тем самым, исключить возникновение взрывоопасной концентрации.

## СПЕЦИФИКАЦИЯ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ.

### Система откачки вакуумного кожуха .

Основные параметры системы.

- 1.Откачиваемый объем - 120 м<sup>3</sup>.
- 2.Разрежение - 10<sup>-5</sup> торр.
- 3.Газоотделение стенок - 33,6·10<sup>-2</sup> торр.л/сек.
- 4.Необходимая скорость откачки - 70000 л/сек.

Высоковакуумные агрегаты.

а) Паромасляные диффузионные насосы.

1.Максимальная производительность - 40000л/сек.

2.Количество - 4 шт.

3.Общая потребляемая мощность - 22 квт.

б) Двухроторные вакуумные насосы.

1.Производительность - 500 л/сек.

2.Количество - 4 шт.

3.Общая потребляемая мощность - 28 квт.

в) Механические насосы с масляным уплотнением.

1.Производительность - 45 л/сек.

2.Количество - 4 шт.

3.Общая потребляемая мощность - 28 квт.

Форвакуумные насосы ( механические с масляным уплотнением ).

1.Производительность - 120 л/сек.

2.Количество - 8 шт.

3.Общая потребляемая мощность - 160 квт.

### Система откачки промежуточных полостей иллюминаторов.

Основные параметры системы.

1.Откачиваемый объем - 0,3 м<sup>3</sup>.

2.Разрежение- 10<sup>-6</sup> торр.

3.Газоотделение стенок - 1,2·10<sup>-4</sup> торр.л/сек.

4.Необходимая скорость откачки - 200 л/сек.

Турбомолекулярные насосы.

1.Производительность - 200 л/сек.

2.Количество - 2 шт.

1.Производительность - 50 л/сек.

2.Количество - 2 шт.

3.Общая потребляемая мощность - 1,4 квт.

Механические насосы с масляным уплотнением.

1.Производительность - 16,5 л/сек.

2.Количество - 2 шт.

3.Общая потребляемая мощность - 5,6 квт.

## ГЛАВА IV

### СИСТЕМА РАСШИРЕНИЯ

Для нормального функционирования пузырьковой камеры необходимо периодически осуществлять перегрев рабочей жидкости. В камерах существующих конструкций перегрев достигается сбросом давления в рабочем объеме до значений, лежащих ниже равновесного состояния системы газ-жидкость при данной температуре. Сброс давления может производиться следующими двумя способами: 1) путем быстрого увеличения объема рабочей жидкости или 2) путем быстрого выброса части рабочей жидкости или газа из объема пузырьковой камеры.

Для больших жидкокислородных пузырьковых камер с объемом рабочей жидкости в несколько десятков кубометров нецелесообразно применение расширительной системы, производящей сброс давления по второму способу. Это обусловлено тем обстоятельством, что в случае выброса газа значительно возрастает холодопроизводительность криогенной установки, а выброс жидкости приводит к необходимости создания специальных криогенных насосов высокой производительности и быстродействующих клапанов с большими проходными сечениями, способных работать при температуре жидкого водорода.

Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только расширительную систему, производящую сброс давления по первому способу.

Эквивалентная механическая схема расширительной системы камеры показана на рис. I2. Действие водорода в пузырьковой камере *A* и рабочей среды в гидроприводе *D* на поршень *C* подобно действию пружин, которые условно изображены в виде упругих элементов *B* и *E*.

В стационарном состоянии поршень занимает верхнее положение.

Сброс давления водорода в чувствительном объеме камеры достигается путем быстрого перемещения поршня вниз за счет усилия *F*, действующего со стороны гидропривода. Движение поршня вниз будет продолжаться до тех пор, пока приобретенная поршнем под действием силы *F* кинетическая энергия не перейдет полностью в потенциальную энергию всех действующих на поршень упругих элементов или пока она не будет погашена в результате его соприкосновения с демпфирующим устройством.

Применение демпферов, широко практикуемое на малых камерах, в данном случае является нецелесообразным, так оно приводит к весьма значительной потере энергии вследствие того, что при торможении поршня вся кинетическая энергия рассеивается в демпфере. Та же энергия в расширительном устройстве без демпфера превращается в потенциальную энергию упругих элементов, которая, в свою очередь, вновь переходит в кинетическую энергию поршня и используется для сжатия рабочей жидкости. Неизбежные при этом относительно небольшие потери энергии компенсируются за счет притока извне.

Указанные обстоятельства послужили основным аргументом в пользу однозначного выбора для рассматриваемой пятиметровой жидкоквадородной пузырьковой камеры расширительного устройства в варианте без демпфера.

### § II. Конструкция узла изменения давления

Метод сброса давления сопряжен с рядом конструктивных неудобств, которые становятся особенно ощутимыми при проектировании больших низкотемпературных камер. Имелся ряд попыток привести камеру в состояние чувствительности к ионизирующему излучению иными способами, например, путем пропускания через рабочий объем импульса ультразвука или импульса высокой частоты. Однако эти попытки пока практического значения не имели, и поэтому в настоящее время наиболее реальным, по-прежнему, остается способ механического расширения, успешно применяемый в ряде существующих конструкций.

Схематический чертеж камеры с расширительным устройством этого вида представлен на рис.10. К основным рабочим звеньям узла изменения давления, показанного на рис.13, принадлежат: поршень 3, торOIDальный сильфон 35 и подвижное днище I. Особенности конструктивного исполнения этих устройств рассматриваются ниже.

а) Поршень является наиболее ответственным узлом механизма расширения камеры. Он подвержен двоякого рода механическим нагрузкам – динамическим и статическим. Поршень находится в зоне действия сильного неоднородного магнитного поля. Последнее обстоятельство накладывает ограничение на выбор материала поршня. Стремление предельно возможно уменьшить влияние индукционных и вихревых токов на работу подвижных частей расширительного механизма с одновременным выполнением условий обеспечения необходимой прочности, легкости и низкой теплопроводности материала конструкции привело всех исследователей, работающих в этом направлении, к мысли о целесообразности применения для этих целей специальных пластических масс, изготовленных на основе использования стекловолокна. Наиболее подходящими материалами для поршня являются пластмассы марок ЗФ32-301 и СВАМ, технология производства которых достаточно хорошо освоена.

Дальнейшие исследования этих материалов в направлении выяснения их поведения в условиях водородных температур начаты в настоящее время совместной группой специалистов ОИЯИ и ВИАМ'я. Ожидается, что эти исследования дадут полноценную информацию относительно окончательного выбора конструкции и технологии изготовления поршневого механизма.

Поршень связан с гидравлическим приводом через посредство полого штока 27, выполненного из материала, имеющего низкий коэффициент теплопроводности при этих температурах. По механическим свойствам наиболее пригодной для этой цели является нержавеющая сталь, теплопроводность которой резко падает в сторону низких температур (приблизительно в  $10^4$  раз).

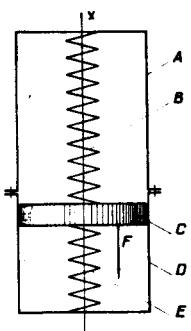


Рис. I2. Эквивалентная механическая схема расширительной системы. А - корпус камеры; В и Е - упругие элементы; С - поршень; D - корпус расширительной системы; F - сила, действующая на поршень в начале цикла расширения.

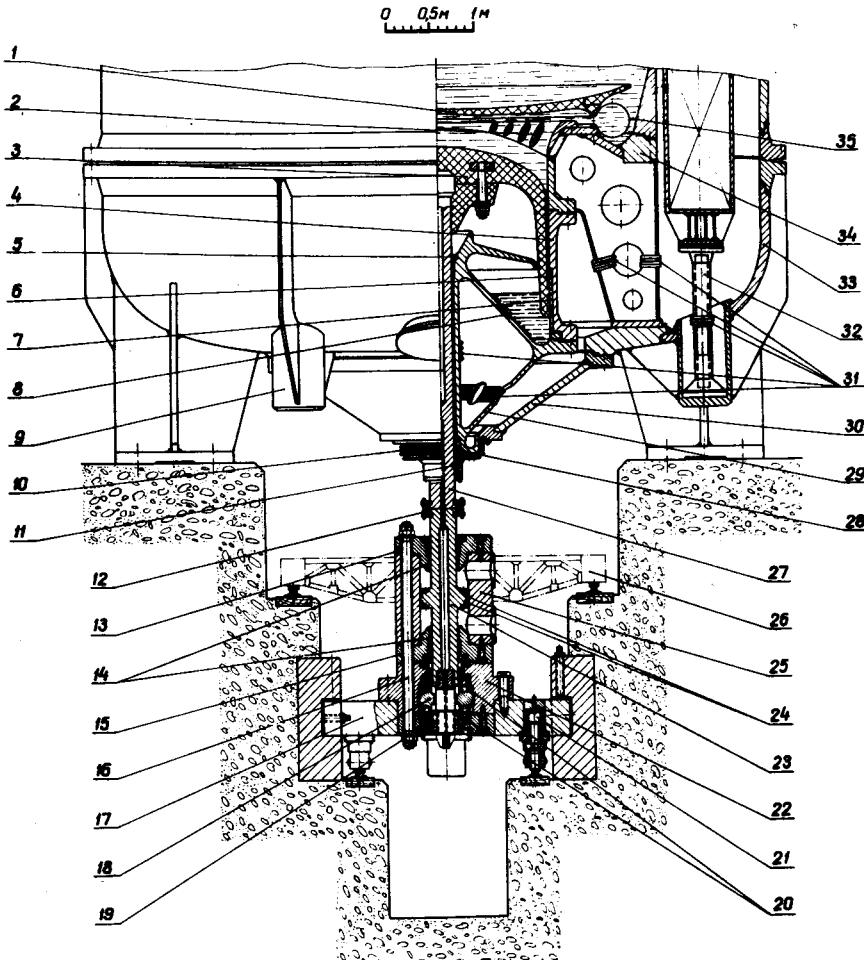


Рис. I3. Схематический чертеж системы расширения. 1 - подвижное днище; 2, 8 и 31 - теплообменники; 3 - поршень; 4 - цилиндр; 5 и 14 - направляющие втулки; 6 - гильза; 7, II и 24 - уплотнения; 9 - опорный стакан; 10 - сильфон-компенсатор; 12 - стяжка разъемная; 13, 15 и 30 - днища; 16 - шпилька; 17 - платформа; 18 - поршень аварийного цилиндра; 19 - крышка; 20 - пружина; 21 - гидроподъемник; 22 - аварийный цилиндр; 23 - поршень рабочего цилиндра; 25 - рабочий цилиндр; 26 - монтажно-транспортное приспособление; 27 - шток; 28 - надувное уплотнение; 29 - силовая растяжка; 32 - опора соленоида; 33 и 34 - опорные днища; 35 - тороидальная сильфон.

Через шток поршня происходит значительный приток тепла к камере. Чтобы ограничить этот теплоприток, направляющая втулка 5 усиленно охлаждается. Следует иметь в виду, что, так как шток работает в условиях низких температур, направляющие втулки работают в режиме сухого трения. Уплотнение штока достигается с помощью специальных манжет II. Дополнительная надувная манжета 28 предусматривается для герметизации подпоршневого пространства в случае повреждения основных манжет. Смена манжетных уплотнений II в этом случае может производиться при наличии водорода в камере.

Чтобы иметь возможность вести ремонт и профилактику гидравлического узла независимо от камеры, шток выполняется разъемным. Механическая связь обеих частей штока между собой осуществляется стяжкой 12.

б) Тороидальный сильфон осуществляет гибкую связь между корпусом камеры и подвижным днищем, герметизируя рабочий объем от пространства, занятого поршневым расширительным механизмом. Основным требованием к этой гибкой связи является обеспечение её высокой долговечности (более  $10^6$  циклов). Как было показано в работе<sup>(22)</sup>, такая долговечность вполне достижима.

Для исследования поведения тороидальных сильфонов в рабочих условиях и с целью освоения технологий их производства, методом гидроштамповки была изготовлена для модели камеры опытная партия из 10 сильфонов с наружным диаметром 750 мм. Сильфоны выполнены с отбортовкой (см. рис. I4 и I5), позволяющей осуществить присоединение их к фланцам так, чтобы наиболее рациональным образом передать нагрузку, полностью исключив напряжения изгиба в сварном шве. Изготовление опытной партии сильфонов создало полную уверенность в возможности освоения производства тем же методом больших сильфонов для пятиметровой камеры.

Чтобы иметь возможность детально исследовать прочностные характеристики тороидальных сильфонов и определить их усталостную прочность, был построен специальный стенд с двумя сильфонами (см. рис. I6), на котором в условиях, приближенных к рабочим, можно провести все необходимые испытания. Результаты предварительных тензометрических измерений, выполненных при комнатной температуре, показывают, что напряжения в наиболее опасных сечениях не выходят за пределы нормы. Одновременно с этим освоены некоторые технологические приемы, связанные с изготовлением, сваркой, уплотнением и последующим креплением полученных гибких элементов.

в) Подвижное днище играет роль диафрагмы, отделяющей рабочий объем камеры от расширительного механизма. Оно имеет многоцелевое назначение. Во-первых, оно позволяет выравнить движение жидкости во время расширения; во-вторых, обеспечивает необходимую гигиену рабочего объема камеры, предотвращая попадание в него загрязняющих частиц, либо газовых пузырей, являющихся следствием работы поршня; в-третьих, оно является тепловым барьером,

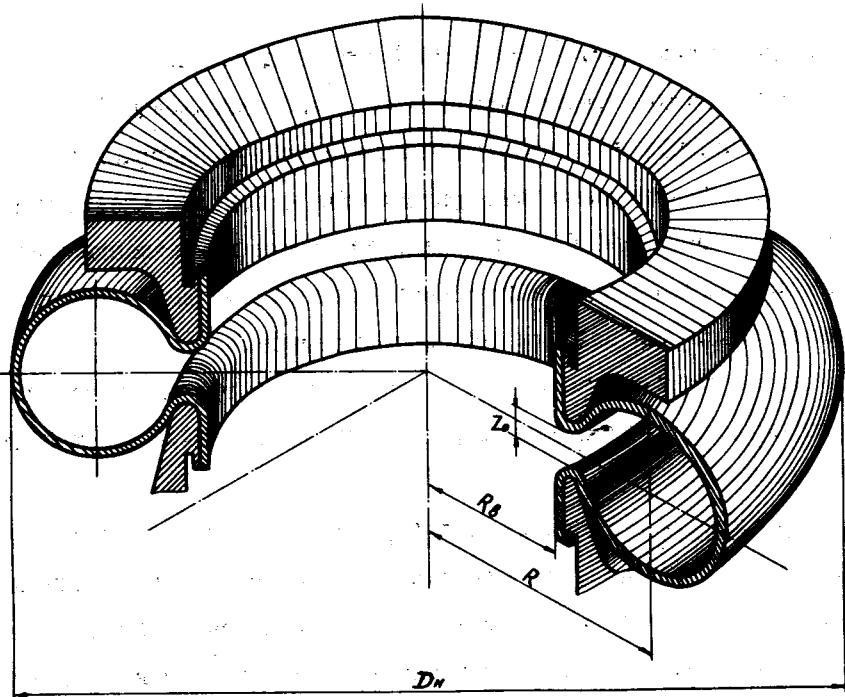


Рис. I4. Крепление торOIDального сильфона к фланцам.

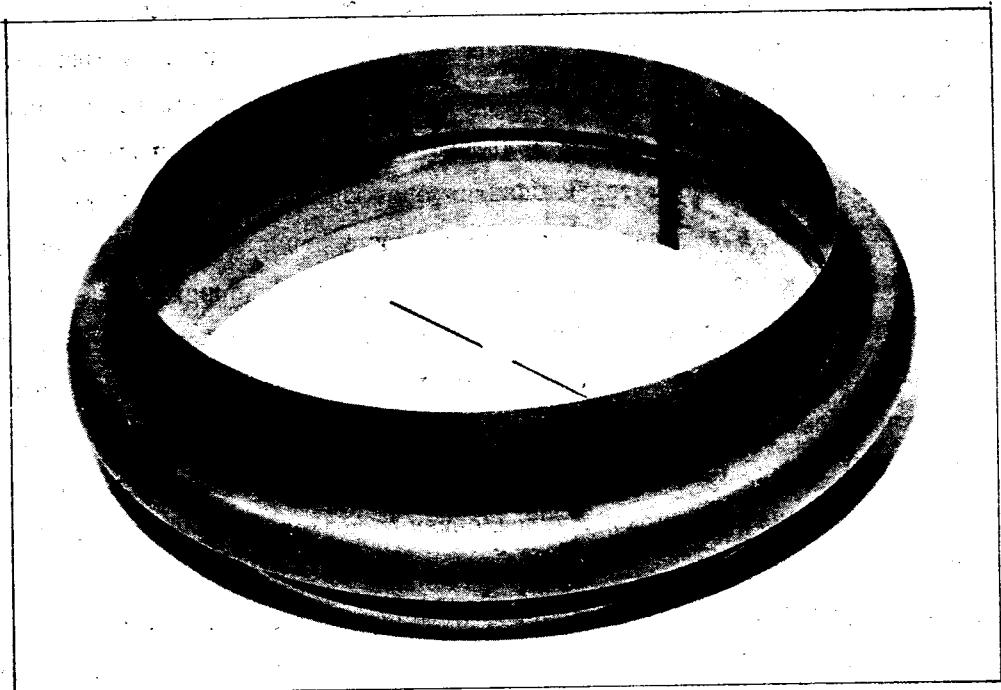


Рис. I5. Опытный образец торOIDального сильфона.

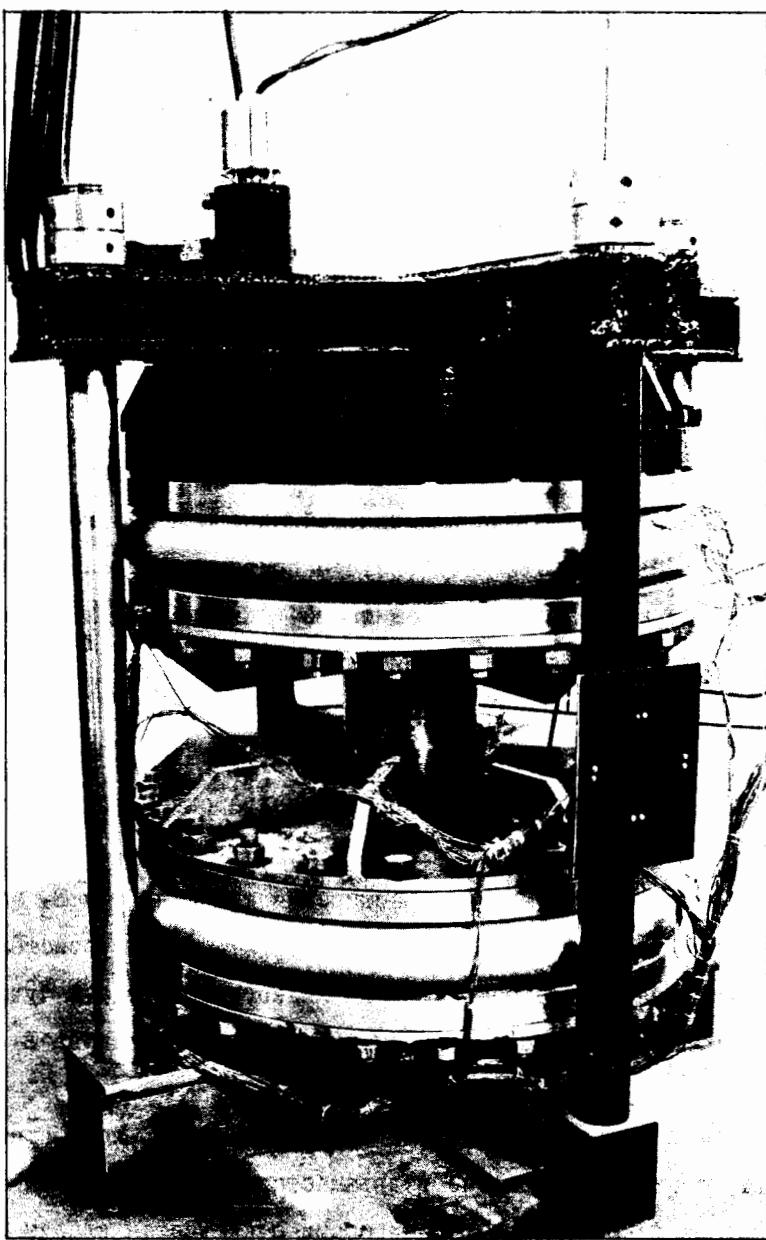


Рис. I6. Установка для испытания торOIDальных сильфонов на усталостную прочность.

локализующим холодную зону в нижней части камеры.

Так же, как и поршень, подвижное днище выполняется из пластмассы. Применение пластмассы с малой теплопроводностью дает возможность уменьшить тепловой контакт зоны измерения с зоной действия расширительного механизма. Форма днища выбирается из соображений получения максимального эффекта отражения от покрытия из скотчлайта, которое наносится на поверхность подвижного днища со стороны рабочего объема. Вопрос выбора формы днища подробно обсуждается в § 15, гл.У. Подвижность днища обеспечивается торOIDальным сильфоном, на который оно опирается по всему периметру.

### § 12. Схема гидравлического привода

#### а) Принцип действия.

На рис. I7 представлена принципиальная схема расширительной системы проектируемой в ОИЯИ пятиметровой жидкокородной пузырьковой камеры.

Период колебаний поршня расширительной системы определяется жесткостью жидкого и газообразного водорода в рабочем объеме пузырьковой камеры и жесткостью газа в аккумуляторах  $A_{II}$  и  $A_{2I}$ . Увеличение жесткости всей системы приводит к уменьшению периода колебаний поршня и, следовательно, к уменьшению паразитного вскипания жидкого водорода на стенках камеры. При выбранном диаметре поршня увеличение жесткости всей системы достигается за счет увеличения жесткости газа в аккумуляторах  $A_{II}$  и  $A_{2I}$ .

В стационарном состоянии, как показано на рис. I7, клапаны  $B_2$  и  $B_3$  - открыты, а клапан  $B_1$ -закрыт. При этом полость I гидравлического цилиндра оказывается соединенной со сливным баком, а аккумулятор  $A_{II}$  с аккумулятором  $A_{12}$ .

Непосредственно перед началом цикла расширения клапаны  $B_2$  и  $B_3$  закрываются, отсоединяя тем самым полость I гидроцилиндра и аккумулятор  $A_{II}$  от гидросистемы.

Сила  $F$ , необходимая для сброса давления жидкого водорода в чувствительном объеме пузырьковой камеры, создается путем присоединения с помощью клапана  $B_1$  к полости I аккумулятора  $A_{II}$  с давлением  $P_{II}$ .

При работе пузырьковой камеры, как уже отмечалось выше, неизбежно возникают потери энергии и в результате этого поршень не возвращается в исходное верхнее положение. Для компенсации этих потерь в конце хода рекомпрессии открывается клапан  $B_2$ , а клапан  $B_1$  закрывается. При этом жидкость из полости I гидроцилиндра начинает вытекать в сливной бак, давление в полости I понижается до уровня  $P_1$  и поршень останавливается в исходном верхнем положении.

Компенсация потерь энергии приводит к тому, что количество жидкости в аккумуляторе  $A_{II}$  уменьшается и в результате этого уменьшается давление газа в нем. Из сливного бака в аккумулятор  $A_{II}$  жидкость возвращается следующим образом. Сначала с помощью клапана  $B_3$

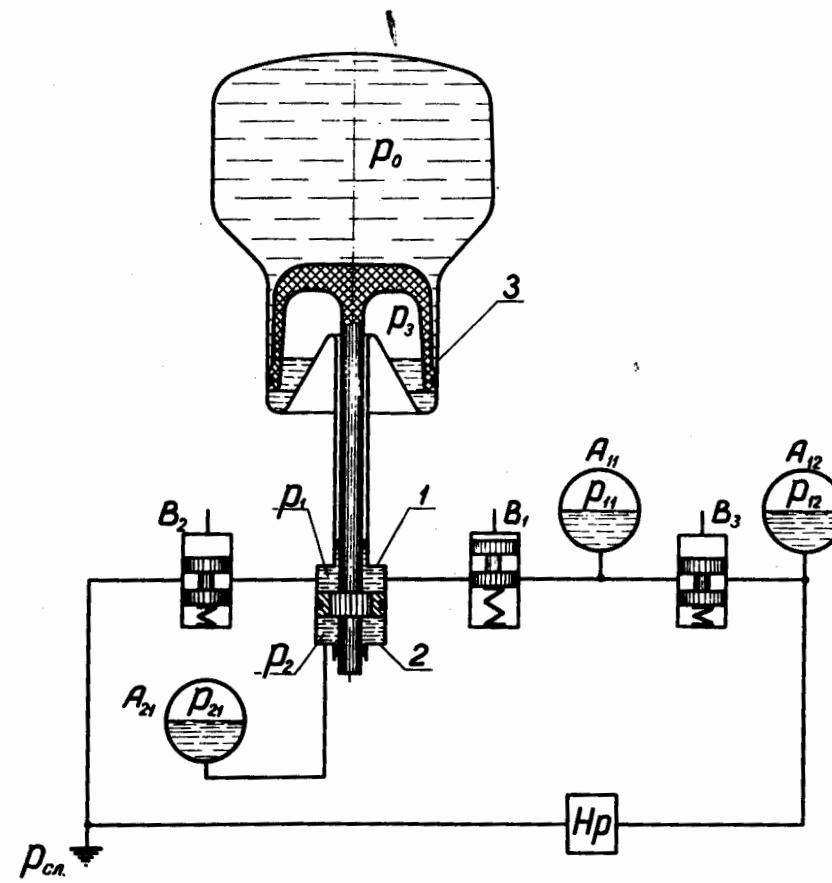


Рис. 17. Принципиальная схема расширительной системы пятиметровой жидкокислородной пузырьковой камеры. 1 и 2 - полости гидравлического цилиндра; 3 - полость расширительной системы;  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  - гидравлические клапаны;  $A_{11}$ ,  $A_{12}$  и  $A_{21}$  - гидроаккумуляторы;  $Hp$  - гидравлический насос;  $p$  - давление среды.

жидкость быстро впускается в аккумулятор  $A_{II}$  из аккумулятора  $A_{I2}$ . Затем с помощью гидронасоса высокого давления Нр осуществляется перекачка жидкости из сливного бака в аккумулятор  $A_{I2}$ . Быстрое восстановление рабочего режима в аккумуляторе  $A_{II}$  требуется для того, чтобы можно было сделать два-три цикла расширения за время одного импульса частот от ускорителя. Восстановление же рабочего режима аккумулятора  $A_{I2}$  может производиться в течение всего цикла ускорителя благодаря тому, что этот аккумулятор имеет большую емкость и давление в нем за два-три цикла расширения изменяется незначительно.

Регулирование степени расширения осуществляется в рассматриваемой схеме путем изменения давления  $P_{II}$  в аккумуляторе  $A_{II}$ . При этом положение подвижного элемента системы расширения в стационарном состоянии не изменяется.

б) Следящая система.

Нормальное функционирование гидропривода обеспечивается с помощью клапанов  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  (рис.17). Управление клапанами осуществляется по схеме, изображенной на рис.18. Подвижные элементы этой схемы указаны в положении, когда пузырьковая камера находится в стационарном состоянии.

Для сброса давления водорода в пузырьковой камере на вход схемы управления клапанами поступает запускающий электрический импульс с электронного пульта управления. Под действием этого импульса электромагнит ЭМ перемещает золотник  $\Pi_1$ , подпертый пружиной в крайнее нижнее положение. При этом золотник  $\Pi_2$  перемещается жидкостью под давлением  $P_4$  в крайнее левое положение и фиксируется в этом положении жидкостью, поступающей в его правую торцевую полость под давлением  $P_5$ . Одновременно с этим жидкость под давлением  $P_5$  закрывает клапаны  $B_4$  и  $B_5$  и перемещает золотник  $\Pi_3$  в крайнее левое положение. В результате переключения золотника  $\Pi_3$  клапаны  $B_2$  и  $B_3$  закрываются, а клапан  $B_1$  - открывается и начинается процесс сброса давления водорода в чувствительном объеме пузырьковой камеры.

В начале движения поршня расширительной системы вниз давление жидкости в нижней полости 4 цилиндра обратной связи резко возрастает, что вызывает быстрое перемещение золотника  $\Pi_4$  в крайнее правое положение. При дальнейшем движении поршня жидкость вытесняется из нижней полости 4 цилиндра обратной связи в сливной бак через клапан  $B_4$ , играющий в данный момент времени роль предохранительного клапана. В то же время через обратный клапан ОК<sub>I</sub> жидкость из сливного бака поступает в верхнюю полость 3 цилиндра обратной связи.

При перемещении золотника  $\Pi_4$  приток жидкости в емкость  $E_I$ , начавшийся после переключения золотника  $\Pi_2$ , прекращается и начинается истечение поступившей жидкости в сливной бак. Время  $t_{u1}$  истечения этой жидкости зависит от давления газа в емкости  $E_I$ .

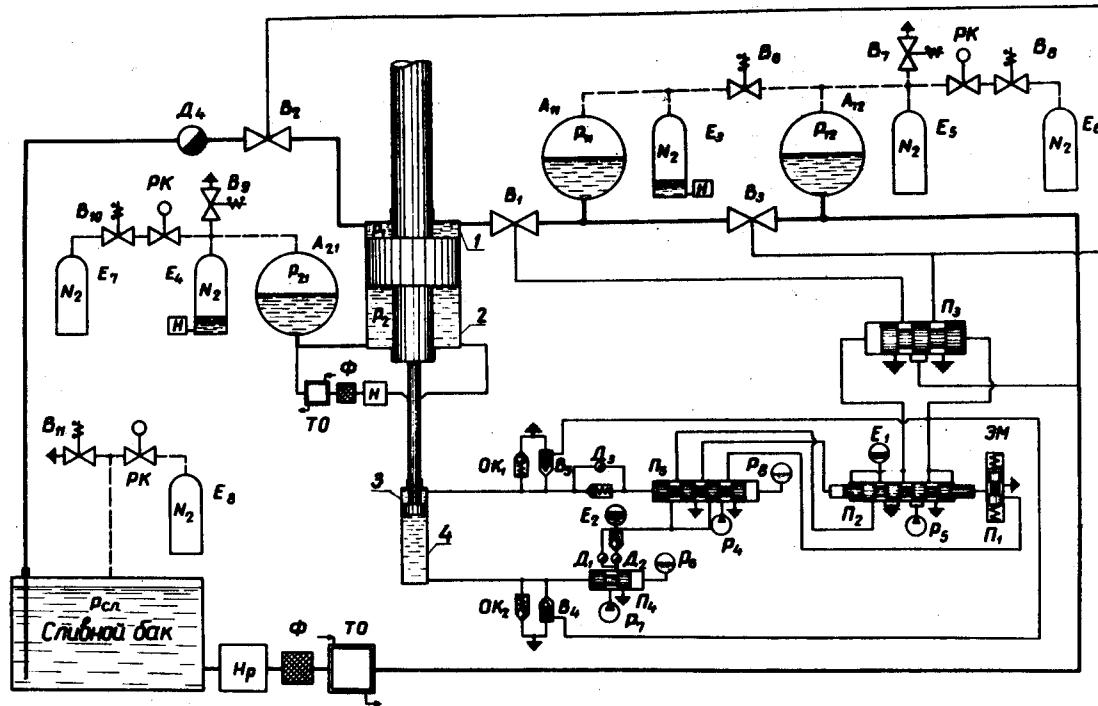


Рис. I8. Схема управления силовым узлом гидропривода. 1 и 2 – рабочие полости гидроцилиндра; 3 и 4 – полости цилиндра обратной связи; А – гидроаккумулятор; Е – емкость; Нр и Н – гидравлические насосы;  $\Phi$  – фильтр; ТО – теплообменник; В – клапан; ОК – обратный клапан; П – золотник; Д – дроссель; ЭМ – электромагнит; Р – давление среды.

Величина этого давления выбирается так, чтобы время  $t_{u1}$  было равно времени наполнения  $t_H$ , емкости  $E_1$  через дроссель  $D_1$  при закрытом дросселе  $D_2$ .

После того, как диафрагма в емкости  $E_1$  ляжет на решетку, начнется истечение жидкости из емкости  $E_2$ . Такая очередность истечения жидкости из емкостей  $E_1$  и  $E_2$  обусловлена тем, что давление газа в емкости  $E_1$  несколько превышает давление газа в емкости  $E_2$ . Истечение жидкости из емкости  $E_2$  будет продолжаться до тех пор, пока золотник  $\Pi_4$  не вернется в свое исходное положение. Нетрудно видеть, что это истечение будет происходить в течение времени  $t_{u2} = \frac{T}{2} - t_{u1}$ .

Переключение золотника  $\Pi_4$  происходит, когда подвижный элемент расширительного устройства начинает двигаться вверх. При этом давление жидкости в нижней полости 4 цилиндра обратной связи быстро падает и жидкость под давлением  $P_6$  перемещает золотник  $\Pi_4$  в исходное положение. Одновременно с переключением золотника  $\Pi_4$  происходит перемещение золотника  $\Pi_5$  в крайнее правое положение за счет резкого повышения давления жидкости в верхней полости 3 цилиндра обратной связи. При дальнейшем движении подвижного элемента вверх жидкость вытесняется из верхней полости 3 цилиндра обратной связи в сливной бак через клапан  $B_5$ , который, аналогично клапану  $B_4$ , играет в данный момент времени роль предохранительного клапана. В то же время через обратный клапан  $OK_2$  жидкость из сливного бака поступает в нижнюю полость 4 цилиндра обратной связи.

После возвращения золотника  $\Pi_4$  в свое исходное положение жидкость поступает только в емкость  $E_2$ , так как магистраль, соединяющая емкости  $E_1$  и  $E_2$ , оказывается перекрытой золотником  $\Pi_5$ . Время наполнения емкости  $E_2$  при закрытом дросселе  $D_2$  будет равно времени  $t_{u2}$ , т.е. времени, в течение которого жидкость вытекала из нее. Когда диафрагма в емкости  $E_2$  ляжет на решетку, произойдет быстрое повышение давления в магистрали, соединяющей эту емкость с золотником  $\Pi_2$  до давления  $P_7$ . При этом золотник  $\Pi_2$  вернется в свое исходное положение. Вслед за этим откроются клапаны  $B_4$  и  $B_5$  и произойдет переключение золотника  $\Pi_3$ , в результате которого клапаны  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  возвратятся в свое исходное положение. При закрытом дросселе  $D_2$  переключение клапанов  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  будет происходить приблизительно в то время, когда поршень расширительного устройства достигнет своего верхнего положения. В случае необходимости, открывая дроссель  $D_2$ , можно закрыть клапан  $B_1$  и открыть клапаны  $B_2$  и  $B_3$  за некоторое регулируемое время до возвращения поршня расширительного устройства в свое верхнее положение.

После переключения клапанов  $B_1$  и  $B_2$  поршень расширительной системы задержится в своем верхнем положении. Возможные колебания его при остановке не будут приводить к перемещению золотников  $\Pi_4$  и  $\Pi_5$ , так как клапаны  $B_4$  и  $B_5$  открыты.

Через некоторое время после остановки поршня расширительной системы в верхнем положении золотник  $P_5$  снова вернется в крайнее левое положение и давление  $P_4$  поступит к золотнику  $P_1$ . Если к этому моменту времени электромагнит ЭМ будет выключен, то на этом цикл расширения водорода в камере закончится. Если же электромагнит ЭМ будет включен, то последует очередное расширение. Время задержки поршня в верхнем положении регулируется с помощью дросселя  $D_3$ .

При выбранном диаметре поршня, равном 2,5 м, период колебаний поршня расширительной системы в рабочих условиях может регулироваться в пределах от  $T=70$  мсек до  $T=85$  мсек. Эта регулировка осуществляется за счет изменения количества газа, содержащегося в емкостях  $E_3$  и  $E_4$ , соединенных соответственно с аккумуляторами  $A_{11}$  и  $A_{21}$ . При этом происходит изменение жесткости всей системы, и, следовательно, изменение периода колебаний поршня. Несмотря на это, переключение клапанов  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  при неизменных положениях дросселей  $D_1$  и  $D_2$  в рассматриваемой схеме управления осуществляется в один и тот же момент времени перед приходом поршня в верхнюю точку. Время опережения не изменяется также, если при варьировании амплитуды колебаний подвижного элемента изменяется продолжительность срабатывания клапанов  $B_1$  и  $B_2$ .

На рис. I9 представлена временная зависимость работы элементов схемы управления.

### § 13. Силовой узел гидропривода

Схематический чертеж силового узла гидравлического привода представлен на рис. 20. Силовой узел гидропривода состоит из двух цилиндров – рабочего 25 и аварийного 22, скрепленных между собою шпильками 16. В рабочем цилиндре располагается поршень 23 с V-образными уплотнениями 24. Шток поршня 23 перемещается в двух направляющих втулках 14, закрепленных в днищах 13 и 15 рабочего цилиндра 25. Штоки поршней 23 и 3 связаны между собой с помощью разъемной стяжки 12. В цилиндре 22 аварийного торможения располагается поршень 18.

При наполнении камеры водородом поршень 18 опирается на крышку 19 цилиндра аварийного торможения и тем самым препятствует перемещению поршня расширительной системы.

Во время работы пузырьковой камеры с помощью пружин 20 поршень 18 удерживается в среднем положении относительно аварийного цилиндра 22 и не соприкасается с подвижным элементом расширительной системы. Их соприкосновение наступает только в том случае, когда по каким-либо причинам подвижный элемент расширительного устройства перейдет границы разрешенного рабочего хода. При этом либо в нижней, либо в верхней плоскостях цилиндра 22 аварийного торможения в зависимости от направления движения подвижного элемента расширительной системы резко возрастает давление гидро жидкости, что приводит к созданию тормозящей силы. Величина тормозящей силы зависит от диаметра поршня 18 и его профиля, которые выбираются так, чтобы давление в цилиндре аварийного торможения не превышало предельно допус-

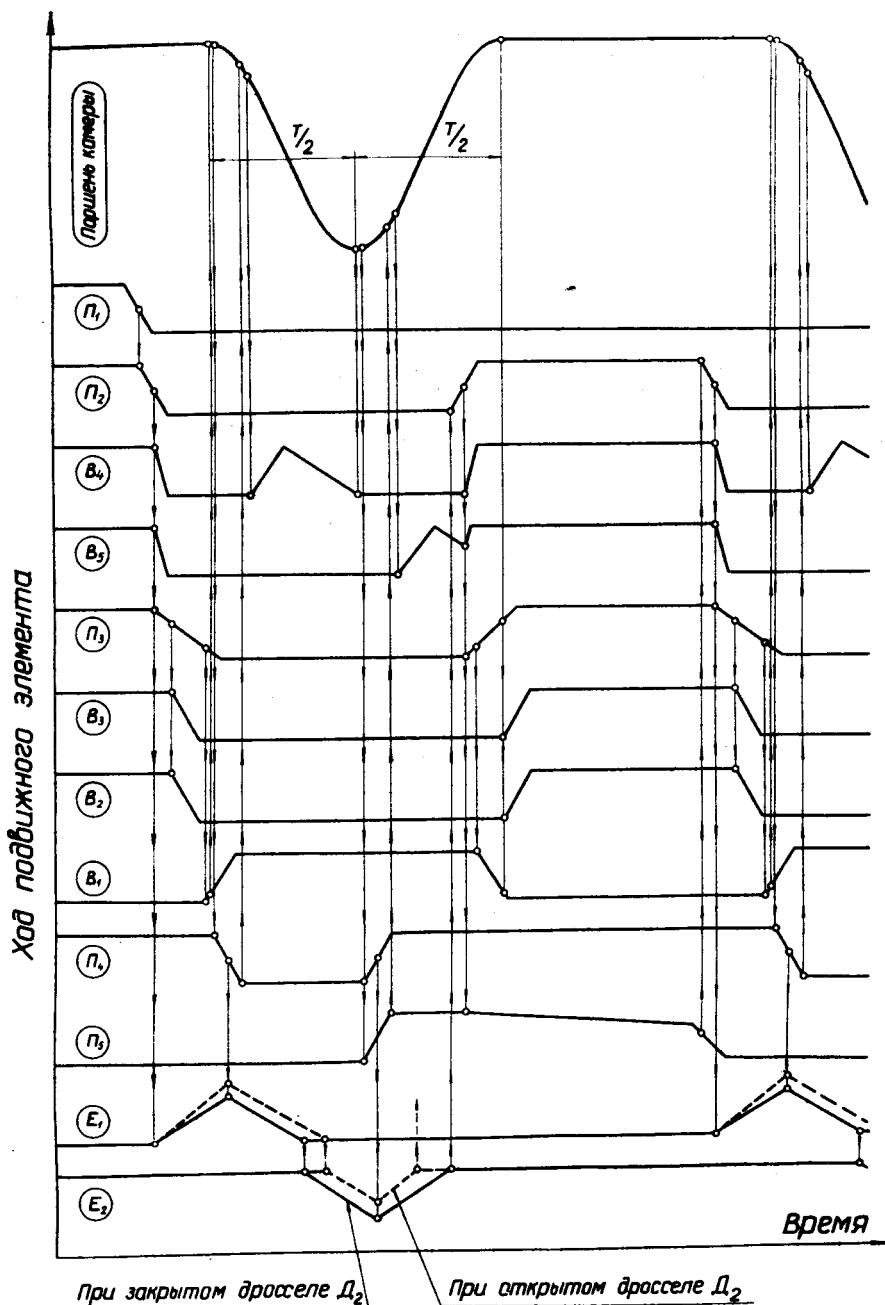


Рис. I9. Временная зависимость работы элементов схемы управления. В - клапан; П - золотник; Е - емкость; Т - период колебаний поршня.

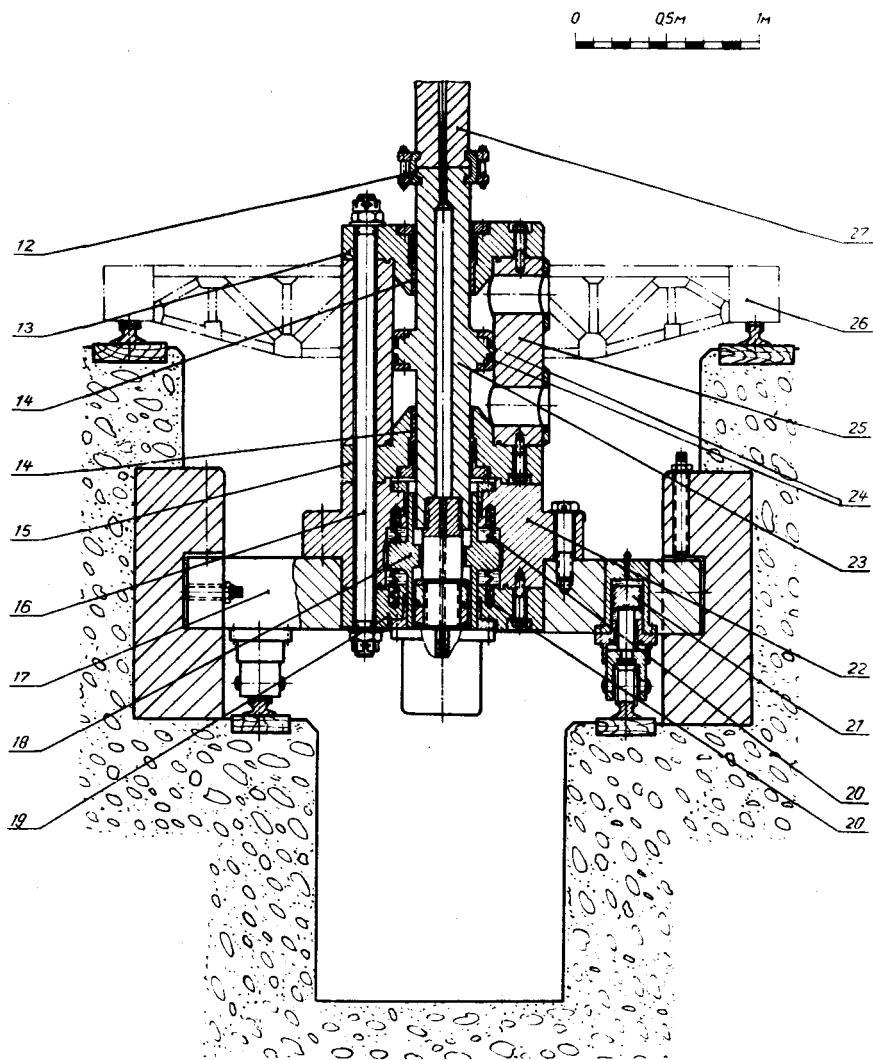


Рис. 20. Силовой узел гидропривода.

Обозначения те же, что и  
на рис. 13.

тимого. Высоты верхней и нижней полостей цилиндра 22 аварийного торможения выбираются из условия, чтобы в худшем случае процесс торможения подвижного элемента расширительной системы закончился мягкой посадкой поршня 18 на торцевые поверхности либо цилиндра 22, либо крышки 19. Силовой узел гидравлического привода вместе с управляющими клапанами, аккумуляторами и другими элементами схемы управления, не показанными на рис.20, установлен на массивной платформе 17, которая с помощью болтов крепится к фундаменту. Юстировка платформы относительно штока поршня расширительного устройства производится оптическим методом при монтаже силового узла гидропривода. При необходимости разборки корпуса пузырьковой камеры платформа 17 вместе со смонтированным на ней оборудованием с помощью гидроподъемников 21 ставится на рельсы, транспортируется по галерее, расположенной под корпусом пузырьковой камеры, и далее переносится к ремонтной площадке.

## ГЛАВА У О П Т И К А

До последнего времени для освещения рабочих объемов жидколовородных пузырьковых камер использовались преимущественно осветительные системы, являющиеся конструктивными разновидностями темнопольного метода освещения. Хотя метод фотографирования на светлом поле был известен давно, он не находил себе распространения вследствие целого ряда присущих ему недостатков.

Наиболее существенным недостатком этого метода является невозможность фотографирования пузырьков малого размера с хорошим контрастом. Получение пузырьков необходимых размеров, в свою очередь, связано с внесением нежелательных искажений следов частиц, которые отчасти обусловлены неравномерным всплыvанием их во время роста, отчасти - движением жидкости в рабочем объеме камеры.

Тем не менее, светлопольная система в последнее время все чаще применяется при сооружении пузырьковых камер, в особенности камер с большим размером рабочей области. Причины этого кроются в практически непреодолимых на сегодняшний день технических трудностях создания специальных камерных иллюминаторов, конденсорных линз или отражателей большого размера и необходимого качества, с которыми могло бы быть связано осуществление темнопольной системы освещения для большой камеры.

С другой стороны, первые обнадеживающие экспериментальные данные, полученные в результате использования для освещения рабочего объема камеры специального автоколлимационного материала типа скотчлайт, создали предпосылки для всестороннего исследования возможности его применения в жидколовородных пузырьковых камерах большого размера. Применение скотчлайта явилось выходом из того тупика, который возник на пути развития методики

пузырьковых камер в направлении дальнейшего увеличения размеров рабочей области. Однако не исключено, что желание достичнуть предельной точности в измерении координат треков частиц в будущем заставит конструкторов пузырьковых камер опять сосредоточить свое внимание на возможностях осуществления темнопольных систем освещения.

#### § 14. Характеристики скотчлайта

Для выполнения конструкторских расчетов, прежде всего, необходимо знать коэффициент отражения скотчлайта, который связывает яркость в отраженном свете с наложенной освещенностью(23):

$$B(\vartheta, \alpha) = \frac{k(\vartheta, \alpha)E}{\pi}, \quad (6)$$

где  $E$  - освещенность на поверхности скотчлайта;  $k$  - коэффициент отражения;  $B$  - яркость скотчлайта в отраженном свете;  $\alpha$  - угол падения света на скотчлайт и  $\vartheta$  - угол между направлениями падающего и отраженного света.

Измерение коэффициента отражения проводилось с помощью автоколлимационной трубы, а также фотографическим путем.

На рис.21 показана зависимость коэффициента отражения от угла  $\vartheta$  для американского скотчлайта типа FE - 582 и SPR - 704, для немецкого скотчлайта "Микролюкс" и двух образцов скотчлайта лабораторного изготовления, обозначенного буквами А и Б.

На рис.22 приведена зависимость коэффициента отражения тех же видов скотчлайта от угла падения света  $\alpha$ .

Для оценки применимости скотчлайта в многометровых пузырьковых камерах необходимо найти математическое выражение зависимости коэффициента отражения скотчлайта от угла  $\vartheta$ . Такое выражение было получено для скотчлайта типа FE - 582.

Из графиков, представленных на рис.21а), с достаточно хорошим приближением можно определить

$$k(\vartheta, \alpha) = \frac{c_1(\alpha)}{1 + (\frac{\vartheta}{c_2})^2}, \quad (7)$$

где  $c_1 \approx 900$  и  $c_2 \approx 0,0094$ , если угол  $\vartheta$  выражается в радианах.

В заключение, можно заметить, что из всех измеренных видов по своим оптическим свойствам только американский скотчлайт (типа FE-582 или SPR - 704) пригодны для применения в осветительных системах жидколоводородных пузырьковых камер. Испытание в жидким водороде показало, что предпочтительнее применять скотчлайт типа SPR-704, гладкая поверхность которого затрудняет паразитное вскипание жидкого водорода.

#### § 15. Параметры осветительной системы

Для системы освещения, основанной на применении скотчлайта в качестве рефлектора, необходимо, чтобы источник света находился вблизи входного зрачка объектива. Выполнение

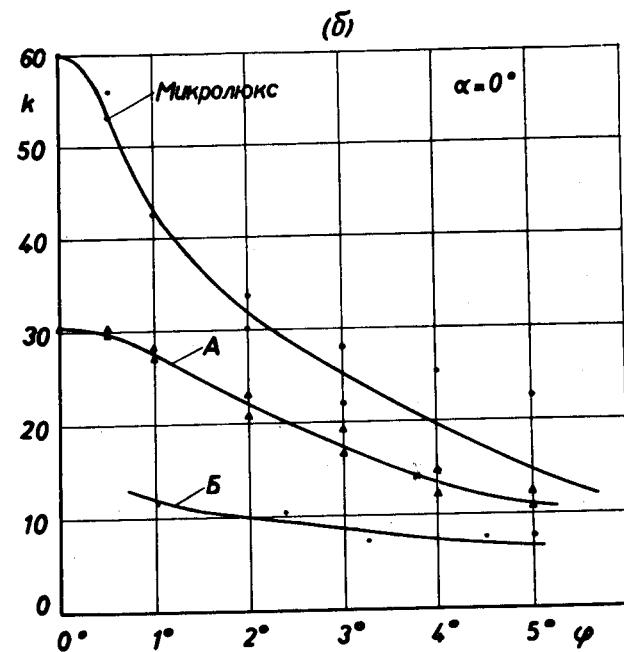
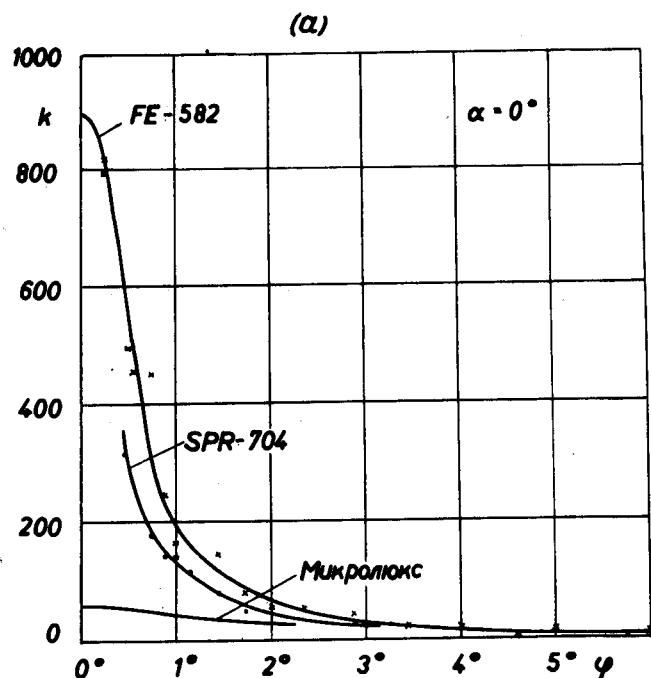


Рис. 21. Зависимость коэффициента отражения скотчлайта от угла  $\varphi$ .

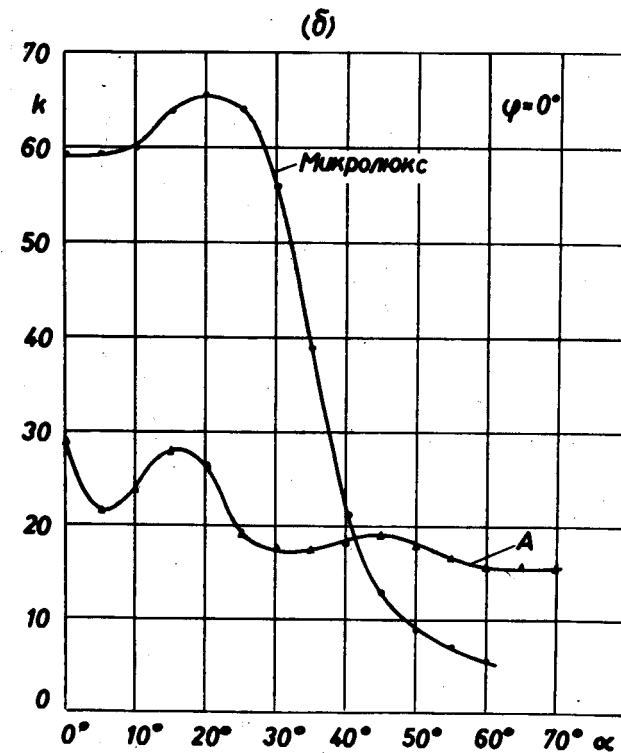
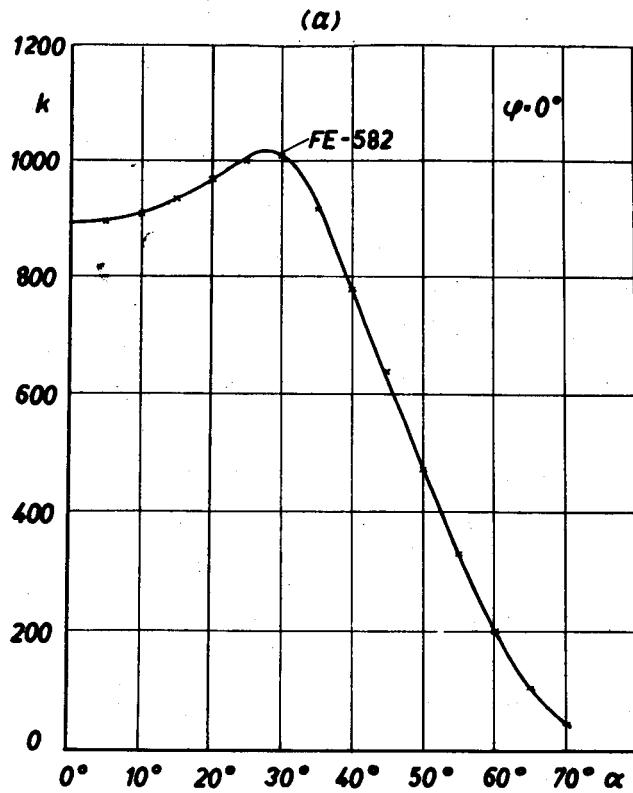


Рис. 22. Зависимость коэффициента отражения скотчлайта от угла падения света  $\alpha$ .

этого условия наилучшим образом достигается путем использования кольцевого источника света, окружающего объектив в плоскости входного зрачка.

Связь между необходимой экспозицией пленки  $H$  и искомой интегральной яркостью импульсной лампы  $\int B dt$  дается соотношением:

$$H = \frac{\pi}{2} \frac{C_1(\alpha) C_2^2 d}{A^2 r} \cos^4 \vartheta \cos \alpha \int B dt, \quad (8)$$

где  $r$  - радиус кольцевой импульсной лампы,  $d$  - диаметр её разрядного канала,  $A = f/D$  - величина диафрагмы объектива и  $\vartheta$  - угол поля зрения.

Следует заметить, что формула (8) была получена в предположении, что размеры входного зрачка объектива постоянны и не зависят от угла поля зрения  $\vartheta$ . Это условие выполняется не для всех объективов. У объектива "Флектогон", например, входной зрачок расстет<sup>(24)</sup> с увеличением угла  $\vartheta$  таким образом, что экспозиция  $H$  оказывается пропорциональной  $\cos^2 \vartheta \cos \alpha$ .

Учитывая приведенные выше характеристики скотчлайта и значения экспозиции ( $H = 1$  лксек), необходимой для пленки Микрат-300, а также задаваясь величинами  $r = 50$  мм и  $d = 5$  мм, найдем значение интегральной яркости импульсной лампы:  $\int B dt = 3,3 \cdot 10^4$  нтсек. В результате неизбежных потерь света в объективах и камерных иллюминаторах, а также потеря, обусловленных необходимостью частичной экранировки источника света, действительно необходимая величина яркости может превышать приведенное выше значение приблизительно на порядок. Тем не менее, такая величина яркости вполне достижима с обычными трубчатыми импульсными лампами серийного производства<sup>(25)</sup>.

Соотношение (8) позволяет определить форму днища и боковых стенок пузырьковой камеры, для которых обеспечивается наибольшая однородность освещенности на пленке, что весьма важно при работе с пленкой, имеющей большую контрастность.

Экспериментальная проверка показала, что результаты, полученные расчетным путем, удовлетворительно согласуются с наблюдаемой в действительности зависимостью экспозиции  $H$  от параметров осветительной системы.

Из рассмотренных нами вариантов наилучшим оказался вариант с эллиптическим днищем, для которого зависимость  $H$  от  $\vartheta$  представлена на рис.23. При этом боковые стенки камеры покрываются ребрами, способствующими увеличению освещенности на краю поля кадра.

### § 16. Контраст изображения

Для успешной работы светлопольной системы освещения чрезвычайно важно, чтобы свет, падающий на пузырьки, подлежащие фотографированию, имел хорошую направленность, ибо только в этом случае световой поток, распространяющийся в направлении объектива фотоаппарата, довольно сильно ослабляется вследствие рассеяния и изображения пузырьков в достаточной

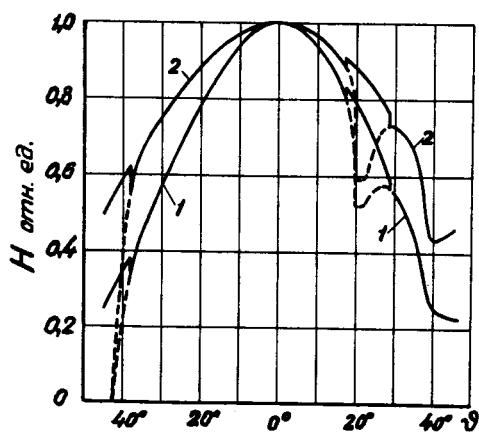
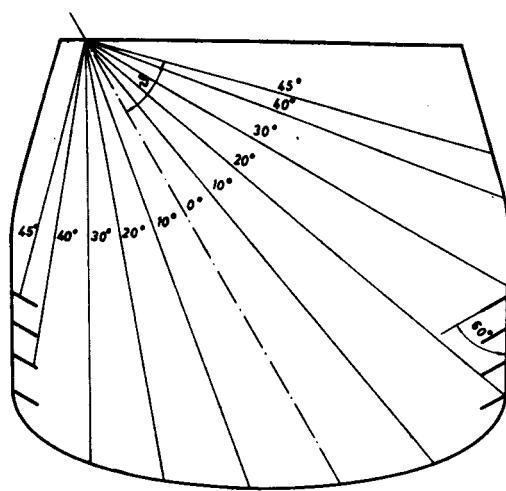


Рис. 23. Распределение экспозиции пленки  $H$  в зависимости от угла поля зрения  $\vartheta$ . 1 - распределение для объектива с постоянным зрачком; 2 - распределение для объектива типа "Флектогон".

мере надежно отделяются от фона.

Оценка возможной величины контраста изображения пузырьков на пленке является весьма трудной задачей. Поэтому мы ограничились рассмотрением наиболее простого случая, когда источник света совпадает с входным зрачком фотообъектива, днище рабочего объема камеры является плоским, а пузырек расположен на оптической оси объектива.

В предположении, что диаметр пузырька достаточно велик и его изображение подчиняется законам геометрической оптики, получим величину контраста изображения пузырька на пленке  $K_0$  в виде:

$$K_0 = \frac{E_\phi}{E_0} = \frac{\pi K(0,0)}{a^2} \int \frac{1}{k(y, \alpha) G(\psi) \cos^2 \psi \cos \psi} dS, \quad (9)$$

где  $E_\phi$  - освещенность на пленке, созданная скотчлайтом и определенная по формуле (8);

$E_0$  - освещенность на пленке, созданная пузырьком;  $a$  - расстояние от входного зрачка объектива до днища камеры;  $G(\psi)$  - индикаторика рассеяния света пузырьком,  $\psi$  - угол рассеяния;  $dS$  - элемент поверхности скотчлайта;  $\ell_1$  - расстояние от входного зрачка объектива до элемента поверхности  $dS$  и  $\ell_2$  - от пузырька до элемента поверхности  $dS$ .

Численные значения контраста  $K_0$  в зависимости от положения пузырька по высоте  $h$  в рабочем объеме камеры представлены на рис.24. Значения отдельных параметров при этом были следующими:  $a = 5m$ ;  $c_2 = 0,0094$ ;  $\Pi_H = 1,083$ .

Необходимо заметить, что в действительности величина контраста может оказаться гораздо меньшей, нежели указанная на рис.24. Причиной этого является рассеяние света в жидким водороде и эмульсионном слое пленки, а также на камерных иллюминаторах и внутри объектива. Однако для пленки "Микрат-300" уже значение контраста  $K=2$  может обеспечить разницу оптических плотностей  $\Delta D = 1$ , достаточную для автоматической обработки снимков.

Значение контраста  $K$  также сильно зависит от величины изображения пузырька на пленке. При уменьшении этого изображения до размеров, определяемых дифракционной картиной, соответствующей данному отверстию объектива, значение контраста быстро убывает.

По методу, указанному в работе<sup>(26)</sup>, можно ориентировочно оценить влияние размеров пузырька на величину контраста. Полагая, что дифракционная картина Эри имеет вид прямоугольника, найдем:

$$K = \frac{(\rho + r_0)^2}{(\rho + r_0)^2 - \rho^2 + \frac{\rho^2}{K_0}}, \quad (10)$$

где  $\rho$  - радиус изображения пузырька на пленке, полученного в отсутствии дифракции, и  $r_0$  - радиус дифракционной картины Эри.

При  $\rho \approx r_0$  можно пренебречь последним членом в знаменателе выражения (10), если значение  $K_0$  достаточно велико. Таким образом, действительное значение контраста  $K$  в данной области не зависит от максимальной величины  $K_0$ , а связано только с размерами пузырька.

Как легко проверить с помощью соотношения (10), радиус изображения пузырька, необходимый для обеспечения контраста  $K=2$ , равняется  $\rho = 2,4 r_0$ . Поскольку картина Эри не является прямоугольником, то в действительности необходимые значения радиуса изображения пузырька  $\rho$  оказываются меньшими полученных нами. Однако ясно, что они должны быть больше радиуса дифракционной картины.

### § 17. Параметры фотографической системы

Рассмотрение разрешающей способности фотографической системы пузырьковой камеры необходимо для определения следующих параметров: масштаба фотографирования  $\beta$  и величины диафрагмы  $A$  объективов, расстояния наводки объективов  $a_0$ , а также размеров и типа применяемой пленки. Величина разрешения оптической системы играет решающую роль, когда для идентификации частиц необходимо измерение их ионизирующей способности. В пузырьковых камерах, основанных на использовании светлопольной системы освещения, разрешающая способность, кроме того, непосредственно определяет размеры пузырьков, которые требуются для получения снимков с допустимым контрастом изображения.

Обычно принято считать, что разрешающая способность оптической системы определяется обратной величиной радиуса дифракционной картины Эри,  $r_0$ . Однако такое определение справедливо только для объектов, расположенных вблизи оптической оси объектива на расстоянии наводки. Если светящаяся точка расположена хотя и на оптической оси объектива, но вне плоскости наводки, то в качестве критерия разрешающей способности часто используют радиус  $r_{0,5}$  того кружка рассеяния, внутри которого сосредотачивается половина всей световой энергии, участвующей в изображении данного объекта.

Для светящихся точек, расположенных вне оптической оси, кружки рассеяния изображаются эллипсами, размеры которых определяются<sup>(27)</sup> полуосями:

$$r_m = \frac{r}{\cos^3 \psi} \quad ; \quad r_c = \frac{r}{\cos \psi} , \quad (II)$$

где  $r_m$  - полуось в меридиональной плоскости;  $r_c$  - полуось в сагиттальной плоскости;  $r$  - радиус кружка рассеяния, расположенного на оптической оси;  $\psi$  - угол между главным лучом и оптической осью.

Однако соотношения (II) справедливы только в том случае, когда форма и размер зрачков объектива не зависят от угла  $\psi$ . Для объектива "Флектогон", например, соотношения (II) переходят в следующие<sup>(24)</sup>:

$$r_m \approx \frac{r}{\cos \psi} \quad ; \quad r_c = \frac{r}{\cos^{0.38} \psi} . \quad (I2)$$

С помощью этих соотношений, а также диаграмм, приведенных в работе<sup>(28)</sup>, были определены значения диаметра  $2r_{0,5}$  дифракционной картины светящейся точки в зависимости от расстояния наводки  $a_0$ , а также от фокусного расстояния  $f$  и апертурной диафрагмы  $D$ .

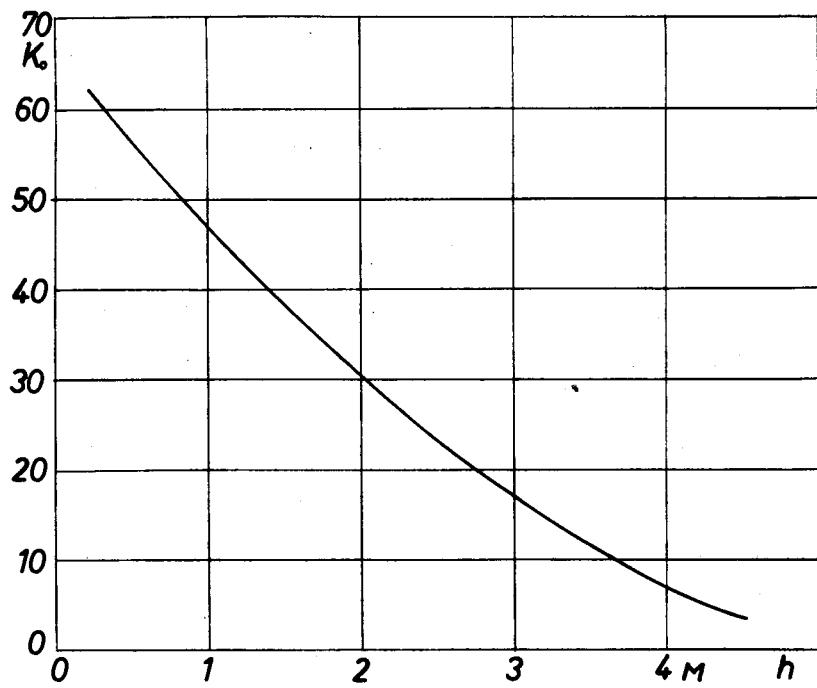


Рис. 24. Зависимость величины контраста изображения пузырька от его положения по высоте в пределах рабочего объема камеры.

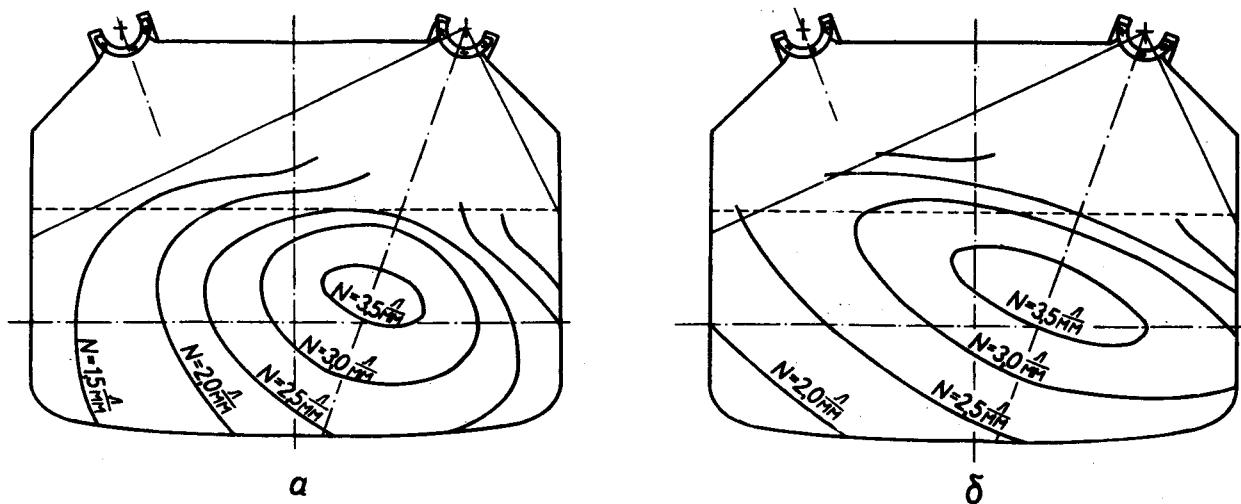


Рис. 25. Распределение разрешающей способности внутри рабочего объема камеры.  
а) - для объектива с постоянным зрачком; б) - для объектива типа  
"Флектогон".

объектива. Длина волны света при этом была принята равной  $580 \cdot 10^{-6}$  мм.

Из полученных результатов следует, что в предлагаемом варианте пятиметровой пузырьковой камеры разумно принять расстояние наводки  $a_0 = 3$  м, а диаметр апертурной диафрагмы  $D = 3$  мм. Распределения разрешающей способности внутри камеры с учетом соотношений (II) и (I2) показаны на рис.25.

В соответствии с результатами, полученными в § 16, необходимый диаметр пузырьков при этом составляет около 2 мм.

До сих пор мы рассматривали лишь влияние дифракции света на краю апертурной диафрагмы на разрешающую способность фотографической системы. Но размеры изображений пузырьков, полученных на фотографической пленке, определяются также свойствами пленки. Влияние пленки на разрешающую способность фотографической системы наиболее просто можно описать с помощью понятия разрешающей силы пленки  $N_n$ . Эта величина хорошо известна для различных типов пленки.

Обычно масштаб фотографирования  $\beta$  и тип пленки выбираются с таким расчетом, чтобы влияние пленки на разрешающую способность фотографической системы было пренебрежимо малым. Это означает, что должно выполняться соотношение:

$$N_n \gg \frac{1}{2 R_{0,5}} \quad (13)$$

Так как стоимость фотопленки составляет существенную часть эксплуатационных расходов по камере, то естественно, что размеры изображения рабочего объема камеры на пленке должны быть минимальными.

Сопоставление паспортных данных различных марок пленки с рассмотренными выше требованиями показывает, что наилучшим типом пленки для наших целей является пленка "Микрат-300" шириной 70 мм. Для предполагаемого угла поля зрения фотообъективов  $2\vartheta = 90^\circ$  в таком случае фокусное расстояние объективов должно составлять  $f = 35 \pm 40$  мм.

### § 18. Варианты конструктивного исполнения

Возможность получения максимальной точности измерения координат на пленке зависит не только от свойств осветительной системы, но в значительной мере определяется также добротностью используемой фотографической оптики.

Помимо удовлетворения требованиям, изложенным в предыдущем параграфе, желательно, чтобы объективы имели также разрешающую способность, близкую к теоретически возможной, т.е. волновую aberrацию меньше  $\lambda/4$  и дисторсию, не превышающую  $I \pm 1,5\%$ , что позволит производить первый визуальный просмотр полученных снимков и отбор интересующих событий на обычных просмотровых столах. Различные возможности создания такого объектива рассматриваются в работе<sup>(24)</sup>.

Как было показано в работе<sup>(29)</sup>, для обеспечения на пленке правильной перспективы изображения событий, происходящих в рабочем объеме камеры, необходимо, чтобы угол наклона оптических осей относительно направления магнитного поля не превышал 30°, а также, чтобы расстояние от плоскости первичного пучка до входных зрачков объективов не было меньшим 2,5 м. Положение иллюминаторов, удовлетворяющее этим требованиям, показано на рис.10.

Целесообразное конструктивное исполнение камерных иллюминаторов имеет большое значение для успешной работы фотографической системы. Основная функция их состоит в отделении рабочего объема камеры, заполненного жидким водородом, от атмосферы. При этом должны быть выполнены так, чтобы обеспечивалось равномерное освещение всего рабочего объема, а также хороший обзор его со стороны объективов. Иллюминаторы должны также удовлетворять следующим требованиям:

- а) окно, обращенное к рабочему объему камеры, должно быть сферическим, что обеспечит независимость хода световых лучей от величины показателя преломления рабочей жидкости;
- б) должна быть предусмотрена возможность юстировки объектива фотоаппарата относительно сферических окон, а также окон между собой;
- в) теплоизоляция рабочего объема камеры от фотообъектива – вакуумная;
- г) импульсная лампа, размещаемая в пространстве между объективом и окном камеры, должна находиться в среде инертного газа;
- д) конструкция иллюминатора должна обеспечивать возможность быстрой замены вышедшей из строя импульсной лампы;
- е) для ограничения теплопритока к рабочему объему камеры от внутренних частей иллюминатора, находящихся при комнатной температуре, необходимо предусмотреть теплофильтр, который одновременно должен выполнять функции защитного стекла в случае аварии со стеклом, находящимся на рабочем объеме камеры;
- ж) с целью обеспечения максимально возможной однородности температуры жидкого водорода вблизи иллюминаторов, желательно, чтобы теплоприток в рабочий объем камеры через конструкционные элементы иллюминатора был минимальным.

На рис.26 и 27 представлены четыре варианта исполнения иллюминаторов, которые указывают на принципиальную возможность удовлетворения изложенным выше требованиям.

Кольцевая импульсная лампа, окружающая объектив, находится в зоне действия сильно-го магнитного поля. При протекании тока через разрядный канал этой лампы она подвергается сильным механическим нагрузкам. Поэтому, во избежание разрушения лампы во время работы, должны быть приняты меры, исключающие возможность возникновения недопустимо больших механических напряжений в стекле.

Вариант А

Вариант Б

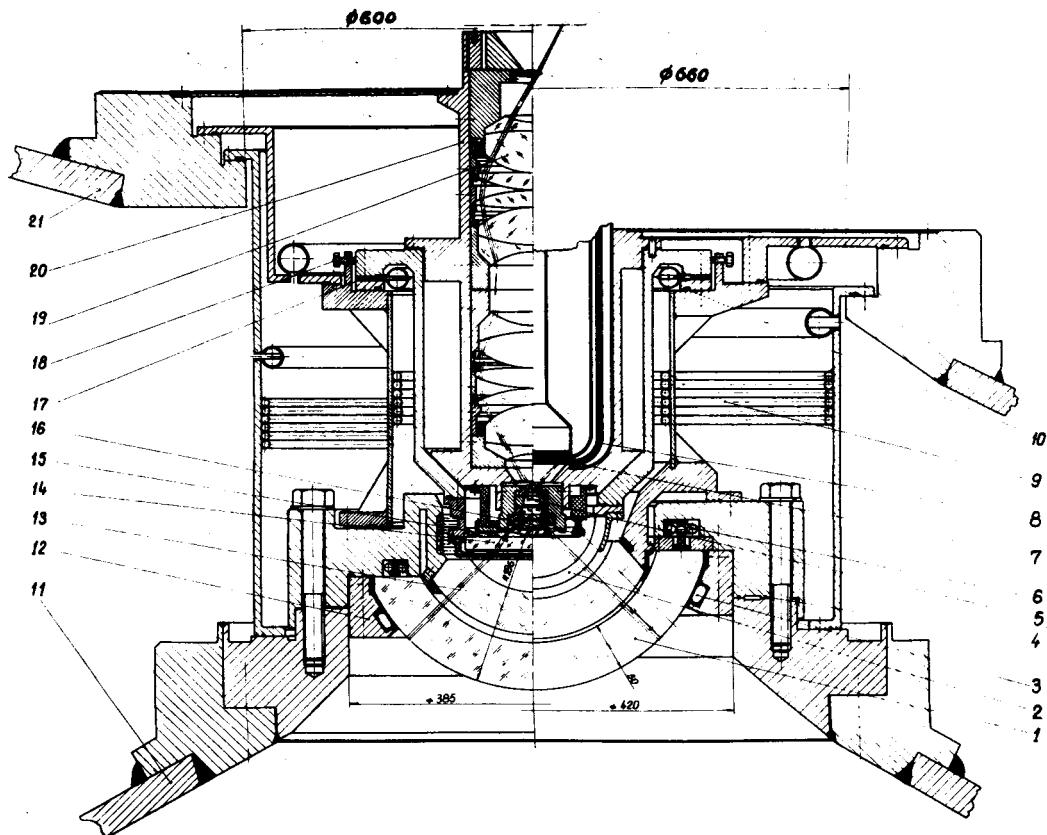


Рис. 26. Иллюминатор камеры. ( Варианты А и Б ). I - камерное окно;  
 2 и 14 - вакуумное окно; 3 и 6 - элемент надувного уплотнения;  
 4 - индивидуальное уплотнение; 5 - объектив; 7 - прижимная пластина;  
 8 - канал для транспортировки пленки; 9 - термостатирующий  
 змеевик; 10 - резиновое уплотнение; II - корпус камеры;  
 12 - прижимной фланец; 13 - стекло-теплофильтр; 15 - секцион-  
 ная импульсная лампа; 16 - кольцевая импульсная лампа;  
 17 - юстировочная прокладка; 18 - юстировочный винт; 19 - сис-  
 тема транспортировки изображения; 20 - тубус объектива;  
 21 - вакуумный кожух.

Вариант В

Вариант Г

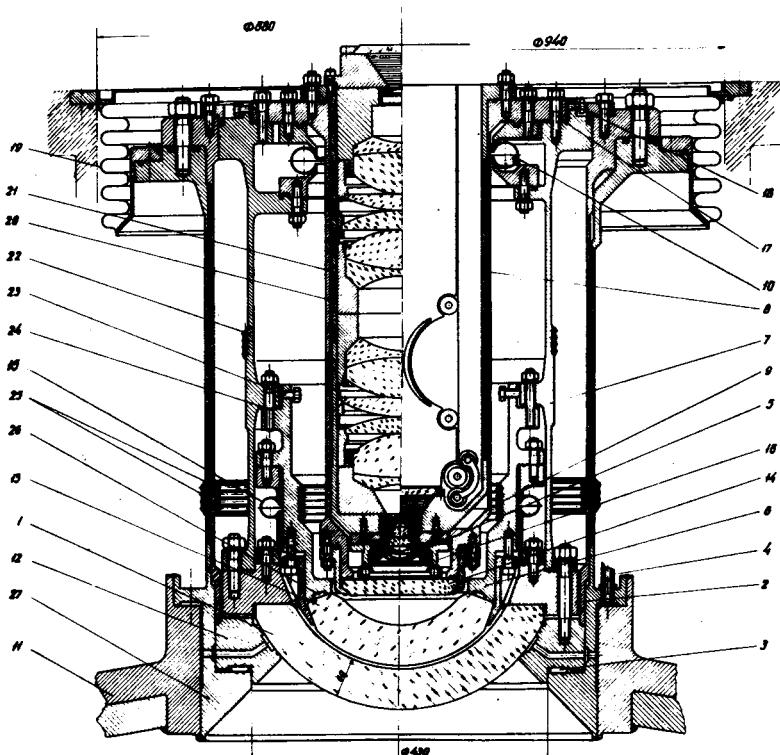


Рис. 27. Иллюминатор камеры. ( Варианты В и Г ). I - камерное окно; 2 - опорный фланец; 3, 26 - элемент надувного уплотнения; 4 - патрубок откачки; 5 - объектив; 6 - опорная термостабилизируемая гильза; 7 - опорный термостатированный стакан; 8 - тубус объектива и лентопротяжного механизма; 9, 22 и 25 - термостабилизирующий змеевик; 10, 15 - юстировочный торoidalный сильфон; II - горловина корпуса камеры; 12 - прижимной фланец; 13 - стекло-теплофильтр; 14 - вакуумное окно; 16 - импульсная лампа; 17, 24 - юстировочная прокладка; 18, 23 - юстировочный винт; 19 - компенсационный сильфон; 20 - элемент оправы линз; 21 - направляющий цилиндр; 27 - наружный кожух.

На рис.28 показана фотография импульсной лампы, которая с целью уменьшения влияния указанных выше факторов, выполнена таким образом, что механические усилия, возникающие при протекании тока через лампу, воспринимаются бандажами из нержавеющей стали, окружающими лампу с наружной и внутренней сторон. Все пространство между бандажами и лампой, за исключением узкой конической области для выхода света, заполнено эпоксидной смолой. Предполагается, что, введя в это пространство медную ребристую трубку с проточной водой, удастся полностью снять тепло, выделяющееся во время интенсивной работы импульсной лампы.

Предварительные испытания лампы, проведенные в постоянном магнитном поле напряженностью 19 кгс, дали удовлетворительные результаты.

Чтобы составить себе наглядное представление об изображении треков, даваемом рассмотренной фотографической системой, с помощью электронной счетной машины были смоделированы некоторые интересные для области энергий серпуховского ускорителя случаи взаимодействия  $\pi^-$ -мезонов с протонами:

$$\begin{aligned} \pi^-(10) + p & \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow p(0,5) + \pi^-(6,87) + \pi^0(3,0); \\ \rightarrow p(0,5) + \pi^-(1,99) + \pi^-(3,87) + \pi^0(3,0) + \pi^+(0,99); \\ \rightarrow \Lambda^0 + K^0 \end{array} \right. \\ \Lambda^0 & \rightarrow p(8,02) + \pi^-(0,98); \\ K^0 & \rightarrow \pi^+(0,83) + \pi^-(1,II); \end{aligned}$$

где цифры в скобках указывают величины импульсов частиц. ( см. также рис. 29 ).

При расчете предполагалось, что четыре фотоаппарата расположены так, как указано на рис.10, по углам квадрата с диагональю 300 см на уровне 260 см над медианной плоскостью камеры. Диаметр рабочей области принимался равным 460 см, глубина резко изображаемого пространства - 200 см. Угол между оптическими осями объективов и осью камеры брался  $20^\circ$ , угол поля зрения объективов -  $90^\circ$ . Магнитное поле считалось однородным с напряженностью 30 кгс. Энергетические потери частиц не учитывались.



Рис. 28. Фотография кольцевой импульсной лампы, предназначенный для работы в сильных магнитных полях.

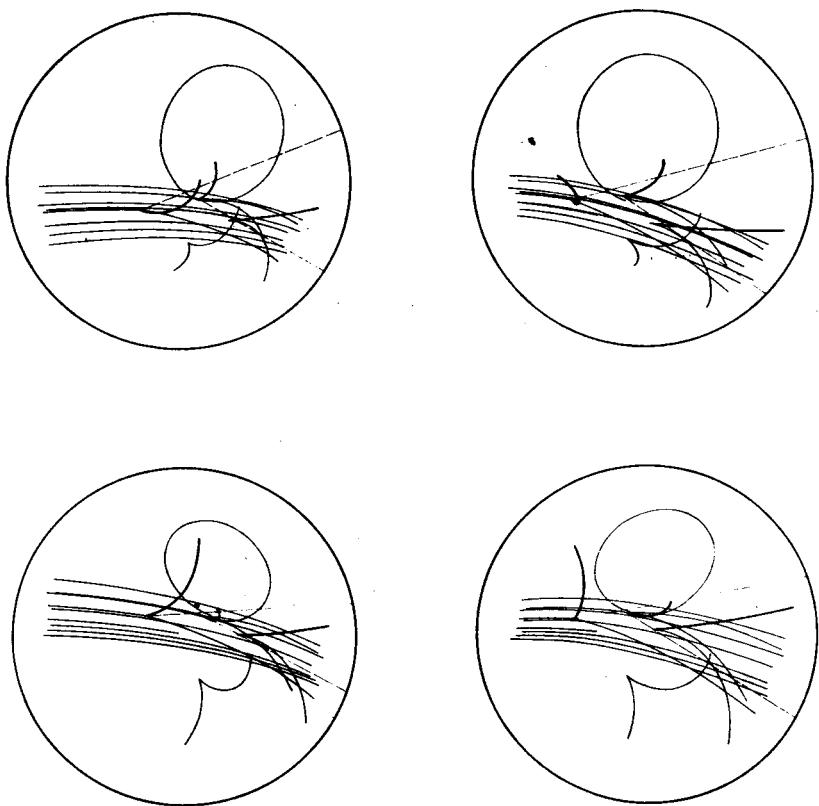


Рис. 29. Моделирование стереоснимков событий, даваемых четырьмя фотоаппаратами, установленными на пятиметровой камере. Характеристики событий приведены на стр. 69. На рисунке жирными линиями обозначены треки протонов, тонкими – треки заряженных пионов, пунктирными – направление вылета нейтральных пионов.

## ГЛАВА У1

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Точность экспериментальной информации, получаемой с пузырьковой камеры, находится в прямой зависимости от напряженности магнитного поля в её рабочем объеме. При импульсах частиц масштаба нескольких десятков Гэв/с радиусы кривизны треков становятся столь большими, что при наличии целого ряда источников ошибок, подробно анализируемых в главах 2-й и 5-й, даже определение знака заряда частиц при ограниченном пробеге их в камере может оказаться весьма затруднительным, не говоря уже о точном измерении их импульсов.

Это обстоятельство является важнейшей причиной того, что при конструировании камер устройствам для создания магнитного поля в их рабочих объемах уделяется основное внимание. Однако масштабы затрат, связанных с сооружением подобных устройств, весьма быстро растут с увеличением объемов камер и повышением напряженности поля в них.

Поэтому уже на стадии определения исходных данных для проектирования анализ существующих методов и изыскание оптимальных путей для обеспечения наибольшей величины поля при современном уровне технических возможностей является чрезвычайно важной задачей. В данной главе вкратце изложены результаты рассмотрения основных аспектов этой проблемы.

Технические вопросы, касающиеся выбора конкретного варианта исполнения, обсуждаются во второй части сборника, посвященной криогенным системам камеры.

С точки зрения основных технико-экономических показателей были проанализированы следующие системы:

- 1) электромагнит с медными или алюминиевыми обмотками с водяным охлаждением;
- 2) соленоид с аналогичным исполнением обмоток;
- 3) соленоид с обмоткой из сверхпроводника.

Криогенные соленоиды (несверхпроводящие) не рассматривались, так как в работах<sup>(30)</sup> и<sup>(31)</sup> показана их экономическая нецелесообразность для случая применения в крупных установках.

В настоящее время отсутствует какая-либо общепринятая методика проведения оценочных технико-экономических расчетов такого рода устройств. Поэтому мы вынуждены были остановиться на полуэмпирическом методе вычисления стоимостей отдельных систем. Для каждой из перечисленных систем составлялось выражение, связывающее полную стоимость с значением индукции поля в центре рабочего объема камеры и геометрическими параметрами обмотки.

С помощью электронно-вычислительной машины для каждой системы были найдены оптимальные значения параметров, соответствующие её максимальной экономической эффективности.

При расчетах вводился коэффициент, показывающий во сколько раз готовое изделие дороже материалов, израсходованных на его изготовление. Кроме того, при рассмотрении сверхпроводящего соленоида стоимость криогенных установок учитывалась в цене жидкого газа. Для упрощения расчетов допускалось, что между обмотками отсутствует щель, необходимая для ввода пучка частиц в камеру. На данном этапе не представлялось возможным учсть эксплуатационные расходы, связанные, в частности, с содержанием обслуживающего персонала.

При проведении вычислений мы исходили из следующих данных:

- а) объем, в котором создается поле, представляет собой цилиндр диаметром 6м и высотой 5м. Поле направлено вдоль его оси;
- б) за период существования камеры время работы с магнитным полем составляет 20000 часов, а количество циклов охлаждения от комнатной до рабочей температуры равно 100;
- в) стоимость 1 квтч - 1,9 коп;
- г) потери электроэнергии в энергоустановках составляют 15%;
- д) капитальные затраты на сооружение электроустановок ориентировочно равны (32)  
 $18 \cdot 10^3$  руб/МГВт;
- е) плотность тока по сечению обмотки постоянна;
- ж) стоимость сверхпроводника составляет ориентировочно 1200 руб/кг.

#### § 19. Соленоид с водяным охлаждением

На основании замечаний, сделанных выше<sup>x)</sup>, и пользуясь основными соотношениями соленоида, приведенными в работах<sup>(30,31)</sup>, можно показать, что полная стоимость такого соленоида будет главным образом слагаться из затрат, связанных с сооружением энергоустановок и насосных станций, а также из стоимости собственно соленоида и потребляемой им электроэнергии.

На рис.30 приведен ряд расчетных кривых, дающих зависимость полной стоимости соленоида и отдельных её компонентов от относительного диаметра  $\alpha$  для медной обмотки прямоугольного сечения. (Смысл  $\alpha$  и других геометрических параметров пояснен на том же рисунке).

x) Подчеркнем еще раз, что расходы, связанные с содержанием обслуживающего персонала и эксплуатацией оборудования, при рассмотрении всех магнитных систем приняты приблизительно одинаковыми и в сравнительную оценку стоимости не включены. Уточнение этих расчетов с учетом всех факторов проводится в настоящее время.

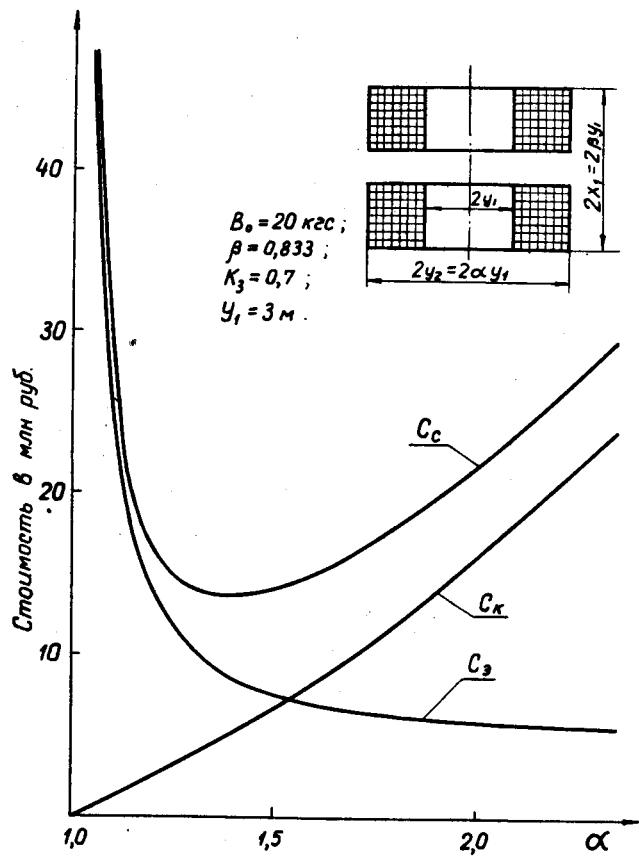


Рис. 30. Зависимость стоимости соленоида с медной обмоткой от его относительного диаметра.  $B_0$  – индукция поля в центре;  $K_3$  – коэффициент заполнения обмотки медью;  $C_c$  – полная стоимость;  $C_k$  – стоимость обмотки;  $C_3$  – стоимость электроэнергии, а также насосных и электропитающих установок.

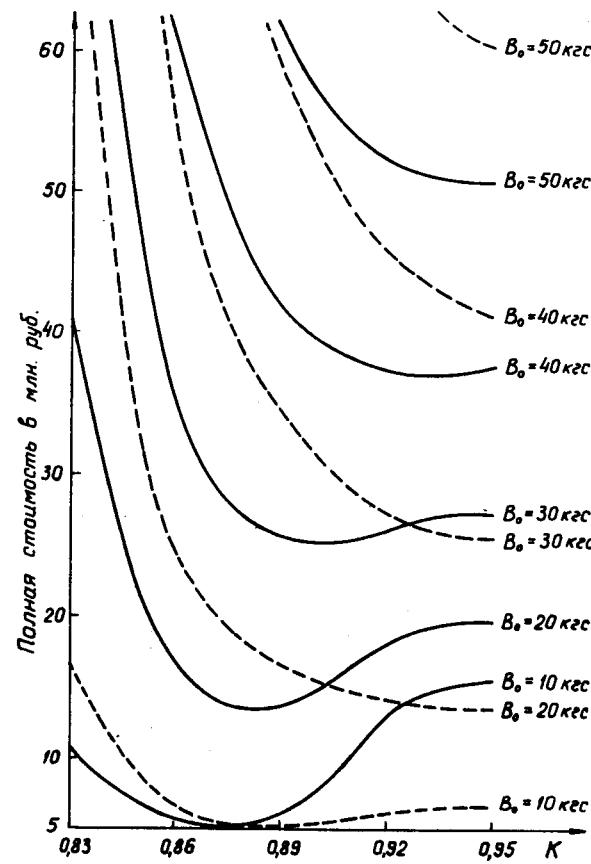


Рис. 31. Зависимость стоимости соленоида от однородности поля на оси для ряда значений индукции поля  $B_0$  в центре. Сплошные кривые относятся к медной обмотке, а пунктирные – к алюминиевой.

Из рисунка видно, что существует оптимальное значение  $\alpha$ , при котором полная стоимость соленоида минимальна. Следует подчеркнуть, что оптимальному  $\alpha$  соответствует оптимальное значение плотности тока. Полученная в результате расчетов величина оптимальной плотности тока  $j = 346 \text{ а/см}^2$  для медной обмотки хорошо согласуется с указанными в работе<sup>(33)</sup> обязательными значениями экономической плотности тока, найденными иными методами.

Аналогично, зафиксировав  $\alpha$  и варьируя величину  $\beta$ , также можно определить оптимальное значение  $\beta$  и соответствующую ему плотность тока.

В дальнейшем оптимальная плотность тока определялась путем поочередного варьирования  $\alpha$  и  $\beta$ . При этом отбирались комбинации этих величин, соответствующие минимальной полной стоимости соленоида.

Аналогичные расчеты проводились и для соленоида с алюминиевой обмоткой. Как и следовало ожидать, оптимальное значение плотности тока в этом случае существенно ниже, хотя полные стоимости медного и алюминиевого соленоидов оказались весьма близкими.

Помимо геометрических параметров, проведенный анализ позволил также определить для ряда значений индукции поля в центре оптимальную однородность, соответствующую минимальным стоимостям соленоидов с медными и алюминиевыми обмотками. Полученные результаты графически представлены на рис.31. Результирующая полная стоимость, вычисленная для соленоидов с оптимальной однородностью, в зависимости от индукции поля в центре представлена на рис. 34. Можно видеть, что стоимость медного соленоида с внутренним диаметром 6 м при индукции поля в центре 30 кгс составит примерно 24 млн.руб. Оптимальная однородность поля в данном случае на оси соленоида для точки, находящейся на краю рабочего объема камеры (на расстоянии 1,25 м от центра), равна 92%.

## § 20. Электромагнит

В работе<sup>(30)</sup> указывается, что вплоть до полей с индукцией 25-30 кгс еще может быть использован электромагнит. Создание электромагнита обычно сопровождается моделированием. Так как провести такое моделирование для нас не представлялось возможным, то была сделана попытка оценить влияние различных факторов на стоимость электромагнита, основываясь на ряде упрощающих предположений.

Полная стоимость электромагнита, кроме затрат, перечисленных в § 19, включает также стоимость магнитопровода. Зависимость полной стоимости электромагнита от величины индукции поля была найдена в результате оптимизации его геометрических размеров. Так как параметр  $\beta$  (см.рис.32) у электромагнита фиксирован и определяется глубиной камеры, то при исследовании на оптимум варьировался только параметр  $\alpha$ . Во всех расчетах принималось, что магнитопровод выполнен из стали-3, а индукция поля в нем распре-

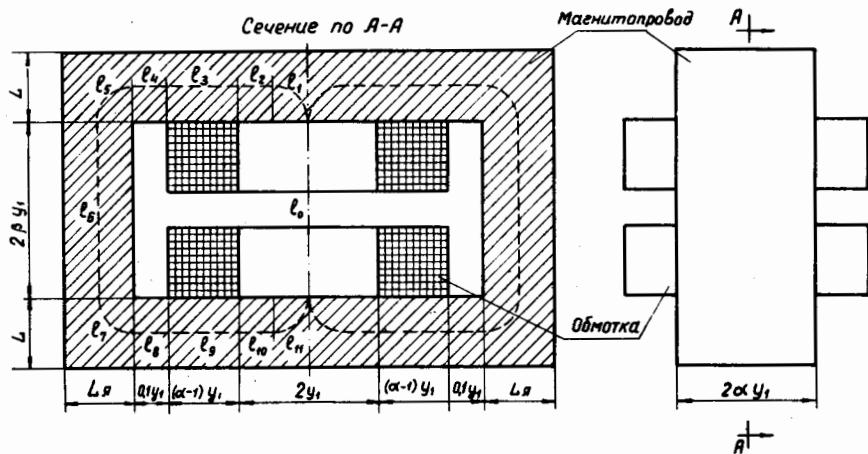


Рис. 32. Схема электромагнита.  $l$  – длины магнитных силовых линий.  
 $L_y$  – линейный размер магнитопровода.

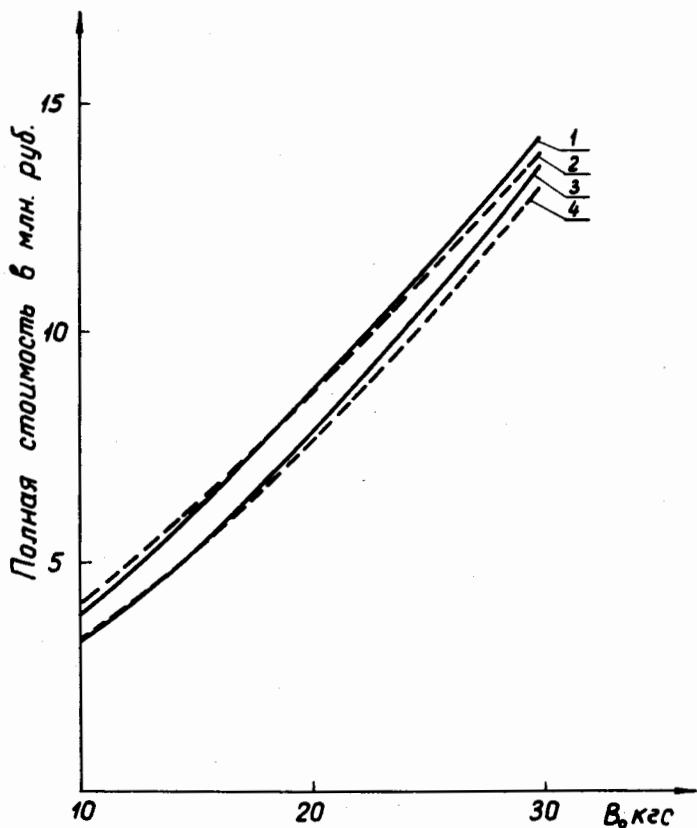


Рис. 33. Зависимость стоимости электромагнита от величины индукции поля  $B_0$  в центре. 1 – медная обмотка ( $B_0=15$  кгс.);  
2 – медная обмотка ( $B_0=20$  кгс.); 3 – алюминиевая обмотка  
( $B_0=15$  кгс.); 4 – алюминиевая обмотка ( $B_0=20$  кгс.);  
 $B_y$  – индукция магнитопровода.

делена равномерно. Результаты вычислений представлены на рис.33. Проведенные расчеты вследствие ряда грубых предположений являются сугубо ориентировочными, особенно в области полей с индукцией, большей 20 кгс. Следует ожидать, что вследствие насыщения железа стоимости электромагнита и соленоида при полях выше 25 кгс окажутся близкими.

## § 21. Соленоид из сверхпроводника

Полная стоимость такого соленоида слагается в основном из следующих компонентов:  
а) стоимости сверхпроводящего материала; б) стоимости несверхпроводящей обмотки с учетом затрат на изготовление соленоида; в) расходов на охлаждение соленоида до рабочей температуры; г) расходов на поддержание рабочей температуры в соленоиде; д) затрат на сооружение электропитающих установок; е) стоимости потребляемой электроэнергии; ж) стоимости запаса гелия; з) стоимости криостата.

При проведении расчетов предполагалось, что обмотка соленоида будет выполнена из стабилизированного сверхпроводника, изготовленного на основе сплава  $Nb + 50\% Zr$ . Принималось также, что однородность поля на расстоянии 1,25м от центра соленоида по его оси должна быть не хуже 92%.

Учитывая сказанное выше и пользуясь формулами работы<sup>(34)</sup>, можно найти зависимости полной стоимости соленоида из сверхпроводника от индукции поля. На рис.34 приведены две кривые такой зависимости (без учета стоимости криостата). Нижняя кривая получена на основании критических характеристик коротких образцов (см.рис.49) из сплава  $Nb+50\% Zr$ , имеющих наименьшие плотности тока. Верхняя кривая соответствует значению плотности тока, принятому одинаковым для всех значений индукции поля и равным  $5 \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$  x). Область, заключенная между этими кривыми, на наш взгляд, соответствует реально достижимым в настоящее время плотностям токов в сверхпроводниках и может дать представление о полной стоимости сверхпроводящего соленоида.

На рис.35 нанесены кривые единовременных затрат, идущих на сооружение различных магнитных систем, в зависимости от величины индукции поля в центре.

Из рассмотрения графиков 34 и 35 можно сделать вывод, что соленоид из сверхпроводника, даже при нынешней высокой стоимости материала и сравнительно низких допускаемых плотностях тока, будет выгоднее соленоида из меди. Появление сверхпроводящих сплавов с

x) Значение плотности тока, равное  $5 \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$ , принималось предположительно, считая его соответствующим средней плотности тока для реальных сверхпроводящих соленоидов, выполненных из рассматриваемого сверхпроводника.

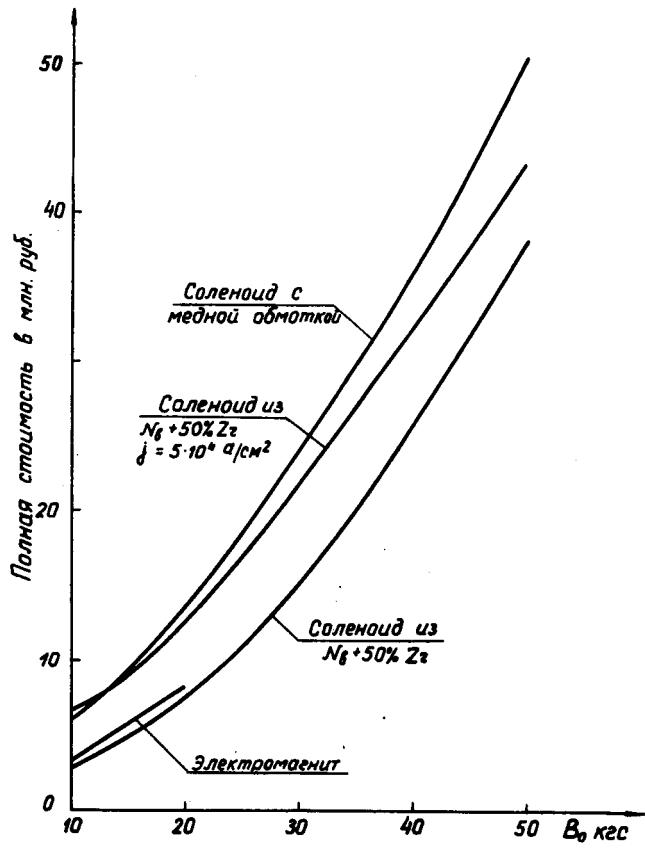


Рис. 34. Зависимость полной стоимости систем для создания магнитного поля от величины индукции  $B_0$  в центре рабочего объема камеры. Время работы - 20 000 часов.

более высокими параметрами сделает в дальнейшем такие соленоиды еще более выгодными. Кроме того, следует ожидать, что в ближайшие годы, в связи с освоением технологий и увеличением масштабов производства сверхпроводников, их стоимость существенно понизится.

Все сказанное выше позволяет прийти к заключению, что в качестве магнитной системы для пятиметровой жидкокислородной пузырьковой камеры целесообразно использовать соленоид из сверхпроводника.

Следует заметить, что затраты, указанные на приводимых графиках, не включают стоимости магнитного экрана, необходимость сооружения которого в настоящее время изучается.

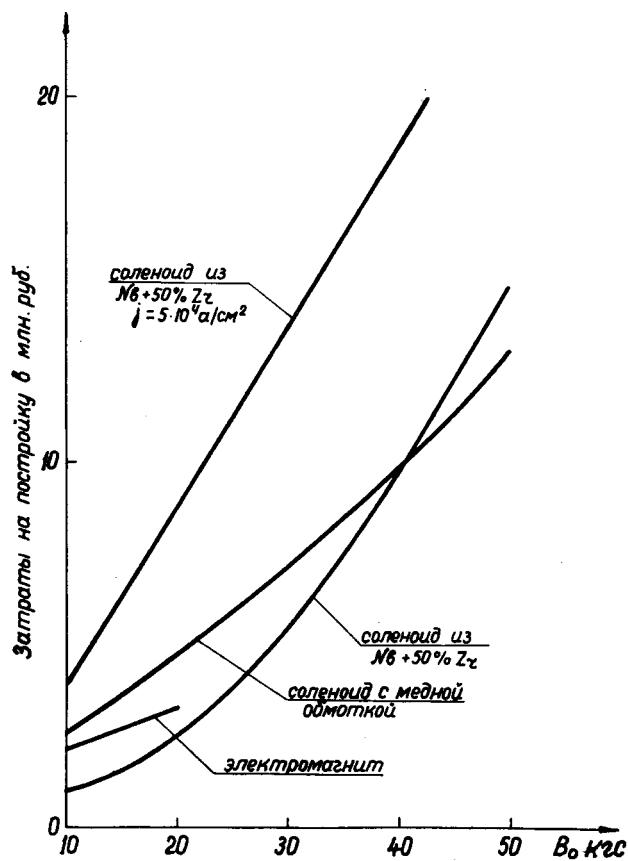


Рис. 35. Зависимость затрат на сооружение систем для создания магнитного поля от величины индукции  $B_0$  в центре рабочего объема камеры.

## ГЛАВА УП

### РАЗВЕРТЫВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Для увеличения эффективности использования проектируемой многометровой жидково-дородной пузырьковой камеры необходима развертывающая система, которая позволила бы равномерно распределить по рабочему объему камеры частицы, получаемые от ускорителя.

К системе отклонения пучка предъявляются требования:

- 1) амплитуда развертки  $4 \pm 5$  м;
- 2) время развертки  $2 \pm 5$  мсек;
- 3) число расширений камеры за один цикл работы ускорителя-5;
- 4) режим работы ускорителя 10 циклов/мин;
- 5) расстояние от начала развертывающей системы до центра камеры порядка 30 м.

#### § 22. Импульсная развертывающая система

Развертка пучка в фокальной плоскости рабочего объема камеры может быть либо непрерывной и осуществляться с помощью импульсного электромагнита, питаемого синусоидальным импульсом тока, либо ступенчатой и осуществляться с помощью ряда импульсных электромагнитов, питаемых последовательно во времени трапециoidalными импульсами тока<sup>(35)</sup>. В этих системах при отсутствии тока в импульсном магните пучок частиц может быть направлен или на центр, или на край камеры. В первом случае для обеспечения необходимой развертки пучка требуется вдвое меньшее магнитное поле и поэтому он более предпочтителен.

Однако использование подобных систем для развертки частиц высоких энергий на большие углы крайне затруднительно, так как это приводит к необходимости создания мощных импульсных магнитных полей в большом объеме. Например, при максимальной индукции в импульсном магните 2 тл и расстоянии от начала развертывающей системы до центра камеры 25 м для отклонения протонов с импульсом 70 Гэв/с на половину диаметра камеры потребуется импульсный магнит длиной порядка 19 м. Подобная система нуждается в очень мощном источнике импульсов тока.

#### § 23. Комбинированная развертывающая система

Для уменьшения размеров импульсных электромагнитов и мощности их источников питания предлагается комбинированная развертывающая система, состоящая из импульсного магнита, установленного в головной части развертывающей системы, и постоянных магнитов, располагаемых между импульсным магнитом и камерой (рис.36). Импульсный магнит, находящийся в начале развертывающей системы, задает углы входа пучка частиц в постоянные магниты. При больших углах входа частиц в постоянный магнит они проходят в магнитном поле

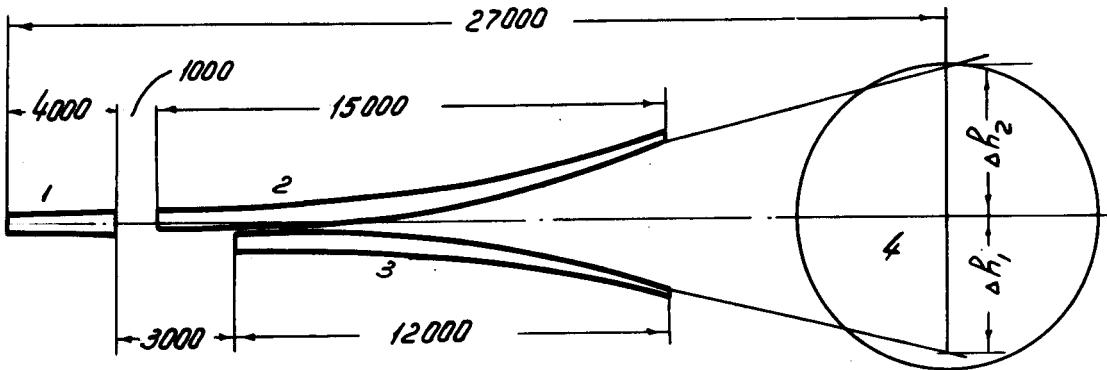


Рис. 36. Комбинированная развертывающая система. 1 - импульсный магнит; 2 и 3 - постоянные отклоняющие электромагниты; 4 - камера.

большие пути и, следовательно, претерпевают большие отклонения. Выбором формы полюсных наконечников постоянных магнитов можно достичь требуемого закона распределения пучка частиц в фокальной плоскости рабочего объема камеры.

Для нормальной работы развертывающей системы бе́зразлично первоначальное направление пучка при отсутствии поля в импульсном магните. Пучок может быть как в центре, так и на краю камеры. В первом случае для развертки пучка вдоль всей камеры в импульсный магнит необходимо подать биполярный импульс тока.

Ниже приводится предварительное рассмотрение одного из вариантов развертывающей системы, предназначеннной для отклонения протонов с энергией 70 Гэв. Размеры системы указаны на рис.36. Предварительные расчеты выполнены при следующих предположениях:

1. Магнитное поле в зазоре постоянных магнитов является однородным.
2. Магнитное поле в рабочем объеме и рассеянное поле вблизи камеры равно нулю.
3. Ток в импульсном магните меняется по синусоидальному закону.

При движении пучка частиц сначала в однородном магнитном поле, а затем при отсутствии магнитного поля, отклонение пучка в развертывающей системе будет:

$$\Delta h = R - \frac{R^2 - L\ell}{\sqrt{R^2 - \ell^2}},$$

где:  $\Delta h$  - отклонение пучка,  $L$  - расстояние от центра камеры до начала магнита,  $\ell$  - длина магнита,  $R$  - радиус кривизны. Радиус кривизны (в метрах) согласно<sup>(36)</sup> равен:

$$R = \frac{P}{0,29978 Z B},$$

где:  $P$  - импульс частицы в Гэв/с;  $B$  - индукция в единицах тесла;  $Z$  - заряд частицы в элементарных единицах заряда.

Для заданных размеров развертывающей системы и индукции в магнитном зазоре  $B=2$  тл амплитуда развертки пучка, равная сумме отклонений, производимых импульсным и постоянными магнитами, будет 4,9 м.

Зная амплитуду и время развертки, можно определить положение пучка частиц в камере в различные моменты времени. Затем для заданной кривой тока в импульсном магните аналитически или графически определяется конфигурация магнитных дорожек постоянных магнитов.

#### § 24. Отклоняющие магниты

В рассматриваемом варианте импульсный магнит целесообразно выполнить броневым с воздушным зазором в центральном стержне (см.рис.37). Сечение полюсных наконечников должно быть трапециевидным, что даст возможность согласно<sup>(37)</sup> существенно повысить эффективность магнита. Материалом сердечника импульсного магнита может служить листовая электротехническая сталь марки Э-320.

Постоянные отклоняющие магниты проектируются С-образной формы. Из-за большой длины отклоняющих магнитов (12м и 15 м) их можно разбить на отдельные секции. Ширина и форма полюсных наконечников определяется параметрами магнитного поля, обеспечивающими равномерную развертку пучка по диаметру камеры. Основные данные магнитов приведены в табл.8.

Таблица 8

Магнит	Индукция в зазоре, тл	Величина зазора, см	Число витков	Индуктивность, гн	Сопротивление, ом	Вес меди, т	Вес стали, т
Импульсный	2,0	5	10	$1,65 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,11	12
1-й постоянный	2,0	10	172	-	0,65	12	180
2-й постоянный	2,0	10	172	-	0,75		

Обмотки изготавливаются из медной трубы сечением 128 мм<sup>2</sup>, охлаждение магнита водяное.

### § 25. Источники питания

В качестве источников питания для постоянных магнитов могут быть использованы генераторы постоянного тока с суммарной мощностью порядка 1500 квт.

Для питания импульсного магнита необходим специальный источник тока, создающий импульсы тока длительностью 20 мсек, синхронизированные с работой камеры. Так как за один цикл ускорения происходит 5 циклов расширения камеры, то генератор должен создавать 5 импульсов за время, примерно равное 300 мсек. Интервал между отдельными группами импульсов выбирается равным 6 сек.

В качестве генератора синусоидального тока может быть использован специальный импульсный машинный генератор или независимый инвертор однофазного тока. Для уменьшения мощности генератора параллельно обмотке магнита необходимо подключить конденсаторную батарею, реактивная мощность которой равна реактивной мощности, потребляемой магнитом. Для уменьшения нагрева обмоток магнита они подключаются к генератору только во время работы камеры (примерно на 300 ± 500 мсек).

Синусоидальный импульс тока можно получить при разряде конденсаторной батареи на импульсный магнит через коммутирующие вентили (например, игнитроны типа ИВС-100/15). При использовании импульсных конденсаторов типа ИМ-5-150, номинальное рабочее напряжение которых равно 5 кв, емкость конденсаторной батареи для рассматриваемого магнита составит 0,008 ф. Для получения биполярного импульса тока игнитроны включаются встречно-параллельно (рис.38). Через игнитроны первой группы проходит положительная волна тока, тогда как через игнитроны второй группы – отрицательная полуволна. При малом коэффициенте затухания ток магнита близок к синусоидальному, а напряжение на конденсаторной батарее меняется

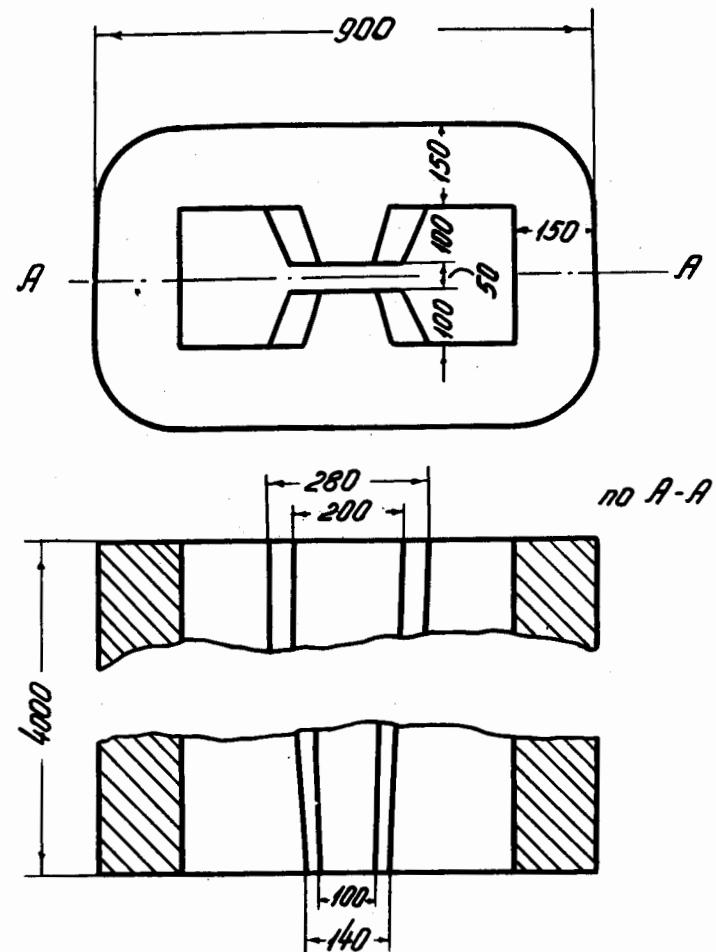


Рис. 37. Сердечник импульсного магнита.

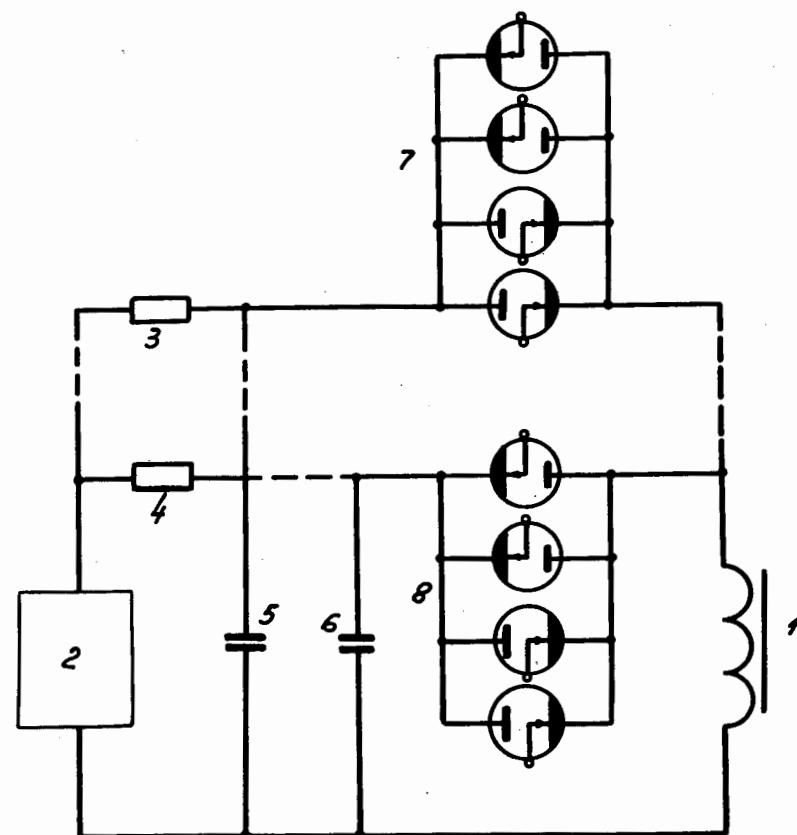


Рис. 38. Схема источника питания импульсного магнита.

1 - импульсный магнит; 2 - выпрямитель;  
3, 4 - зарядные сопротивления; 5, 6 - конденсаторы; 7, 8 - игнитроны.

почти по косинусоидальному закону.

Так как по условиям работы камеры генератор импульсов должен создавать 5 импульсов тока за один цикл работы ускорителя, то необходимо использовать 5 конденсаторных батарей, которые последовательно разряжаются на магнит.

Рассмотренная развертывающая система представляется довольно громоздким сооружением и требует сравнительно мощных источников питания.

Для уменьшения размеров магнитов и мощности их источников питания желательно увеличить расстояние от начала развертывающей системы до камеры и иметь хорошо сфокусированный пучок частиц, что позволит уменьшить зазоры между полюсными наконечниками магнитов. Значительного уменьшения времени развертки пучка частиц вдоль фокальной плоскости рабочего объема камеры можно достичь, применив многосекционный импульсный магнит со специальным источником тока<sup>(35)</sup>.

Кроме того, необходимо рассмотреть возможность изготовления постоянных отклоняющих магнитов развертывающей системы из сверхпроводящего материала.

### ГЛАВА III

#### КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ, СИНХРОНИЗАЦИЯ

Пятиметровая жидколоводородная пузырьковая камера является сложным физическим прибором, по своим масштабам не уступающим крупной промышленной установке. Комплекс основного оборудования камеры включает: I) собственно камеру; 2) соленоид со сверхпроводящими обмотками; 3) криогенные установки; 4) вакуумные агрегаты; 5) компрессорное хозяйство; 6) гидравлические устройства; 7) вакуумные системы; 8) систему аварийной защиты; 9) хранилище для сжиженного и сжатого газа; 10) вспомогательные ремонтно-профилактические приспособления; II) магнитные системы для развертки пучка; 12) энергетические установки и т.п.

Весь комплекс оборудования камеры охватывается единой системой централизованного управления, контроля, сигнализации, автоматического регулирования и связи. Наличие огромных количеств жидкого водорода требует соблюдения особых мер предосторожности при проведении экспериментов на камере<sup>(38)</sup>. Кроме применения самосрабатывающих устройств (защитных мембран, предохранительных клапанов и т.п.), предотвращающих возможность возникновения чрезмерного повышения давления и исключающих проникновение жидкого водорода в вакуумную систему<sup>(39)</sup>, в установке предусматриваются автоматические блокирующие устройства, своевременно останавливающие работу расширительного механизма, снимающие напряжение с импульсных ламп, отключающие вспомогательные агрегаты камеры, включающие сис-

тему аварийной вентиляции и т.п.

Ниже приводятся соображения по выбору и компоновке контрольно-регулирующих устройств, а также рассматриваются вопросы построения системы синхронизации работы камеры с ускорителем.

### § 26. Блок-схема установки

На рис.39 приведена общая блок-схема установки. В нее не включены охлаждающие устройства и системы сброса и хранения сжиженных газов, поскольку криогенные системы подробно рассматриваются во II части.

Камера со вспомогательным оборудованием, обеспечивающим работу всех её узлов, размещается в отдельном зале. Часть этого оборудования имеет местные блоки и пульты управления, снабженные приборами во взрывобезопасном исполнении. Все устройства, находящиеся в рассеянном магнитном поле, экранируются от его воздействия.

Операции регулирования и контроля при работе камеры осуществляются дистанционно. Для этой цели наиболее ответственные контрольно-измерительные приборы выносятся в отдельный зал, где располагается центральный пульт управления и размещаются наиболее важные устройства оперативного регулирования и контроля.

### § 27. Центральный пульт управления

Конструкция пульта и размещение его оборудования выполняются так, чтобы оператор мог легко производить необходимое регулирование и следить за работой установки. На центральном пульте располагаются:

1. Вторичные приборы дистанционных манометров, непосредственно измеряющих давление в рабочем объеме камеры.

2. Приборы, показывающие и запоминающие динамические процессы, протекающие в рабочем объеме камеры и в наиболее ответственных узлах системы расширения во время рабочих циклов. Для этой цели пульт оборудуется многолучевым запоминающим осциллографом, который позволяет одновременно, но независимо, наблюдать кривые расширения и хода поршня с наложенными на них сигналами от пучка частиц и импульсных ламп. Такая система дает возможность детально проследить всю последовательность сложной цепи процессов, развивающихся в различных узлах установки. Первичными приборами этой контрольной системы являются емкостные и индуктивные датчики.

3. Приборы измерения абсолютной температуры в нескольких точках рабочего объема камеры (точность отсчета должна быть не хуже  $0,01^{\circ}$ ).

4. Приборы, фиксирующие ход и крайние положения поршня и торOIDального сильфона (точность отсчета – не хуже 0,5 мм).

5. Основные регулирующие органы системы синхронизации работы камеры с ускорителем,

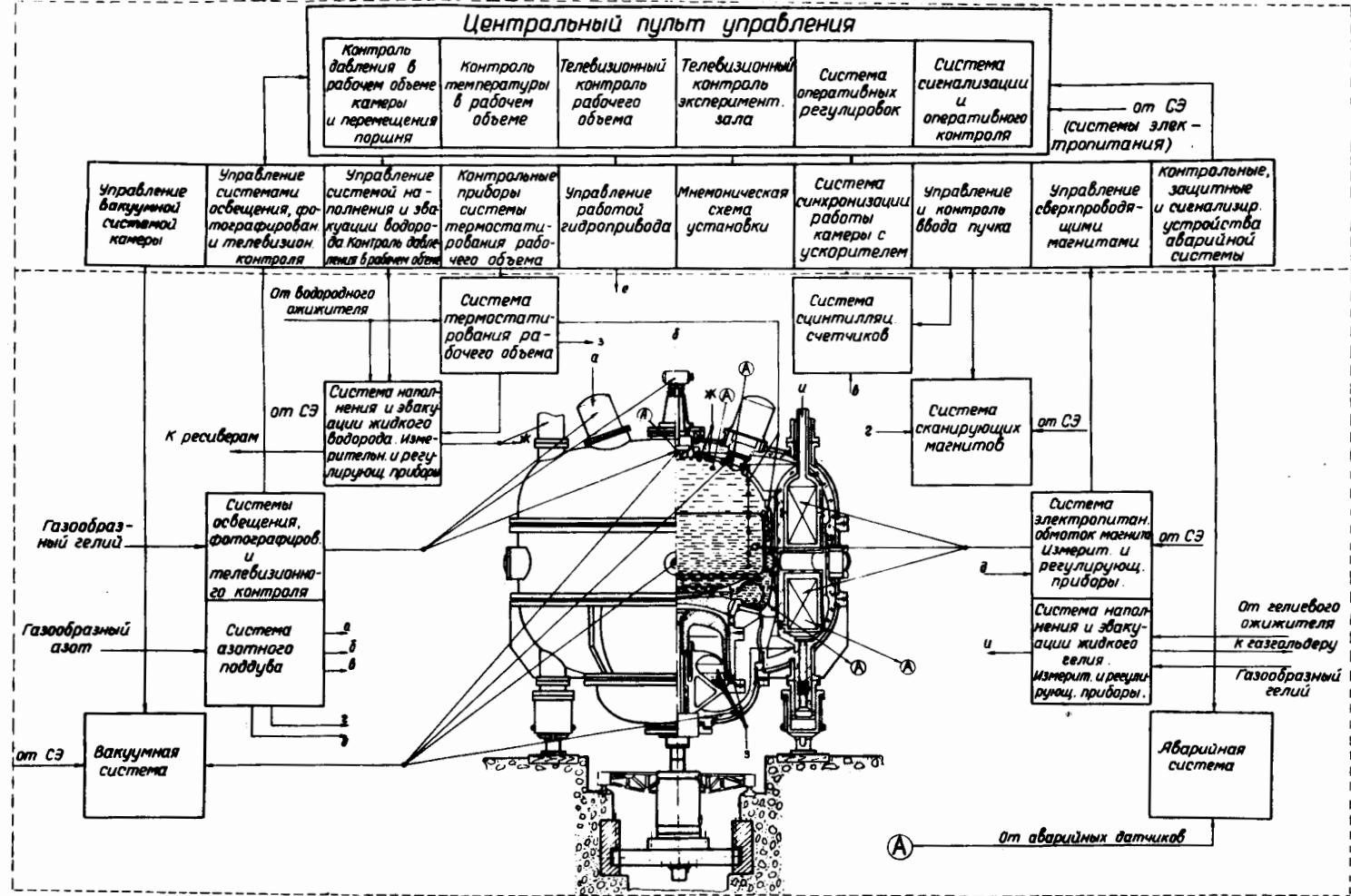


Рис. 39. Общая блок-схема установки.

позволяющие по желанию оператора изменять режим работы камеры, регулировать положение пучка на кривой расширения и т.д.

6. Телевизионные установки для наблюдения рабочего объема камеры, основного экспериментального зала и ряда других технологических помещений. У каждой телевизионной установки предусматриваются коммутаторы, позволяющие по желанию оператора производить выбор объекта наблюдения.

7. Приборы контроля напряженности магнитного поля, числа частиц в пучке, числа кадров, суммарного числа циклов.

8. Сигнализаторы, оповещающие о всех нарушениях неаварийного характера. Сюда относятся световое табло, сигнализирующее о неисправностях ламп-вспышек, лентопротяжных механизмов, об обрывах или окончании пленки, о нарушениях в системе синхронизации, об изменении числа частиц. Здесь же находится зуммер, оповещающий оператора о предстоящем впуске пучка в камеру.

9. Табло световой сигнализации аварийного состояния наиболее ответственных узлов и систем камеры. Здесь осуществляется сигнализация о нарушениях вакуума, о возникновении утечек водорода в помещение, о чрезмерном повышении или падении давления в рабочем объеме, об аварийных отклонениях поршня или омега-сильфона, о деградации магнитного поля сверхпроводящего соленоида, о понижении уровня гелия, о нарушениях магистралей гидропривода и т.п. Включение каждого аварийного табло сопровождается сигналом сирены.

### § 28. Функциональные блоки

Размещение аппаратуры регулирования и контроля различных узлов камеры производится поблочно. Каждый блок включает в себя приборы, относящиеся только к одной управляемой им системе:

а) Управление гидроприводом. Этот блок содержит:

- I) Схемы управления работой электромагнитных клапанов гидропривода.
- 2) Радиосхемы преобразования сигналов от динамических датчиков давления.
- 3) Схему стабилизации положения поршня.
- 4) Схему измерения скорости поршня и индикации его положения при остановках.

5) Вторичные приборы (электронные потенциометры и т.п.), работающие от датчиков давления, температуры, уровня и расхода.

б) Управление вакуумной системой. В блоке размещаются:

- I) Приборы дистанционного управления работой вакуумных агрегатов.
- 2) Приборы контроля вакуума.
- 3) Блокировочные устройства, исключающие возможность ошибочного включения вакуумного оборудования в работу.

4) Приборы световой и звуковой сигнализации о нарушении вакуума.

в) Управление системами освещения, фотографирования и телевизионного контроля.

В этот блок входят:

I) Высоковольтные выпрямители для питания ламп-вспышек.

2) Источники питания электродвигателей фотоаппаратов (или схема управления системой пневматической протяжки пленки).

3) Пульт управления телевизионной системой.

4) Прибор контроля температуры защитных стекол объективов.

5) Схема для задания стробоскопического режима ламп контрольного освещения.

6) Приборы контроля давления газа в защитных объемах системы фотографирования.

7) Прибор контроля вакуума в защитных объемах.

8) Схема контроля работы импульсных ламп подсвета.

г) Управление системой наполнения и эвакуации водорода. Блок включает в себя:

I) Приборы, регулирующие уровень водорода по мере заполнения камеры. Датчиками уровня могут, например, служить конденсационные манометры (40,4I).

2) Приборы контроля устройства автоматического поддержания количества жидкости в рабочем объеме камеры.

3) Вторичные приборы, показывающие статическое давление.

д) Контрольные приборы терmostатирующей системы. В этом блоке размещены:

I) Вторичные приборы, показывающие и регистрирующие температуру в различных точках рабочего объема камеры, поршневого устройства и в терmostатирующих змеевиках.

2) Манометры, указывающие давление в системе терmostатирующих змеевиков.

е) Ввод пучка и контроль интенсивности. В блоке размещены:

I) Схемы дистанционного контроля работы отклоняющих магнитов.

2) Контрольные приборы системы стабилизации питания магнитов.

3) Высоковольтные стабилизированные источники питания фотоумножителей сцинтиляционных счетчиков.

4) Блок регулирования напряжения на каждом фотоумножителе.

5) Блок линий задержек для согласования времен прохождения сигналов от фотоумножителей к схемам совпадений.

6) Высокочастотные разветвители сигналов.

7) Схемы совпадений и широкополосные усилители.

8) Пересчетные приборы.

9) Логические схемы (схемы пропускания, блокировки), предназначенные для управления пересчетным прибором, регистрирующим число частиц в каждом цикле.

- I0) Преобразователи электрических сигналов в цифровой код и устройство печати чисел.
- I1) Приборы дистанционного управления системой вывода пучка.
- I2) Приборы контроля интенсивности внутреннего пучка ускорителя.
- I3) Приборы контроля электронных схем.
- и) Синхронизирующее устройство. В этом блоке размещены:
- I) Электронная схема синхронизирующего устройства, состоящая из каскадов, согласовывающих момент прохождения пучка с работой расширительного устройства и системой фотографирования. Подробное описание этой схемы дано в § 29.
- 2) Логическая схема автоматического контроля работы системы синхронизации.
- 3) Основные и резервные блоки питания.
- 4) Приборы для контроля и настройки схем системы синхронизации.
- и) Управление сверхпроводящим магнитом. В блоке находятся:
- I) Вторичный прибор, показывающий напряженность магнитного поля в рабочем объеме камеры.
- 2) Контрольные приборы схем защиты сверхпроводящих обмоток.
- 3) Вторичный прибор сверхпроводящего датчика уровня гелия.
- 4) Органы ручного управления системой наполнения криостата гелием.
- 5) Вторичный прибор, показывающий расход гелия.
- 6) Вторичный прибор манометра, показывающего давление в криостате.
- и) Устройства аварийной защиты. В помещениях и промежуточных объемах некоторых узлов камеры, где в результате течей может оказаться взрывоопасная концентрация водорода, устанавливаются датчики быстродействующих газоанализаторов. При появлении водорода вырабатывается сигнал, который оповещает об опасности, включает на форсированный режим вентиляцию, останавливает гидропривод и т.д. Чтобы при внезапном выключении электропитания не произошла авария, в блоке защиты предусматривается система резервирования питания от аккумуляторных батарей.
- Логические схемы системы защиты анализируют сигналы, поступающие со всех блоков и узлов камеры, и, в случае возникновения аварии, производят включения соответствующих блокировок.
- Для повышения надежности работы системы защиты необходимо все датчики, логические схемы и исполнительные механизмы блокировок дублировать.
- и) Световое табло. Блок объединяет в себе все световые сигнальные устройства, указывающие на нарушение работы перечисленных выше систем, а также на все отклонения от нормального протекания технологического процесса.

л) Мнемоническая схема установки. На мнемонической схеме четко изображаются все узлы и системы установки, а также магистральные линии наполнения и эвакуации жидкого водорода, откачки, электропитания и т.д.

Для предотвращения поломок и аварий при неправильных действиях оператора предусматриваются логические схемы и блокировки, не допускающие включения оборудования в работу и сигнализирующие об ошибках.

### § 29. Синхронизация камеры с ускорителем

По предварительным данным ожидается, что длительность импульса частиц от протонного синхротрона ИФВЭ составит  $0,3 - 0,5$  сек при интервале их следования  $5-8$  сек. Так как расчетный период колебаний расширительной системы камеры равен  $100 \pm 150$  мсек, то каждому циклу ускорения может соответствовать от 2 до 5 фотографий треков частиц. Таким образом, расширительное устройство камеры, система сканирования камеры пучком, а также аппаратура для фотографирования должны работать сериями через каждые  $5-8$  сек. Это обстоятельство определяет основное отличие создаваемого синхронизирующего устройства от ранее известных<sup>(42,43)</sup>.

Изображенная на рис.40 блок-схема синхронизирующего устройства составлена для схемы управления гидравлическим приводом, описание которой дается в § 12 главы IУ. При этом также учитывался тот факт, что начало каждой серии расширений задается стартовым импульсом от ускорителя, а вся последующая работа систем камеры определяется внутренними синхроимпульсами, получаемыми от датчиков давления, установленных на гидроприводе.

При помощи коммутатора рода работы возможно осуществить внешний и внутренний режимы запуска камеры. В режиме внешнего запуска синхронизация осуществляется стартовыми импульсами, полученными от ускорителя; при внутреннем запуске синхроимпульсы поступают от специального генератора имитирующих импульсов. Дальнейшая работа в обоих случаях происходит либо от импульсов гидропривода, либо от его имитатора.

Каскад задержки синхронизирующих импульсов КЗ<sub>1</sub> применен для смещения первого цикла серии относительно начала пучка частиц. В связи с тем, что для ввода пучка в камеру используется система сканирования, то требования к стабильности временной задержки этого каскада могут быть нежесткими. Важно только, чтобы начало пучка совпадало с началом прямого хода сканирования. Поэтому каскад может быть выполнен по схеме одновибратора с относительной нестабильностью  $5-8\%$ <sup>(44)</sup>. Стартовый импульс, задержанный каскадом КЗ<sub>1</sub>, открывает клапан запуска и перебрасывает электронные ключи ЭК<sub>1</sub> и ЭК<sub>2</sub>.

В момент начала сброса давления от датчика, установленного в гидроприводе, на схему поступает импульс, который запускает все последующие каналы системы синхронизации. Наиболее выгодное положение пучка по отношению к началу расширения задается изменением времен-

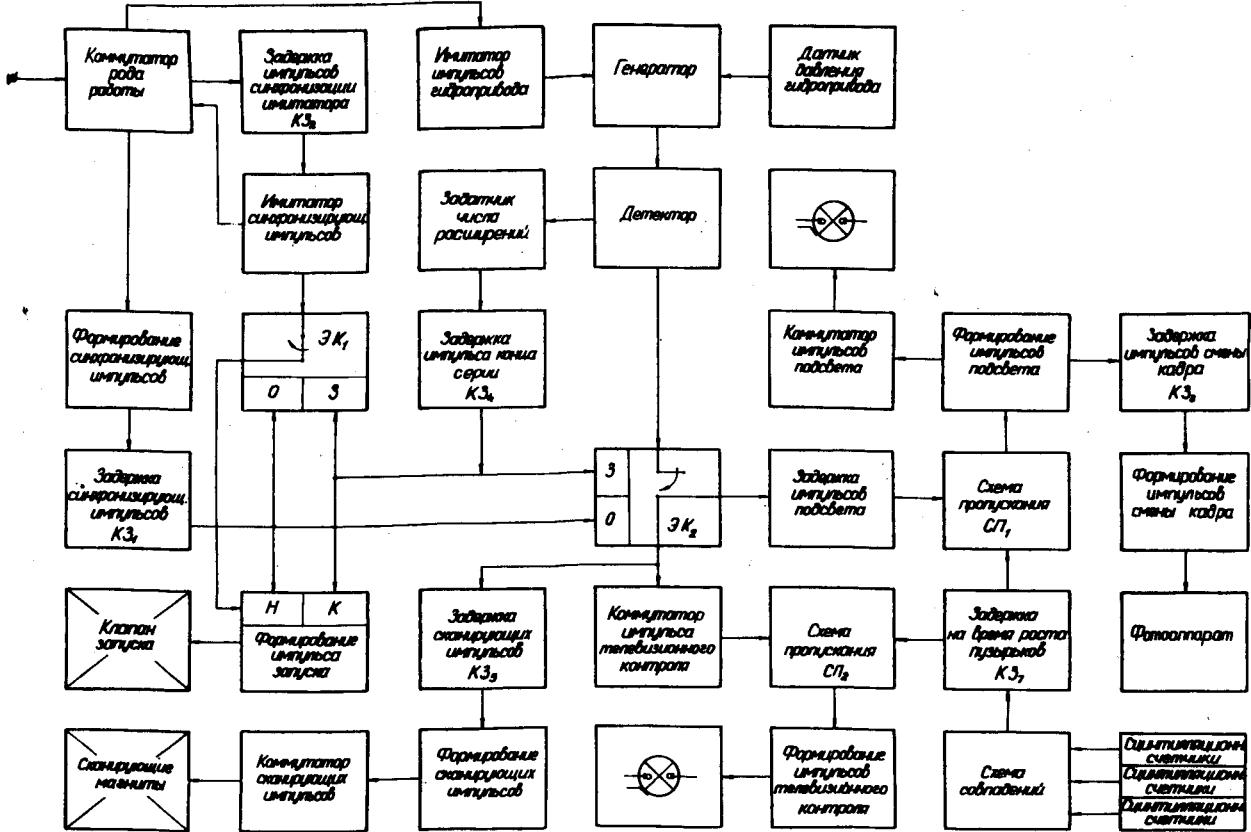


Рис. 40. Блок-схема синхронизирующего устройства.

ной задержки в каскаде КЗ<sub>5</sub>.

Возраст пузырьков треков частиц определяется временем задержки импульса, поступающего от схемы совпадений, к которой подключен телескоп из сцинтилляционных счетчиков. Этот импульс соответствует началу прохождения пучка частиц через рабочий объем камеры. Чтобы нестабильность временной задержки каскада КЗ<sub>7</sub> не влияла на возраст пузырьков, он выполнен по схеме фантастрона с относительной нестабильностью 0,5 %<sup>(45)</sup>.

Коммутатор телевизионного контроля позволяет выбирать для визуального просмотра любой из кадров данной серии. Схемы пропускания СП<sub>1</sub> и СП<sub>2</sub> предотвращают включение каналов подсвета и телевизионного контроля в отсутствии пучка.

Задатчик числа расширений отсчитывает количество импульсов, поступающих от гидропривода, и, в зависимости от заданной программы, выдает импульс конца серии. Пройдя каскад задержки КЗ<sub>4</sub>, этот импульс закрывает клапан запуска и перебрасывает в исходное положение ключи ЭК<sub>1</sub> и ЭК<sub>2</sub>. С приходом на вход синхронизирующего устройства следующего импульса от ускорителя серия повторяется. На рис.4I изображена временная диаграмма следования импульсов через основные блоки системы синхронизации камеры.

В случае вынужденной остановки ускорителя, на вход синхронизирующего устройства импульсы не поступают. Расширительная система прекращает свою работу и установившийся в динамике температурный режим камеры нарушается. Для устранения этого недостатка в синхронизирующем устройстве предусмотрена система стабилизации термодинамического режима, состоящая из генератора-имитатора синхроимпульсов ускорителя и электронных ключей ЭК<sub>1</sub> и ЭК<sub>2</sub>. Длительность интервала следования импульсов имитатора выбирается на 0,05-0,1 сек больше интервала между синхронизирующими импульсами. Через каскад задержки КЗ<sub>2</sub> импульсы, получаемые от ускорителя, синхронизируют имитатор, запуская его после начала работы клапана сброса давления и срабатывания электронных ключей. Так как в этот момент ключ ЭК<sub>1</sub> оказывается переброшенным, то импульс от имитатора не попадает в рабочий канал. В случае отсутствия на входе устройства синхроимпульсов от ускорителя каскад задержки КЗ<sub>1</sub> не работает, электронные ключи находятся в исходном положении и, следовательно, запуск схемы осуществляется сигналами, поступающими от имитатора. При этом импульсы от гидропривода через электронный ключ ЭК<sub>2</sub> не проходят в остальные каналы.

Требования к стабильности временной задержки каскадов КЗ<sub>2</sub>, КЗ<sub>3</sub>, КЗ<sub>4</sub>, КЗ<sub>5</sub>, КЗ<sub>6</sub>, КЗ<sub>8</sub> и коммутатора импульса телевизионного контроля не слишком жесткие, и поэтому каскады могут быть выполнены по схеме одновибратора с относительной нестабильностью 5-8 %. Для обеспечения бесперебойной работы магнитов сканирования и импульсных ламп предусмотрены схемы коммутации, осуществляющие поочередное подключение нескольких накопителей энергии к одной нагрузке. Подзаряд накопителей происходит в промежуток между сериями.

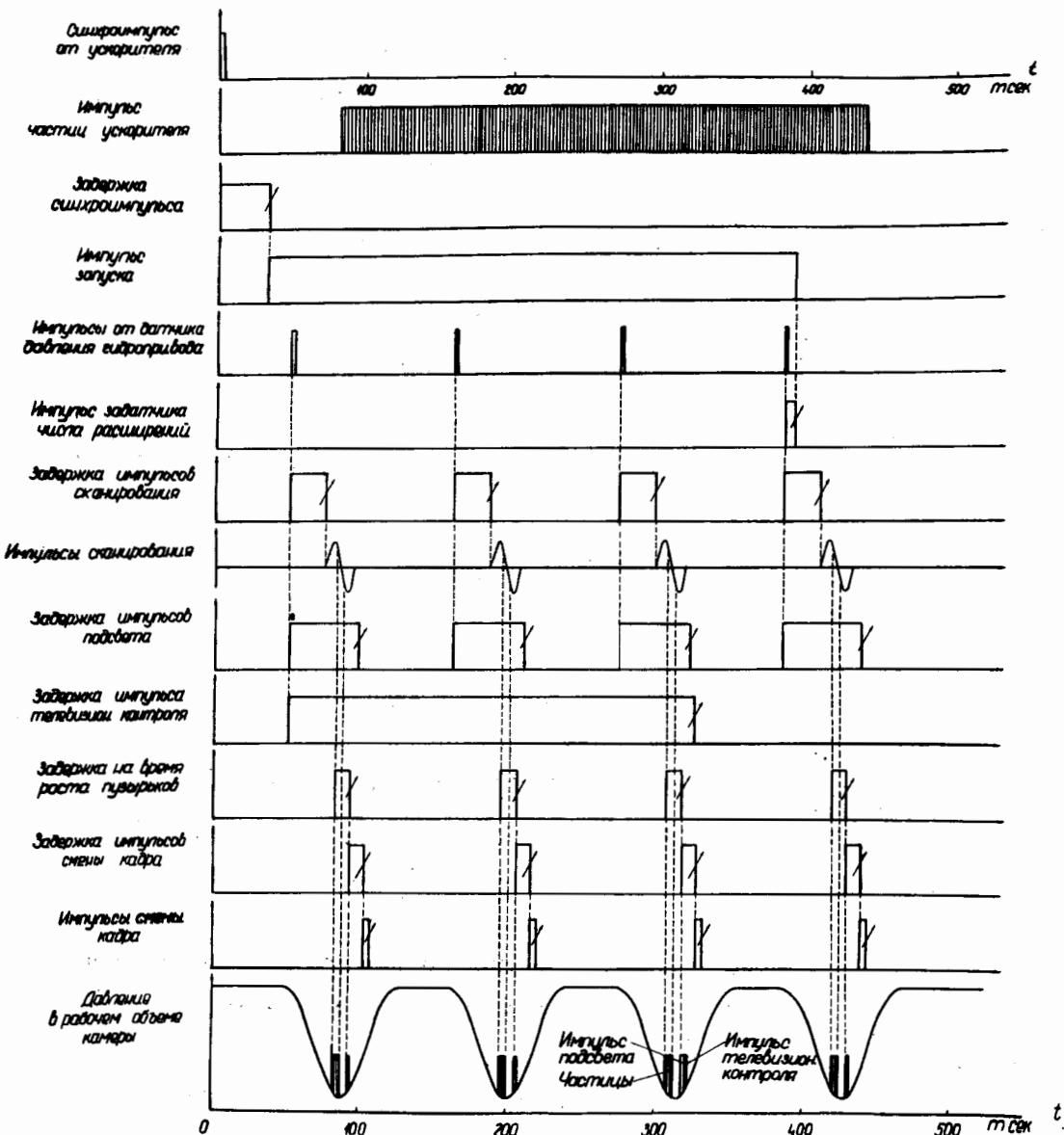


Рис. 4I. Временная диаграмма следования импульсов.

Для повышения надежности, уменьшения габаритов и потребляемой мощности синхронизирующее устройство выполняется на полупроводниковых элементах. Перед установкой в схему синхронизации полупроводниковые элементы должны быть подвергены искусенному старению, с целью выявления внутренних дефектов и устранения возможных выходов из строя в начальный период эксплуатации.

В синхронизирующем устройстве предусматривается система оперативного автоматического контроля за работой всех блоков. Вся работа системы синхронизации должна наглядно отражаться на мнемонической схеме установки.

## ГЛАВА IX

### МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пятиметровая жидкокристаллическая пузырьковая камера в техническом отношении является прибором, который не имеет себе непосредственного аналога. Решение многих узлов такой камеры является принципиально новым как с конструкционной, так и с технологической стороны. Конструкция камеры основывается на целом ряде новейших научно-технических достижений, воплощение которых в промышленном масштабе будет впервые осуществлено на этом приборе. Кроме того, камера таких размеров является уникальным прибором. Поэтому отдельные узлы камеры в силу специфики эксплуатации и сложной композиции одновременного действия многих факторов – низких температур, давления, вакуума и динамических нагрузок – не могут быть полностью решены только расчетным путем.

Одним из способом преодоления технических трудностей, возникающих при проектировании крупной установки, является проведение всесторонней экспериментальной отработки отдельных её узлов на моделях и макетах. В частности, наиболее полная информация о физических процессах, протекающих в такой установке, может быть получена только в условиях, максимально приближенных к реальным путем создания аналогичного прибора небольшого размера, когда технология изготовления и конструктивное исполнение учитывают требования, предъявляемые к крупной установке.

Поэтому, чтобы в максимальной мере удовлетворить поставленной выше задаче, была разработана широкая программа проведения комплекса модельных испытаний, которые должны способствовать получению исчерпывающей информации по различным аспектам рассматриваемой проблемы. С той же целью была начата разработка 50-сантиметровой модели камеры в магните-соленоиде из сверхпроводника. Ей предшествовал большой объем методических исследований, проведенных на действующей 25-сантиметровой камере, а также разработка и испытание серии сверхпроводящих соленоидов нарастающего размера.

С помощью 50-сантиметровой камеры будет проведено детальное исследование следующих систем:

- 1) соленоида из сверхпроводника,
- 2) гидравлического привода системы расширения,
- 3) тороидального сильфона,
- 4) системы освещения и фотографирования с применением скотчлайта.

Поскольку создание 50-сантиметровой камеры связано с материальными затратами, то целесообразно после проведения модельных испытаний использовать её как действующий прибор, предназначенный для постановки физических опытов в пучках частиц сравнительно небольших энергий, получаемых на синхроциклоне ЛЯП.

### § 30. Конструкция 50-сантиметровой водородно-дейтериевой пузырьковой камеры

Стремление в одном техническом комплексе сочетать установку для моделирования и полноценный физический прибор для ядерных исследований накладывает отпечаток на конструктивное исполнение 50-сантиметровой камеры. Так в случае использования камеры в качестве физического прибора весьма целесообразно применить систему фотографирования на темном поле, как обеспечивающую наиболее контрастное изображение малых пузырьков на пленке. Поэтому конструктивно камера должна быть выполнена таким образом, чтобы переход от темнопольной системы освещения к светлопольной и обратно не был связан с существенными осложнениями.

На рис.42 представлен совмещенный чертеж двух вариантов камеры, в одном из которых используется система освещения напросвет с помощью линзы (правая половина рисунка), а в другом - для освещения применяется скотчлайт (левая половина рисунка). Элементы конструкции камеры обозначены в подписи к рисунку. Основные её характеристики приведены в табл.9.

Таблица 9

- I. Внутренний диаметр - 50 см.
2. Глубина камеры - 52 см.
3. Рабочий объем - 80 литров в варианте со скотчлайтом и 120 литров в варианте с линзой.
4. Система расширения - тороидальный сильфон с гидравлическим приводом.
5. Пределы изменения давления в рабочем объеме - 2-10 атм.
6. Рабочий ход сильфона при 1% расширении - 3 мм.
7. Время цикла - 15 мсек<sup>x)</sup>.
8. Система терmostатирования - водород, кипящий под давлением.
9. Способ фотографирования - на темном или светлом поле.
10. Магнитное поле - 40 кгс.
- II. Теплоизоляция - высоковакуумная.

x) При вычислении времени цикла использовалось значение коэффициента сжимаемости водорода  $K_0 = 2,115 \cdot 10^{-3}$  (46).

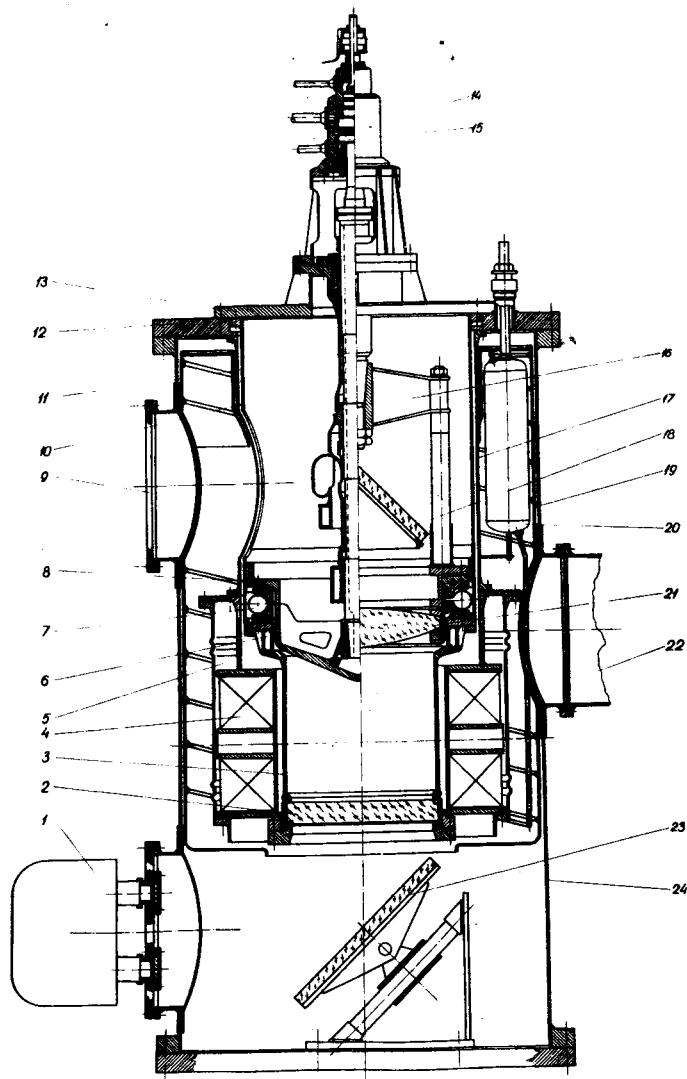


Рис. 42. Совмещенный чертеж двух исполнений 50-сантиметровой камеры.

1 - стереофотоаппарат; 2 - смотровое окно; 3 - корпус камеры;  
 4 - соленоид из сверхпроводника; 5 - криостат соленоида;  
 6 - термостатирующая полость; 7 - торoidalный сильфон;  
 8 - днище; 9 - люк для осветителя; 10 - тонкостенный цилиндр  
 для крепления камеры; 11 - шток; 12 - кольцевая крышка;  
 13 - крышка; 14 - гидравлический цилиндр; 15 - поршень;  
 16 - силовой каркас; 17 - тонкостенный цилиндр для крепления  
 криостата; 18 - зеркало; 19 - азотный экран; 20 - резервный  
 бачок; 21 - собирающая линза; 22 - патрубок для откачки;  
 23 - зеркало; 24 - вакуумный кожух.

### § 31. Расширительное устройство

В настоящем параграфе рассматривается только силовая часть гидравлической системы, которая конструировалась в соответствии с принципиальной схемой, приведенной на рис.43а).

Рассмотрим работу гидропривода, руководствуясь этой схемой. Давление  $P_0$  является демпфирующим. Его величина устанавливается постоянной и равной  $300 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Давления  $P_1$  и  $P_2$  выбираются так, чтобы выполнялось условие  $P_2 > P_1$ . При поджатии камеры клапан  $K_2$  открывается, и масло поступает под давлением  $P_2$  в полость I гидравлического цилиндра. В это же время клапан  $K_1$  закрыт, а  $K_4$  – открыт. К концу поджатия обратный клапан  $K_3$  закрывается, и в объеме устанавливается давление  $P = 300 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Система останавливается, и камера оказывается в поджатом состоянии. При расширении клапаны  $K_1$  и  $K_4$  открыты, а  $K_3$  и  $K_2$  – закрыты. В этом случае масло под давлением  $P_1$  из гидравлического цилиндра поступает в аккумулятор  $P_1$ . Система начинает двигаться. В момент достижения подвижной системой нулевой скорости клапан  $K_4$  закрывается, и в камере создается нижнее давление. При поступлении на клапан  $K_2$  нового управляющего импульса цикл повторяется.

На рис.43б приведен схематический вид силового цилиндра с поршнем, на котором обозначены основные параметры системы. Ниже приводятся численные значения этих параметров:  
 $S_0 = 72 \text{ см}^2$ ,  $S_1 = 61,7 \text{ см}^2$ ,  $S_3 = 154,5 \text{ см}^2$ ,  $S_5 = 44 \text{ см}^2$ ,  $P_0 = 300 \text{ кг}/\text{см}^2$ ,  
 $P_1 = 16,2 \text{ кг}/\text{см}^2$ ,  $P_2 = 103,7 \text{ кг}/\text{см}^2$ ,  $P_3 = 20 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

Конструктивное исполнение силового узла гидропривода представлено на рис.44.

Важной проблемой при конструировании силовой части гидропривода является обеспечение торможения подвижного узла в случае аварии, которая может возникнуть, например, при поломке торOIDального сильфона или трубопровода, идущего от аккумулятора  $P_0$  к силовому узлу гидропривода.

На рисунках 45 и 46 приведены графики изменения действующих сил и сил торможения в зависимости от хода поршня при поломке торOIDального сильфона и трубопровода  $P_0$  для трех положений системы расширения. Кривые 1, 2 и 3 соответственно отражают аварийные состояния, происходящие при минимальном, среднем и максимальном давлениях в камере. Индекс "а" относится к кривым изменения действующих, а индекс "б" – к кривым изменения тормозящих сил. Цифрой 4 на рис.45 обозначена кривая изменения силы в гидравлическом цилиндре в случае поломки торOIDального сильфона при стационарном давлении в камере, равном  $10 \text{ кг}/\text{см}^2$ , а цифрой 5 – кривая изменения действующей силы в камере при нормальной работе гидропривода.

Из рассмотрения рисунков 45 и 46 следует, что самый большой путь торможения подвижной системы получается при следующих условиях: а) когда происходит поломка торOIDаль-

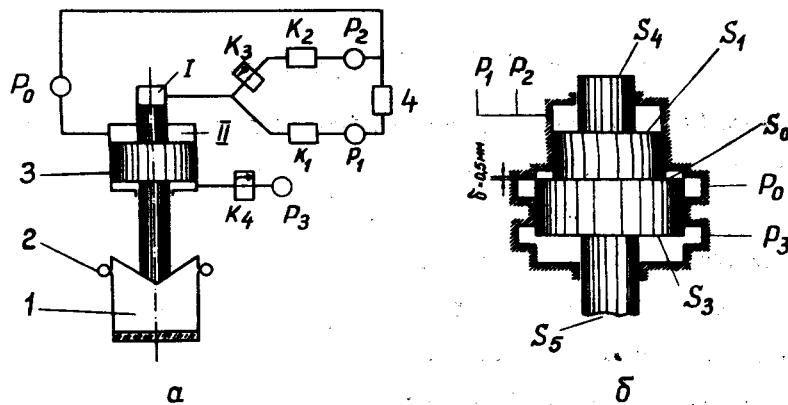


Рис. 43. Схемы гидравлической системы и силового узла гидропривода для 50 - сантиметровой камеры. 1 - камера; 2 - тороидальный сильфон; 3 - поршень; 4 - гидронасос; К - клапаны; Р - давления; S - поверхности; I и II - полости гидроцилиндра.

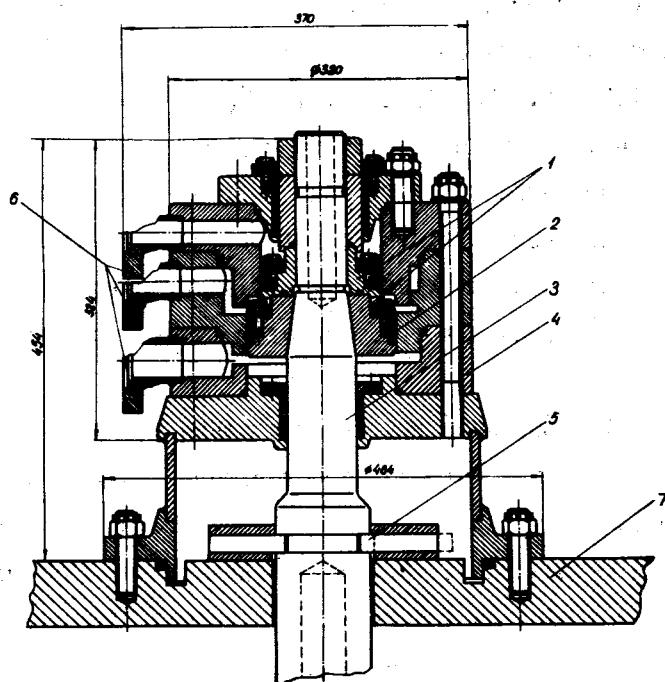


Рис. 44. Конструкция силовой части гидропривода 50 - сантиметровой камеры. 1 - поршень; 2 - кожаное уплотнение; 3 - шток; 4 - цилиндр; 5 - механический ограничитель; 6 - трубопроводы; 7 - крышка вакуумного кожуха камеры.

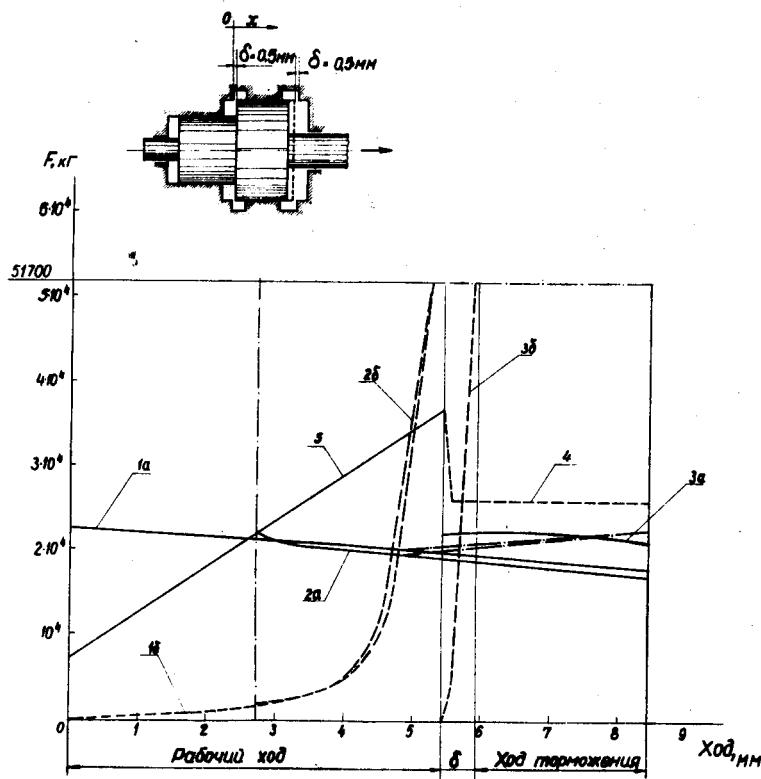


Рис. 45. Изменение сил в гидравлическом цилиндре в случае аварийного торможения при поломке торOIDального сильфона.

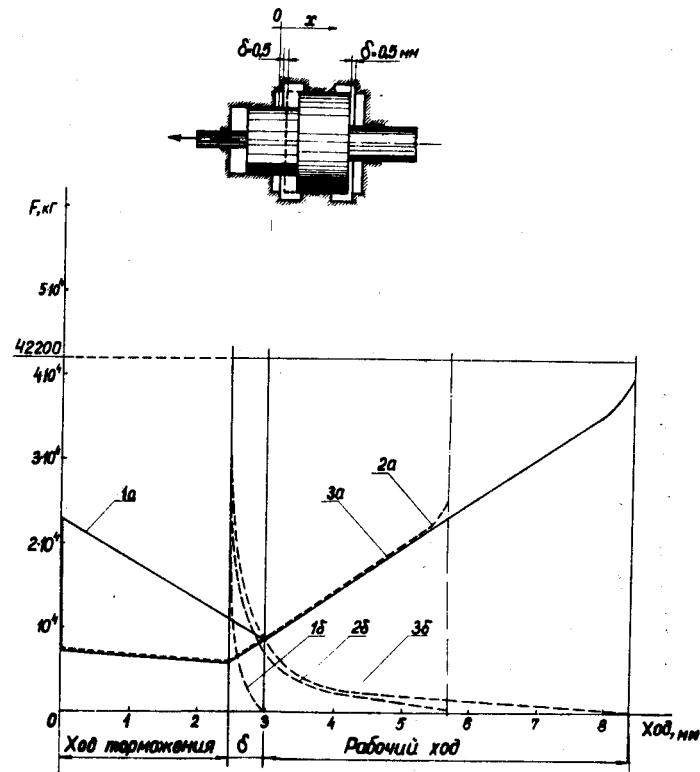


Рис. 46. Изменение сил в гидравлическом цилиндре в случае аварийного торможения при поломке трубопровода.

ного сильфона при давлении в камере  $P_H = 2$  атм, б) когда нарушается трубопровод  $P_O$  при давлении в камере  $P_B = 10$  ат.

Сравнивая площади под соответствующими кривыми действующих и тормозящих сил для этих случаев, можно видеть, что путь торможения подвижной системы не превышает 3 мм. С учетом рабочего хода подвижной системы и пути её торможения в аварийных условиях было найдено, что для 50-сантиметровой камеры должен быть использован тороидальный сильфон, имеющий раскрытие в свободном состоянии порядка 8 мм. Для окончательного определения условий торможения необходимо рассмотреть всю гидросистему камеры в целом, так как торможение во многом зависит также от условий работы клапанов в схеме управления силовым узлом.

Рассмотренная система будет работать удовлетворительно в том случае, когда имеется начальный зазор между тормозящим поршнем и гидравлическим цилиндром, который в нашем случае выбран равным 0,5 мм.

### § 32. Система освещения и фотографирования

Как отмечалось выше, конструкция камеры предусматривает возможность раздельного использования двух систем освещения и фотографирования: "напросвет" (темнопольная система) и с применением скотчлайта (светлопольная система).

На рис.47 приведена схема освещения и фотографирования первого типа. Свет от источника I, отразившись от плоского зеркала 3, попадает на конденсорную линзу 4, после прохождения которой и последующего отражения от второго плоского зеркала 7 собирается в пятно между объективами 9, где поглощается световой ловушкой. Область рабочего объема вблизи стенки камеры освещается с помощью цилиндрического зеркала 2. Отброшенный этим зеркалом свет в виде кольцевого пучка падает на внутреннюю поверхность цилиндрического зеркала 5 и, отразившись от него, попадает в ту же ловушку.

В качестве источника света применяется импульсная лампа типа ИФК-500 с энергией вспышки 500 джоулей. Фотографирование рабочего объема камеры осуществляется двумя стереофотоаппаратами, снабженными объективами типа "Рускар-29", на перфорированную фотопленку "Тип-10" шириной 35 мм. Фокусное расстояние объективов равно 70 мм. Масштаб фотографирования составляет 1:19,2.

На рис.48 приведена схема освещения и фотографирования с использованием скотчлайта. Свет от кольцевого источника I, окружающего объектив 2 стереофотоаппарата, попадает на зеркало 3 и, отразившись от него, через смотровое окно камеры 4 падает на покрытие из скотчлайта 6, наклеенное на крышку камеры 7, и на дополнительные отражательные кольца 8. Интенсивность света, отраженного от скотчлайта (см.рис.22а), резко уменьшается при углах

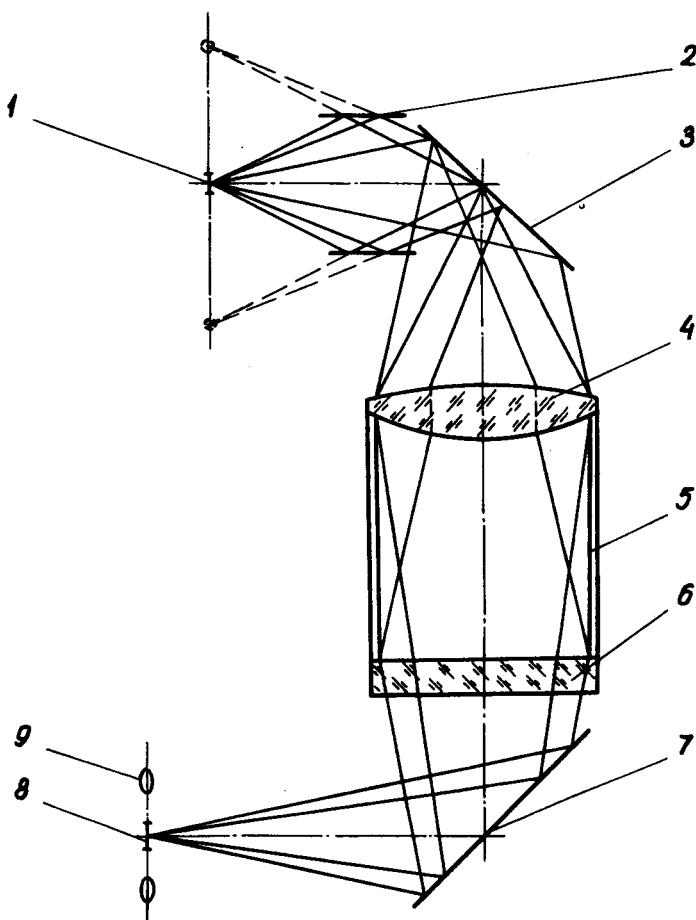


Рис. 47. Схема освещения камеры с применением линзы.

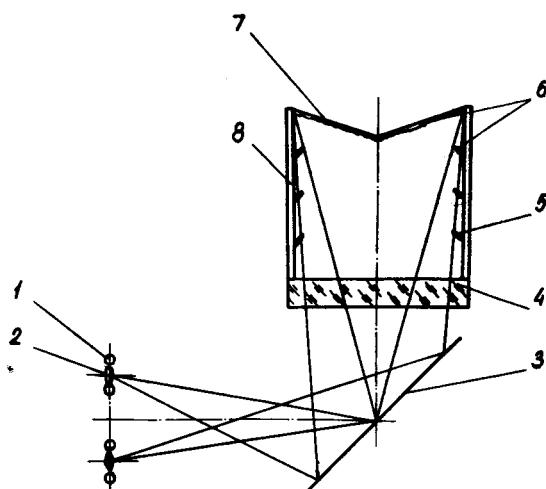


Рис. 48. Схема освещения камеры с применением скотчлайта.

падения света, больших 50 градусов. Поэтому поверхности, на которые наклеивается скотчлайт, располагаются по отношению к падающему на них свету под углами, не превышающими 35 градусов.

### § 33. Сверхпроводящий соленоид

Соленоид для 50-сантиметровой камеры выполняется из стабилизированного кабеля, изготовленного на основе сверхпроводящей проволоки из сплава  $Nb + 50\% Zr$  диаметром 0,25 мм без дополнительного покрытия. Критические характеристики этой проволоки для ряда образцов приведены на рис.49, основные параметры соленоида указаны в таб.10.

Таблица 10

Средний ток в обмотке	- 500 ампер
Средний коэффициент заполнения обмотки сверхпроводником	- 4,5%
Средний ток в сверхпроводящей жиле	- 50 ампер
Средняя плотность тока в сверхпроводящей жиле	- $10^5 \text{ а/см}^2$
Общий вес кабеля	- 1100 кг
Общий вес сверхпроводника	- 50 кг
Сила притяжения между катушками	- 500 тонн.

На рис.50 представлены схемы обмоток и топография магнитного поля соленоида. В соответствии с распределением магнитного поля внутри обмоток, каждая из них была разбита на 3 секции. Такое деление обмоток позволяет пропустить через сверхпроводящие жилы наибольший ток, соответствующий максимальному полю в данной секции. Предполагается, что в дальнейшем все секции обмотки будут питаться от одного источника тока. Основные характеристики отдельных секций приведены в табл.II. На рис.50 приведены также конструкции стабилизированных кабелей, заполняющих каждую секцию обмотки соленоида. Поперечные размеры кабелей и количество стабилизирующего материала определялось по формуле<sup>(47)</sup>:

$$S \cdot A_n \cdot h \cdot \Delta T = I^2 \cdot \rho,$$

где  $I$  - ток в стабилизированном сверхпроводнике в амперах,  $\rho$  - удельное сопротивление стабилизирующего материала в ом·см,  $\Delta T$  - разность между температурами кабеля  $T_k$  и гелиевой ванны  $T_B$ ,  $S$  - поверхность охлаждения кабеля на единицу длины в  $\text{см}^2/\text{см}$ ,  $h$  - коэффициент теплоотвода от кабеля к гелиевой ванне в ватт/см<sup>2</sup>град,  $A_n$  - площадь поперечного сечения нормального проводника в  $\text{см}^2$ .

При расчетах соленоида принималось, что стабилизирующий медный проводник в поле 50 кгс при температуре 4,2<sup>0</sup>К обладает удельным сопротивлением, равным  $5 \cdot 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{см}$  (48,49). Параметр  $h \cdot \Delta T$  в формуле брался равным  $0,2 \text{ вт}/\text{см}^2$  (50).

Из топографии магнитного поля (рис.50) видно, что максимальный градиент поля в рабочем объеме пузырьковой камеры составляет 15%. С целью повышения однородности

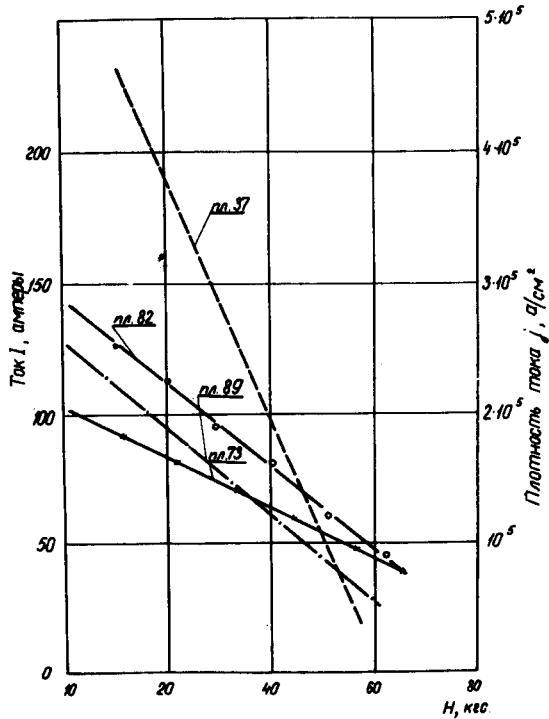


Рис. 49. Критические характеристики коротких образцов проволоки  $\varnothing 0,25$  мм из сплава  $Nb + 50\% Zr$ .

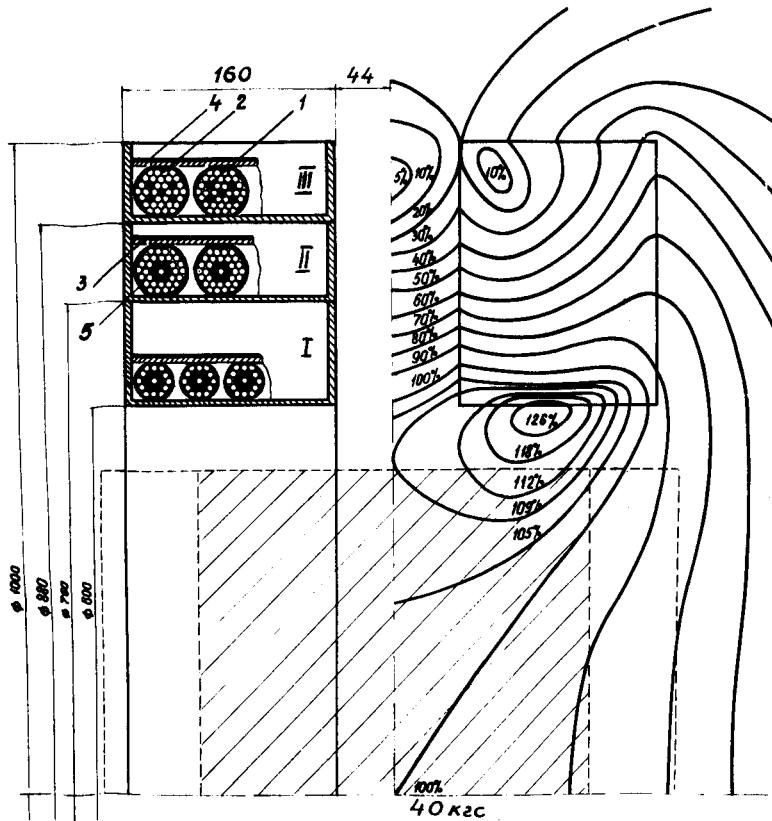


Рис. 50. Структура секций и топография поля сверхпроводящего соленоида. I - сверхпроводник; 2 - медная проволока; 3 - сетка из нержавеющей стали; 4 и 5 - изоляция; I, II и III - номера секций. Диаметры кабелей без изоляции: I 1мм ( I-я секция ), 2,3мм ( II-я и III-я секции ). Заштрихованная область представляет собой рабочий объем камеры.

Т а б л и ц а II

№ секций	Внутрен- ний диа- метр, мм	Наружный диаметр, мм	Коэффи- циент за- полнения обмотки сверхпро- водником, %	Коэффици- ент запол- нения об- мотки ка- белем, %	Ток в сверх- проводни- ком кабеле, амперы	Плотность тока в сверх- проводящей жи- ле, а/см <sup>2</sup>	Плотность тока в об- мотке, а/см <sup>2</sup>	Вес сверх- проводни- ка в секции, кг	Длина ка- беля, км	Число витков кабеля	Максималь- ное поле в обмотке секции, кГс
I	600	750	7	24	30	$0,6 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^4$	27,2	7,6	3600	65
II	750	860	3,3	24	50	$10^5$	$0,33 \cdot 10^4$	II,4	6,4	2540	40
III	860	1000	2,5	24	75	$1,5 \cdot 10^5$	$0,35 \cdot 10^4$	II,0	7,4	2540	30

поля был проведен также расчет корректирующих катушек, располагающихся у торцов основных обмоток.

Оптимальные геометрические характеристики корректирующих катушек, дающих понижение неоднородности магнитного поля внутри рабочего объема камеры до  $5 \pm 7\%$ , приведены в таблице I2.

#### Таблица I2

Внутренний диаметр корректирующих катушек - 720 мм.

Наружный диаметр корректирующих катушек - 880 мм.

Расстояние между катушками - 520 мм.

Высота отдельной катушки - 80 мм.

### ГЛАВА X

#### РАЗМЕЩЕНИЕ НА ПУЧКАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ

Как уже отмечалось в начале отчета, программа исследований, которые предполагается провести с пятиметровой жидколоводородной пузырьковой камерой, имеющей рабочий объем  $60\text{ m}^3$ , охватывает широкую гамму экспериментов по физике сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Она включает также поиск новых частиц и резонансов, которые могут образовываться в результате взаимодействия энергичных П- и К-мезонов обоих знаков, а также протонов и антипротонов.

Так как пятиметровая камера является весьма монументальным сооружением, рассчитанным на длительный срок эксплуатации, то её размещение на пучках частиц от ускорителя в Серпухове должно в максимальной мере учитывать возможность получения научной информации по наиболее перспективным направлениям.

С другой стороны, комплекс сооружений камеры должен удачно сочетаться с существующими или планируемыми экспериментальными установками, располагаемыми на тех же пучках. Последнее обстоятельство накладывает существенное ограничение на выбор конкретного места расположения как самой камеры, так и всех функционально связанных с ней устройств.

#### § 34. Строительный комплекс

Ориентировочный, весьма предварительный план возможного размещения камеры показан на рис.5I. Новые строения, относящиеся только к этой камере, отмечены цветной маркировкой. Можно видеть, что основной экспериментальный зал ориентирован вдоль возможного направления пучка нейтрино. По оси этого зала со стороны, примыкающей к галерее 25, размещается пятиметровая камера II. Строения, находящиеся по обеим сторонам этого зала,

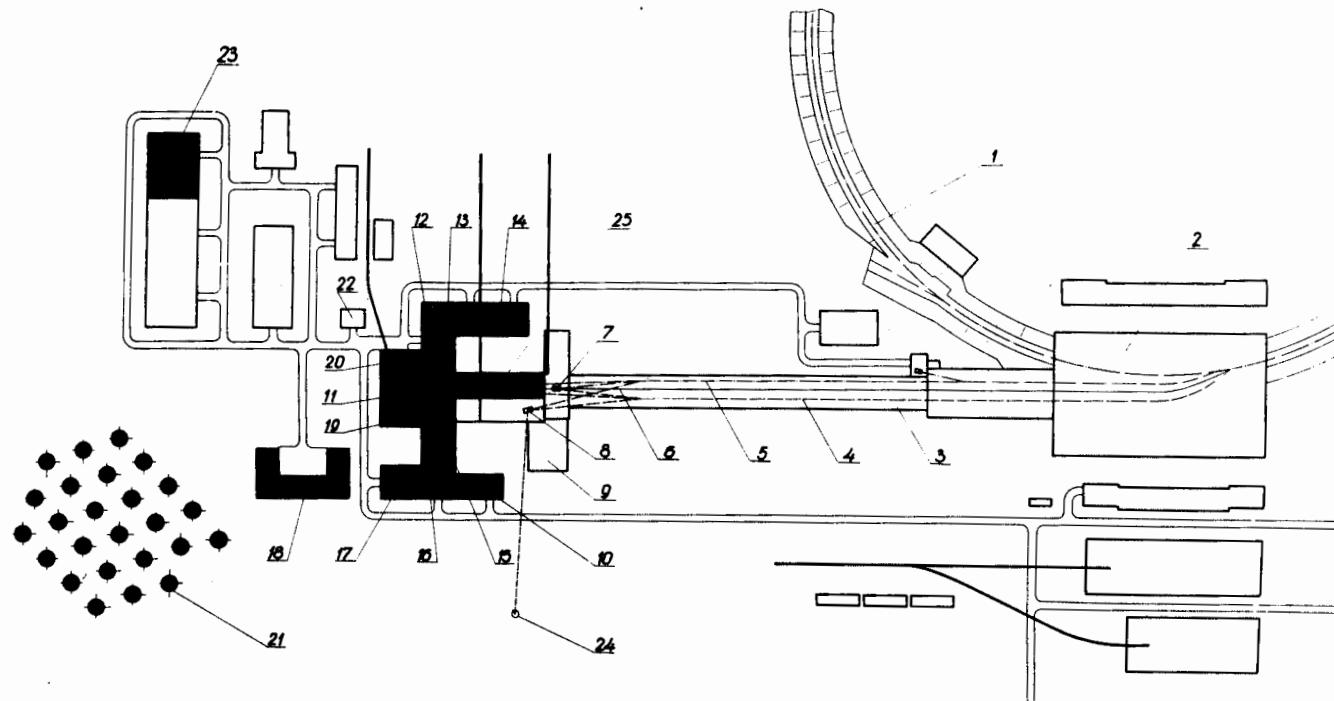


Рис. 5I. Пятиметровая камера в комплексе ускорителя на 70 Гэв. I - кольцо ускорителя; 2 - экспериментальный зал; 3 - галерея; 4 - канал пучков ускоренных частиц  $K^+$  (20 + 35 Гэв/с),  $\bar{p}$ ,  $\pi^+$  (20 + 40 Гэв/с),  $p$ ,  $\pi^-$  (до 70 Гэв/с) с непрерывным спектром энергий; 5 - канал пучков ускоренных частиц с прерывным спектром энергий (25 + 32 Гэв/с); 6 - нейтринный канал; 7 - камера "Скат"; 8 - камера "Мирабель"; 9 - вспомогательные помещения камер "Мирабель" и "Скат"; 10, 16 - водородная и гелиевая компрессорные станции; II - пятиметровая камера; 12 - павильон испытания и профилактики гидропривода; 13 - насосная (I-й этаж), пультовая (2-й этаж); 14 - энергокорпус; 15 - охладительная; 17 - мастерские; 18 - лабораторный корпус; 19, 20 - вентиляторная; 21 - емкости хранения и аварийного сброса газов; 22 - электролизная; 23 - азотный завод; 24 - "факел"; 25 - павильон сканирующих магнитов (I-й этаж), вытяжная венткамера (2-й этаж).

несут непосредственные служебные функции. Помещение, помеченное номером 15, предназначается для размещения охижительных установок. Его непосредственным продолжением является компрессорный зал 16, который, сливаюсь с помещением аналогичного назначения 10, позволяет создать единую цепь водородно-гелиевых компрессорных установок. Ремонтные мастерские 17 носят вспомогательный характер. Их назначение – обслуживание всего основного и вспомогательного оборудования, связанного с камерой.

С противоположной стороны от основного экспериментального зала находятся помещения 12 и 13, в которых на первом этаже размещаются гидравлические системы камеры. Причем помещение 12 представляет собой двухсветный зал, оборудованный подъемным краном. Оно предназначается для проведения ремонтно-профилактических работ с гидравлическими устройствами, а помещения 13 занимаются под основное оборудование, обеспечивающее жизнедеятельность расширительного механизма камеры: гидронасосы, компрессоры, гидроаккумуляторы, теплообменники и проч. На втором этаже этой части здания располагается центральный пульт управления камерой с главными блоками дистанционного контроля, управления, синхронизации, визуального наблюдения и аварийной защиты. Из пультового помещения через тамбур имеется выход в главный зал камеры. Навесная галерея соединяет этот выход с верхней площадкой камеры. Схематически строение пульта показано на рис.52.

Помещение 14 заключает в себе основное энергетическое оборудование. Здесь находятся сильноточные агрегаты питания сверхпроводящего соленоида камеры и силовые установки общего энергоснабжения.

Галерея 25 необходима для размещения магнитных импульсных развертывающих устройств, обеспечивающих шаговое отклонение пучка заряженных частиц.

Лабораторный корпус, помеченный номером 18, является основным местом нахождения персонала, занятого в экспериментах на камере. Он создает также необходимые условия для проведения предварительной обработки экспериментального материала и методических исследований, направленных на улучшение качественных показателей используемого оборудования.

Охижительные установки камеры смогут работать с требуемой производительностью только при условии некоторого увеличения производственной мощности существующего азотного завода. Необходимое расширение завода будет связано с пристройкой к нему дополнительного помещения, показанного на рис.51 под номером 23.

Для хранения ценных газов-дейтерия и неона – предусматривается площадка со сферическими емкостями 21, которая должна быть удалена от основного комплекса сооружений на расстояние 300–400 м. С противоположной стороны (на рис.51 не показано) должен находиться торшер с факелом для сжигания водорода в аварийном случае.

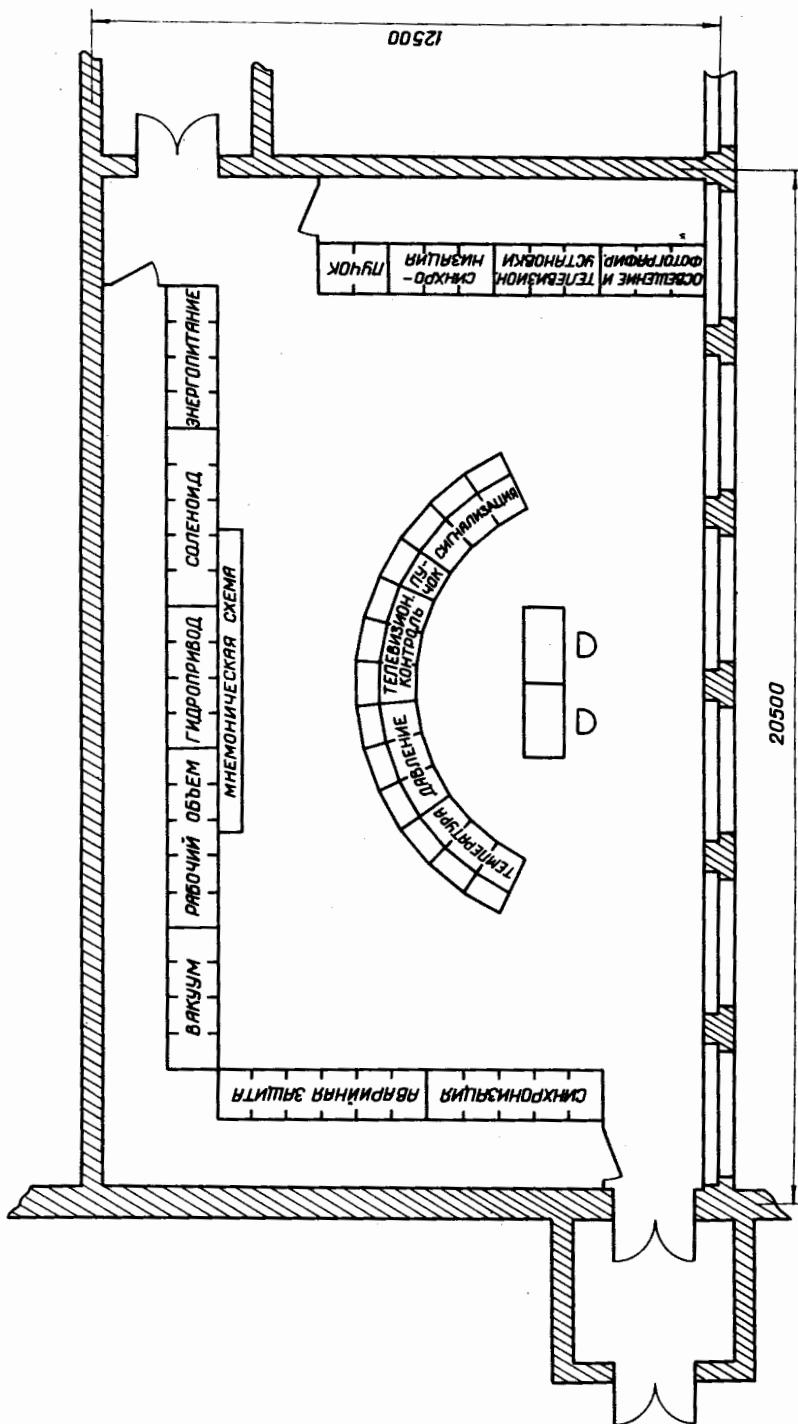


Рис. 52. Блок-схема пульта управления.

Наглядное представление о полном ансамбле строительных сооружений дает рис.53.

Размещение камеры в пределах здания показано на рис.54. Камера устанавливается на массивном фундаменте, обеспечивающем отсутствие выходящих за пределы нормы вибраций при работе расширительного механизма. Одновременно с этим фундамент служит силовым звеном, осуществляющим механическую связь между корпусом камеры и гидравлическим приводом расширительного механизма. Фундамент имеет сложную конфигурацию, которая обусловлена необходимостью размещения в этом районе специальных монтажно-транспортных приспособлений, а также способом крепления к нему опорной платформы гидравлического привода.

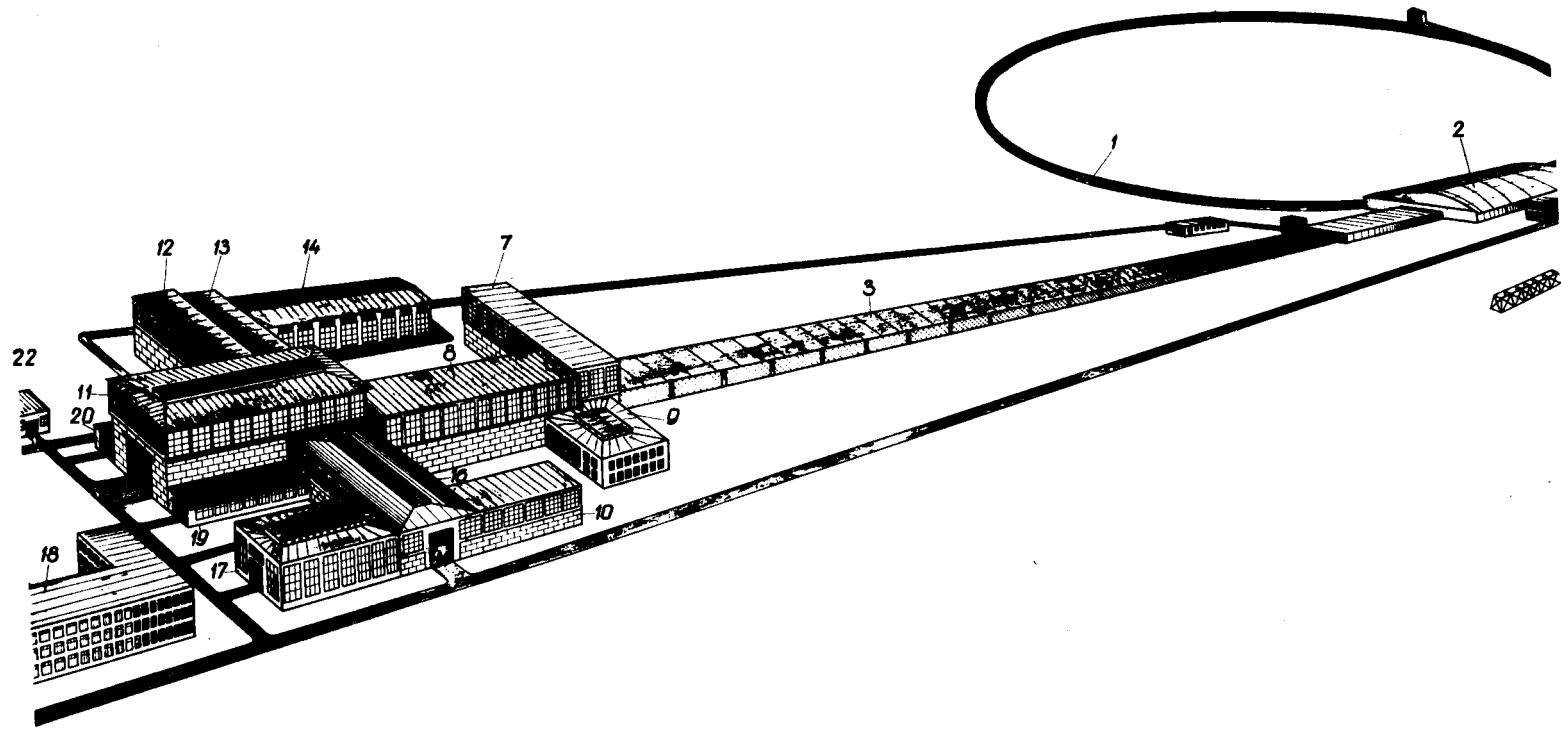
Для проведения ремонтно-профилактических работ, связанных с разборкой расширительного устройства камеры, или гидравлического цилиндра, последние должны транспортироваться в специальное помещение, оборудованное стендами и монтажными приспособлениями. Такое помещение предусматривается в непосредственной близости от основного зала камеры. Траншея, имеющаяся под камерой, дает возможность осуществлять необходимые перемещения указанных выше узлов. Эта же траншея служит для прокладки коммуникаций.

Чтобы иметь возможность проводить работы по ремонту и монтажу основных узлов камеры (корпуса, соленоида, криостата, вакуумного кожуха и т.п.), основной экспериментальный зал оборудуется двумя кранами с грузоподъемностью 200 т. и 5 т.

В заключение отметим, что общим требованием к экспериментальному залу и помещениям I5 и I6 (см.рис.51) является обеспечение взрывобезопасности всего устанавливаемого в них оборудования. Сами помещения должны быть выполнены с легкой кровлей и иметь достаточную площадь остекления. Из наивысших точек помещений предусматривается естественная вытяжка. Кратность обмена воздуха за счет действия принудительной вентиляции в нормальных условиях должна составлять 5 и в аварийном случае - 30. Приточные вентиляционные камеры I9 и 20 для наиболее эффективного их действия располагаются с обеих сторон от экспериментального зала, а вытяжные - над галереей 25.

### § 35. Программа научно-методических и конструкторских разработок

Создание сверхбольших жидковородных пузырьковых камер, имеющих настолько грандиозные масштабы, что их можно сравнить с ускорителем средних размеров, совмещенным с заводом по производству жидкого водорода и гелия, естественно, требует такой организации работ, при которой научно-методические и конструкторские работы по наиболее трудоемким узлам осуществляются параллельно. При этом должно предусматриваться частичное перекрытие сроков проектирования и изготовления камеры, а также существенное опережение сооружения строительного комплекса.



СЕТЕВОЙ ГРАФИК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО КАМЕРЕ

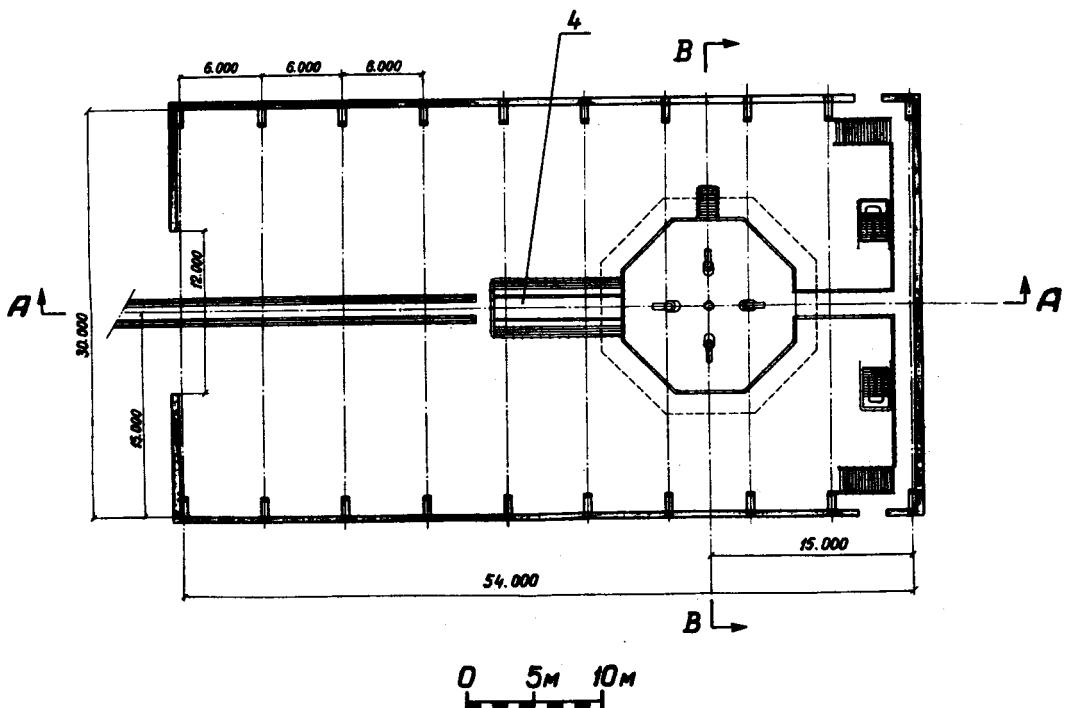
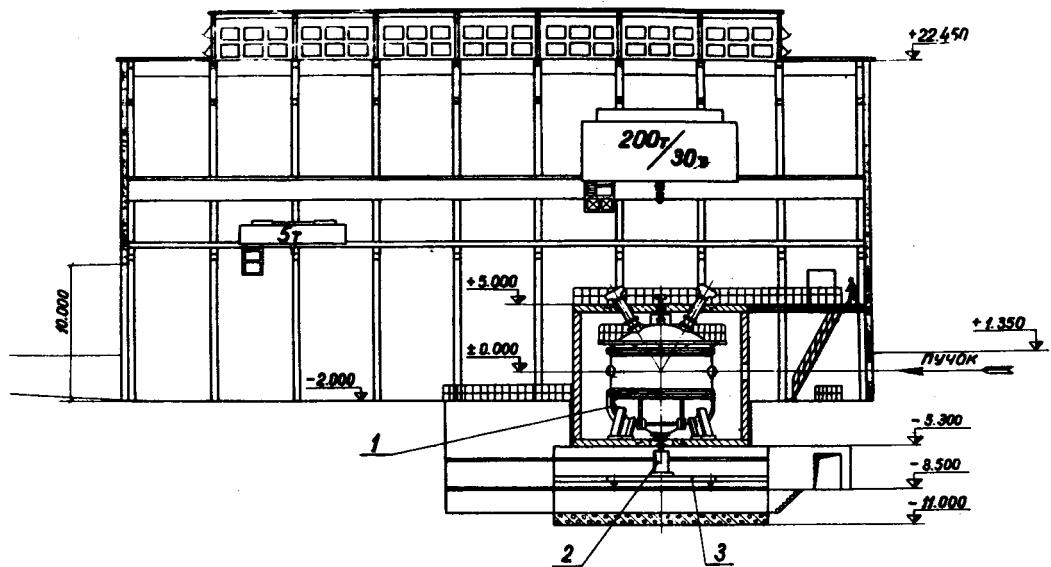
Содержание работы	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Модель камеры		пр	изг си				
Камера	Корпус	изг					
	Вак. кож.						
Соленоид из сверхпр.	Криостат	пз	пр		изг		
	Обмотка	пз	пр		изг		
	Кабель	пз	пр		изг		
Расширят. система	Цилиндр	пз	пр		изг		
	Поршень	пз	пр		изг		
	Гидравл.	пз	пр		изг		
Оптич. устр-ва	Иllumинат.	пз	пр		изг		
	Объективы	пз	пр		изг		
	Фотоаппарат	пз	пр		изг		
Вакуум. система	Агрегаты	пз	пр		изг		
	Приборы	пз	пр		изг		
Строит. комплекс	Экспер. зал	пз	пр		изг		
	Другие здан.	пз	пр		изг		
Криогенные системы	Охлажд. ус-ва	пз	пр		изг		
	Теплоизоляц.	пз	ри		изг ви		

Условные обозначения

ай - испытания при азотной Т;  
вд - испытания при водородной Т; изг - изготовление;  
ви - вакуумные испытания;

гви - гидравлические и  
вакуумные испытания; пз - проектное задание;  
изг - изготовление; мр - монтажные работы;  
ви - вакуумные испытания; пр - проектирование;  
ри - разработка и испытание;  
сб - сборка;  
си - стендовые испытания;  
стр - строительство.

По А-А



По В-В

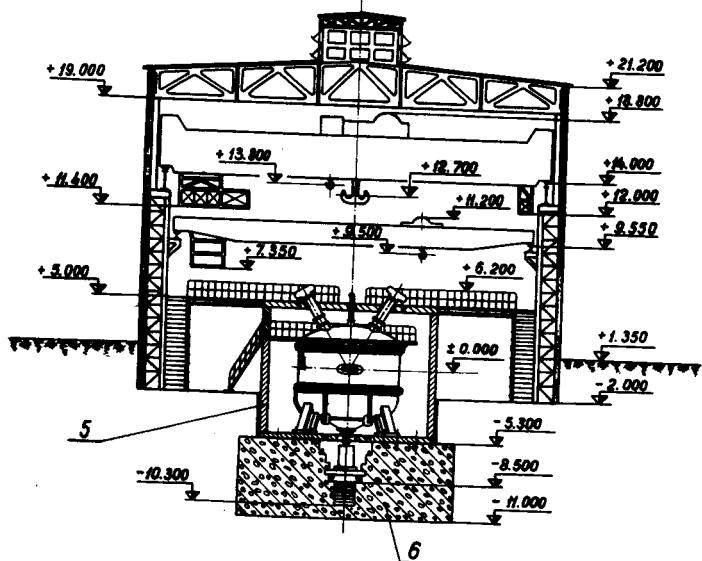


Рис. 54. Размещение камеры в экспериментальном зале. 1 - камера; 2 - гидропривод; 3 - опорная платформа гидропривода; 4 - траншея, служащая для разборки гидропривода; 5 - магнитный экран; 6 - Фундамент.

Для того, чтобы составить себе общее представление о масштабах предполагаемой разработки, на стр. III приведен поэтапный график выполнения работ. Из приведенного графика видно, что при благоприятном стечении обстоятельств камера могла бы быть смонтирована в 1972 г. и после необходимых испытаний введена в эксплуатацию в середине 1973 г.

### § 36. Оценка стоимости сооружения

Провести корректную оценку затрат, связанных с сооружением камеры, без полного знания местных условий и без учета всех составляющих стоимости не представляется возможным. Однако некоторая ориентация в масштабах стоимости сооружений может быть получена из рассмотрения предлагаемой ниже спецификации стоимости сооружений, в которой указаны предположительные затраты, основывающиеся на тех предварительных неофициальных сведениях, которыми располагали авторы настоящего отчета на данном этапе. В спецификацию не включены стоимости дейтерия и неона, которые не являются составной частью стоимости сооружения. С учетом сделанных выше оговорок, можно полагать, что стоимость установки в водородном варианте не выйдет существенно за пределы 24 млн.руб. Однако к этой сумме добавятся расходы, связанные с научно-методической деятельностью на этапах разработки, расходы на проектирование, а также на изготовление модели камеры в соленоиде из сверхпроводника. Эти расходы дополнительно составят 2,2 млн.руб.

#### Спецификация стоимости сооружения камеры

млн.руб.

##### 1. Камера:

а) корпус с теплообменниками .....	0,8
б) вакуумный кожух.....	0,7
в) теплоизоляция.....	0,1
г) вакуумное оборудование (стандартное).....	0,2
д) вакуумное оборудование (специальное, взрывозащищенное).....	0,1
	<hr/>
	1,9

##### 2. Расширительная система:

а) цилиндр с направляющими втулками, уплотнительными элементами и теплообменниками.....	0,1
б) гильза с учетом хромирования и хонингования.....	0,1
в) поршень и шток.....	0,4
г) гидропривод с клапанами.....	0,3
д) система управления.....	0,2
е) оборудование гидравлической системы.....	0,25
ж) торOIDальный сильфон с днищем.....	0,25
	<hr/>
	1,6

**3. Магнит-соленоид:**

а) обмотка .....	5
б) криостат с катушками и бандажами.....	0,6
в) система питания.....	0,1
г) система защиты.....	0,1

**4. Система фотографирования:**

а) объективы без сферических иллюминаторов....	0,2
б) фотоаппараты с автоматическими шлюзами...	0,5
в) иллюминаторы (включая конструкцию).....	0,2
г) скотчлайт.....	0,1

1,0

**5. Сканирующая система:**

а) импульсная катушка с оборудованием.....	0,8
б) отклоняющие магниты.....	0,5
в) источники питания.....	0,2

1,5

**6. Криогенные системы:**

а) охладители с детандерами.....	2,5
б) система хранения жидких газов.....	1,0
в) аварийные системы.....	0,5
г) системы транспортировки сжиженных газов....	0,5
д) компрессорное оборудование.....	0,5

5,0

**7. Строительный комплекс:**

а) расширение азотного завода.....	0,5
б) основной зал и фундамент.....	0,8
в) мастерские.....	0,4
г) галерея.....	0,3
д) железная дорога.....	0,1
е) охладительно-компрессорная.....	0,5
ж) пультовая и гидравлическая.....	0,4
з) энергокорпус и оборудование общего назначения	0,7
и) вентиляционные помещения.....	0,2
к) лабораторный корпус.....	0,6

4,5

8. Приборы, система сигнализации и контроля..... 0,6

9. Магнитная защита..... 2,0

10. Расходы на проектирование и моделирование..... 2,2

**СУММАРНЫЕ РАСХОДЫ..... 26,1**

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что камера диаметром 5м и глубиной 3м компромиссно удовлетворяет целому ряду требований, вытекающих из ряда физических задач, интересных в области энергий до 70 Гэв. Такая камера является идеальным детектором событий, вызванных нейтрино. Она позволяет идентифицировать процессы, в которых образуется несколько нейтральных частиц, и провести детальное исследование взаимодействий гиперонов с протонами. Давая возможность получить максимальное число сведений о природе вторичных частиц и о кинематике найденного события, пятиметровая камера является наиболее подходящим прибором для обнаружения неожиданных явлений в новой области энергий.

2. Конструктивно камера выполняется в виде вертикального цилиндра с нижним расположением расширительной системы.

3. В системе расширения камеры применяется пластмассовый поршень с гидравлическим приводом. Рабочий объем камеры герметично отделяется подвижным днищем от пространства, занятого расширительным механизмом. Подвижное днище обеспечивает равномерное расширение жидкости в пределах видимой области камеры.

4. В качестве системы для создания магнитного поля используется сверхпроводящий соленоид. Цилиндрическая форма камеры наилучшим образом удовлетворяет требованиям, вытекающим из конструктивных особенностей соленоида.

5. В камере используется система фотографирования на светлом поле с применением скотчлайта. Фотографирование рабочего объема осуществляется четырьмя фотоаппаратами, снаженными объективами типа "Флектогон" с углом поля зрения 90°.

6. Совместно с камерой используется развертывающая система, которая позволяет равномерно распределить входящие частицы по её рабочему объему.

7. По предварительным оценкам стоимость проектирования и сооружения камеры (включая строительный комплекс) составит 26 млн. руб.

0000000

При выполнении настоящей работы большая помощь авторам была оказана со стороны ряда подразделений, а также отдельных сотрудников Объединенного института ядерных исследований.

Прежде всего авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников криогенного отдела ЛВЭ за обсуждение ряда вопросов, затронутых в отчете, а также коллектив отдела базисных вычислительных машин ЛВТА, обеспечивший выполнение многих сложных расчетов. Авторы признательны лаборантам и техникам камерного отдела, конструкторского бюро и фотолаборатории ЛЯП за большую помощь в оформлении работы, а также В.Н.Михушкиной, выполнившей быстрое печатание текста с рукописных материалов.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. W.Cinowsky, SLAC report, N 5, 79 (1962).
2. ANL - report, June 10, 1964.
3. BNL - 8266, June, 1964.
4. CERN (TC) BEBC, 65-3.
5. M.L.Stevenson, IRL - Memo 553 (1964).
6. C.Baltay, BNL - 7957, 66 (1964).
7. R.P.Shutt, Nucl.Instr. and Meth., 20, 71 (1963).
8. В.Гайтлер, Квантовая теория излучения, ИЛ, Москва,(1956), стр. 425.
9. L.Behr, P.Mittner, Nucl.Instr. and Methods, 20, 446 (1963). См. также Ю.А.Будагов, А.Г.Володько, В.Б.Флягин, П.В.Шляпников, ПТЭ, №I, 70 (1966).
10. В.Г.Гримин, Э.П.Кистенев, Л.И.Лепилова, В.И.Мороз, Му Цзинь, Препринт ОИЯИ Р-2277, Дубна (1965).
11. H.P.Reinhard, CERN (TC) BEBC, 66-62 (1966).
12. F.S.Crawford, Jr., Phys.Rev., 117, 1119 (1960).
13. G.Trilling, SLAC rep., N 5, 32 (1962).
14. A.G.Prodell, Rev.Sci.Instr., 36, 1174 (1965).
15. E.G.Pewitt, IEEE Trans.Nucl.Sci., N5-12 N4 (1965).
16. Г.Г.Воробьев, Авторское свидетельство №166972, Бюллетень изобретений №24 (1964), см. также H.Filthuth, Rapporteur Speach, Int. Conf. on High Energy Physics, p. 524, Dubna, (1964).
17. M.Derrick, Proceedings 1966 Int. Conf. on Instrumentation for High Energy Physics, p. 429.
18. Proposal for the Construction of a 12-ft Bubble Chamber, ANL, Title I, report, July, 1966; Proc. 1966 Int. Conf. on Instrumentation for High Energy Physics, p. 104.
19. 14-Foot Cryogenic Bubble Chamber Project, BNL 10700 (1966).
20. Report on the Design Study of a Large Hydrogen Bubble Chamber for the CERN Proton Synchrotron, TC/BEBC 66-73 (1966).
21. Л.Б.Голованов, Препринт ОИЯИ Р8-3237, Дубна (1967).
22. A.Tomasaitis, Development Progress Report, ANL-BBC-45, (1965).
23. Д.С.Волосов, М.В.Цивкин, Теория и расчет светооптических систем, Искусство, Москва (1960).

24. VEB Carl Zeiss Jena. Studienentwurf über ein optisches System  
 für große Blasenkammern, Jena (1966).  
 25. И.С.Маршак, ПТЭ, №3, 5,(I962).  
 26. D.R.Firth, Rev.Sci.Instr., 24, 1393 (1963).  
 27. А.И.Тудоровский, Теория оптических приборов, АН СССР, Москва (I948).  
 28. M.Born, E.Wolf, Principles of Optics, London, (1959).  
 29. B.Willis, G.Schulz, H.Leutz, Computer Simultated Track  
 Pictures from Big Bubble Chambers, CERN (TC) BEBC 66-19.  
 30. В.Р.Карасик, Физика и техника сильных магнитных полей, Наука (I964).  
 31. R.W.Boom, R.S.Livingston, Proc. IRE, 50, 274 (1962).  
 32. Электротехнический справочник, Изд.3, том II, Энергия, Москва (I964), стр. 673.  
 33. Правила устройства электроустановок, Энергия, Москва (I964), стр.43.  
 34. Сверхпроводящие соленоиды, Мир (I964).  
 35. Faltens, Barale, Rev. Sci. Instr., v. 37, N11, (1966).  
 36. В.В.Миллер, ПТЭ, № 6, 3 (I964).  
 37. Ю.А.Александров, Г.С.Воронов, В.М.Горбунков, Н.Б.Делоне, Ю.И.Нечаев,  
 Пузырьковые камеры, Госатомиздат, Москва (I963).  
 38. Жидкий водород, Сборник переводов, Мир, Москва,(I964), стр. 100.  
 39. Т.Д.Блохинцева, А.Т.Василенко, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, Г.Лисман, Л.Л.Неменов,  
 Г.И.Селиванов, Дань Жун-Фан, ПТЭ, № 5, 56 (I962).  
 40. Г.Уайт, Экспериментальная техника в физике низких температур, Физматгиз, Москва (I961).  
 41. Р.Скотт, Техника низких температур, ИЛ, Москва, I37 (I962).  
 42. М.П.Баландин, В.Г.Гребинник, Г.И.Селиванов, ПТЭ, № 5, 60 (I962).  
 43. В.И.Баранов, Р.С.Шляпников, ПТЭ, № 3, 45 (I966).  
 44. В.Г.Миленин, Г.А.Базь и др., Основы импульсной техники, Воениздат,  
 Москва, (I966), стр. 224 и 235.  
 45. В.Ф.Доронкин, В.В.Воскресенский, Транзисторные генераторы импульсов,  
 Связь, Москва, (I965), стр. 218.  
 46. W. Van Dael, A.Van Itterbeek, A.Cops and I.Thoen, Cryogenics, 4, 210 (1965).  
 47. Z.J.J.Stekly, IEEE Trans. on Magnetics, vol., mag-2, N3, p.p.319-322, September(1966).  
 48. H.Brechta, Report CERN, SLAC-PUB-182, April (1966).  
 49. L.Donadieu et J.Maldy, Report Saclay (1966).  
 50. C.N.Whetstone, G.G.Chase et al., IEEE Trans. on Magnetics, vol. mag-2,  
 N3, pp. 307-310, September (1966).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В процессе разработки пятиметровой жидколоводородной камеры было рассмотрено несколько вариантов исполнения расширительной системы. Схематические чертежи камеры с различными исполнениями расширительной системы представлены на рис.55-59. В каждом из вариантов обеспечивается полная герметизация рабочего объема камеры и высокая равномерность расширения жидкости.

Сравнительной простотой отличается узел изменения объема (рис.55), выполненный в виде подвижного днища, прикрепленного к корпусу камеры при помощи торOIDального сильфона с передачей усилия от гидропривода через шток. К недостаткам данной системы относятся жесткие требования, предъявляемые к работе гидропривода (особенно в аварийном режиме); наличие больших движущихся масс; возможность возникновения токов Фуко при движении днища в неоднородном магнитном поле; необходимость съема теплового потока с движущегося штока.

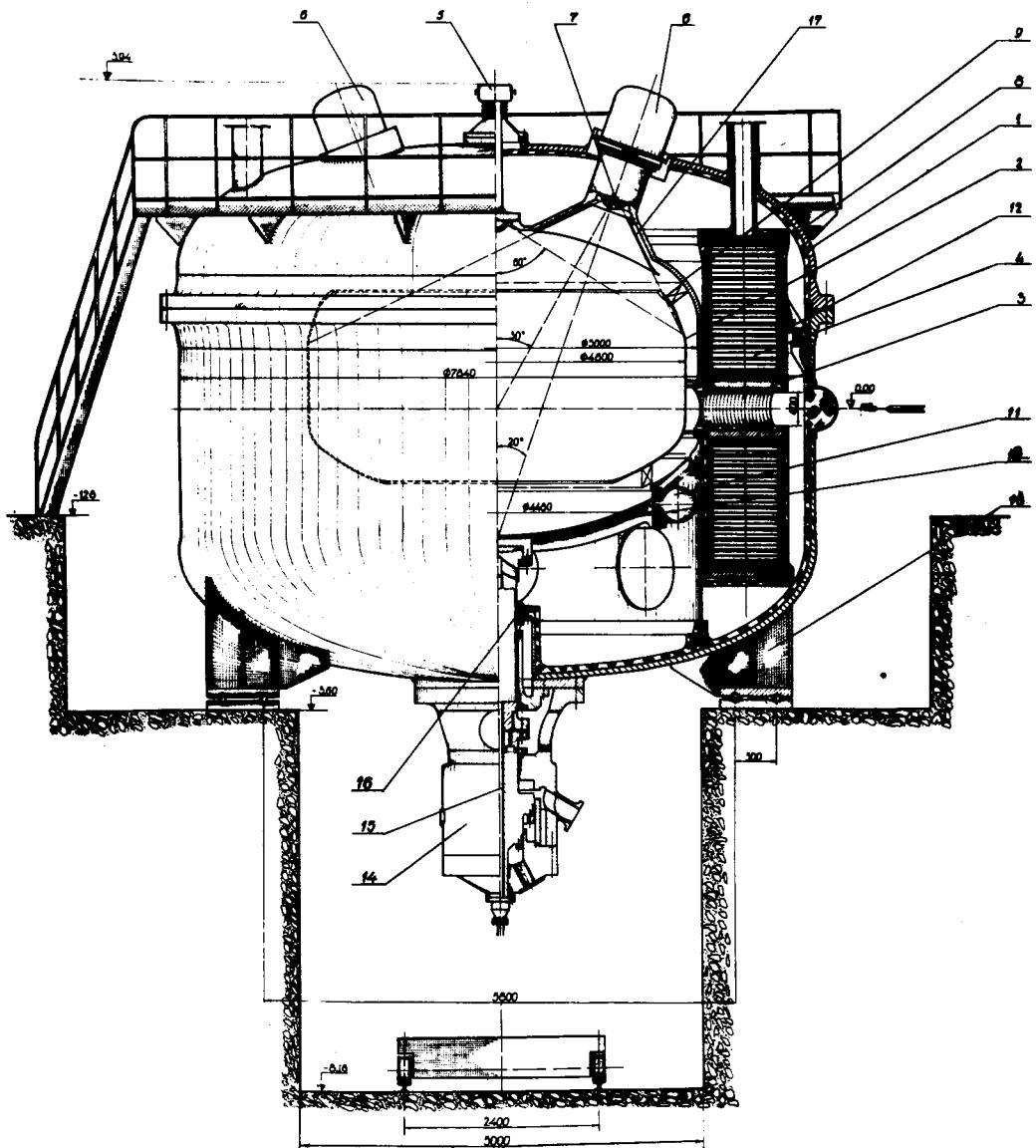
На рис.56-58 представлены варианты камеры с разгруженным подвижным днищем. Отличительной особенностью этих вариантов является наличие поршня ( $\phi 2500$  мм), имеющего сравнительно большой ход и передающего усилие от гидропривода к подвижному днищу большого диаметра через промежуточную жидкость. Возможны два типа подвижного днища - холодное (рис.58) и теплоизолирующее (рис.56, 57). В варианте с холодным днищем промежуточной жидкостью является переохлажденный жидкий водород, так что поршень работает в условиях низких температур. Надежность и долговечность работы поршневых уплотнений такого большого диаметра при больших удельных нагрузках, работающих без смазки в условиях низких температур, могут оказаться весьма невысокими, причем любая неполадка в поршневом устройстве приведет к необходимости отогрева всей камеры.

В связи с этим вариант с теплоизолирующим днищем (рис.56, 57) обладает определенными преимуществами. В этом варианте уплотнение поршня не является проблемой, поскольку промежуточная жидкость имеет комнатную температуру. При этом надежность и долговечность уплотнения могут быть весьма большими, а в случае его поломки не возникает необходимости в отогреве камеры. Для того, чтобы обеспечить для днища хорошие теплоизолирующие свойства и устойчивость в условиях работы на сжатие при относительно малом весе, оно выполняется в виде сотовообразной конструкции. Существенным недостатком

варианта с теплоизолирующим подвижным днищем является наличие двух сильфонов большого диаметра, от долговечности которых будет зависеть работоспособность камеры.

Вариант камеры, изображенный на рис.58, предусматривает возможность вынесения основного разъема рабочего объема камеры в теплую зону. Этим достигается высокая надежность уплотнения. Однако для того, чтобы уплотнение находилось при комнатной температуре, длина теплового моста должна составлять не менее 3 м. При этом в зазоре между цилиндрическими обечайками теплового моста возникает газовая подушка. Для того, чтобы избежать проникновения газа из зазора в рабочий объем камеры в момент расширения, необходимо иметь также холодное уплотнение. Правда, требования к холодному уплотнению в этом случае оказываются менее жесткими.

На рис.59 представлена конструкция камеры, где в системе расширения используется эластичная мембрана, поджимаемая давлением газа. Меньший вес движущихся частей в этом варианте позволяет получить меньшее время расширения. Однако с энергетической точки зрения вариант с мембраной менее выгоден, чем поршневой.



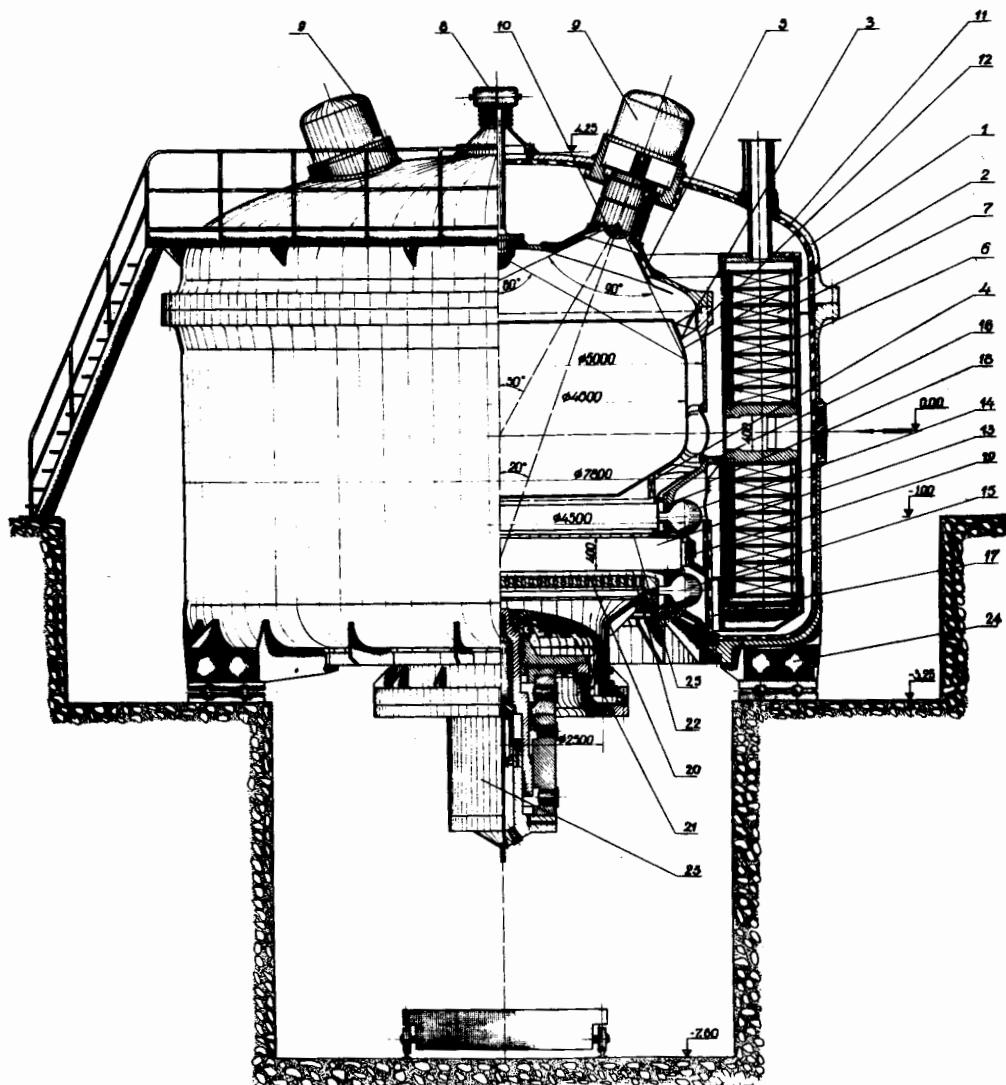


Рис. 56. Вариант пятиметровой жидколоводородной камеры с теплоизолирующим разгруженным подвижным днищем и теплым поршнем (нижнее расположение расширительного устройства).  
 I - вакуумный кожух; 2 - термостатирующий экран; 3 - основной теплообменник;  
 4 - стабилизирующий теплообменник; 5 - экран термостатирования иллюминатора;  
 6 - гелиевый криостат; 7 - соленоид; 8 - перископ; 9 - защитный кожух фотоаппарата;  
 10 - иллюминатор; II - многослойная теплоизоляция; I2 - корпус камеры;  
 I3 - теплоизолирующее разгруженное подвижное днище сотовой конструкции;  
 I4 - холодный торoidalный сильфон; I5 - теплый торoidalный сильфон; I6 - подвеска криостата;  
 I7 - опора корпуса камеры; I8, 25 - теплообменники; I9 - аварийный карман в дырчатом исполнении; 20 - опорная решетка; 21 - теплый поршень;  
 22 - объем с теплой жидкостью; 23 - гидропривод; 24 - опора вакуумного кожуха камеры.

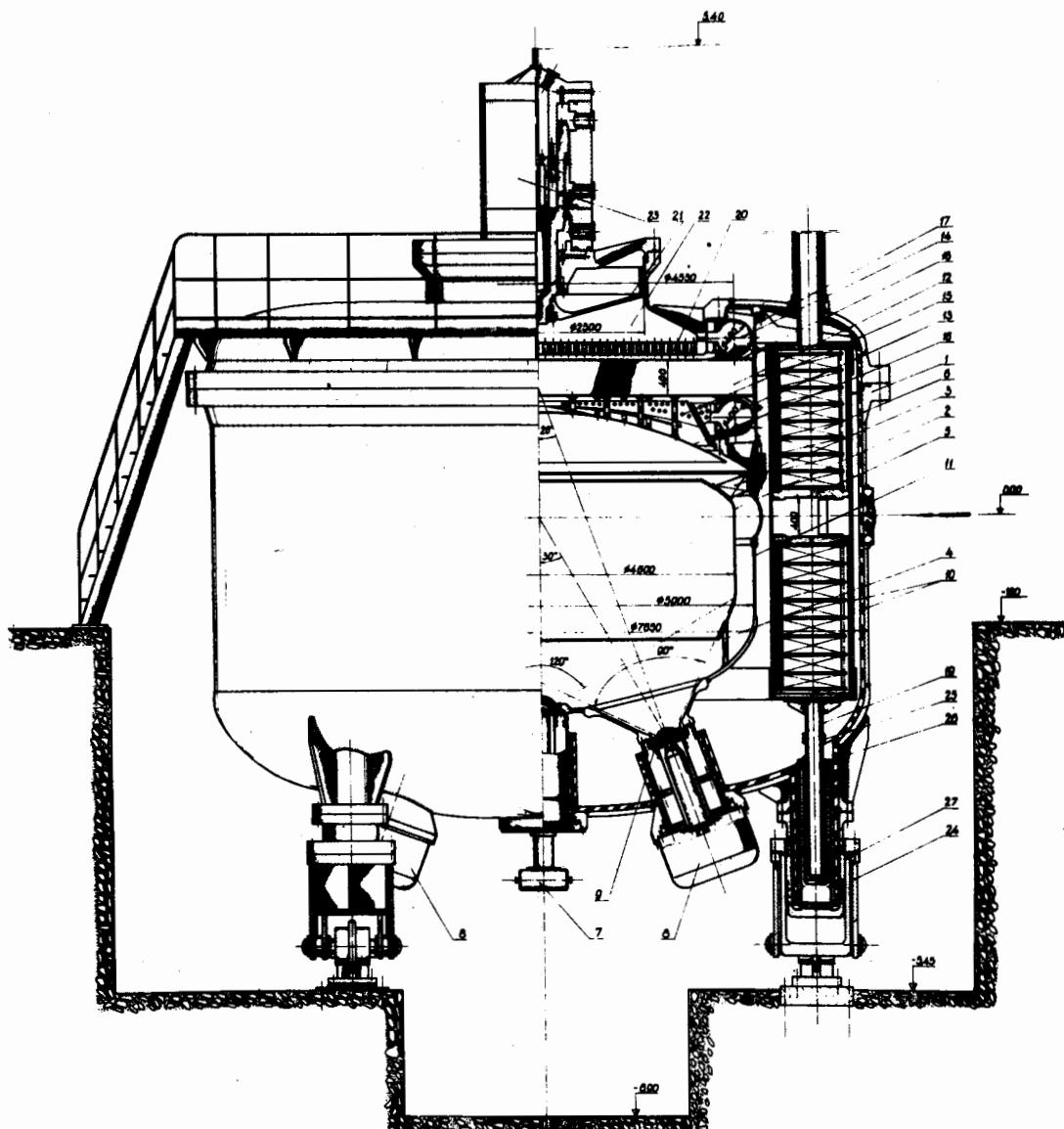


Рис. 57. Вариант пятиметровой жидколоводородной камеры с теплоизолирующим разгруженным подвижным днищем и теплым поршнем (верхнее расположение расширительного устройства).  
 I - вакуумный кожух; 2 - термостатирующий экран; 3 - основной теплообменник;  
 4 - стабилизирующий теплообменник; 5 - гелиевый криостат; 6 - соленоид; 7 - перископ;  
 8 - защитный кожух фотоаппарата; 9 - иллюминатор; 10 - многослойная теплоизоляция;  
 II - корпус камеры; 12 - плавающая стенка сотовообразной конструкции; 13 - холодный торoidalный сильфон; 14 - теплый торoidalный сильфон; 15, 25, 26 - теплообменники; 16 - ложное днище; 17 - подвеска корпуса камеры; 18 - шариковые упоры;  
 19 - опора соленоида; 20 - опорная решетка; 21 - теплый поршень; 22 - объем с теплой жидкостью; 23 - гидропривод; 24 - опора вакуумного кожуха; 27 - гидравлический домкрат.

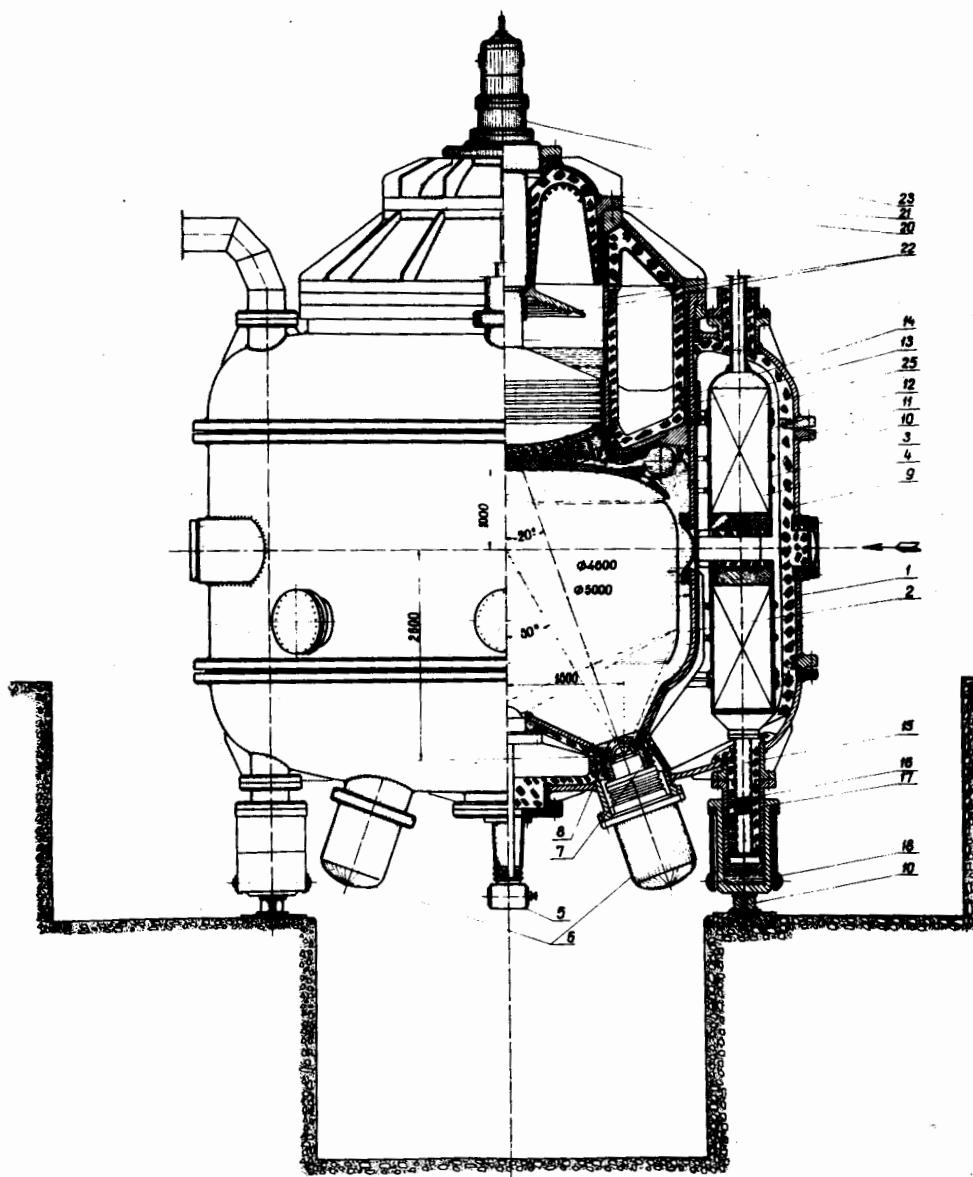


Рис. 58. Вариант пятиметровой жидколоводородной камеры с холодным разгруженным подвижным днищем, холодным поршнем и уплотнением корпуса камеры, вынесенным в теплую зону.

I - вакуумный кожух; 2 - термостатирующий экран; 3 - гелиевый криостат; 4 - соленоид; 5 - перископ; 6 - защитные кожухи фотоаппарата; 7, 16, 21, 22, 25 - теплообменники; 8 - иллюминатор; 9 - многослойная теплоизоляция; 10 - корпус камеры; II - холодное разгруженное подвижное днище; 12 - торOIDальный сильфон; 13 - холодный поршень; 14 - цилиндр; 15 - опора соленоида; 17 - гидравлический домкрат; 18 - каретка для передвижения камеры; 19 - рельсовый путь; 20 - фланец-лабиринт; 23 - гидропривод.

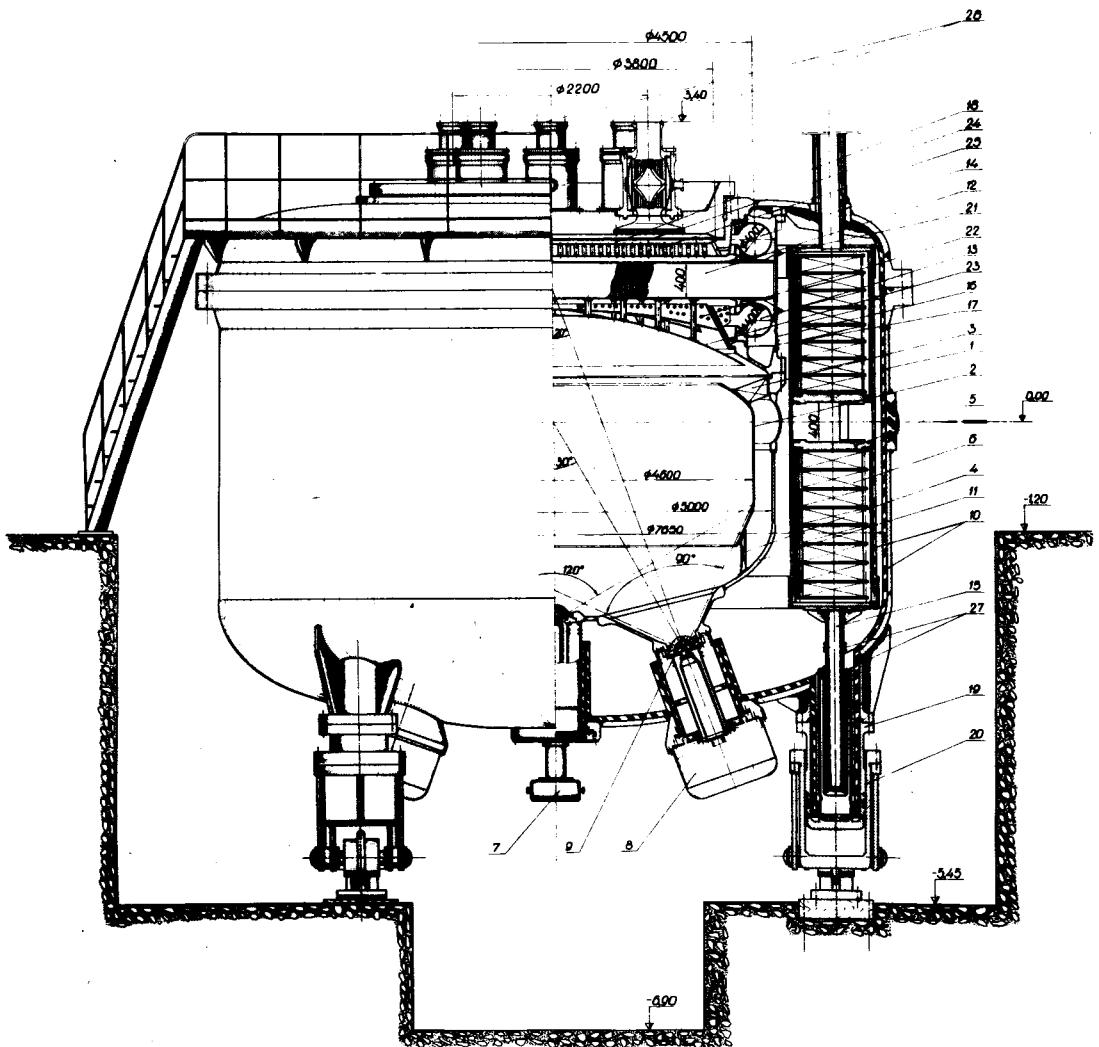


Рис. 59. Вариант пятиметровой жидколоводородной камеры с теплоизолирующим разгруженным подвижным днищем и теплой эластичной мембраной (верхнее расположение расширительного устройства). I - вакуумный кожух; 2 - термостатирующий экран; 3 - основной теплообменник; 4 - стабилизирующий теплообменник; 5 - гелиевый криостат; 6 - соленоид; 7 - перископ; 8 - защитный кожух фотоаппарата; 9 - иллюминатор; 10 - многослойная теплоизоляция; II - корпус камеры; 12 - теплоизолирующее разгруженное подвижное днище сотовообразной конструкции; 13 - холодный торoidalный сильфон; 14 - теплый торoidalный сильфон; 15 - опора соленоида; 16 - подвеска корпуса камеры; 17, 22, 27 - теплообменники; 18 - объем с теплой жидкостью; 19 - опора вакуумного кожуха камеры; 20 - гидравлический домкрат; 21 - шариковые упоры; 23 - ложное днище; 24 - резиновая мембрана; 25 - опорная решетка; 26 - управляемые прямоточные клапаны чулочного типа.