

С 345 и.

11/14-69

B-19

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 4512



А.Т.Василенко, Л.Г.Денисова, Н.М.Ковалева,
В.И.Сидорова, Н.С.Толстой, В.А.Бычков

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

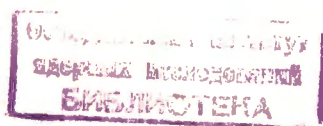
КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
РЕЛЯТИВИСТСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

1969

9 - 4512

7936/1, нр.
А.Т.Василенко, Л.Г.Денисова, Н.М.Ковалева,
В.И.Сидорова, Н.С.Толстой, В.А.Бычков

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
РЕЛЯТИВИСТСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ



I. ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований введена в действие электронная модель релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой^{1/}. Модель предназначена для исследования динамических процессов в сильноточных протонных ускорителях с током внутреннего пучка до сотен миллиампер.

Так как в качестве ускоряемых частиц выбраны электроны, то это обусловило целый ряд конструктивных особенностей модели. Ускоряющая система модели отличается малыми рабочими зазорами. Это обстоятельство наложило отпечаток на исполнение дуанта. Величина магнитного поля составляет несколько десятков эрстед, поэтому модель безкелезная, а рабочее поле формируется системой токовых катушек. Формирование среднего магнитного поля осуществляется при помощи десяти токовых концентрических обмоток, расположенных с равными интервалами по радиусу на расстоянии 127,5 мм от медианной плоскости, а также одиночного сильноточного витка, расположенного вблизи конечного радиуса вариационной обмотки.

Необходимая глубина вариации магнитного поля обеспечивается вариационной обмоткой, представляющей собой систему двух проводников, уложенных по линиям спиралей Архимеда ($r = 64 \phi$ см) и дугам окружностей ($r_H = 100$ мм и $r_K = 1140$ мм). Угол между прямым и обратным витками элемента периодичности обмотки задан равным $22,5^\circ$. Требуемая зависимость амплитуды основной гармоники поля от радиуса соз-

дается за счёт изменения вертикального зазора между витками вариационной обмотки в пределах 100–200 мм.

Для компенсации горизонтальной составляющей магнитного поля Земли используются специальные обмотки, расположенные вне объема ускорительной камеры.

Измерение характеристик магнитного поля ускорителя осуществлялось с помощью специального измерительного комплекса. Составной частью этого комплекса является штанга, позволяющая датчик поля перемещать по радиусу, а также по азимуту с заданной точностью.

В ускорителе предусмотрена внутренняя и внешняя инжекции электронов. Внешняя инжекция пучка предназначена для получения предельных плотностей пучков в фазовом объеме.

Вакуумный объем ускорителя состоит из отдельных форвакуумной и высоковакуумной частей.

В модели ускорителя использованы немагнитные конструкционные материалы.

II. КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

1. Магнитная система

а) Вариационная обмотка – система витков, расположенных по линиям спиралей Архимеда ($r = 64\phi$), соединенных последовательно внутри камеры. На рис. 2 пунктиром показан ход спиралей обмотки, на рис. 3 – положение трубки (5) вариационной обмотки на начальном и конечном радиусах. Ток через обмотку – 730 а. Зазор между витками обмотки по вертикали изменяется в соответствии с законом, заданным табл. 1.

h – расстояние от медианной плоскости ускорителя до осевой линии витка. Допуск на величину h равен $\pm 0,1$ мм.

б) Десять пар концентрически расположенных катушек формируют среднее поле с точностью 1–5%. Центры катушек удалены от медианной плоскости на расстояние $127,5 \pm 0,5$ мм. Расположение центров катушек вдоль

Таблица 1

r мм	100	120	140	160	180	200	240	280	320	360	400	440
h мм	50	50	50	51,3	55,2	58,6	65,0	70,8	76,0	80,4	84,5	88,3
r мм	480	520	560	600	640	680	720	760	800	840	880	
h мм	91,5	94,3	96,9	98,8	100,3	101,4	101,8	101,6	100,5	99,0	96,4	
r мм	920	960	1000	1040	1060	1080	1100	1120	1141			
h мм	92,5	87,8	81,4	73,0	67,9	62,4	56,8	50,9	50,0			

радиуса и максимальное значение ампервитков находятся в соответствии с табл. 2. На рис. 3 показана катушка (8) среднего поля и способ ее закрепления в пазу с помощью накладок. Обоймы катушек: дюралюминиевые. Одиночный виток (14) на ток 500 а используется также для формирования среднего поля. Центр витка находится на расстоянии 7 мм от медианной плоскости.

Таблица 2

r мм	120	250	350	450	550	650	750	850	953,5	1053,5
$J_{\text{в.к}}$	250	50	50	50	50	50	100	100	150	250

Допуск на средний радиус - не более $\pm 0,5$ мм.

в) Основные параметры двадцати четырех пар катушек тонкой коррекции (3) среднего поля (см. рис. 3) приведены в табл. 3.

Таблица 3

$r_{\text{ср}}$ мм	230	270	310	350	390	430	470	510	550	590	630	670
$J_{\text{в.к}}$ а	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$r_{\text{ср}}$ мм	710	750	790	830	870	910	950	990	1030	1070	1110	1154
$J_{\text{в.к}}$ а	50	50	50	50	50	50	50	100	150	150	50	300

Допуск на средний радиус $\pm 0,5$ мм.

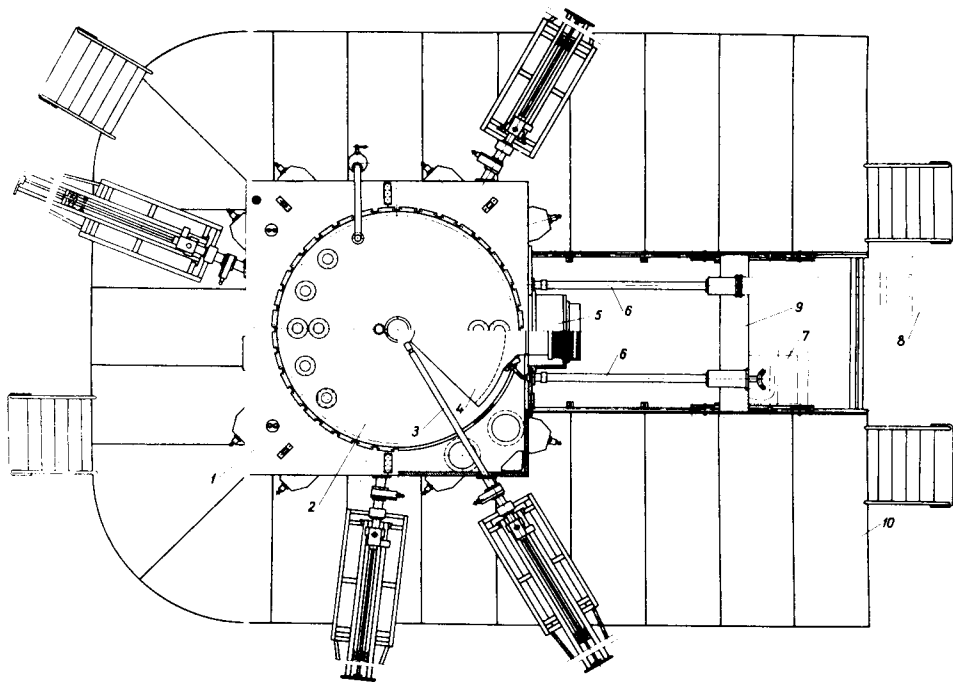


Рис. 1. План действующей модели ускорителя. 1 - вакуумная камера, 2 - поюсная крышка, 3 - пробник, 4 - дуант, 5 - резонансная линия, 6 - высокочастотные фидеры, 7 - ламповый эквивалент нагрузки, 8 - высокочастотный генератор, 9 - тележка для монтажа и демонтажа резонансной линии с дуантом, а также для лампового эквивалента нагрузки высокочастотного генератора, 10 - аитресоль для обслуживания ускорителя.

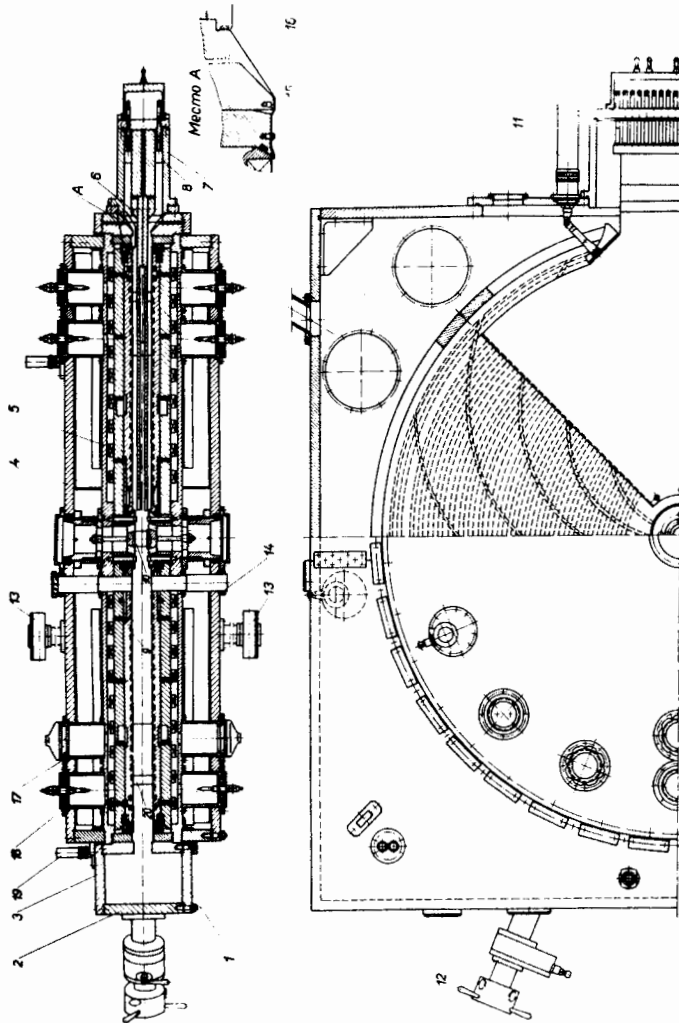


Рис.2. Высоковакуумная камера в разрезе, 1 - нижняя крышка камеры, 2 - боковая стенка камеры, 3 - верхняя крышка камеры, 4 - верхний диск полюсной крышки, 5 - нижний диск полюсной крышки с ребрами, 6 - дуант, 7 - резонансная линия, 8 - закорачивающее устройство, 9 - диск с катушками тонкой коррекции среднего магнитного поля, 10 - центральная колонна, 11 - фидерная линия, 12 - шлюз пробника, 13 - шиберный затвор форлингии полюсника крышки, 14 - вход тракта инжекции или внутреннего источника электронов, 15 - контактная плоская пружина, 16 - плакировка.

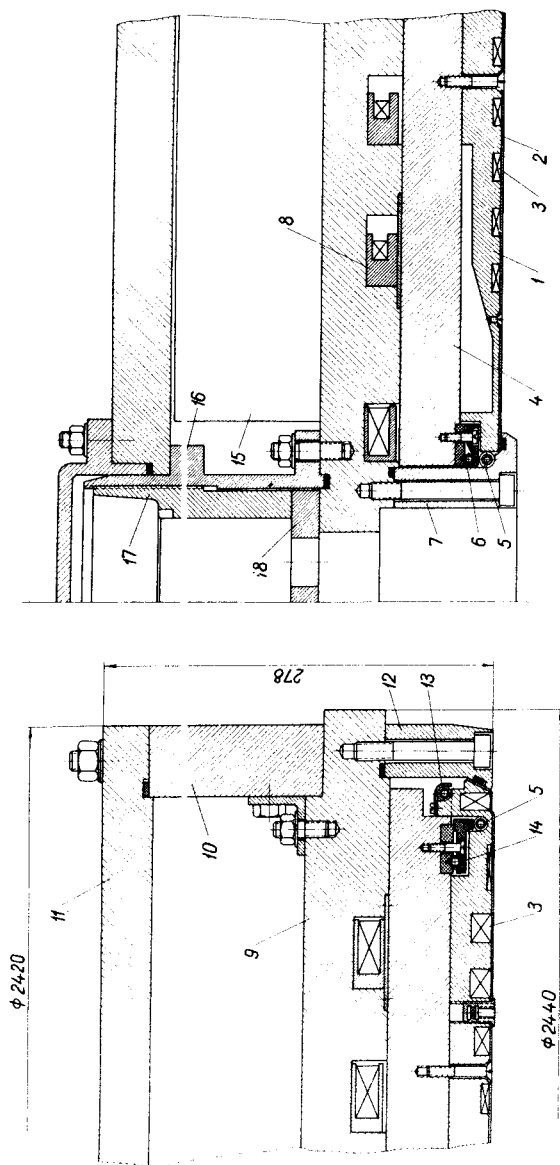


Рис. 3. Полусная крышка в разрезе. Показаны центральная и периферийная области. 1 - диск с катушками тонкой коррекции среднего магнитного поля, 2 - шайка, 3 - катушка, 4 - сектор, формирующий спиральную канавку, 5 - вариационная обмотка, 6 - компенсационный виток, 7 - накладка втулки, 8 - одна из основных катушек, формирующих среднее поле, 9 - нижний диск полюсной крышки с ребрами, 10 - кольцо, 11 - верхняя наружная крышка полюсного диска, 12 - накладное кольцо, 13 - сильноточный виток для компенсации среднего поля пучка, 14 - сильноточный виток, выполняющий роль катушки среднего поля, 15 - ребро, 16 - распорная втулка, 17 - гайка, которая совместно с диском 18 увеличивает жесткость внутреннего края нижнего диска, 18 - диск.

г) Для компенсации среднего поля пучка предусмотрены четыре сильноточных витка в районе предельных радиусов ускорителя. На радиусе $r = 100$ мм через виток (6), рис. 3, пропускается 350 а. Виток (14), рис. 3, установленный на радиусе $r = 1115$ мм, рассчитан на ток 150 а. Центры витков удалены от медианной плоскости ускорителя на 64 мм.

2. Корпус вакуумной камеры

Корпус камеры имеет прямоугольную форму и размеры $3000 \times 3000 \times 420$ мм³. В его верхней и нижней крышках имеются отверстия для дисков магнитной системы. Допустимый прогиб дисков 0,2–0,25 мм. Посадочные места для дисков магнитной системы в камере, а также конструкция вакуумных уплотнений позволяют производить разборку и сборку дисков соответственно сверху или снизу.

Полюсные наконечники с обмотками со стороны высоковакуумного объема камеры закрываются сплошными медными дисками (2) толщиной 1,5 мм с вакуумными уплотнениями (см. рис. 3). Выпучивание медного диска на полюсном наконечнике – не более 0,5 – 0,8 мм. Медные диски являются обратными токопроводами высокочастотной системы. Соосность полюсных дисков обеспечивается с помощью специальной втулки (10, рис. 2) с точностью $\pm 0,1$ мм.

3. Высокочастотная система

а) Ускоряющий электрод (дуант), рис. 4, имеет вид сектора, ограниченного окружностями с радиусами $r_n = 160$ мм и $r_k = 1085$ мм и углом при вершине, равным 90° . Полная высота дуанта – 40 мм, из них 20 мм отводится для пучка. Зазор между дуантом и плакировкой полюсного наконечника – 20 мм. Наружное покрытие электрода – полированная медь. Средняя его плоскость совпадает с медианной плоскостью ускорительной камеры с точностью $\pm 0,5$ мм. В результате охлаждения электрода обеспечивается отвод мощности потерь 1,5квт. Дуант крепится консолью к внутреннему электроду (3) резонансной линии (см. рис.4). Так как лепестки (2) дуанта тонкие, то они под собственным весом прогибаются существенно больше допустимого (допуск – 0,5 мм). Этот прогиб устраняется с помощью лент (6) и натяжных шпилек (5).

б) Резонансная линия, рис. 5, представляет собой плоскую коаксиальную линию. Размеры сечения внутреннего электрода $100 \times 500 \text{ мм}^2$, размеры сечения наружного электрода (по внутреннему контуру) – $160 \times 700 \text{ мм}^2$. Максимальная длина линии 350 мм, минимальная – 160 мм.

Внутренний электрод резонансной линии подсоединяется к основанию дуанта с помощью наклонного перехода, имеющего длину 150 мм. Предусмотрено водяное охлаждение внутреннего электрода линии и закорачивающего устройства. Охлаждение обеспечивает съём мощности 4,5–5 квт.

С помощью закорачивающего устройства (см. рис. 5) осуществляется перестройка резонансной линии. На рисунке не показан внутренний электрод резонансной линии – он дан на рис. 4.

В качестве упругого элемента для осуществления высокочастотного контакта между плавирками резонансной линии и камеры применен шнур из вакуумной резины.

Возбуждение высокочастотной системы осуществляется за счёт кондуктивной связи (см. рис. 2 и рис. 6).

4. Система инжекции

Система инжекции (см. рис. 7) состоит из электронной пушки (1,2,3), жесткофокусирующего тракта (10,11), системы дробления пучка (5,7) и электростатического дефлектора (8).

Для исключения дефокусирующего влияния поля катушек грубой и тонкой коррекции на пучок электронов тракта служат четыре линейных сильноточных проводника, уложенных параллельно тракту, кроме того, для этих же целей смонтированы пермаллоевые экраны.

Запуск модели и предварительная отработка основных параметров ускорителя осуществлялись с внутренним источником электронов, показанным на рис. 8. Источник обеспечен шлюзовой камерой (3), моторным приводом (6). Имеется ручной привод (7), а также механизм юстировки углового положения головки (1), который позволяет найти оптимальный угол инжектирования. От механизма угловые перемещения на головку передаются через галец (5).

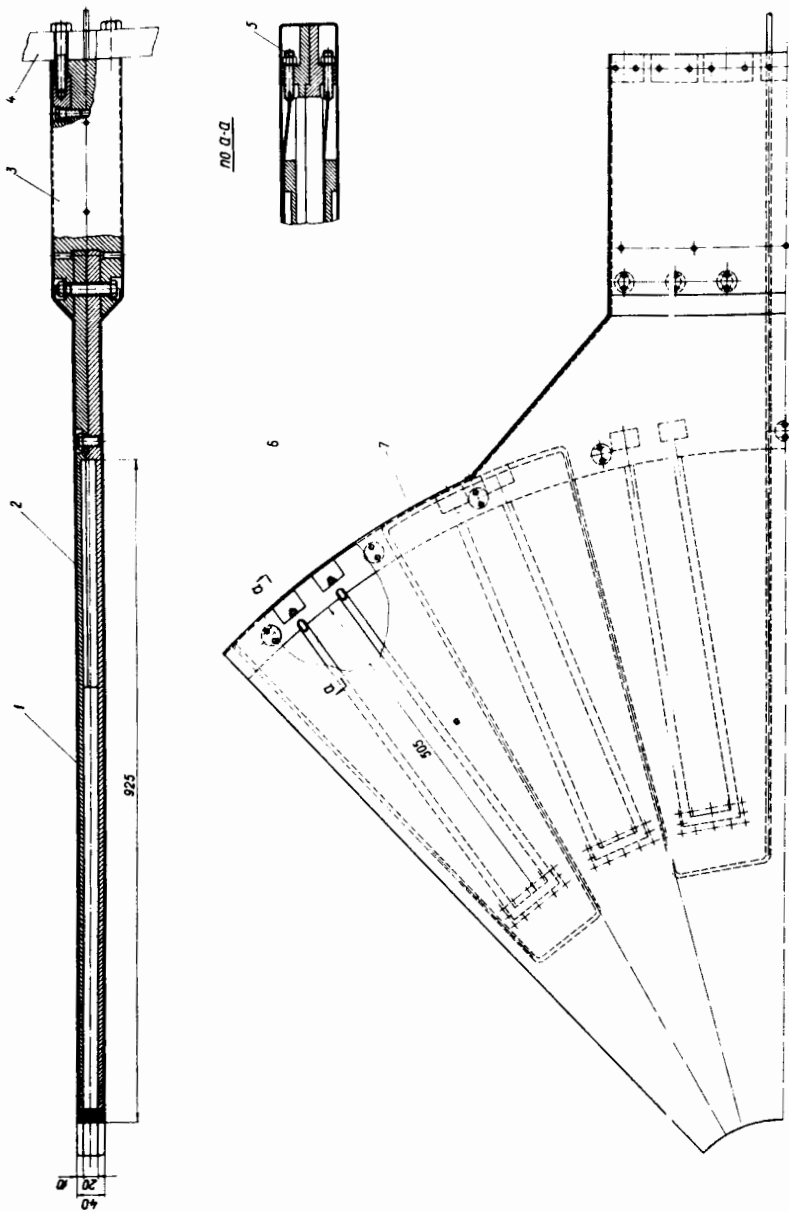


Рис. 4. Дуант. 1 - дюралевый лист дуанта, 2 - медный лист, плакировка, 3 - центральный электрод резонансной линии, 4 - стенка резонансной линии, 5 - натяжной винт с гайкой, 6 - лента, 7 - трубка для охлаждающей воды.

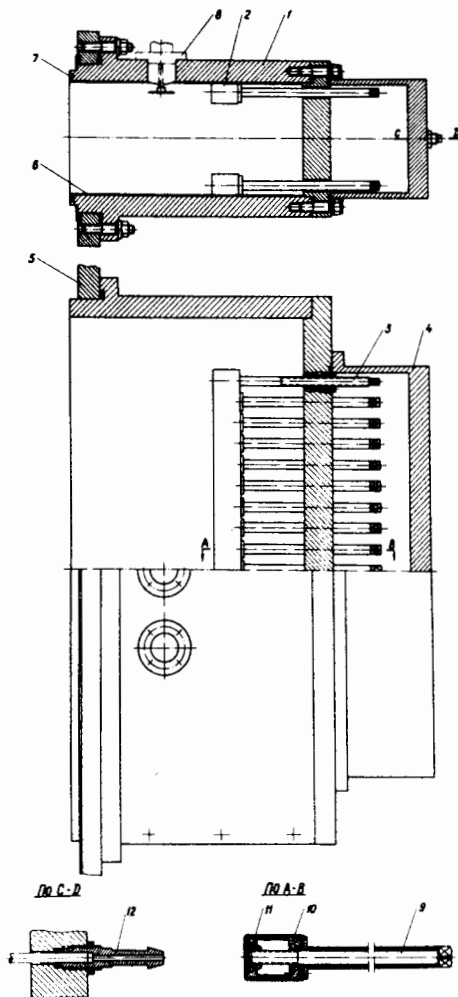


Рис. 5. Резонансная линия. 1 - корпус резонансной линии, 2,9,10,11 - закорачивающее устройство, 3 - винт для перестановки устройства, 4 - кюмал, 5 - фланец, 6 - плакировка, 7 - резиновый шнур, прижимающий плакировку резонансной линии к плакировке камеры, 8 - датчик высокочастотного напряжения, 12 - оливка для подвода воды.

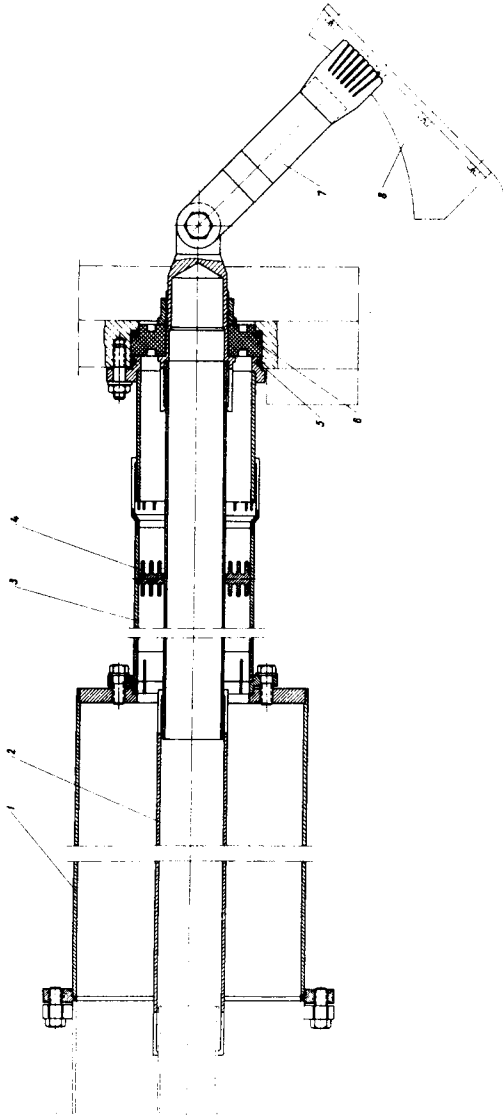


Рис. 5. 1 - переходная труба перехода, 2 - воздушный
 труба перехода, 3 - основная труба линии, 4 - изолятор, 5 - пружинное кольцо, обеспечивающее высокочастотный контакт, 6 -
 проходной изолятор, 7 - рычаг связи, 8 - контактный сектор,
 укрепленный на дуэнте.

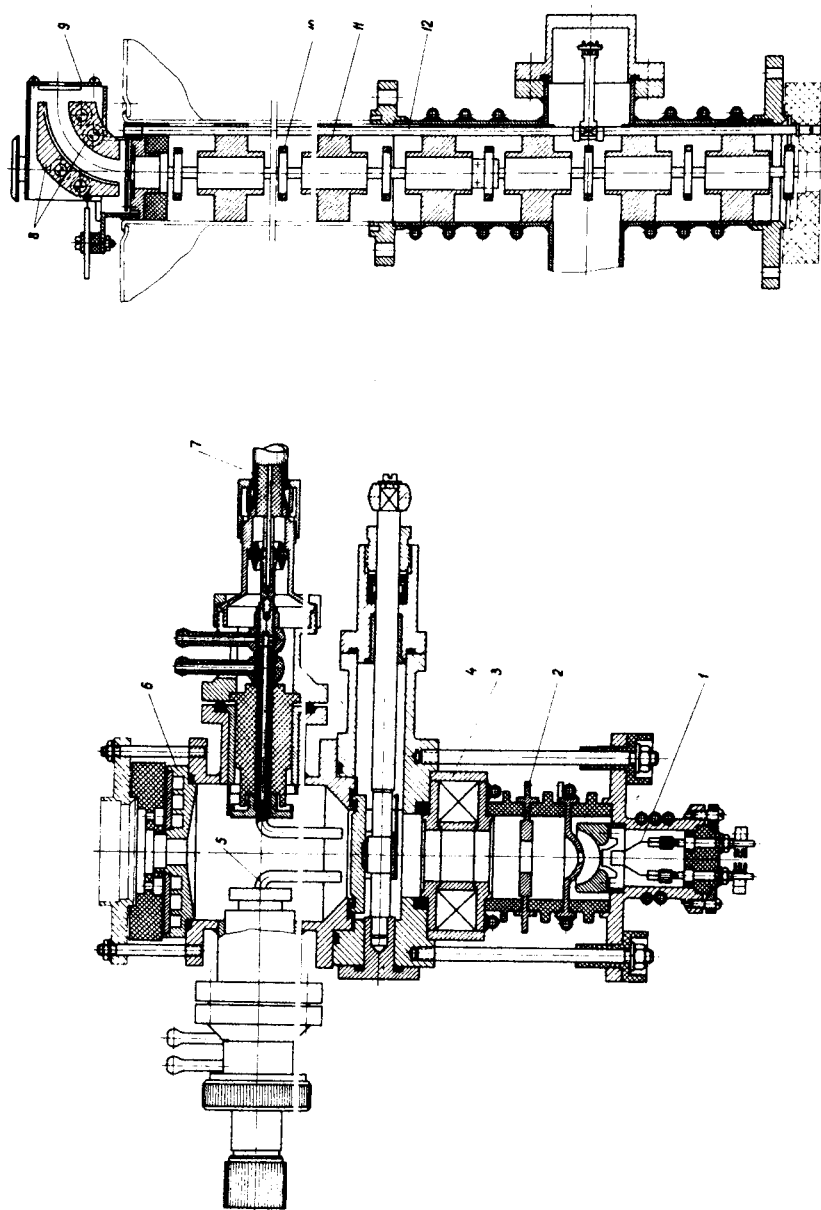


Рис. 7. Тракт инъекции. В правой части изображена "пушка" с шиберным затвором и системой дробления, слева - электростатический тракт с дефлектором. 1 - нить накаливания (катод), 2 - ускоряющий электрод, 3 - фокусирующая катушка, 4 - шиберный затвор, 5 - электрод системы дробления, 6 - диафрагма, 7 - высокочастотный кабель, 8 - дефлектор, 9 - диафрагма, 10 - кольцо ускоряющее, 11 - заземленный цилиндр, 12 - стержень для поворота дефлектора.

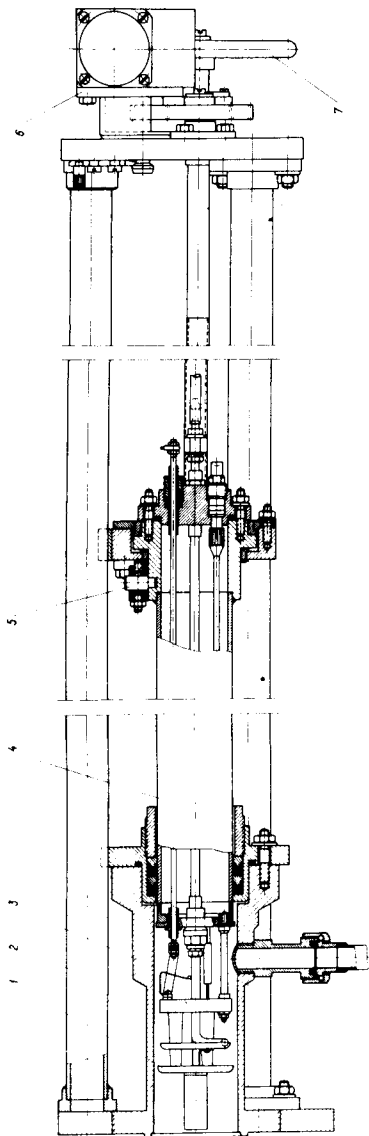


Рис. 8. Внутренний источник электронов, 1 - головка, 2-направляющая труба, 3 - штырь, 4 - шток, несущий головку, 5 - палец, 6 - электропривод, 7 - маховик ручного привода.

5. Пробники

Камера снабжена четырьмя пробниками (3) с токоизмерительными мишенями (см. рис. 1). Предусмотрено водяное охлаждение мишеней с максимальным теплоотводом до 25 квт. Управление пробниками дистанционное. Имеются ручной и гидравлический приводы пробников. В гидравлическом приводе применены телескопические цилиндры (см. рис. 9). Схема гидропривода дана на рис. 10. Для коммутации направления движения масла служат двухходовые краны (5) с непосредственным ручным управлением и с управлением посредством "электрического вала" с использованием сельсинсв типа ДИ и редуктора с передаточным числом $i = 5$.

Для каждого пробника используются два гидроцилиндра (7). Для индикации положения пробников применяются контактные трехфазные датчики (8), работающие на сельсин-приемник с механическим счетчиком (9). Головка с электростатическим дефлектором тракта инъекции поворачивается гидроцилиндром (6). Рабочее давление масла в гидроприводе не более 25 атм.

Пробники обеспечены комплектом сменных головок. Сюда входят одноламельная головка с допустимой тепловой нагрузкой до 25 квт, трехламельная головка (рис. 11) с тепловой нагрузкой на ламель до 8 квт, головка для изучения радиальной структуры пучка (см. рис. 12), высокочастотная головка (рис. 13), С-образная головка (рис. 14). Устройство головок ясно из приводимых чертежей. Для токовой изоляции и обеспечения вакуумного уплотнения тоководов использован фторопласт-4. Сигнал к измерительному прибору передается либо коаксиальной линией с волновым сопротивлением 75 ом, либо кабелем типа РК-119.

6. Электростатические электроды

Электростатические сигнальные электроды (всего 50 штук) предназначены для контроля фазы пролета пучка частиц через ускоряющие щели. Электроды устанавливаются на расстоянии ± 12 мм от средней плоскости магнитной системы.

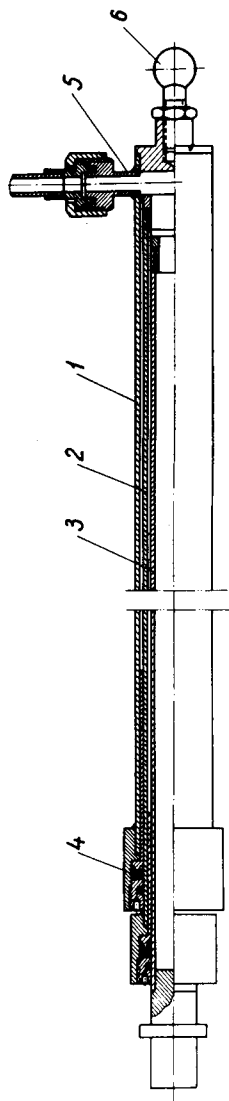


Рис. 9. Гидроцилиндр, используемый в гидропроводах пробников. 1 - наружный цилиндр, 2 - промежуточный цилиндр, 3 - цилиндр малый, 4 - уплотнение манжетное, 5 - штуцер, 6 - шаровая цапфа.

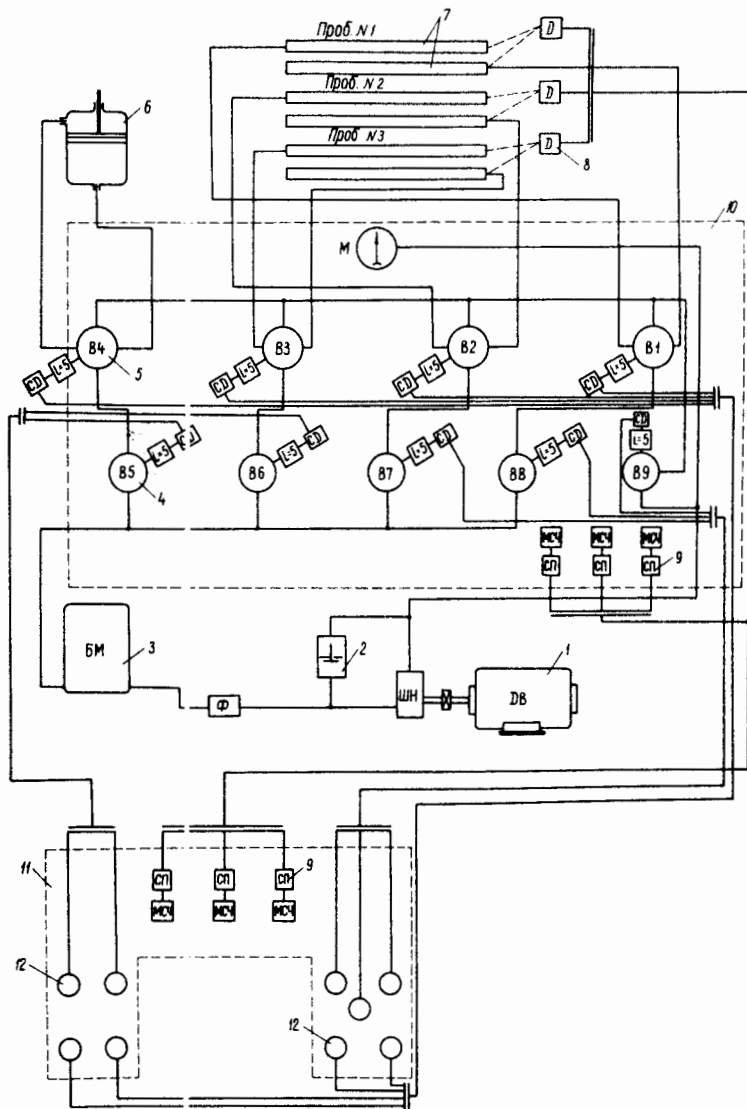


Рис. 10. Электрическая схема и схема маслопровода гидропривода к пробникам. 1 - электродвигатель, 2 - обратный клапан, 3 - бак масляный, 4 - вентиль игольчатый, 5 - двухходовый кран, 6 - гидрцилиндр поворота дефлектора тракта инъекции, 7 - гидрцилиндры, 8 - контактные трехфазные датчики, 9 - сельсий-приемник с механическим счётчиком, 10 - щиток управления, расположенный около ускорителя, 11 - пульт управления, расположенный в пультной комнате, 12 - сельсийны типа ДИ, используемые в системе "электрического вала".

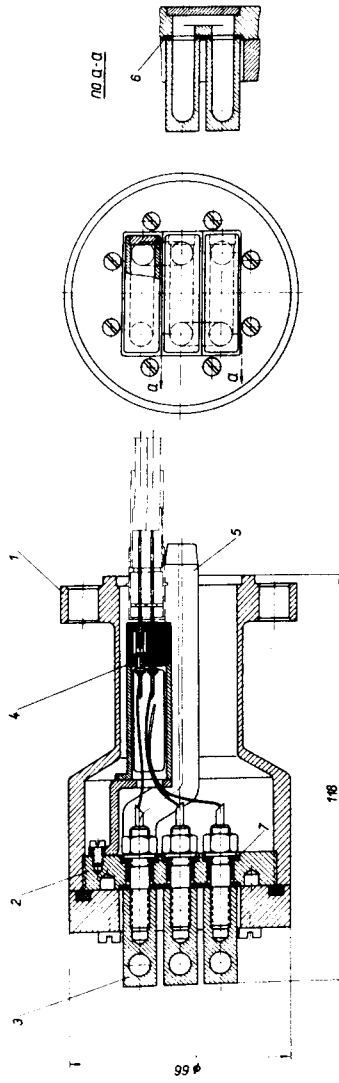


Рис. 11. Трехламельная головка пробника, 1 - корпус, 2 - основание, 3 - ламель, 4 - фишка, 5 - трубка, подводящая воду для охлаждения ламелей, 6 - прокладка уплотняющая, 7 - проходная изоляционная втулка.

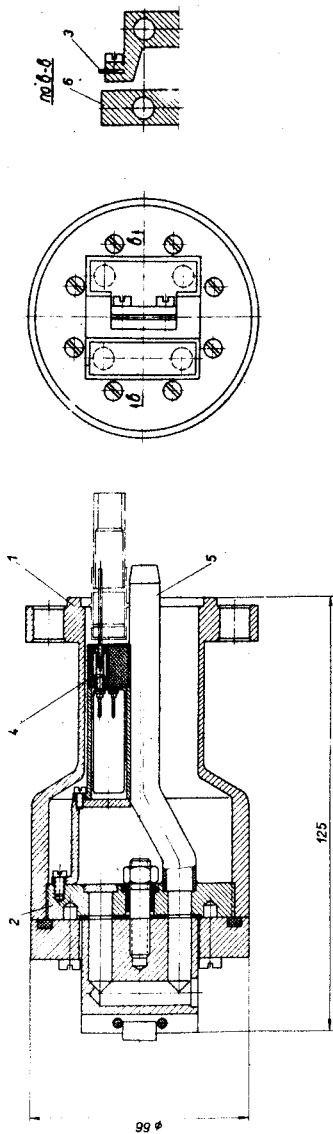


Рис. 12. Головка для изучения радиальной структуры пучка. 1 - корпус, 2 - основание, 3 - мишень, 4 - фишка, 5 - трубка, подводящая воду для охлаждения защитной ламели, 6 - защитная ламель.

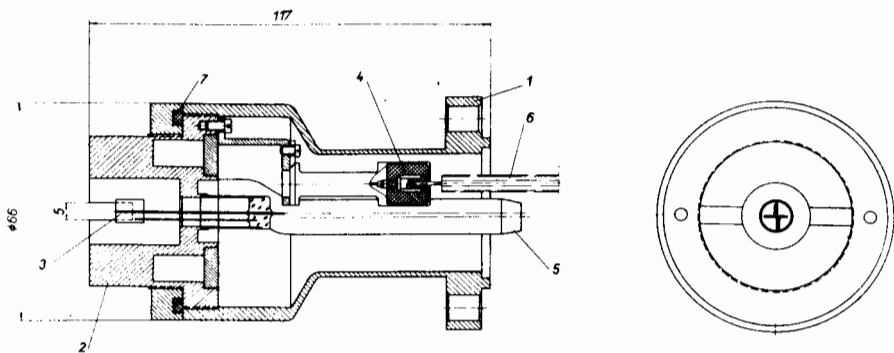


Рис. 13. Высокочастотная головка пробника. 1 - корпус, 2 - основание, 3 - мишень, 4 - фишка, 5 - трубка, подводящая воду для охлаждения основания, 6 - коаксиальная линия с волновым сопротивлением 75 ом.

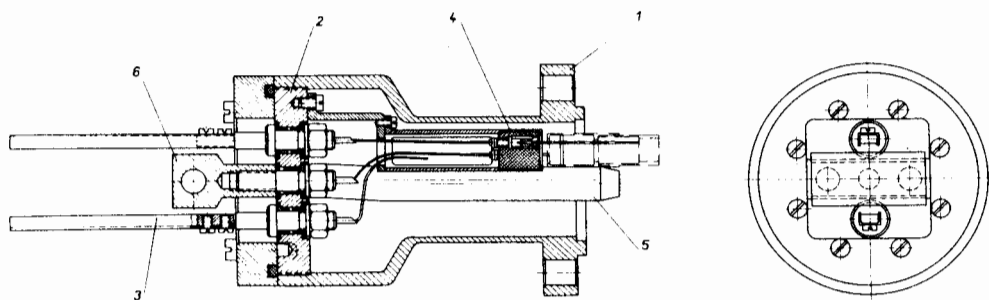


Рис. 14. С - образная головка пробника. 1 - корпус, 2 - основание, 3 - электрод-направляющая, 4 - фишка, 5 - трубка, подводящая воду для охлаждения центрального электрода, 6 - центральный электрод.

Для уменьшения прогиба несущих листов используются натяжное устройство (2, рис. 15). Сигнал с электродов снимается посредством кабеля РК-119. Высоксвакуумный высокочастотный ввод через фланец (4) показан на рис. 15.

7. Вакуумная система

Вакуумная система (рис. 16) состоит из трех форнасосов, восьми диффузионных насосов типа Н-5С из немагнитного материала, системы измерения и контроля вакуума. Высоковакуумные насосы (рис. 17) обеспечены азотными ловушками.

Вакуум в ускорительной камере должен быть не хуже $6 \cdot 10^{-6}$ мм Hg.

8. Измерительная штанга

Измерительная штанга предназначена для перемещения датчика магнитного поля в зазоре магнитной системы ускорителя. Датчики могут перемещаться по радиусу в пределах от 150 мм до 1200 мм и устанавливаться с точностью $\pm 0,1$ мм. По азимуту датчики перемещаются на 360° с минимальным азимутальным шагом $2,5^{\circ}$, точность установки $\pm 0,025^{\circ}$. Азимутальное перемещение дистанционное. Датчик движется в средней плоскости камеры. Установка радиального положения датчика производится вручную на начальном азимуте $\phi = 0^{\circ}$.

9. Вакуумная камера

Верхняя и нижняя крышки камеры состоят из двух плит и имеют отверстия для полюсных дисков. По наружному контуру крышки опираются на боковые стенки камеры, по внутреннему контуру – на специальное кольцо-гнездо для полюсных дисков. Нижняя крышка, кроме отверстия для полюсного диска, имеет еще 8 отверстий для подсоединения высоковакуумных агрегатов. Уплотнение плит осуществляется с помощью круглого шну-

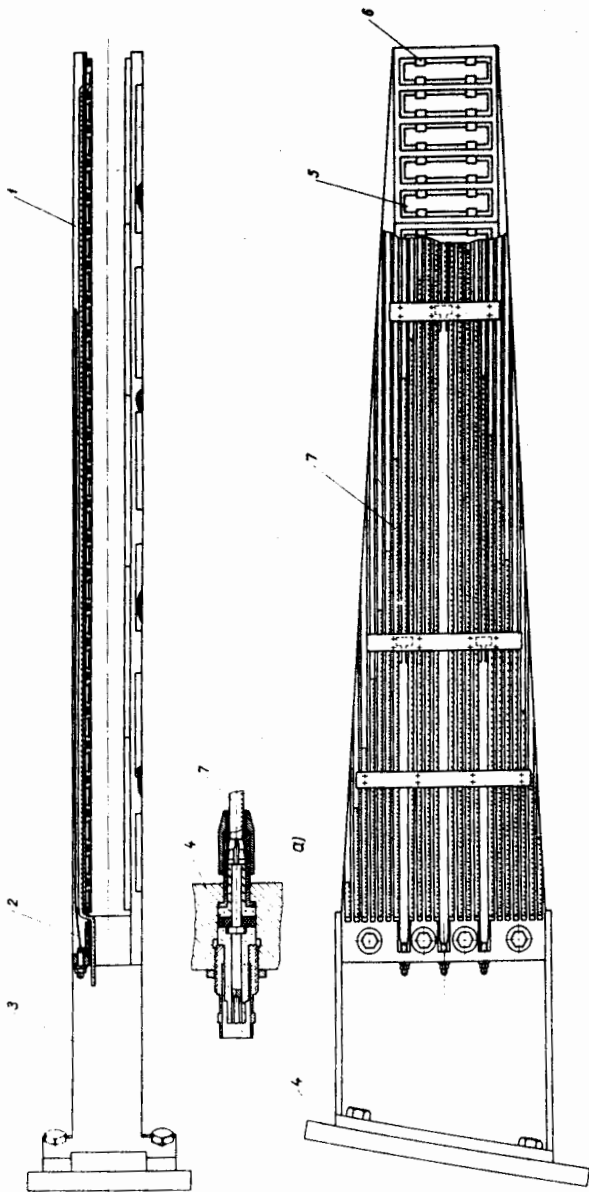


Рис. 15. Электростатические электроды. 1 - несущая плита, 2 - натяжная лента, 3 - вилка, 4 - фланец с высокочастотными вводами, 5 - электрод, 6 - изолятор, 7 - кабель типа РК-119 без винифлексового чехла.

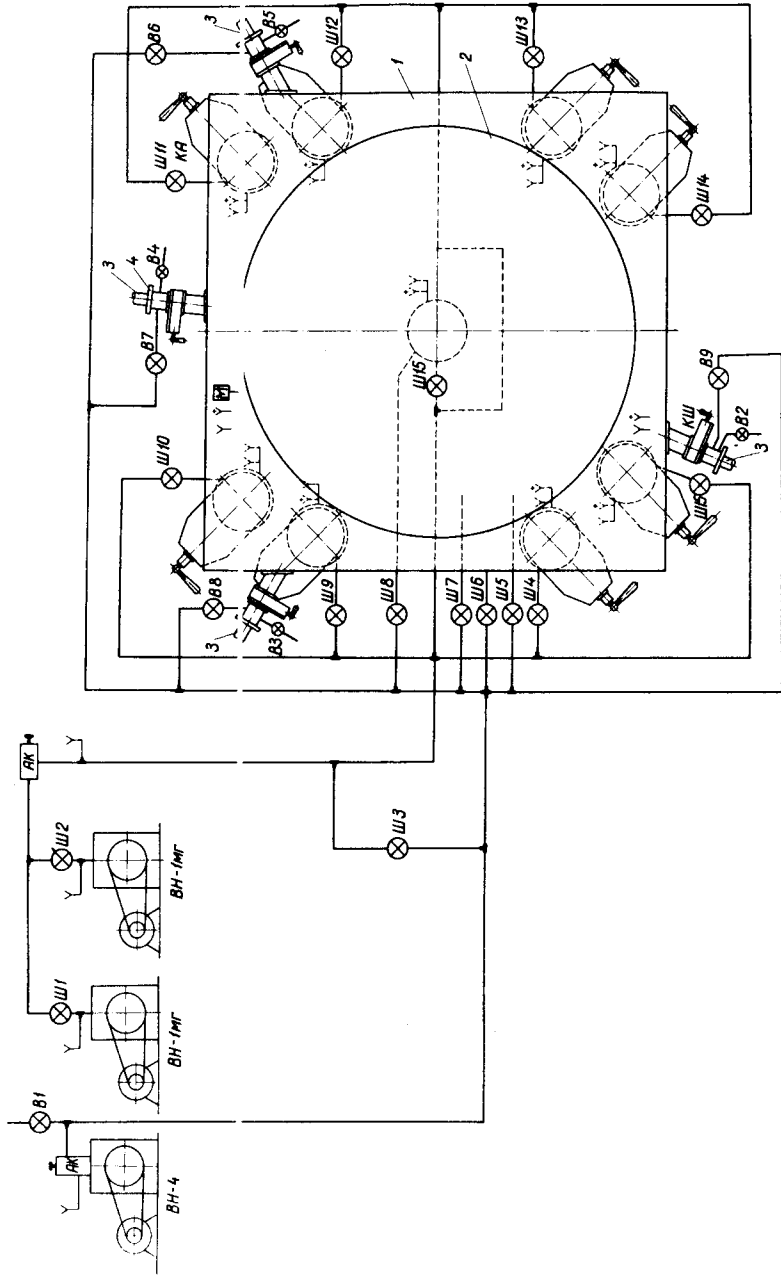


Рис. 16. Схема вакуумных линий. 1 - камера, 2 - полусная крышка, 3 - пробник, 4 - шлюз, ВН-4, ВН-1МГ - форвакуумные насосы, В - вентили, цифры обозначают порядковый номер, АК - автоматический клапан, Ш - шиберный затвор, шифры обозначают порядковый номер, Y - датчик термометрический ЛТ-2, YY - датчик ионизационного манометра ЛМ-2, M - датчик ММ-13М-4.

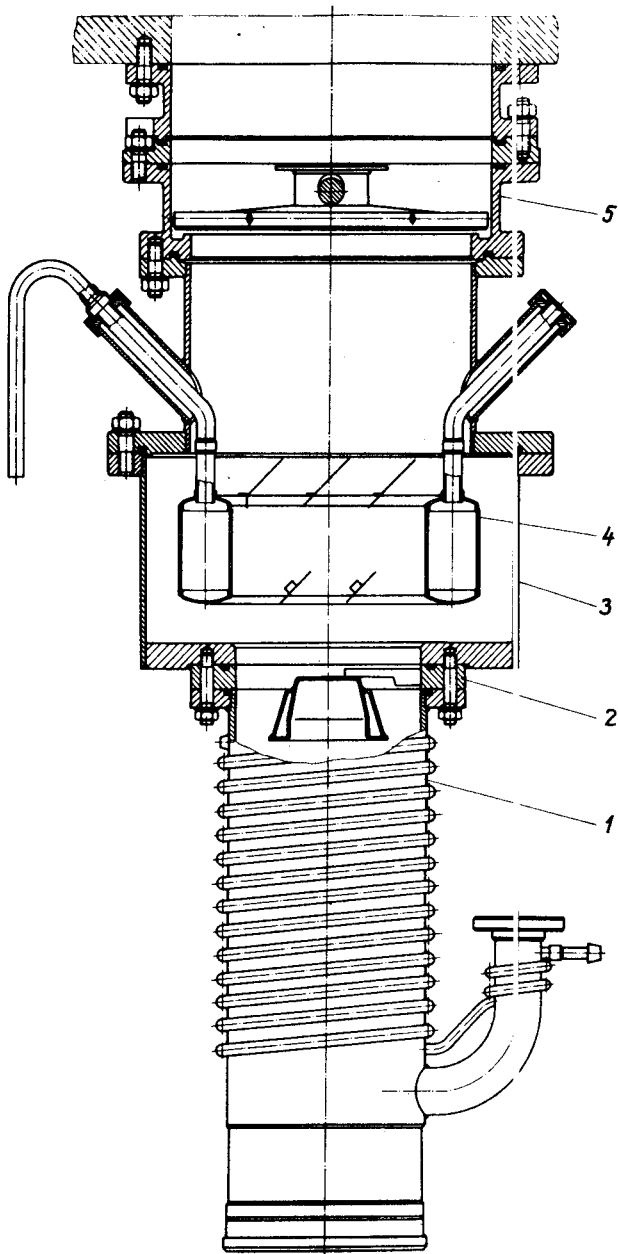


Рис. 17. Высоковакуумный агрегат, 1 - диффузионный насос, 2 - маслоотражатель, 3 - корпус ловушки, 4 - сосуд для аргона, 5 - шибберный затвор.

ра из вакуумной резины. Размеры канавок для уплотняющего шнура выбраны так, чтобы при обжатии шнура по высоте на 30–33% не происходило полного заполнения резиной поперечного сечения канавки.

Боковые стенки камеры имеют необходимое количество окон для установки пробника, электростатических электродов, дуанта, а также для визуального наблюдения за процессом ускорения электронов.

Наиболее высокие требования предъявлены к жесткости полюсных дисков-крышек. Их прогиб не должен превышать 0,25 мм. Для выполнения данного требования диски, свободно лежащие на опоре, подперты в центре специальной распорной колонкой (10, рис. 2), которая одновременно является центрирующим элементом, обеспечивающим соосность дисков с точностью не хуже 0,1 мм. Полюсные крышки выполнены в виде низкого цилиндра, нижняя крышка которого имеет 16 радиально расположенных ребер, а верхняя крышка гладкая. Внутренняя полость полюсных крышек откачивается на форвакуум. Это позволяет разгрузить плакировку полюсных накопителей, а также произвести перераспределение атмосферной нагрузки, приходящейся на крышку, между диском с ребрами, наружной опорой крышки и центральной колонной. Степень распределения нагрузки зависит от величины зазора между дисками и ребрами внутреннего диска крышки.

Расчёт на жесткость полюсных дисков-крышек производился по следующей методике.

Вырежем сектор, ограниченный ближайшими ребрами жесткости. Нагрузим сектор равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью $q = 1 \text{ кг/см}^2$. Влиянием смежных секторов на выделенный пренебрежем. Это дает несколько завышенный результат расчётной величины прогиба. Выделенный сектор в сущности представляет собой балку с переменным сечением. На рис. 18 изображен сектор (план) и поперечное сечение его.

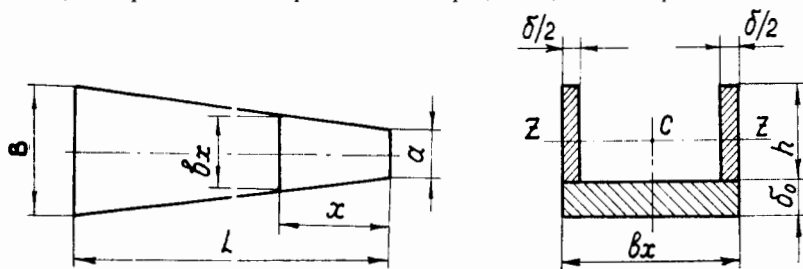


Рис. 18

Так как балка (см. рис. 18) имеет вид трапеции, то силовая нагрузка может быть разбита на две независимые системы сил:

а) равномерно распределенная нагрузка с интенсивностью q_1

$$q_1 = \frac{a \cdot L \cdot q}{L} \quad \text{кг/см},$$

б) треугольная нагрузка с максимальным значением интенсивности q_2

$$q_2 = \frac{(b-a)Lq}{2L} = \frac{b-a}{2}q \quad \text{кг/см}.$$

Расчётные схемы, соответствующие данным системам сил, приводятся на рис. 19.

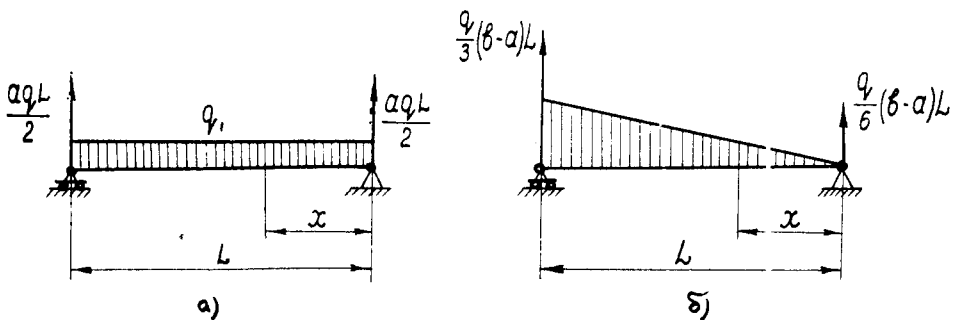


Рис.19

Для схемы а) изгибающий момент в сечении x равен

$$M_1(x) = \frac{q \cdot a \cdot L \cdot x}{2} - \frac{q \cdot a \cdot x^2}{2}.$$

Для схемы б) изгибающий момент в сечении x равен

$$M_2(x) = \frac{q}{6} \cdot \frac{b-a}{L} x^3.$$

Уравнение изогнутой оси балки

$$y'' = \frac{M(x)}{E J(x)} \dots, \quad (1)$$

где $M(x)$ равно сумме моментов $M_1(x)$ и $M_2(x)$.

С целью упрощения решения дифференциального уравнения изогнутой оси балки возьмем среднее арифметическое значение момента инерции между двумя предельными значениями, соответствующими концевым сечениям балки.

Обозначим это значение через $J_{\text{ср}}$.

После интегрирования уравнения (1) получим

$$y' = \frac{1}{E J_{\text{ср}}} \left[\frac{qL}{12} (2a+b)x^2 - \frac{aq}{6} x^3 - \frac{q}{24} (B-a) \frac{x^4}{L} + \frac{aqL^3}{24} + \frac{q}{120} (B-a)L^3 - \frac{qL^3}{36} (2a+B) \right] \dots, \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{E J_{\text{ср}}} \left[\frac{qL}{36} (2a+B)x^3 - \frac{aq}{24} x^4 - \frac{q}{120} \frac{B-a}{L} x^5 + \frac{aqL^3}{24} x + \frac{q}{120} (B-a)L^3 x - \frac{qL^3}{36} (2a+B)x \right] \dots \quad (3)$$

Максимальный прогиб имеет место при $x = 55,509$ см. Геометрические размеры сектора равны: $a = 25,7$ мм, $B = 452,6$ мм, $L = 1073$ мм. Нагрузка - атмосферное давление, $q = 1$ кг/см².

Геометрические размеры сечения, соответствующего координате $x = 0$, следующие: $B_x = a$, $h = 111$ мм, $\delta_0 = 50$ мм, $\delta = 5$ мм. Момент инерции сечения относительно оси z (см. рис. 18) равен $J_1 = 526,7$ см⁴.

Геометрические размеры сечения, соответствующего координате $x=L$, следующие: $B_x = B$, $h = 111$ мм, $\delta_0 = 50$ мм, $\delta = 5$ мм. Момент инерции сечения относительно оси z равен $J_2 = 1271,11$ см⁴.

Среднее значение момента инерции

$$J_{\text{ср}} = \frac{J_1 + J_2}{2} = 899.$$

Модуль упругости равен: $E = 0,71 \cdot 10^6$ кг/см².

Максимальное значение прогиба сектора получим в сечении с координатой $x = 55,509$ см. Подставив в формулу (3) для прогиба значения всех входящих величин (q в кг/см², длина в см, E в кг/см², J в см⁴), получим: $y = 0,0647$ см.

Полученное значение прогиба больше прогиба, который получится при нагружении реального диска. Попробуем оценить, во сколько раз он больше реального прогиба. Рассмотрим диск толщиной δ с опорами по наружному периметру и в центре. Нагрузка равномерная с интенсивностью q . Найдем максимальное значение прогиба диска Y_g . Из диска вырежем сектор с размером "а" при вершине, в мм, с размером "в", в мм, в основании. Длина сектора обозначена через L и равна радиусу диска. Найдем максимальное значение прогиба для сектора Y_c и сравним с прогибом диска Y_g .

$$Y_g = \frac{q L^4 \rho^2 \cdot 12(1-\nu^2)}{64 E \delta^3} \left(\rho^2 - 1 - 2 \frac{5+\nu}{3+\nu} \ln \rho \right),$$

где

$$\rho = \frac{r}{L},$$

r - переменное значение радиуса, $\nu = 0,3$. Y_c имеет максимальное значение при $\frac{r}{L} = 0,53$.

Для Y_c справедлива зависимость (3), полученная ранее, только момент инерции $J_{\text{ср}}$ следует заменить на новое значение $J'_{\text{ср}}$.

$$J'_{\text{ср}} = \left(\frac{a \cdot \delta^3}{12} + \frac{B \cdot \delta^3}{12} \right) \frac{1}{2}.$$

Возьмем отношение $n = \frac{Y_c}{Y_p}$, получим $n = 1,2$.

Следовательно, можно ожидать реальный прогиб диска, имеющего радиально расположенные ребра, равным $Y_p = \frac{Y}{n}$, $Y_p = 0,54$ мм.

Такой прогиб больше допустимого. Но у нас имеется большой резерв, заключающийся в возможности распределения атмосферной нагрузки за счёт форвакуумной откачки полости полюсной крышки.

Если оставить зазор между ребрами и наружным диском полюсной крышки равным половине прогиба диска от атмосферной нагрузки, то прогиб полюсной крышки в целом составит 0,27 мм, что является допустимым.

Реализация таких мероприятий как а) усиление одного из дисков крышки ребрами; б) обеспечение зазора между ребрами и вторым диском крышки; в) форвакуумная откачка внутренней полости полюсной крышки, — позволяет получить необходимую жесткость полюсной крышки.

Величина зазора между ребрами и диском должна быть не более 6 мм и не менее 2,7 мм.

Экспериментальная проверка величины прогиба дала следующее его значение: $Y = 0,24$ мм. Измерение производилось с помощью индикатора с ценою деления 0,02 мм, установленного внутри камеры на соответствующем радиусе.

На рис. 3 показана полюсная крышка. К диску (9), усиленному радиально расположенными ребрами (15), крепятся кольцо (10), накладки (4), между которыми образованы спиралевидные канавки для размещения вариационной обмотки (5). В кольцевых проточках диска размещены катушки (8), формирующие среднее поле. Катушки укрепляются в проточках с помощью накладок. К накладкам (4) крепится диск (1), в про-

точках которого находятся катушки тонкой коррекции магнитного поля. Катушки тонкой коррекции закрыты тонколистовой медью. Наружный диск (11), совместно с кольцами (10, 12), а также дисками (1 и 2) образуют полость, которая откачивается на форвакуум. Уплотнение мест разъемов осуществляется с помощью круглого шнура из вакуумной резины ϕ 5-6мм. Зазор между ребрами и наружным диском взят равным 3 мм, что эквивалентно двухкратному уменьшению нагрузки на диск с ребрами. При зазоре, равном 3 мм, обеспечивается допустимый прогиб полюсной крышки. Дальнейшее увеличение зазора приводит к ухудшению условий работы уплотнений на выводных стаканах (17, см. рис. 2).

Следует отметить хорошее совпадение расчётного значения прогиба 0,27 мм с измеренной величиной $0,24 \pm 0,02$ мм. Предложенная методика расчёта жесткости дисков с ребрами может быть полезной в инженерной практике.

10. Дуант

Дуант представляет собой камертонообразный лепесток, выполненный из дюралюминия и обшитый тонколистовой медью ($\delta = 0,5$ мм). К плакировке дуанта припаяна медная трубка, через которую пропускается охлаждающая вода. Верхний и нижний лепестки имеют толщину 10 мм, просвет между лепестками (20 мм) служит для прохождения пучка электронов. Верхний и нижний лепестки скрепляются обоймой, которая, в свою очередь, крепится к несущей консольной балке. Лепестки имеют вид сектора с центральным углом, равным 90° . Их допустимое провисание составляет не более 0,5 мм. Требуемая жесткость может быть обеспечена применением специальных мер.

Вырежем из лепестка сектор с углом при вершине, равным 10° , тогда $a = 27,9$ мм, $b = 189$ мм, $L = 925$ мм. Толщина лепестка 10 мм, при этом 9,5 мм приходится на дюраль, а 0,5 мм на медь, $\gamma_2 = 8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/см³. Нагрузка – весовая, сосредоточенная сила $Q = 15,6 \cdot 10^{-3}$ кг. Принимаем за начало координат место крепления сектора. При этом постоянные интегрирования будут равны нулю.

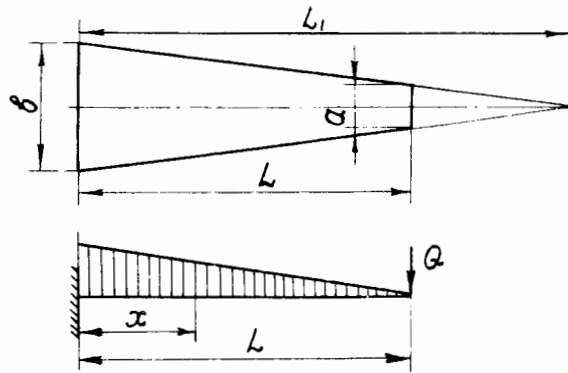


Рис.20

Выражения для изгибающего момента в сечении x будет иметь вид:

$$M(x) = \frac{1}{2}(L-x)^2 a(\delta_1 \cdot \gamma_1 + \delta_2 \cdot \gamma_2) + Q(L-x) + \frac{1}{6} \frac{(L-x)^3}{L} (\delta_1 \gamma_1 + \delta_2 \gamma_2).$$

Момент инерции поперечного сечения сектора $J(x)$ будет равен:

$$J_x = J_0 \frac{L_1 - x}{L_1}.$$

Уравнение изогнутой оси балки запишется в виде:

$$y'' = \frac{1}{E J_0} \frac{L_1}{L_1 - x} \left[Q(L-x) + \frac{ac}{2} (L-x)^2 + \frac{bc}{6L} (L-x)^3 \right],$$

где

$$c = \delta_1 \gamma_1 + \delta_2 \gamma_2.$$

Применение графического интегрирования позволяет с минимальной затратой времени решить это уравнение.

Введем обозначение: $M_1(x) = \frac{L_1}{L_1 - x} M(x).$

Составим таблицу для $M_1(x).$

Таблица 4

X, см	0	10	20	30	40	50	60	70	80	92,5
$M_1(X)$ кг.см	118,5	96,35	76,6	58,8	43,24	30	19	10,3	4	0

Строим график $M_1(x)$, после чего проводим графическое интегрирование. Результаты интегрирования приводятся в виде кривых угла поворота ϕ поперечного сечения лепестка и прогиба Y (см. рис. 21, 22). Из графика Y для свободно висящего лепестка дуанта получим величину прогиба конца дуанта:

$$y = m_4 z, \quad Y = 0,33 \text{ см,}$$

где z в мм, m_4 в см/мм.

Видим, что прогиб свободно висящего лепестка существенно больше допустимой величины 0,5 мм.

Если в одном или нескольких сечениях сектора возбудить момент M_x , обратный по знаку моменту от весовой нагрузки, то при соответствующей величине первого можно существенно уменьшить прогиб сектора. M_x можно возбудить с помощью ленты, расположенной в верхнем слое сектора. Один конец ленты связан с сектором, а второй - с натяжным винтом. При этом, кроме момента, к сектору оказывается приложенной продольная сила, стремящаяся нарушить его продольную устойчивость. Для обеспечения продольной устойчивости необходимо, чтобы натяжная лента по всей длине имела связь с сектором. Такая связь обеспечивается в нашем случае плакировкой. Эта схема обеспечения напряженного состояния моделировалась и применена при разработке конструкции дуанта.

Следует отметить, что хорошее совпадение результатов расчёта с экспериментом достигается на относительно узких элементах, в плоскости которых располагается несколько натяжных устройств. Если из-за чрезмерной ширины сектора необходимы несколько групп натяжных устройств,

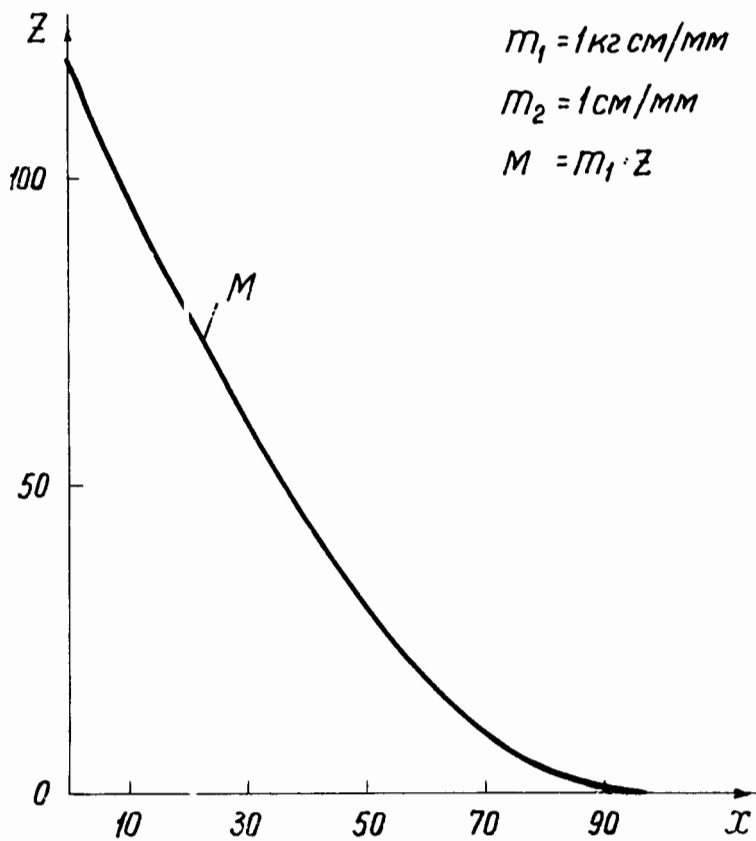


Рис.21. Изгибающий момент свободно висящего дуанта (консоль)

$$y' = \frac{1}{EJ_0} m_1 m_2 S_M ; \quad m_3 = 107 \frac{1}{EJ_0} \frac{\text{кг см}^2}{\text{мм}}$$

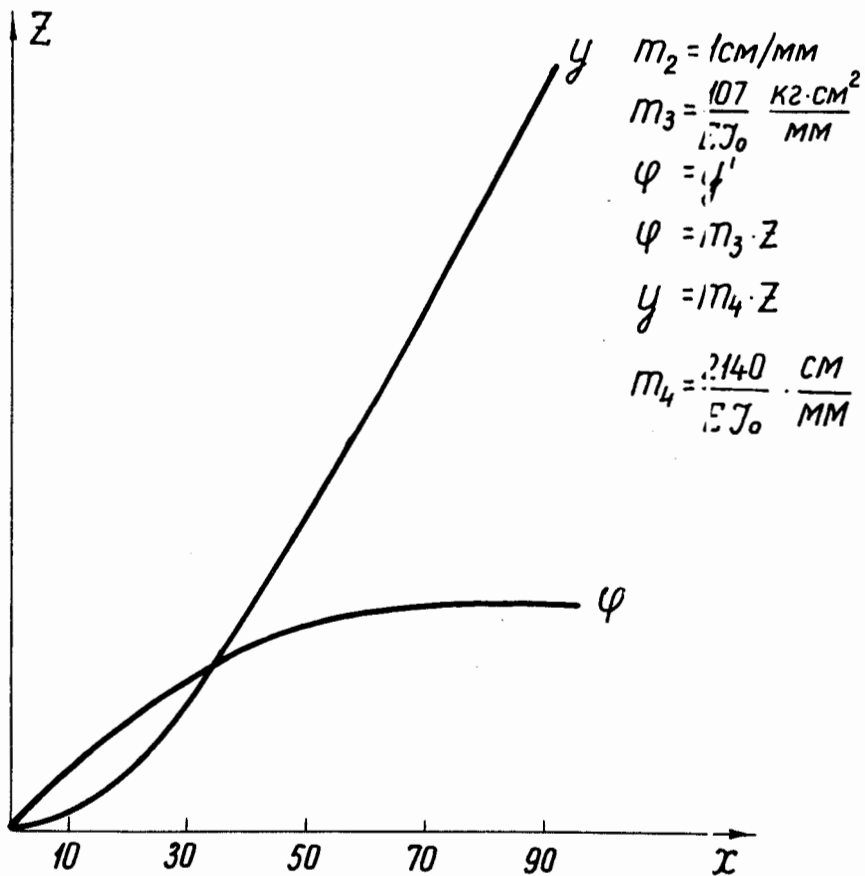


Рис.22. Угол поворота и прогиб свободно висящего дуанта (консоль).

$$y = m_2 m_3 s ; m_4 = \frac{m_2 m_3 s_1}{Z_0} = \frac{1 \cdot 107 s_1}{EJ_0 \cdot 2,5} = 107 \frac{50}{2,5 EJ_0} ; Z \dots \frac{Z_0 s}{s_1}$$

периодически повторяющихся, то расхождение с расчётом может быть значительным (в 1,5 - 2 раза). В таком случае более целесообразным будет приготовление лепестка или панели наборными из отдельных узких секторов. Хорошие результаты получены по устранению прогиба длинных труб пробников.

Итак, в сечении $x = \ell$ приложим сосредоточенный момент M_k . При расчёте должен быть взят момент

$$M_D = \frac{L_1}{L_1 - x} M_k.$$

Составим новую таблицу, при этом на участке $0 \leq x \leq \ell$

$$M(x) = \frac{L_1}{L_1 - x} \left[Q(L-x) + \frac{ac}{2}(L-x)^2 + \frac{bc}{6L}(L-x)^3 - M_k \right],$$

а на участке $\ell \leq x \leq L$ уравнение для момента $M_1(x)$ соответственно запишется в виде

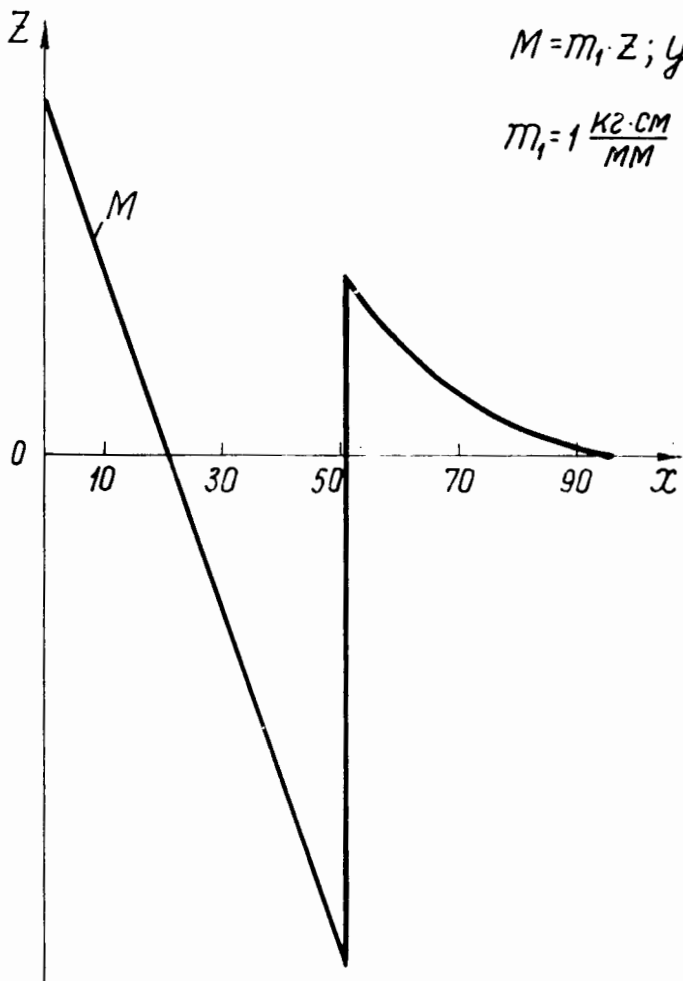
$$M(x) = \frac{L_1}{L_1 - x} \left[Q(L-x) + \frac{ac}{2}(L-x)^2 + \frac{bc}{6}(L-x)^3 \right].$$

Таблица 5

X см	0	10	20	30	40	50,5	60	70	80	92,5
$M_1(X)$ кг.см	58,5	30,26	3,0	-24,2	-51,8	-82,9	19	10,3	4,0	0

Компенсирующий момент M_k в сечении $x = 50,5$ см взят равным 60 кг. см. Проведя графическое интегрирование, найдем, что максимальный прогиб лепестка в сечении с координатой $x = 400$ мм составляет 0,179 мм (см. рис. 23 и 24). Усилие, растягивающее ленту, равно:

$$Q_D = \frac{M_k}{0,4} = 150 \text{ кг.}$$



$$M = m_1 \cdot z; \quad y' = \frac{1}{EJ_0} \cdot m_1 \cdot m_2 \delta(x)$$

$$m_1 = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{см}}{\text{мм}}, \quad m_2 = 1 \frac{\text{см}}{\text{мм}}$$

Рис. 23. Изгибающий момент свободно висящего лунга (консоль) при одновременном действии компенсирующего момента M_k .

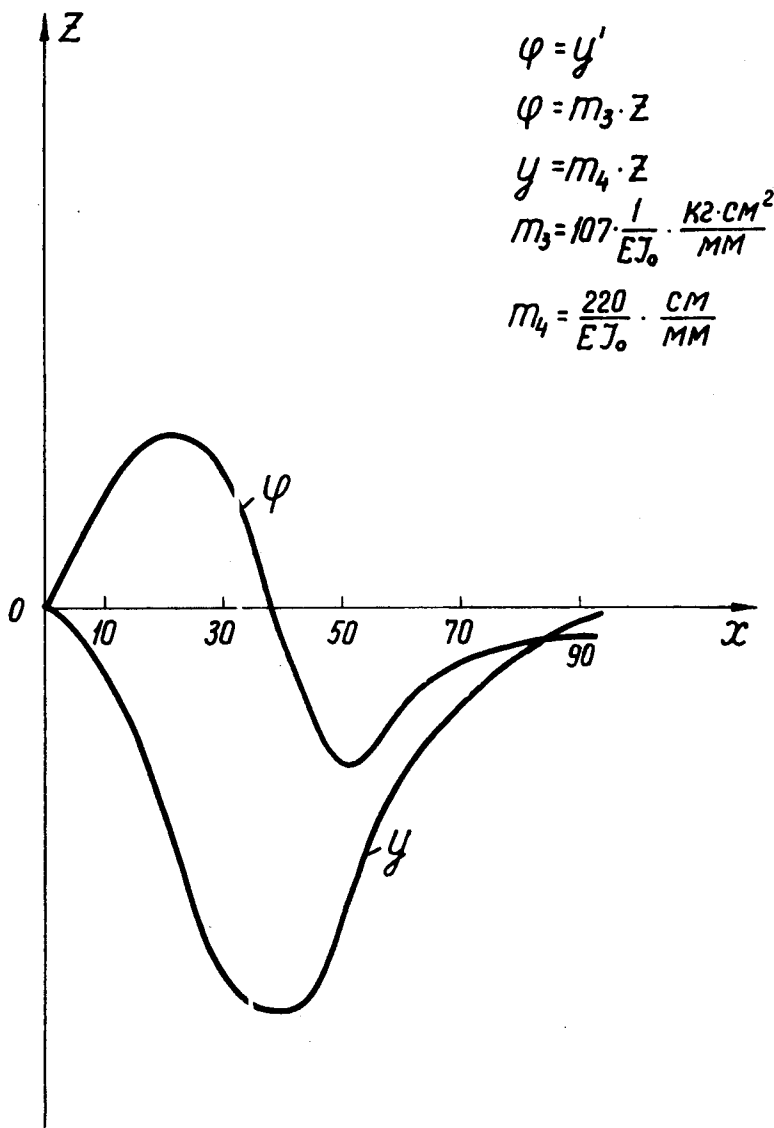


Рис.24. Угол поворота и прогиб свободно-висящего дуанта (консоль) при одновременном действии компенсирующего момента M_k .

Напряжение в ленте

$$\sigma_p = \frac{Q_p}{F} = \frac{150}{0,1} = 1500 \text{ кг/см}^2.$$

Натяжные ленты и болты изготовлены из сплава титана ВТ-4. Данный немагнитный сплав обладает высокой прочностью и легкостью.

Аналитический расчёт сектора дуанта упрощается, если в уравнение для прогнутой оси сектора вместо переменного значения момента инерции $J(x)$ подставим среднее его значение, тогда уравнение изогнутой оси сектора на участке $0 \leq x \leq \ell$ будет иметь вид

$$y'' = \frac{1}{EJ_{\text{ср}}} \left[Q(L-x) + \frac{ac}{2}(L-x)^2 + \frac{bc}{6L}(L-x)^3 - M_k \right], \quad (4)$$

А на участке $\ell \leq x \leq L$ запишется в следующем виде (при этом начало координат перенесено в точку $x = \ell$, а аргумент в уравнении меняется от нуля до $x = L - \ell$)

$$y'' = \frac{1}{EJ_{\text{ср}}} \left[Q(L - \ell - x) + \frac{ac}{2}(L - \ell - x)^2 + \frac{bc}{6}(L - \ell - x)^3 \right]. \quad (5)$$

Решив уравнение (4), найдем угол поворота Y'_ρ и прогиб Y_ρ поперечного сечения сектора с координатой $x = \ell$, при этом начальные условия нулевые. Начальными условиями для решения уравнения (5) являются следующие: $x=0$, $Y'_0 = Y'_\ell$, $Y_0 = Y_\ell$.

Произведя интегрирование и подставив численные значения параметров, получим:

$$\begin{aligned} Y'_\rho &= 5,1854 \cdot 10^{-3} - 0,0918 \cdot 10^{-3} M_k, \\ Y_\rho &= 170,1476 \cdot 10^{-3} - 2,3174 \cdot 10^{-4} M_k, \\ Y_2 &= 404,269 \cdot 10^{-3} - 6,173 \cdot 10^{-3} M_k. \end{aligned}$$

Задавшись прогибом конца сектора Y_2 , равным нулю, найдем компенсирующий момент M_k :

$$M_k = 65,5 \text{ кг.см.}$$

Усилия в натяжной ленте будут равны:

$$Q_p = \frac{M_k}{0,4}; \quad \sigma_p = 1637 \text{ кг/см}^2.$$

Мы получили несколько завышенный результат в сравнении с более точным графическим решением, где $M_k = 60$ кгм, а $\sigma_p = 1500$ кг/см².

Однако расхождение несущественное. Следовательно, с успехом можно применять замену переменного значения момента инерции на среднюю его величину, оставив без изменений систему действующих сил.

11. Высоковакуумная система

Заданием на проектирование ускорителя предусматривался вакуум в ускорительной камере не хуже $6 \cdot 10^{-6}$ мм Hg. Расчет проводился исходя из этого давления, при этом предполагалось, что заданное давление будет достигнуто за 6 часов откачки. Использовались следующие формулы (см. работы /6,7,8/):

$$S = n \frac{Q_m + Q_2}{P}; \quad \lg \left(\frac{Q_2}{S_0} \right) = A - Bt; \quad \frac{1}{S} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{F};$$

$$\frac{1}{F_g} = \frac{1}{9,1D^2}; \quad \frac{1}{F_1} = \frac{L}{12,1 D_{mp}^3}.$$

Здесь

S - производительность системы у выпускного отверстия откачиваемого объема, л/сек.

n - коэффициент запаса, взят равным 1,5.

Q_m - поток, образованный натеканием в объем, мм.л/сек.

Предполагалось, что натекание отсутствует.

Q_2 - поток, образованный газоотделением внутренних поверхностей системы, мм. л/сек, или скорость газоотделения в л/сек при 1 мм Hg.

S_0 - поверхность, с которой определяется газоотделение, в см². Так, поверхность дюралюминия $S_g = 2,13 \cdot 10^5$ см², поверхность меди $S_M = 3,67 \cdot 10^5$ см², поверхность нержавеющей стали $S_{\text{нерж}} = 5,48 \cdot 10^4$ см² (при рабочем пректировании сталь марки IX18H9T линии откачки была заменена на дюраль, перерасчёт газоотделения не производился), поверхность резиновых уплотнений равна: $S_{\text{рез}} = 4,72 \cdot 10^3$ см².

t - время откачки в часах, необходимое для получения заданного давления P .

A и B - эмпирические коэффициенты, зависящие от вида материала и способа обработки его. Для меди и дюрала, протравленных и промытых бензолом и ацетоном, $A_M = -3,826$, $B_M = 0,374$, $A_g = -3,39$, $B_g = 0,296$. Для необработанной нержавеющей стали $A = -2,84$, $B = 0,264$. Для вакуумной резины газоотделение определялось согласно /7/.

S_H - необходимая производительность диффузионного насоса, л/сек.

F - пропускная способность линии откачки, л/сек.

$\frac{1}{F_g}$ - сопротивление диафрагмы, сек/л.

$\frac{1}{F_l}$ - сопротивление трубы, сек/л.

D - диаметр диафрагмы, см, $D = 274$ мм.

$D_{\text{тр}}$ - диаметр трубы, см, $D_{\text{тр}} = 274$ мм.

L - диаметр трубы, см, $L = 152$ мм.

Сопротивление азотной ловушки определялось по зависимостям для круглых трубопроводов. Проходные отверстия ловушки выполнены в виде прямоугольных щелей двухъярусных жалюзи. В расчёте взято число кругов, вписанных в щель. Диаметр круга равен наименьшему размеру щели в свету. На число кругов вносилась поправка 1,3, учитывающая заполнение площади щели площадью кругов.

После проведения расчётов было найдено, что $S = 2,7 \cdot 10^3$ л/сек, $F_l = 1460$ л/сек - пропускная способность ловушки, $S_H = 490$ л/сек. Насосов с таким S_H должно быть взято восемь штук. (Нами использовались насосы марки Н5-С).

Сосуд для жидкого азота в ловушке выполнен в виде тора с полезной емкостью 2,3 л. Экспериментально найдено, что данной емкости достаточно для непрерывной работы в течение 8-9 часов.

12. Результаты экспериментальной проверки
высоковакуумного агрегата

Были проведены стендовые измерения характеристик изготовленного высоковакуумного агрегата. Результаты измерений приводятся в табл. 6 и 7.

На рис. 17 изображен высоковакуумный агрегат. Корпус (1) выполнен из нержавеющей стали, диффузоры - из алюминия, корпус ловушки - из латуни и спаян припоем ПСр-45. Сосуд для азота (4) - медный. Шибер (5) - эксцентриковый, дюралюминиевый с проходным отверстием 240 мм. Управление шибером ручное.

Таблица 6

Скорость откачки высоковакуумного агрегата в зависимости от давления P для случая применения уплотняющей резины, промытой спиртом

$P, \text{ммНг}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$
$V_v, \text{л/сек}$	408	415	436	450	305	310

Таблица 7

Зависимость давления в высоковакуумном агрегате от времени откачки. В ловушку залит жидкий азот (в момент времени $t=0$)

час	P ммНг	час	P ммНг	час	P ммНг
0	$2,2 \cdot 10^{-6}$	4,0	$4 \cdot 10^{-7}$	8,0	$3,4 \cdot 10^{-7}$
0,5	$1,2 \cdot 10^{-6}$	4,5	$3,8 \cdot 10^{-7}$	8,5	$3,4 \cdot 10^{-7}$
1,0	$9,2 \cdot 10^{-7}$	5,0	$3,8 \cdot 10^{-7}$	9,0	$3,3 \cdot 10^{-7}$
1,5	$6,9 \cdot 10^{-7}$	5,5	$3,7 \cdot 10^{-7}$	9,5	$3,2 \cdot 10^{-7}$
2,0	$5,5 \cdot 10^{-7}$	6,0	$3,6 \cdot 10^{-7}$	10,0	$3,2 \cdot 10^{-7}$
2,5	$4,6 \cdot 10^{-7}$	6,5	$3,6 \cdot 10^{-7}$	10,5	$3,1 \cdot 10^{-7}$
3,0	$4,4 \cdot 10^{-7}$	7,0	$3,5 \cdot 10^{-7}$	11,0	$3 \cdot 10^{-7}$
3,5	$4,2 \cdot 10^{-7}$	7,5	$3,4 \cdot 10^{-7}$		

Л и т е р а т у р а

1. В.Н.Аносов, А.Т.Василенко, С.Б.Ворожцов, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Н.И.Дьяков, Б.И.Замолотчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, В.А.Кочкин, Д.Л.Нозиков, Л.М.Онищенко, М.М.Семенов, Ю.И.Сусов, П.Т.Шишлянников. Релятивистский кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой. Препринт ОЯИ, Р9-3787, Дубна, 1968.
2. В.И.Федосьев. Сопротивление материалов, "Наука", 1967.
3. Д.В.Вайнберг, Е.Д.Вайнберг. Пластины, диски, болки-стенки. Госстройиздат, Киев, 1959.
4. Уплотнения. Сборник статей, Изд. "Машиностроение", Москва, 1964.

5. Д.В.Спицын. Синхронная передача и следящий привод. Изд. ВИА, Москва, 1949.
6. Н.Я.Басалаева. Газоотделение металлов, применяемых в вакуумной технике. Журнал технической физики, т. XXVIII, вып. 5 (1958).
7. Б.С.Данилин. Конструирование вакуумных систем. Госэнергоиздат, 1959.
8. В.А.Ланис, Л.Е.Левина. Практические основы вакуумных испытаний, Госэнергоиздат, 1955.

Рукопись поступила в издательский отдел

29 мая 1969 года.