



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

30/III-81

1610/2-81

13-80-843

Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, И.В.Колесов,
К.Д.Туманов

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ У-400

Направлено на Всесоюзный симпозиум
"Состояние и перспективы разработки
и производства новых видов вакуумного
оборудования" /Казань, 1981/

1980

В конце 1978 года в ОИЯИ вступил в строй новый четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400/1-3/. Этот ускоритель обеспечивает получение интенсивных пучков ионов широкого диапазона для проведения научных и прикладных исследований.

Ионы основного диапазона масс /от 20 до 40/ ускоряются до энергии $6 \div 10$ МэВ/нуклон. Необходимые для ряда прикладных исследований энергии $1 \div 4$ МэВ/нуклон можно получить практически для всех ионов с массовым числом от 12 до 240. Что касается легких частиц с массой 20 и менее, то их можно ускорять до энергии 25 МэВ/нуклон. Интенсивность пучков для ионов первой половины основного диапазона масс /от 25 до 65/ составляет $10^{13} \div 10^{14}$ част.с⁻¹, а для второй половины /от 65 до 140/ - не менее 10^{12} част. с⁻¹.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ У-400

Диаметр полюсных наконечников	- 400 см
Конечный радиус ускорения	- 172 см
Зазор в холме	- $4,2 \div 7,2$ см
Зазор в долине	- 30 см
Число секторов	- 4
Угловая протяженность сектора	- 45°
Число пар радиальных корректирующих обмоток	- 10
Число пар азимутальных корректирующих обмоток	- 8
Число дуантов	- 2
Напряжение на дуантах	- $80 \div 100$ кВ
Диапазон частот	- $5,8 \div 12$ МГц
Энергии ускоряемых частиц	- $650 Z^2/A$ МэВ
Отношение массы к заряду ионов A/Z	- $4 \div 20$
Интенсивность пучков ускоренных ионов	- $10^{12} \div 10^{14}$ част.с
Система вывода	- обдирка
Коэффициент вывода	- $30 \div 90\%$
Число выведенных пучков	- $2 \div 3$.

Для увеличения интенсивности на У-400 используются меньшие зарядности ионов, чем на циклотронах У-200 и У-300. В связи с этим длина пути ионов здесь выше в $5 \div 10$ раз /рис.1/, что

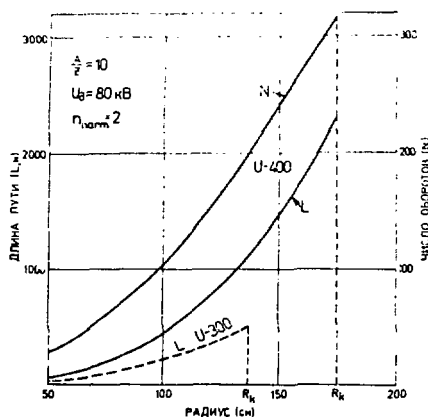


Рис.1. Длина пути и число оборотов ускоренных ионов в камере циклотрона У-400.

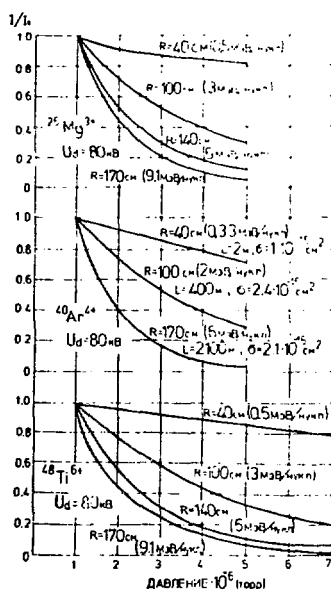


Рис.2. Зависимость потерь ионов от давления в камере У-400.

определило повышенные требования к величине остаточного давления в объеме ускорителя. В предположении одинаковых сечений перезарядки ускоряемых ионов на молекулах остаточного газа давление в камере циклотрона У-400 в режиме ускорения должно быть на уровне 10^{-7} Торр.

Потери ионов из-за перезарядки на молекулах остаточного газа выражаются зависимостью ^{14/}:

$$\frac{\Delta I}{I} = 1 - \exp\left(-2.1 \cdot 10^{27} \int_0^T P \cdot \beta \cdot \sigma(\beta) \cdot dt\right),$$

где P - давление остаточного газа, Торр; $\beta = \frac{V}{c}$ - приведенная скорость ионов; $\sigma(\beta)$ - полное сечение перезарядки $\text{см}^2/\text{атом}$; T - время ускорения, с.

Экспериментальные результаты зависимости потерь ионов от давления в камере У-400 представлены на рис.2.

Интерполяция экспоненциальных зависимостей в область более низких давлений показала, что для снижения потерь ионов до 30% необходимо обеспечить рабочий вакуум в циклотроне около $5 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Основными источниками газового потока в ускоритель являются:

- натекание через неплотности элементов соединений;
- газоотделение с внутренних поверхностей вакуумного объема;
- поступление рабочего газа из ионного источника.

Вакуумный объем У-400 составляет 25 м^3 при площади внутренней поверхности этого объема - 310 м^2 /рис.3/.

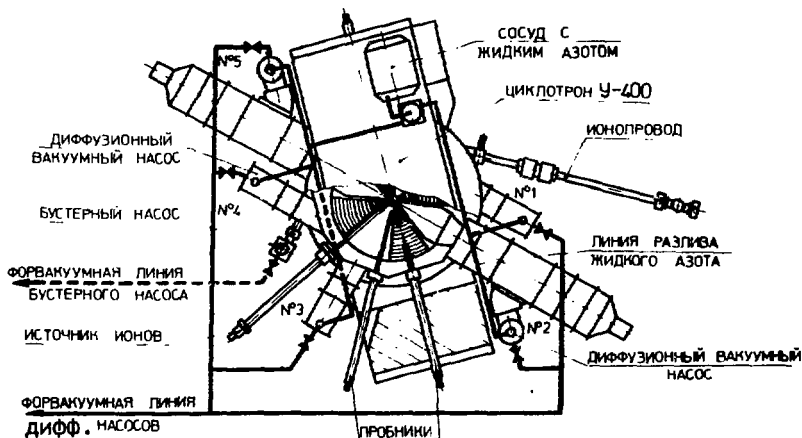


Рис.3. Схема вакуумной системы ускорителя У-400.

ТАБЛИЦА ВАКУУМНЫХ ОБЪЕМОВ И ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИКЛОТРОНА У-400

Объем ускорительной камеры	- 9 м^3
Объем резонансных баков	- $2 \times 8 \text{ м}^3$
Поверхность меди	- 150 м^2
Поверхность стали	- 80 м^2
Поверхность нержавеющей стали	- 30 м^2
Поверхность сплавов из алюминия	- 30 м^2

Стальная поверхность баков и секторов магнитного зазора, а также штоки с дуантами в.ч.-системы покрыты медной плакировкой с системой охлаждения в виде припаянных медных трубок диаметром 14 мм. Обмотки 20 радиальных корректирующих катушек на верхнем и нижнем дисках магнитного зазора закрыты герметичными мембранами из тонкой нержавеющей стали. Объем под мембраной, в котором расположены катушки, откачивается на форвакуум. Для исключения аварийной ситуации в случае быстрой разгерметизации форобъема с катушками, на мембране установлен аварийный клапан, автоматически выравнивающий давление в камере ускорителя с давлением в форобъеме. При этом срабатывает вакуумная

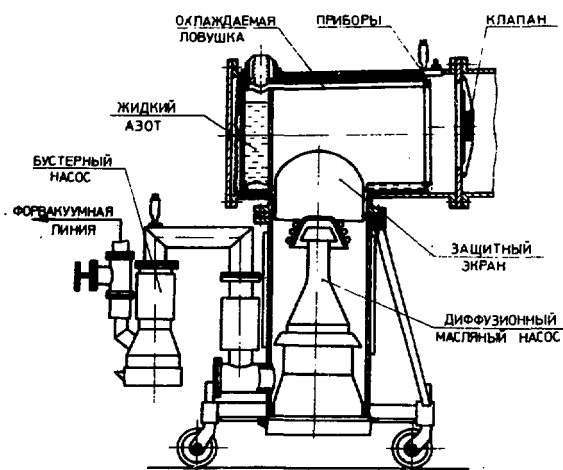


Рис. 4. Высоковакуумный диффузионный насос с азотным экраном.

блокировка системы высоковакуумной откачки ускорителя и закрываются шиберные затворы агрегатов до выяснения причин аварии. Порог срабатывания клапана установлен на давление 5 Торр. Весь комплекс вакуумной откачки ускорителя состоит из трех основных систем: форвакуумного обеспечения, промежуточной /бустерной/ и высоковакуумной откачек.

Система высоковакуумной откачки объема циклотрона состоит из 5 диффузионных вакуумных насосов с суммарной быстротой действия по азоту 21000 л.с^{-1} .

На камере ускорителя смонтировано 3 вакуумных агрегата /рис. 4/, которые состоят из паромасляного насоса, бустерного насоса, охлаждаемой жидким азотом ловушки и шиберного затвора ДУ-500 с временем закрытия 5 с. На корпусе агрегата смонтирован измерительный блок с манометрическими датчиками высокого и сверхвысокого вакуума.

Вакуумные параметры диффузионного насоса оптимизированы за счет частичного изменения конструкции насоса и подбора режима подогрева рабочей жидкости ¹⁵.

Размещение в переходном патрубке агрегата азотной ловушки значительно улучшило его вакуумные характеристики. При стендовых испытаниях получены следующие параметры:

предельный вакуум агрегата	- $8 \cdot 10^{-9}$ Торр,
скорость откачки: по азоту	- 4250 л.с^{-1}
по парам воды	- 20000 л.с^{-1}
расход хладагента	- 2 л.ч^{-1}
емкость ловушки	- 70 л.

Азотная ловушка состоит из емкости в виде тороида с двойным дном, внутренний диаметр которого - 600 мм, межстеночное пространство - 25 мм.

Для уменьшения теплопритока за счет излучения тепла с корпуса насоса внешняя поверхность ловушки изолируется десятью слоями металлизированной лавсановой пленки. Заливочная горловина изготовлена из тонкостенных нержавеющих трубок с медным элементом уплотнения и допускает разборку и демонтаж ловушки из корпуса агрегата. В переходном патрубке размещен антимиграционный защитный экран. На выходе установлен бустерный насос с быстротой действия 450 л.с^{-1} , что значительно снизило требования к обеспечению работы агрегатов предварительным разрежением. На баках резонансной системы циклотрона установлено по одному высоковакуумному агрегату типа ВА-8-4 без азотных ловушек. Форвакуумное обеспечение всего комплекса У-400 осуществляется централизованно из форнасосной, где установлено 14 насосов предварительного разрежения с быстротой действия насосов 18, 55 и 150 л.с^{-1} . Все форнасосы оборудованы автоматическими аварийными клапанами типа ДУ-80, отсекающими форнасос от форлинии с высоковакуумными агрегатами. Принцип действия клапана основан на использовании перепада давлений над тарелкой клапана /в сильфонном переходе всегда атмосфера/ и под тарелкой, т.е. в форлинии. Центробежный бегунок, расположенный в шкиве, при остановке форнасоса воздействует через рычажок и трос на защелку, удерживающую клапан в открытом состоянии. Происходит мгновенное закрытие клапана. Вакуумного объема форкоммуникаций вполне достаточно для обеспечения работы диффузионных агрегатов в течение 30 мин, после чего начинается медленное ухудшение их параметров. Этого времени достаточно для принятия мер по устранению неполадок. Такая система аварийной защиты исключает вероятность прорыва атмосферы со стороны форнасоса в высоковакуумные агрегаты, а следовательно, и выброс рабочей жидкости в откачиваемый объем.

Процесс откачки ускорителя выполняется в 3 этапа. На первом снижение давления от атмосферного до 10^{-1} Торр осуществляется в течение 30 мин. форвакуумным насосом производительностью 150 л.с^{-1} через вакуумный затвор и трубопровод диаметром 120 мм.

На втором этапе откачивание до давления 10^{-4} Торр производится в течение 15 мин. бустерным насосом производительностью 2000 л.с^{-1} . Начиная с давления 10^{-4} Торр и ниже /3-й этап/ в процесс откачивания включаются высоковакуумные агрегаты. Надежная система вакуумной блокировки по высокому вакууму и дублирование ее по форвакууму на выходе диффузионных агрегатов в сочетании с быстродействующими шиберными затворами ДУ-500 исключает аварийный прорыв атмосферы в систему высоковакуумной откачки У-400. Ввод в режим и остановка диффузионного агрегата производятся с закрытыми на агрегате шиберным затвором на входе и клапаном ДУ-50 на выходе. Это исключает мигра-

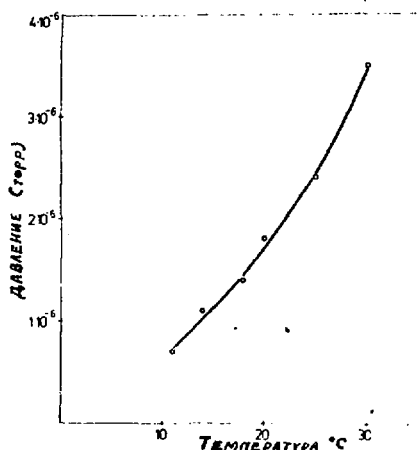


Рис.5. Зависимость давления в камере У-400 от температуры воды, охлаждающей агрегаты ВА-8-7 /без жидкого азота в экранках/.

цию в агрегат паров форвакуумного масла, летучих примесей и т.п. из-за неустойчивого режима работы паровой струи.

В работе/6/ обращается внимание на зависимость остаточного давления диффузионного вакуумного насоса от температуры воды, охлаждающей маслоотражательный колпак и корпус насоса. Эта зависимость для вакуумных агрегатов У-400 представлена

на рис.5. В системе охлаждения вакуумных агрегатов У-400 предусмотрен вторичный контур с использованием холодильной машины, работающей в автоматическом режиме, что обеспечивает подачу охлаждающей воды при температуре $+13 \pm 1^\circ\text{C}$. Специальные биметаллические датчики при повышении температуры корпуса насоса выше $+45^\circ\text{C}$ выдают сигнал на закрытие шиберного затвора агрегата и отключение его нагревателей.

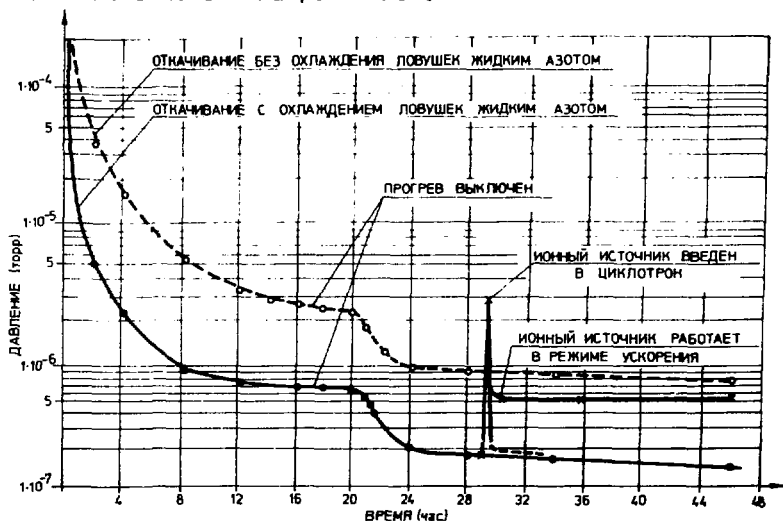


Рис.6. Зависимость давления в камере У-400 от времени откачки.

Все перечисленные технические мероприятия гарантируют получение высоких предельных характеристик диффузионных агрегатов в течение 3-4 лет непрерывной эксплуатации.

Заливка жидкого азота в ловушки вакуумных агрегатов производится 1 раз в сутки из резервуара типа ТРЖК-2У, установленного на магните ускорителя. Устройство раздачи и транспортировки жидкого азота состоит из промежуточного резервуара емкостью 1,5 л, с вмонтированными в него клапанами с электромагнитными приводами, и системы трубопроводов с многослойной вакуумной изоляцией. Заливка азота в охлажденные ловушки производится в течение 20 мин. Зависимость давления от времени откачки камеры циклотрона показана на рис.6, где режим высоковакуумной откачки У-400 с жидким азотом в ловушках представлен нижней кривой. Для ускорителя У-400, имеющего сложную конфигурацию элементов внутренних конструкций и малые зазоры между корпусом и медной плакировкой, процесс обезгаживания поверхности объема в обычном режиме вакуумной откачки затруднен. Для уменьшения времени выхода ускорителя на рабочий вакуум при откачке с атмосферного давления /760 Торр/, предусмотрен прогрев медных плакировок вакуумного объема горячей водой с $T = +75^{\circ}\text{C}$ в течение 16 ± 18 ч. Вакуумные поверхности камеры ускорителя, не имеющие системы охлаждения, облучаются галогенными лампами с ультрафиолетовым спектром излучения. Для этого на боковых фланцах камеры ускорителя установлено 9 ламп с суммарной мощностью 9 кВт. При кратковременных напусках в объем циклотрона атмосферы ускорению процесса обезгаживания служит и система заполнения объема сухим азотом /рис.7/. В герметичном корпусе /1/ расположен нагреватель /4/ мощностью 7 кВт. Из сосуда Дьюара /9/ жидкий азот под небольшим давлением поступает в нагреватель, где переходит в газообразное состояние, и при $T = +40 \pm 50^{\circ}\text{C}$ через клапан на фланце /6/ заполняет вакуумный объем ускорителя. Предохранительный клапан /8/ не допускает повышения в системе напуска давления выше $1,2 \text{ кгс.см}^{-2}$. Процесс заполнения объема У-400 сухим азотом производится в течение 20 мин. Расход жидкого азота при этом составляет около 30 л.

Высоковакуумная откачка У-400 с давления 760 до $5 \cdot 10^{-7}$ Торр проводится в течение 18 ч. Дальнейшая тренировка и обезгаживание вакуумного объема ускорителя и достижение предельного разрежения осуществляются в процессе работы циклотрона. Величина газового потока в У-400 в режиме откачки /без подачи рабочего газа в ионный источник/ составляет в среднем $2 \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ л.Торр.с}^{-1}$ и изменяется от уровня вакуума в камере ускорителя /рис.8/. Кривая 1 характеризует изменение газового потока при откачке ускорителя с жидким азотом в ловушках вакуумных агрегатов. Для

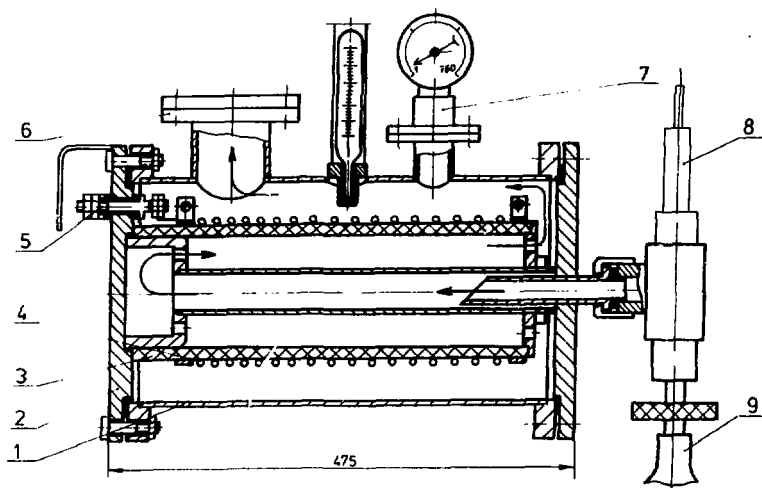


Рис.7. Система напуска сухого азота: 1 - корпус; 2 - крышка корпуса; 3 - труба керамическая; 4 - нагреватель; 5 - электроввод; 6 - фланец клапана напуска; 7 - мановакуумметр; 8 - предохранительный клапан; 9 - сосуд Дьюара.

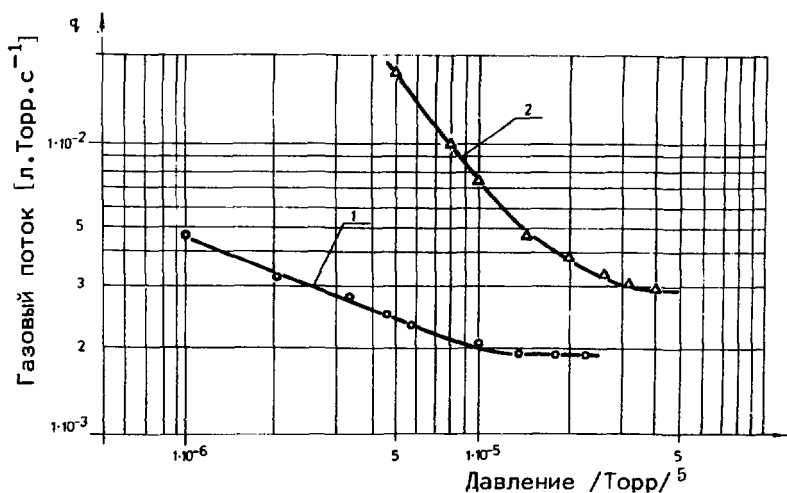


Рис.8. Зависимость величины газового потока в камеру У-400 от вакуума: 1 - откачивание камеры У-400 с азотом в ловушках, 2 - откачивание без азота в ловушках.

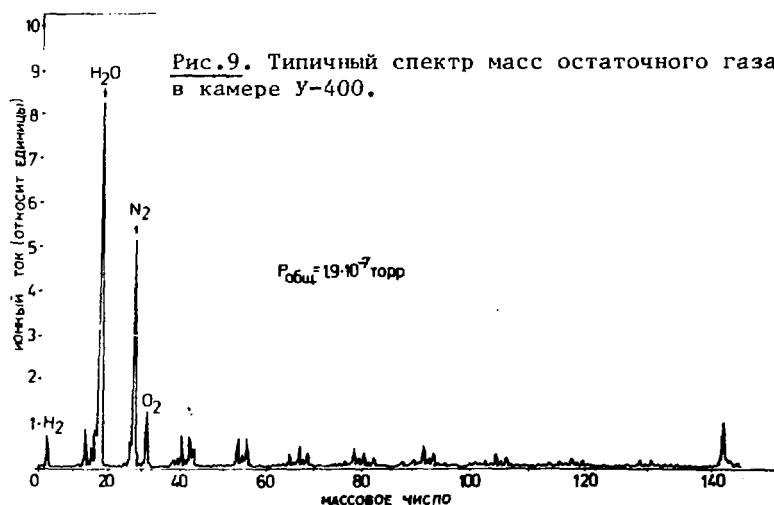


Рис.9. Типичный спектр масс остаточного газа в камере У-400.

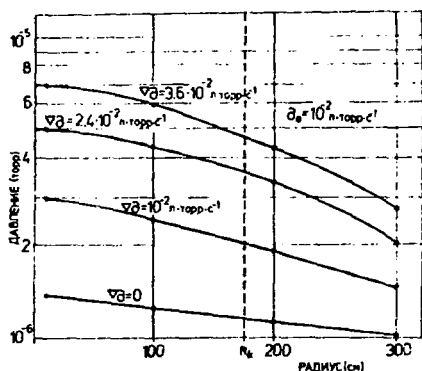


Рис.10. Распределение давления по радиусу камеры У-400.

сравнения: кривая 2 - без азота в ловушках. Газовая нагрузка за счет внешнего натекания составляет в среднем $1 \cdot 10^{-3}$ л.Торр.с⁻¹ и является для ускорителя У-400 величиной постоянной /определена при длительных остановках ускорителя/. Весь остальной прирост величины газового потока приходится на газоотделение с внутренних поверхностей вакуумного объема, т.к. сборка деталей и узлов ускорителя производилась без специальной вакуумной технологии их обработки. Увеличение газового потока при давлениях ниже $5 \cdot 10^{-8}$ Торр объясняется ускорением процесса десорбции составляющих газового потока с упругостью пара выше

значения вакуума в ускорителе в контролируемый момент. Наличие азотных экранов с температурой поверхностей $T = 77 \text{ К}$ значительно ускоряет процесс достижения более низких давлений в камере циклотрона. В стационарном режиме, т.е. без подачи рабочего газа через источник ионов в центр камеры У-400 вакуумная система ускорителя обеспечивает разрежение по всему периметру камеры $1,3 \cdot 10^{-7}$ Торр. При этом распределение давления по радиусу в целевом зазоре между секторами магнитной системы центра камеры /с апертурой от 70 мм в центре до 42 мм на конечном радиусе/ изменяется незначительно /см. рис.10/.

При дополнительной газовой нагрузке из источника ионов в пределах $4 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-2}$ / л.Торр.с⁻¹ давление в камере ускорителя устанавливается на уровне $5 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-6}$ Торр. Это обеспечивает получение пучков ускоренных ионов с большими интенсивностями и малыми его потерями при прохождении до конечного радиуса.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову и профессору Ю.Ц.Оганесяну за постановку задачи и постоянную помощь в работе, а также сотрудникам группы вакуумной техники и опытного производства Лаборатории ядерных реакций за изготовление, монтаж и ввод в эксплуатацию вакуумной системы всего комплекса У-400.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. и др. Четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов ОИЯИ. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.9.
2. Флеров Г.Н. и др. Сооружение ускорителя У-400. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977, том 1, с.58.
3. Оганесян Ю.Ц. Состояние работ по сооружению изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400 в Дубне. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979, том.1, с.42.
4. Веников Н.П. и др. Препринт ИАЗ-3214, М., 1979.
5. Иваненко А.И., Филипсон А.Н. ОИЯИ, 13-6281, Дубна, 1972.
6. Пауэр Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. "Энергия", М., 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 декабря 1980 года.