



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

И.Ф. Малышев, В.Г. Рогозинский

1396

**ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ У-300**

Дубна 1963

И.Ф. Малышев, В.Г. Rogozинский

1396

2118/1 чр.
ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ У- 300

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1963

А н н о т а ц и я

Приводится описание вакуумного объема, вакуумной системы циклотрона многозарядных ионов У-300 Объединенного института. Предельный вакуум в объеме циклотрона получен $2,5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. при натекании в объем 20 л /сек и при откачке четырьмя высоковакуумными агрегатами со скоростью откачки 6000-8000 л/сек., а в режиме ускорения - $1/5-7/10^{-6}$ мм.рт.ст. Приведены некоторые расчетные данные и экспериментальные результаты по откачке циклотрона в режиме ускорения, дан анализ централизованной системы форвакуумной откачки, а также получена приближенная формула зависимости скорости откачки форвакуумного насоса от рода газа.

В в е д е н и е

При решении задачи получения необходимого вакуума и создания вакуумной системы ускорителя важно учесть особенности, присущие данному типу ускорителя.

Циклотрон многозарядных ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ У-300/ с диаметром полрсов 300 см имеет ряд особенностей, которыми обуславливаются определенные требования к вакууму в камере циклотрона и к вакуумной системе.

Циклотрон У-300 предназначен для ускорения многозарядных ионов $^{1/1} Ar$, Ne , N_2 , O_2 , C , а также других элементов с отношением заряда Z к массовому числу A в пределах

$$\frac{Z}{A} = \frac{1}{7} - \frac{1}{3,5},$$

при этом энергия должна составить от 4-5 Мэв/нуклон до 9-10 Мэв/нуклон.

Напряженность магнитного поля в центре варьируется до 19000 эрстед. Зазор между полюсами магнита, а также расстояние между поверхностями дуантов и плакировкой камеры, равное 100 мм, ограничены также из соображений минимальной мощности питания магнита. Это расстояние обеспечивает электрическую прочность вдоль магнитного поля при ВЧ напряжении на дуантах $2 V_0 = 300-350$ кв при вакууме не хуже $1-2/10^{-5}$ мм.рт.ст.

Такое высокое напряжение на дуантах при мощном потоке газа до $300 \text{ см}^3 \text{ атм/час}^{1/2}$, подаваемом в ионный источник, является важной особенностью циклотрона У-300. Отсюда вытекают определенные требования к конструкции дуантов, источника, камеры и к вакууму в камере, особенно если учесть, что расстояние между вытягивающей линзой дуанта и щелью ионного источника невелико $1/10 \text{ мм}^{1/2}$ и в этом месте имеется повышенное давление за счет истечения нейтрального газа из источника. Постоянное напряжение на отклоняющей пластине тракта вывода пучка должно быть 100-150 кв при относительно малых расстояниях между пластинами, одна из которых находится под потенциалом земли, и между пластиной и крышками дуантов. Это также требует достаточно хорошего вакуума в районе размещения пластины, а также определенной чистоты поверхностей самих пластин и изоляторов.

В связи с этим особое значение придавалось возможности максимального снижения количества масляных паров, проникающих в объем циклотрона из вакуумных

насосов, чтобы избежать образования на металлических поверхностях и изоляторах влияющих на электрическую прочность масляных пленок.

Оседание значительного количества паров масла на плакировках камеры, дуантах, особенно в районе витков связи и закорачивающей пластины, может приводить к возникновению ВЧ-разряда^{/3/} и к большим газовыделениям из-за разложения масла под воздействием электронов и ионов.

При облучении мишеней для исследования ядерных реакций на многозарядных ионах слой углерода, образующийся за счет разложения пленки масла ионным пучком, может влиять на характер рассеяния и поглощения продуктов, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами, что может искажать результаты эксперимента. По-видимому, слой углерода 1 мкгр/см^2 существенно не влияет на изменение параметров продуктов реакций с тяжелыми ионами.

Все вышеизложенные соображения, казалось бы, требуют применения в вакуумных насосах "непростреливаемых" ловушек, охлаждаемых жидким азотом, что, в свою очередь, привело бы к созданию сложной системы дистанционного непрерывного питания ловушек жидким азотом и значительному его расходу - 2000 кг/сутки. По-видимому, одним из многих факторов, влияющих на получение максимально возможной интенсивности ионного пучка на конечном радиусе и после вывода его из камеры, является перезарядка и рассеяние ускоренных частиц на остаточном газе. В условиях циклотрона У-300 /большой поток газа в "центре"/ характер рассеяния и перезарядки будет зависеть от распределения давления в камере по радиусу и от энергии ионов, а также от абсолютной величины давления в камере. В циклотроне У-300 рассеяние и перезарядка ускоренных ионов происходят в основном на нейтральных молекулах того же газа, который используется для получения ионов, а также примесей / O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , пары масла и др./, а пути, проходимые ионами, значительно меньше /1000 м/, чем, например, в синхрофазотроне.

Из процесса ускорения в основном будут выпадать те ионы, которые меняют свой заряд в результате столкновений с атомами остаточного газа. Рассеяние на остаточном газе, по-видимому, будет играть существенную роль только при рассеянии на большие углы, при малых углах за счет фокусировки магнитным полем часть ионов будет возвращаться в пучок.

Количественная оценка эффектов рассеяния и перезарядки многозарядных ионов на остаточном газе в циклотроне является сложной задачей и представляет собой самостоятельную проблему, которая может быть решена в специальной работе. Однако экспериментальное изучение зависимости интенсивности ионного пучка от вакуума в камере будет иметь значение для выяснения возможностей повышения интенсивности ионного пучка в циклотроне.

Представляет некоторый интерес рассмотрение эффекта возможной перезарядки ускоренных ионов в присутствии паров масла с большим молекулярным весом /500/. Так, в работе^{/5/} исследована потеря зарядности при прохождении слоя углерода 5 мкгр/см^2 ионами F^{18} с энергией до 28,5 Мэв, Cl^{35} с энергией до 31,1 Мэв, Br^{79} с энергией до 35 Мэв, при этом оказалось, что с увеличением энергии выход ионов с большей зарядностью увеличивается.

Если произвести оценку эквивалентного слоя углерода, проходимого ионами по длине пути ускорения, при условии: длина пути - 1000 м, площадь сечения пучка - 1 см^2 , упругость паров масла ВМ-1 при температуре $+20^\circ\text{C}$ - 1.10^{-8} мм.рт.ст., то на своем пути ионы пройдут эквивалентный слой масла 3.10^{-2} мкгр/см², что на два порядка меньше, чем в^{/5/}. Это говорит о том, что на процесс перезарядки присутствие паров масла /и тем более при употреблении охлаждаемых ловушек в вакуумных насосах/ не оказывает существенного влияния.

Вышеизложенные соображения дают основание предположить, что создание вакуума в камере в пределах 5.10^{-6} - 1.10^{-5} мм.рт.ст. в процессе ускорения при потоке газа из ионного источника до 5 см^3 атм/мин удовлетворит требованию получения максимально возможной интенсивности ионного пучка и не приведет к созданию весьма громоздкой и сложной вакуумной системы.

Для ускорения частиц с различным Z/A необходимо иметь возможность изменения длины волны ускоряющего напряжения от 50 м до 100 м. Это приведет к увеличению размеров резонансной системы, а следовательно, к значительному увеличению объема вакуумной камеры /70 м³/ и поверхности /800 м²/, определяющих время откачки с атмосферного давления и получения необходимого вакуума.

Использование для ускорения ионов таких весьма дефицитных газов, как Ne^{22} и других, требует создания системы улавливания, очистки и возврата их для многократного использования. Конструктивные решения ряда основных узлов циклотрона играют важную роль для длительной эксплуатации, надежность работы узлов циклотрона должна быть высокой, особенно тех, которые обеспечивают ввод и вывод различной аппаратуры без нарушения вакуума /пробники, источники, триммеры, закорачивающая пластина, витки связи, юстировка дуантов и др./.

В данной работе рассматриваются вопросы определения основных параметров вакуумной системы циклотрона У-300, схема вакуумной откачки и характеристика вакуумной системы, здесь также приведены результаты анализа системы форвакуумной откачки и некоторые практические данные, полученные при эксплуатации циклотрона.

1. Основные параметры вакуумной системы

Связь между эффективной скоростью откачки объема $S_{\text{э}}$ и заданным давлением P_0 в стационарном режиме определяется известным соотношением:

$$S_{\text{э}} P_0 \geq Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{г}},$$

где: $Q_{\text{н}}$ - поток газа из источника ионов в л/сек,
 $Q_{\text{д}}$ - натекание в объем в л/сек,
 $Q_{\text{г}}$ - газоотделение поверхностей объема в л/сек,
 P_0 - давление в μ .
 $S_{\text{э}}$ - скорость откачки в л/сек.

Для циклотрона У-300: $Q_{\text{н}} = 5 \text{ см}^3 \text{ атм/мин} = 60 \text{ л } \mu / \text{сек},$
 $P_0 = 5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5} \text{ мм.рт.ст.}$

Определенную сложность составляет задание величин $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{г}}$, которые требуют учета конструктивных особенностей и знания опытных данных по газоотделению материалов в вакууме, а также некоторого опыта по конструированию и созданию вакуумных систем. Для вакуумного объема циклотрона возможной величиной натекания, исходя из опыта создания вакуумных установок, может быть принята величина $1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ атм./час}$ на 1 литр объема или $2 \cdot 10^{-4} \text{ л } \mu / \text{сек}$ на 1 л. Тогда $Q_{\text{н}} = 2 \cdot 10^{-4} V \text{ л } \mu / \text{сек.},$ где V - величина объема в л.

Ввиду того, что геометрия камеры и резонансной линии, а также конфигурация узлов и деталей, помещенных внутри, отличаются некоторой сложностью, трудно довольно точно рассчитать величину объема. На рис. 1 представлен общий вид вакуумного объема циклотрона, который дает некоторое представление о его сложности и размерах. Величина объема была найдена следующим способом. Натекание в объем определяется формулой:

$$\Delta V = \frac{V(P_2 - P_1)}{t}, \quad /1/$$

где: ΔV - натекание в л $\mu / \text{сек},$
 V - объем камеры в л,
 P_1, P_2 - давление в начале и конце измерения в $\mu,$
 t - время измерения повышения давления в сек.

Если создать натекателем натекание ΔV_1 в объем, которое может быть измерено бюреткой, и одновременно измерять повышение давления в объеме, то получим:

$$\Delta V + \Delta V_1 = \frac{V(P_2' - P_1')}{t'} \quad /2/$$

Вычитая /1/ из /2/, получим:

$$\Delta V_1 = V \left(\frac{P_2' - P_1'}{t'} - \frac{P_2 - P_1}{t} \right) \quad /3/$$

Из /3/ определяется величина объема V . Для циклотрона У-300

$V = 70500 \text{ л.},$ причем измерение давления велось по ионизационному манометру с вымораживанием жидким азотом паров в ловушке манометра. Зная V , определяем натекание в объем: $Q_{\text{н}} = 14,1 \text{ л } \mu / \text{сек.}$

Такая величина натекания для столь больших объемов является вполне допустимой, если учесть, что камера и резонансная линия изготовлены из стали /камера из нержавеющей стали/ и сварены электросваркой. В сварных швах может быть большое число микротрещин из-за повышенного содержания углерода в стали /особенно в обычной стали СТ-3/^{1/4}. Эти микротрещины в швах, а также весьма малые натекания через уплотнения и другие неконтролируемые течи могут создавать значительные суммарные натекания, хотя методом гелиевого теченскателя они могут быть и не обнаружены. Произведем оценку $Q_{\text{г}}$ по результатам работы^{16,7/}, в табл. 1 сведены ориентировочные данные по газоотделению вакуумного объема циклотрона У-300 через 5 часов откачки.

Т а б л и ц а 1

Поверхность	Материал	К-во газов с 1 см ² в см ³ атм/час	Площадь, м ²	К-во десорбирующихся газов, л $\mu / \text{сек.}$
Оболочка объема	сталь	$1 \cdot 10^{-4}$	200	40
Плакировка	медь	$4 \cdot 10^{-5}$	600	48
Сварные швы	сталь	$5 \cdot 10^{-2}$	2	100
Уплотнения	вакуумная резина	$5 \cdot 10^{-2}$	0,4	40

На основании данных таблицы 1 $Q_{\text{г}} = 228 \text{ л } \mu / \text{сек.}$ Однако в процессе непрерывной откачки $Q_{\text{г}}$ значительно уменьшается. Так, например, газоотделение вакуумной резины при хранении ее под форвакуумом в течение 22 ч и откачки в течение 6-ти часов уменьшается в 3 раза. Скорость газоотделения с единицы поверхности выражается зависимостью^{16/}:

$$\lg g = A - Bt,$$

где A и B - коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого материала, t - время в часах.

Отношение потоков за различное время t_1 и t_2 будет равно:

$$\frac{q_1}{q_2} = 10^{B(t_2 - t_1)}$$

Так, для меди, промытой бензином и ацетоном, $t_1 = 5 \text{ ч.}, t_2 = 25 \text{ ч}$ и $B = 0,21,$

$\frac{q_1}{q_2} = 10^4,$ т.е. газоотделение с медной поверхности уменьшается. Для сварных швов² за это же время газоотделение уменьшается в 6 раз. Таким образом, через

25 часов после откачки Q_r станет равным примерно 40 л μ /сек. Общий поток газа составит 114 л μ /сек.

Для данных условий точность оценки невелика, и поэтому можно округленно принять $Q_r = 100$ л μ /сек. Тогда из $S_a = \frac{Q}{P}$ получим значение необходимой скорости откачки: $S_a = 2.10^4$ л./сек при $p_a = 5.10^{-6}$ мм.рт.ст. С учетом пропускной способности патрубков для присоединения вакуумных насосов и входных окон в патрубках, в которых вставлены решетки для ликвидации разрыва плакировки, необходимая скорость откачки должна быть увеличена примерно на 30% и может быть принята равной 3.10^4 л/сек.

Для того, чтобы обеспечить требуемую скорость откачки объема при данном давлении и потоке газа, необходимо подобрать высоковакуумные насосы с подходящими характеристиками, удовлетворяющие также конструктивным требованиям в целом всего циклотрона. Обычно насосы подбираются из номенклатуры насосов, выпускаемых промышленностью, или разрабатываются заново на основании имеющегося опыта по созданию вакуумных насосов. Таким подходящим насосом оказался высоковакуумный агрегат ВВА-20-2а^{/8/} со скоростью откачки 1.10^4 л/сек при давлении $5.10^{-6} - 1.10^{-4}$ мм.рт.ст., с впускным окном 500x850, без ловушки.

Число насосов определяется формулой^{/9/} для случая одинаковой пропускной способности присоединительного патрубка и скорости откачки насоса:

$$n = \frac{Q}{P} \cdot \frac{U + S_H}{U \cdot S_H},$$

где Q - поток газа в л μ /сек, P - заданное давление в μ , S_H - скорость откачки насоса при давлении P , U - пропускная способность патрубка в л/сек.

Если присоединительный патрубок выбрать прямоугольного сечения размером 500 x 850 x 500, то U в случае молекулярного режима определяется формулой^{/10/}:

$$U = 30,9 k \frac{a^2 b^2}{L(a+b)},$$

где: a и b в см. L в см, $k = f(a/b)$. В нашем случае $K = 1,15$. С учетом сопротивления входной диафрагмы $U = 2.5.10^4$ л/сек.

Тогда при условии, что насос выбран с $S_H = 7000$ л/сек /это то, что можно было ожидать для насоса ВВА-20-2а с ловушкой/, получим $n = 3,5$. Принимаем $n = 4$. Однако для того, чтобы иметь резерв по скорости откачки и по количеству насосов, на циклотроне У-300 принята установка 6-ти высоковакуумных насосов. Это также необходимо для более быстрого восстановления вакуума при пробоях и других кратковременных ухудшениях вакуума.

2. Вакуумная камера и вакуумная система

На рис. 1 представлен общий вид вакуумного объема циклотрона У-300, состоящего из баков 1 /резонансной линии/, камеры 2, помещенной между полюсами магнита, кожуха 3, внутри которого размещена опора штоков дуантов, прикрепленная к внутренней стенке баков, измерительной трубы 4 с блоком вакуумметрических датчиков, шлюза 5 для ввода в камеру пробников при работе на внутреннем пучке, монопровода 6 для выведенного пучка и отсекаемого шибером от основного объема. К кожуху 3 через трубопровод с вентилем D_1 , - 80 подсоединен кондиционер K_d - 25, служащий для фильтрации и некоторой осушки напускаемого в объем воздуха при его вскрытии, виток связи 8 для передачи ВЧ-напряжения на дуанты.

Баки без конусной части и кожух изготовлены из обычной стали и представляют собой цельносварную конструкцию, причем сварной шов положен как изнутри, так и снаружи. Камера состоит из двух половин, сваренных из нержавеющей стали, и собирается совместно с нижним и верхним полюсами магнита, одновременно служащими поверхностями вакуумного объема камеры. На камере /и на баках/ имеются смотровые окна, ввод отклоняющей системы, вводы подстроечных триммеров и др. Внутри вакуумный объем плакирован медными листами, к которым припаяны трубки охлаждения. С задней стороны кожуха установлен изолятор, через который проходят трубки охлаждения штоков и дуантов. Уплотнения камера-баки, баки-кожух обеспечивают не только герметичность, но и хороший электрический контакт между плакировками. В таблице 2 дана характеристика основных узлов объема циклотрона.

Т а б л и ц а 2

У з л	Объем, м ³	Поверхность стали, м ²	Поверхность меди, м ²	Длина свар. швов, м	Длина уплотне- ний ва- куумн. резины, м	Длина трубок вод. охлажд., м
Б а к и	50	116	240	260	45	420
Кожух	11	30	60	46	25	-
Камера	7	43	90	56	55	226
Дуанты	0,2	-	50	-	-	280
Ш т о к и	1,5	-	117	-	-	492
Опора	0,5	-	8	-	-	-

Для улучшения условий откачки пространства между стенкой оболочки объема

и плакировкой в горловине камеры в плакировке сделано 4 отверстия $\varnothing = 80$ и 16 отверстий $\varnothing = 100$ в плакировке горловины баков. Это обеспечивает равномерную откачку с атмосферного давления, что предупреждает деформацию плакировки и лучшее обезгаживание поверхностей стенки объема и поверхности плакировки, обращенной к стенке. Делать большое количество маленьких отверстий в плакировке камеры в резонансной линии /как, например, в У-150/, по-видимому, не следует, т.к. происходит загрязнение стенок под плакировкой /очищать которые можно только сняв плакировку/ и особенно при попадании значительного количества воды в результате аварии охлаждающих систем, что может привести к разборке всего циклотрона и длительной его остановке.

На рис. 2 представлена принципиальная схема вакуумной системы откачки циклотрона У-300 и циклотрона У-150. На этой схеме цифрами I-V обозначены высоковакуумные агрегаты ВВа-20-2а. К агрегатам ВВа-20-2а была разработана ловушка для улавливания паров масла. Скорость откачки соответственно равна 6000 л/сек при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст. Агрегат снабжен бустерным насосом Б-300. Предельный вакуум и выпускное давление соответственно равны $5 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст. при охлаждении ловушки жидким азотом и 0,5 мм рт.ст.

Агрегаты укомплектованы шиберами затворами 850x500 и $D_7 - 900^{1/8}$, имеющими дистанционное управление и автоматическое закрытие при ухудшении вакуума в объеме циклотрона. Система форвакуумной откачки представляет собой централизованную систему откачки группы высоковакуумных насосов одним или несколькими форвакуумными насосами ВН-4Г с разобалластным устройством через один из четырех трубопроводов, собранных из труб 102x3, сталь 20, предварительно протравленных и промытых.

Все 8 форвакуумных насосов подключены к двум кольцевым трубопроводам. С помощью вентилей $D_7 - 80$ имеется возможность включить любой насос на любой из четырех трубопроводов, причем возможна параллельная работа любых насосов на любой трубопровод.

Все трубопроводы собраны с помощью соединительной арматуры из дюрала на резиновых уплотнениях. На рис. 3 показан один из основных типов таких соединений.

Употребление таких соединений очень удобно для монтажа, а также совершенно исключает использование сильфонов даже для присоединения непосредственно у входа в насос для устранения вибрации. Надежность таких соединений высока.

В случае аварийной остановки насосов ВН-4 для перекрытия форвакуумного трубопровода от насоса во избежание попадания атмосферного воздуха через насос в работающие вакуумные агрегаты используется стандартный клапан $D_7 - 85$ ПР с трехфазным мотором. Предварительная откачка объема с атмосферного давления до 10^{-2} мм.рт.ст. осуществляется насосом ВН-6 /№ 8/. Представляют интерес некоторые данные расчета форвакуумной системы для откачиваемых газов: воздух, неон, кислород, азот^{х/}. На рис. 4 представлена план-схема вакуумной системы. Задача состоит в том, чтобы, зная поток газа Q , геометрические размеры трубопроводов, скорость откачки насоса ВН-4 на входе в насос, определить давления и скорость откачки S_A и S_B в сечении А - в начале трубопровода, в сечении С и С' - в местах входа трубопроводов форвакуумной откачки высоковакуумных насосов.

В случае стационарного режима откачки при $Q = 200$ л μ /см (поток взят вдвое больше, чем было определено выше) режим течения газа через трубопровод будет молекулярно-вязкостным. Давление в узлах трубопровода, пропускная способность определяется по формулам:

$$p_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 2A(Q + \frac{A}{2} p_2^2 + B p_2)}}{A},$$

$$u = A\bar{p} + B.$$

Значения А и В приведены в^{/11/}. Скорость откачки находилась по известной формуле:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U}.$$

Ввиду того, что скорость откачки насоса зависит от рода газа, т.к. пропускная способность входных каналов в самом насосе зависит от рода откачиваемого газа, найдем соотношение, позволяющее оценить скорость откачки данного газа по известной скорости откачки по воздуху и известным параметрам газа /вязкость/.

Скорость откачки воздуха механического насоса по воздуху определяется соотношением^{/11/}:

$$\frac{1}{S_{\text{возд}}} = \frac{1}{S_{\text{ге}}} + \frac{1}{U_{\text{возд}}}, \quad /4/$$

где $S_{\text{возд}}$ - скорость откачки воздуха на входе в насос, л/сек.,

$S_{\text{ге}}$ - геометрическая скорость откачки насоса, л/сек.,

$U_{\text{возд}}$ - пропускная способность по воздуху входного канала насоса, л/сек.

Скорость откачки по другому газу:

$$\frac{1}{S_{\text{газ}}} = \frac{1}{S_{\text{ге}}} + \frac{1}{U_{\text{газ}}}. \quad /5/$$

^{х/} Вычисления проведены сотрудником КНР Суй Цзу-хуа.

Так как $U = \frac{K}{\eta}$, где: K - коэфф., η - вязкость газа, то, обозначив $\frac{\eta}{K} = a$, проведя преобразование /4/ и /5/, получим:

$$S_{\text{газ}} = \frac{S_{\text{возд}} S_{\text{ге}}}{a S_{\text{ге}} + S_{\text{возд}} (1-a)} \quad /6/$$

Формула /6/ довольно точно будет выполняться только для случая вязкостного режима течения газа в каналах насоса, для молекулярно-вязкостного необходимо учитывать молекулярный член, что представляет некоторую трудность, ибо необходимо учитывать давление, которое трудно определить в каналах насоса. В таблице 3 даны значения $S_{\text{газ}}$ и a для $S_{\text{возд.}} = 20$ л/сек., $S_{\text{ге}} = 60$ л/сек при давлении $2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. для насоса ВН-4.

Т а б л и ц а 3.

Г а з	a	S л/сек
Воздух	1	20
Ne	1,71	13,8
O ₂	1,12	18,8
Ne ₂	0,97	20,5

На рис. 5 совмещены графики зависимости вычисленной скорости откачки воздуха S_A и S_B от числа подключаемых форвакуумных насосов от № 1 до № 4. Из графиков видно, что если S_A значительно изменяется от числа подключаемых насосов, то S_B растет очень медленно.

На рис. 6 дана зависимость скорости откачки для разных газов и различного числа подключаемых насосов от длины трубопровода, а на рис. 7 - зависимость давления от длины трубопровода. Анализ этих кривых указывает на то, что при размещении форвакуумных насосов следует осторожно подходить к вопросу выбора места установки насосов и числа используемых насосов при централизованной системе откачки.

На рис. 8 представлена схема трубопровода предварительной откачки объема циклотрона от атмосферного давления до форвакуума.

Время откачки от давления 760 мм.рт.ст. до давления 1 мм.рт.ст. определяется приближенной формулой:

$$t = \frac{V}{S}$$

где: V - объем в л., S - скорость откачки насоса. Для насоса ВН-6 $S = 145$ л/сек и $t = 1$ час 5 мин.

Для оценки времени откачки от давления 1 мм.рт.ст. до давления $5 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. необходимо определить скорость откачки на входе в трубопровод

P_1 и P_2 , которая в нашем случае оказалась равной 6,35 л/сек для скорости откачки насоса ВН-6, равной 125 л/сек при давлении $5 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. Время откачки определяется по формуле:

$$t = 2,3 \frac{V}{S_{\text{э}}} \lg \frac{P_1}{P_2}$$

Здесь $P_1 = 1$ мм.рт.ст., $P_2 = 5 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст., $S_{\text{э}} = 6,35$ л/сек, и время будет равно $t = 9$ часов. Общее время откачки будет равно 10 часам, что совпадает с практически полученным временем откачки и является довольно большой величиной.

3. Некоторые практические данные, полученные

при эксплуатации циклотрона

На рис. 9 показана кривая откачки объема циклотрона У-300 3-мя высоковакуумными насосами после нахождения объема под атмосферным давлением в течение нескольких недель и промывки всех поверхностей бензином и спиртом. В связи с тем, что с повышением температуры скорость газоотделения растет по закону:

$$q = a e^{bT}$$

нами введен прогрев поверхности плакировок подачей горячей дистиллированной воды при температуре $+70^\circ\text{C}$ в трубки охлаждения. В момент подачи горячей воды резко повысилось давление при откачке на форвакуум. По достижении вакуума $6 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. были включены высоковакуумные насосы, и откачка велась при прогреве до $2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. После тренировки ВЧ-напряжением вакуум в камере был достигнут $5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. Характерная картина изменения давления в объеме циклотрона, записанная самопишущим магнитным вакуумметром ВМБС-1 во время возникновения высоко-частотного разряда ^{/12/}, показана на рис. 10. Здесь необходимо заметить, что в дальнейшем наблюдалось сильное влияние на длительность получения предельного вакуума применения для промывки растворителей /бензин, спирт/. После кратковременных напусков атмосферного воздуха в течение 3-5 часов без разборки всего циклотрона и при производстве работ внутри баков /например, замена контактов закорачивающей пластины и частичной необильной промывки бензином/ вакуум $5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. получался через 20-24 часа откачки с прогревом плакировок в течение 8-ми часов. Самый лучший предельный вакуум без подачи газа в ионный источник был получен $2,5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. после непрерывной откачки в течение нескольких недель при работе 4-х высоковакуумных насосов и охлаждении ловушек при температуре -20°C .

Возможность нормальной работы /в смысле электрической прочности дуэтов и влияния на физические эксперименты/ при температуре ловушек вакуумных насосов $-15 - -20^\circ\text{C}$ была найдена опытным путем. При запуске циклотрона ловушки охлаждались жидким азотом до температуры $-130 - -140^\circ\text{C}$. Затем температура ловушек

была повышена до -50°C охлаждением парами азота, что дало уменьшение расхода жидкого азота в 2 раза. При этой температуре циклотрон работал в течение 2-х недель, после чего температура была повышена до $-15 - -20^{\circ}\text{C}$, при которой также наблюдалась нормальная работа циклотрона. Предельно допустимая температура ловушек -10°C , выше которой в циклотроне появляется характерное свечение при ВЧ-разряде, что вызывает снижение ВЧ-напряжения на дуантах и нестабильность работы циклотрона.

При дальнейшей эксплуатации циклотрона ловушки охлаждались фреоновыми холодильными машинами с производительностью 1100-3000 ккал/час. В настоящее время находится в наладке система охлаждения ловушек раствором Ca Cl_2 в воде, охлаждаемом фреоновыми машинами с производительностью 30000 ккал/час., которая дает возможность более надежной и удобной эксплуатации системы охлаждения ловушек.

При испытании на гелий с помощью течеискателя ПТИ-6 всех уплотнений и сварных швов течей обнаружено не было. Натекание, замеренное за 100 часов, составило 20 л μ /сек.

В режиме ускорения при потоке Ne из источника ионов $4 \text{ см}^3 \text{ атм/мин}$ и натекании в объем 40 л μ /сек, замеренном за 15 мин. по ионизационному манометру, что учитывает и газоотделение, общий поток составлял 90 л μ /сек., а вакуум в объеме при откачке 4-мя насосами был $6 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. по ионизационному манометру, установленному примерно в середине баков, $8 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. - по манометру на шлюзе пробника, $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. - по манометру на измерительной трубе. Такая разница в давлениях объясняется тем, что из центра камеры, где помещается источник, подается газ, а на измерения по манометру на измерительной трубе влияют ее длина и диаметр, а также наличие уплотнений в месте установки манометров.

Давление в форвакуумном трубопроводе в сечении "С" без вымораживания паров в ловушке манометра ЛТ-2 было $3 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст., при откачке 2-мя насосами ВН-4 № 1 и № 2, что близко к расчетным значениям, равным $1,8 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. для воздуха и $2,2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. для неона /без учета паров/. В дальнейшем для форвакуумной откачки использовался один насос ВН-4 № 1 или № 2. Насос ВН-4 № 3 используется для откачки шлюзов, а насос ВН-4 № 4 - для улавливания ценных газов (Ne^{22}).

В результате большой работы по тщательной сборке всех узлов циклотрона, очистке внутренних поверхностей и ликвидации имевшихся течей в вакуумной камере, проведения целого ряда опытов и расчетов по определению основных параметров вакуумной системы удалось устойчиво получить необходимый вакуум $5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. при работе циклотрона обычными паромасляными диффузионными

насосами большой производительности с охлаждением ловушек фреоном при температуре $-15 - -20^{\circ}\text{C}$. Возможность использования фреона /или другого промежуточного хладагента/ для охлаждения ловушек насосов в циклотронах вместо жидкого азота в значительной степени упрощает обслуживание и удешевляет эксплуатацию циклотрона, повышает надежность работы вакуумного оборудования.

Централизованная форвакуумная откачка дала возможность не только эффективно использовать форвакуумные насосы, но и создать систему очистки и возврата весьма ценного газа Ne^{22} , имеющегося количества которого недостаточно для проведения большого числа физических экспериментов.

Опыт работы показал также, что для напуска атмосферного воздуха в объем циклотрона можно применять обычный кондиционер вместо громоздкой и сложной системы сухого воздуха. Вакуум $5 \cdot 10^{-8}$ мм.рт.ст. после напуска воздуха в объем циклотрона на 2-3 часа без его разборки и промывки достигается за 12-14 часов откачки вначале насосом ВН-6, а затем высоковакуумными агрегатами.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность члену-корреспонденту АН СССР Флерову Г.Н. за ценные обсуждения и постановку ряда задач при разработке и создании вакуумной системы У-300, а также Я.Л. Михелису, Ю.Ц. Оганесяну, А.С. Пасюку, за обсуждения и советы по ряду вопросов данной работы.

Л и т е р а т у р а

1. Материалы конференции по ядерным реакциям с многозарядными ионами /март 1958/. Препринт ОИЯИ Р-374, Дубна, 1959, стр. 147.
2. Го Ци-цзянь, А.С. Пасюк и др. Получение многозарядных ионов неона в импульсном источнике для циклотрона. Препринт ОИЯИ № 924, Дубна, 1962.
3. Б.А. Загер, В.Г. Тишин. Резонансный высокочастотный разряд и возможности его подавления. Препринт ОИЯИ 1058, Дубна, 1962.
4. Э. Фишер. Сверхвысокий вакуум. Препринт ОИЯИ 787, Дубна, 1961.
5. E. Almgvist, C. Broude et al. Atom. En. Sav. Limited Progress Report, I.X-31. XII. 1961.
6. Н.Я. Басалаева. ЖЭТФ, VIII, 5 /1958/.
7. В.С. Данилин. Конструирование вакуумных систем. Госэнергоиздат, М-Л, 1958.
8. К.П. Шумский. Вакуумные конденсаторы химического машиностроения. Гостехиздат, М., 1961.
9. Н.А. Тягунов. Основы расчета вакуумных систем. Госэнергоиздат, 1948.
10. А. Гутри и Р. Уокерлинг. Вакуумное оборудование и вакуумная техника. ИЛ, 1951.
11. В.И. Кузнецов. Механические вакуумные насосы. Госэнергоиздат, М-Л., 1959.
12. Б.А. Загер, В.Г. Тишин. Резонансный высокочастотный разряд в циклотроне. Препринт ОИЯИ Р-811, Дубна, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 августа 1963 г.

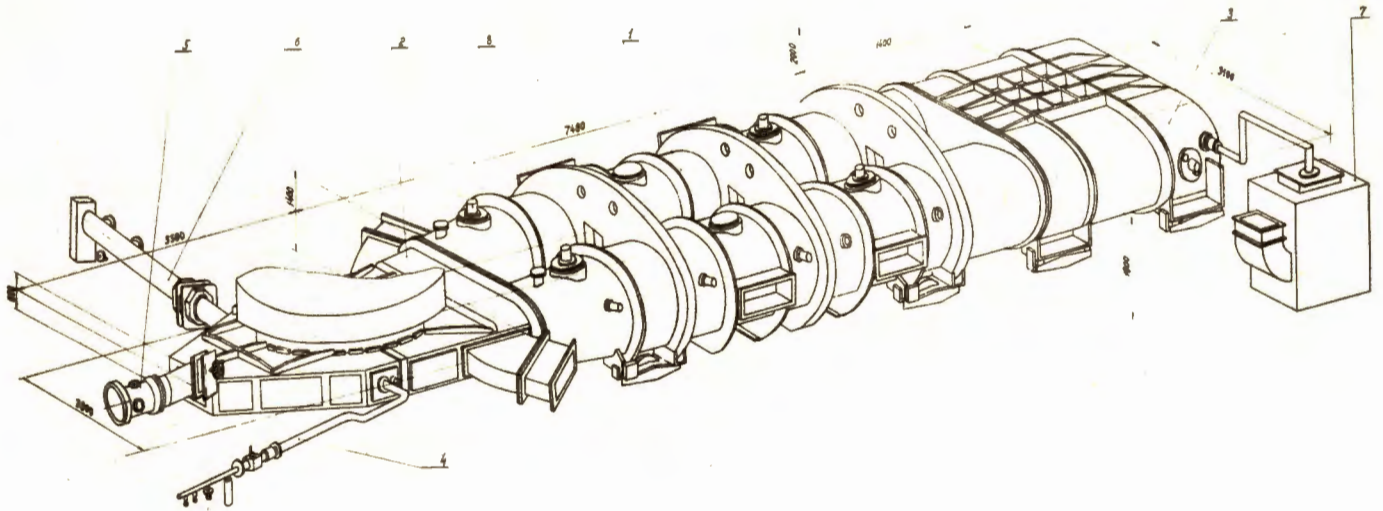


Рис. 1. Общий вид вакуумного объема циклотрона.

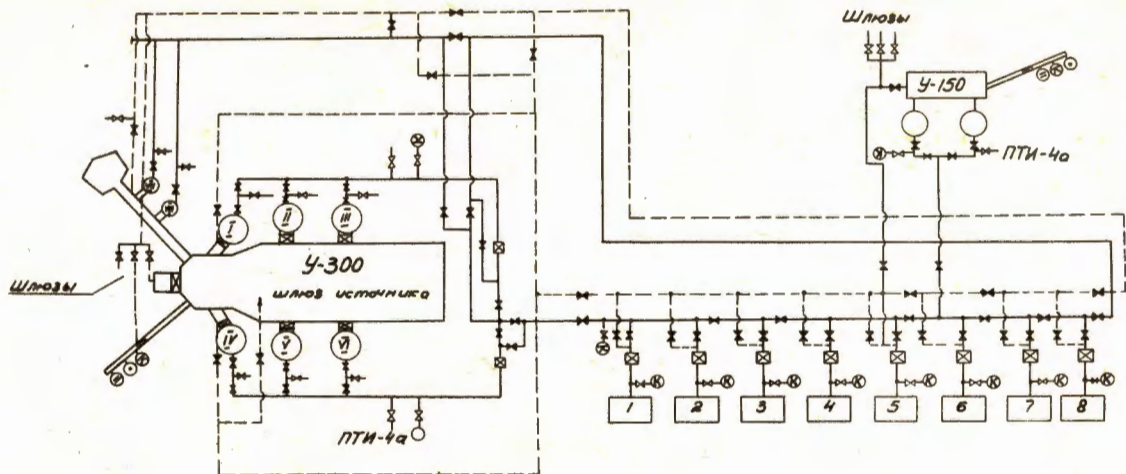


Рис. 2. Принципиальная схема вакуумной системы циклотронов У-300 и У-150:
 — линия форвакуумной откачки высоко-вакуумных агрегатов,
 - - - линия предварительной откачки объема циклотрона с атмосферы;
 ○ - ионизационный манометр ЛМ-2, ⊙ - термометрический манометр ЛТ-2,
 ⊕ - магнитный электроразрядный манометр ММ-5, ▴ - вакуумный вентиль Ду - 80 ручной, ▽ - вакуумный вентиль ручной Ду - 25, ⊠ - вакуумный автоклав, VII, VIII - агрегаты ВА-05-1.

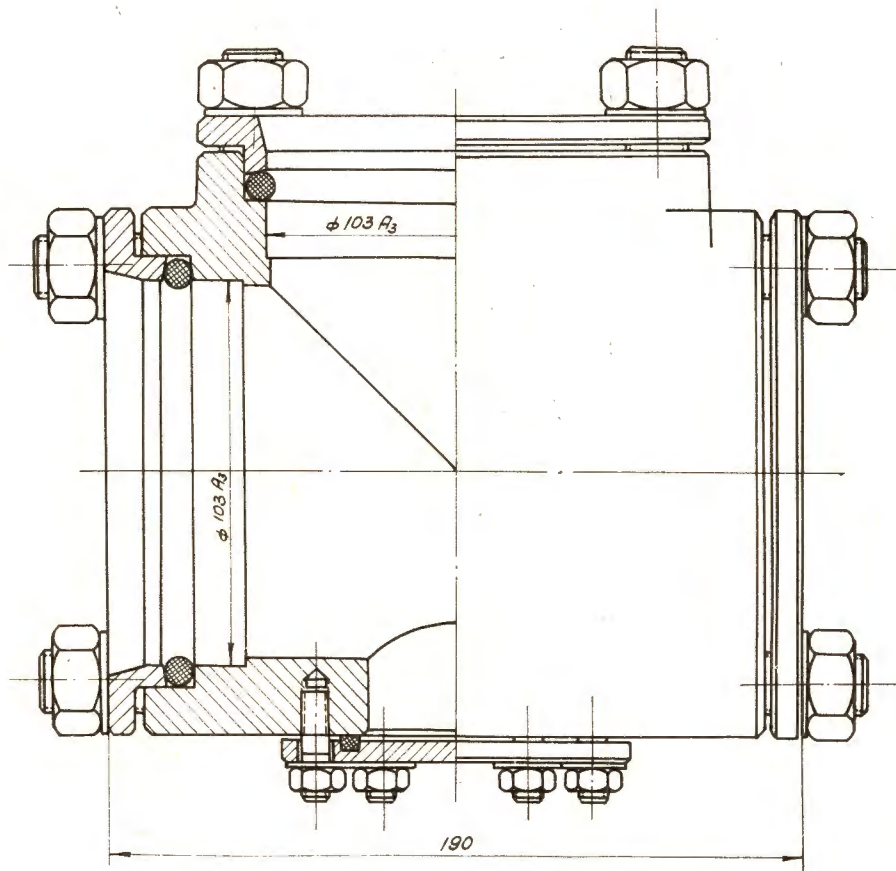


Рис. 3. Тройник для соединения трех вакуумных трубопроводов.

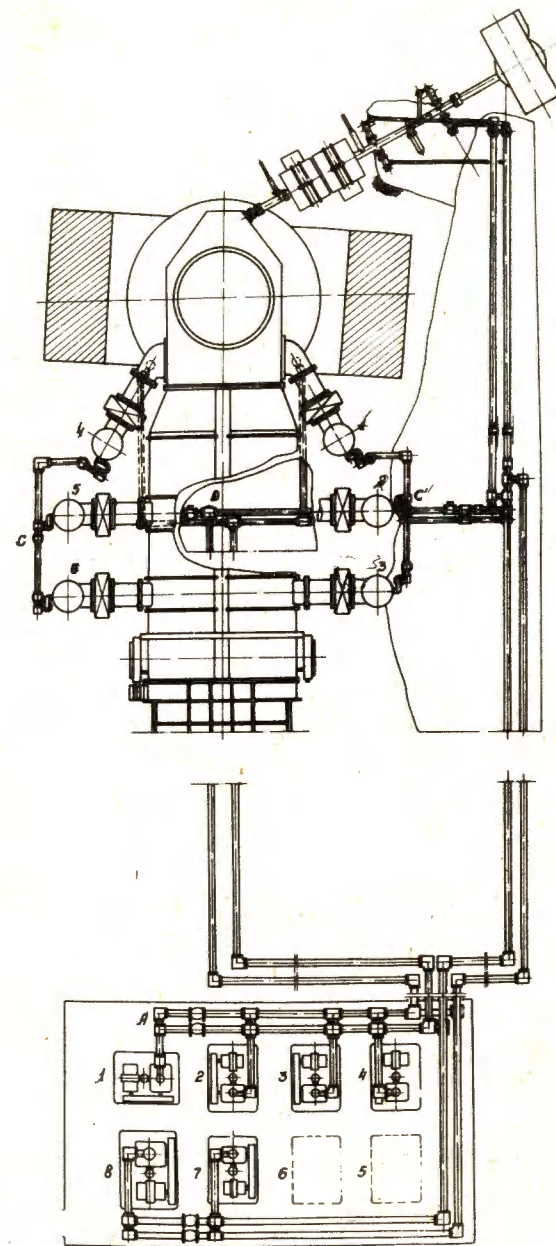


Рис. 4. Плав-схема вакуумной системы циклотрона У-300.

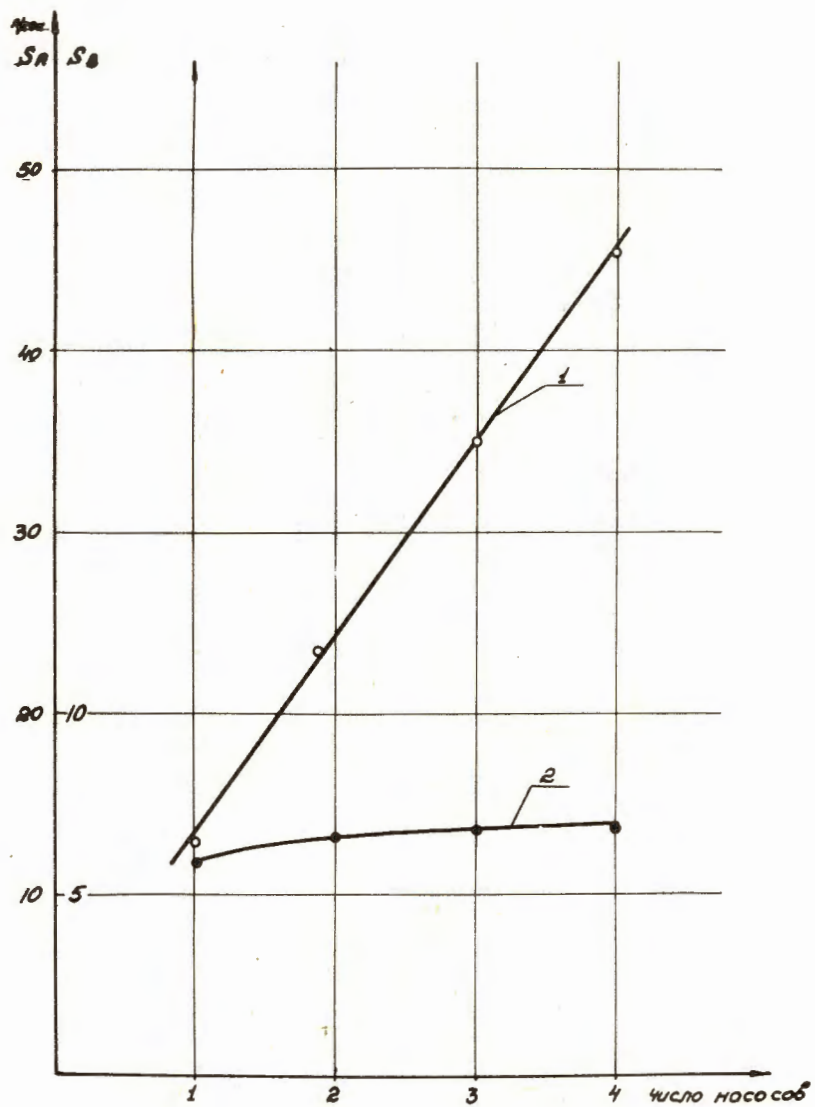


Рис. 5. Зависимость скорости откачки по воздуху от числа подключаемых насосов В Н-4: кривая 1 - S_A , кривая 2 - S_B .

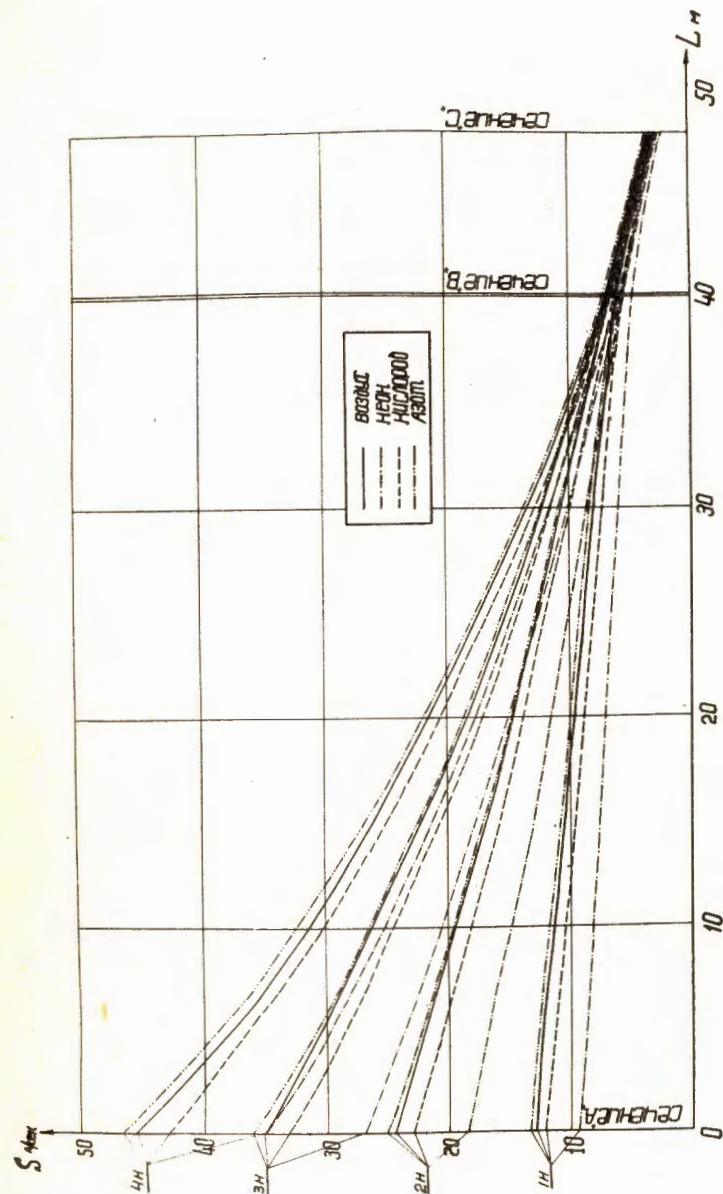


Рис. 6. Зависимость скорости откачки для разных газов и числа насосов от длины трубопровода /слева по оси ординат указаны числа насосов/.

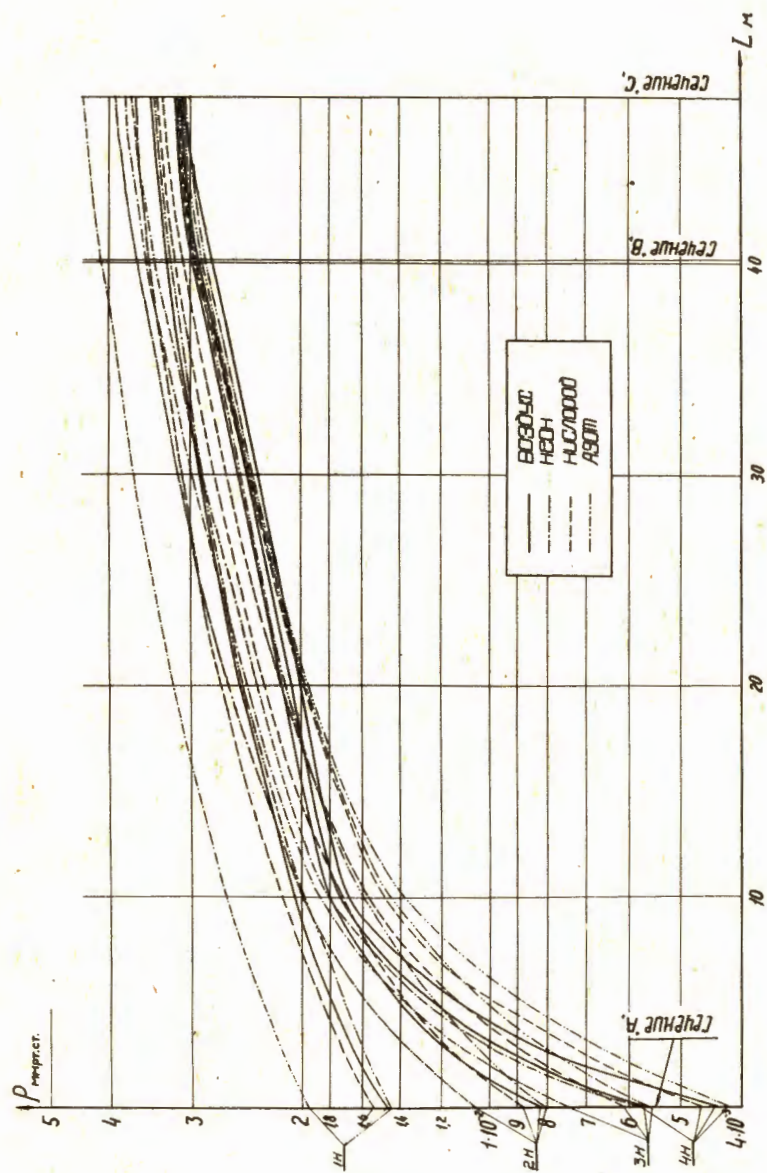


Рис. 7. Зависимость давления для разных газов и числа насосов от длины трубопровода.

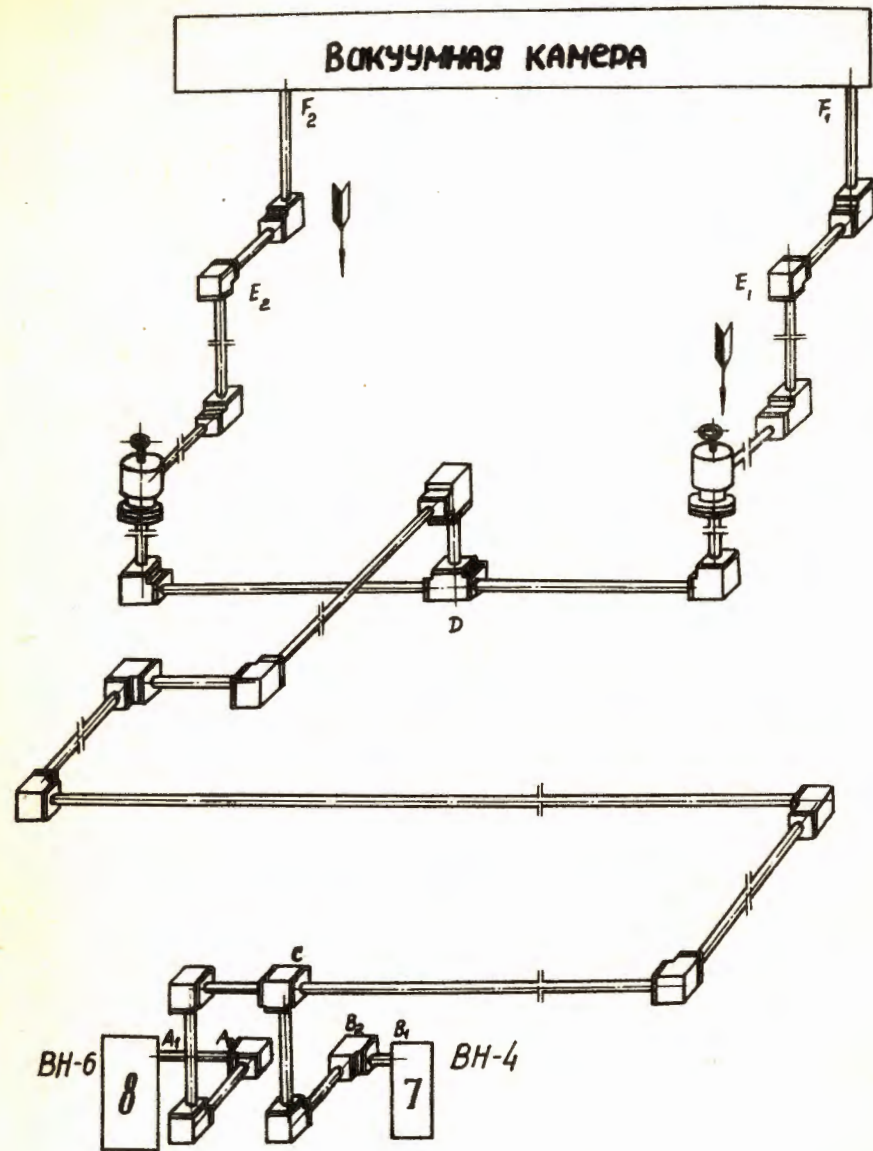


Рис. 8. Схема трубопровода предварительной откачки объема циклотрона, буквами A_1 , A_2 и т.д. обозначены узловые точки, где вычислялись давление и пропускная способность.

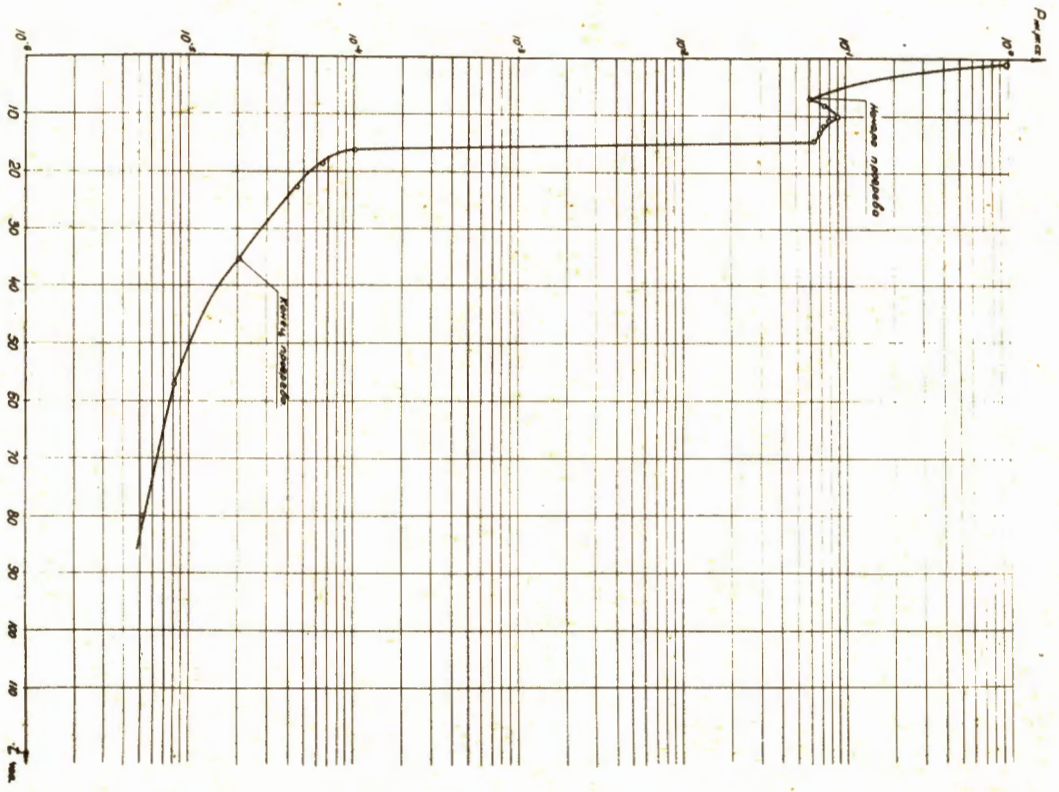


Рис. 8. Зависимость изменения давления в объеме У-300 от времени при откачке насосом ВН-6 и 3-мя высоковакуумными агрегатами.

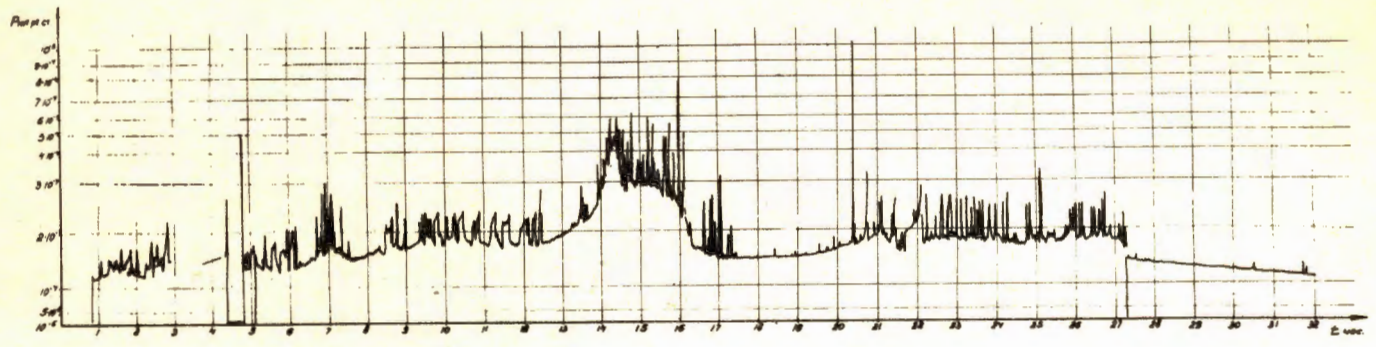


Рис. 10. Изменение давления в объеме в процессе "тренировки" высокочастотным напряжением.