

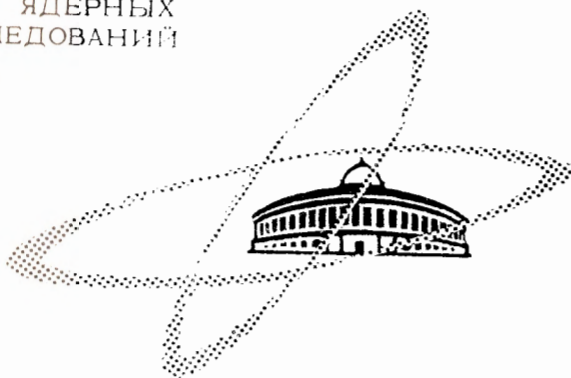
С 345.0
П-183

5/II 65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P - 1853



В.И. Данилов, И.Б. Епчевич, Б.Н. Марченко,
Э.А. Полферов, А.Н. Сафонов, А.В. Шестов

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОКА ВНУТРЕННЕГО ПУЧКА
СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ
ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

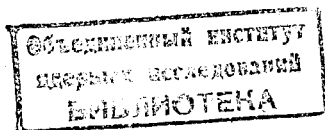
1964

P-1853

В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Б.Н. Марченко,
Э.А. Полферов, А.Н. Сафонов, А.В. Шестов

УВЕЛИЧЕНИЕ ТОКА ВНУТРЕННЕГО ПУЧКА
СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ
ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ

Направлено в журнал "Известия на Физический институт
с АНБ" (Болгария)



29/7/2 48.

Ограничение тока ускоряемых ионов в синхроциклотроне при оптимальных условиях захвата ионов в ускорение и отсутствии в процессе ускорения фазовых потерь в основном обусловлено дефокусирующим действием пространственного заряда сгустка ионов в окружающей ионный источник области диаметром 25–30 см. Наличие большого пространственного заряда объясняется тем, что при сравнительно небольшом ускоряющем напряжении ($U_y \leq 20$ кв) и отсутствии шелевого набора пучок продвигается по радиусу с очень малым шагом, примерно в $1 \text{ мм}^{1/1}$, причем радиус первого оборота не превышает 3 мм, что делает невозможным использование источника ионов закрытого типа.

В центральной области силы кулоновского расталкивания ионов в пучке оказываются значительно больше фокусирующих сил, обусловленных спадом магнитного поля по радиусу. В результате этого вертикальная устойчивость пучка нарушается, и происходят значительные потери частиц, пока пучок не достигнет области, где дефокусирующие силы пространственного заряда, уменьшающиеся вследствие потерь частиц и увеличения объема, занимаемого пучком, окажутся меньше возрастающих с радиусом сил магнитной фокусировки.

Чтобы уменьшить потери частиц и, таким образом, увеличить ток пучка, необходимо увеличить вблизи центра ускорителя силы, фокусирующие пучок в вертикальном направлении. Для увеличения магнитных фокусирующих сил необходимо обеспечить больший спад магнитного поля по радиусу, так как магнитные фокусирующие силы пропорциональны n , где $n = -\frac{r}{B} \cdot \frac{dB}{dr}$ — показатель неоднородности магнитного поля. Имеются данные об увеличении тока пучка 184-дюймового синхроциклотрона в Беркли путем увеличения спада магнитного поля^{2/}. Однако при большой апертуре камеры синхроциклотрона ОИЯИ, равной 60 см, увеличение n на малых радиусах до $r = 10 \div 15$ см затруднено существующей конструкцией ионного источника. Помещение на крышках камеры железных шимм размером $\Delta h = 2,5$ см, $\Delta r = 3,7$ см и $r_{\text{оп}} = 17,4$ см не привело к увеличению тока, так как заметное увеличение n начинается с радиусов, больших $r = 11 \div 12$ см. Кроме того, изменение n приводит к изменению начального фазового режима, так как диапазон частот ускоряющего напряжения, при которых происходит захват частиц в режим ускорения, зависит от спада магнитного поля^{1/}. Таким образом, при увеличении вертикальной фокусировки вблизи центра путем создания большего спада магнитного поля необходимо вновь найти оптимальные условия захвата и в соответствии с ними скорректировать частотную программу синхроциклотрона.

Вертикальную фокусировку пучка на малых радиусах можно также увеличить,

создавая вокруг ионного источника электростатическое поле, вертикальные составляющие напряженности которого были бы направлены к медианной плоскости. Так, например, фокусирующим действием в вертикальном направлении обладает электростатическое поле, образованное отрицательным напряжением, приложенным к дуанту для улучшения работы высокочастотного генератора. Келлером, Фидекаро и Барбье были проведены приблизительные расчеты фокусирующего действия отрицательного напряжения на дуанте для синхроциклотрона ЦЕРНа^{/3/}. В расчетах не учитывалось влияние столба ионного источника на распределение поля, так как в синхроциклотроне ЦЕРНа источник работает только в течение времени захвата ионов. В этом случае фокусирующее действие максимально в центре ускорителя и становится исчезающе малым на $r = 12,5$ см.

Однако зависимость фокусирующего действия отрицательного напряжения на дуанте от радиуса в синхроциклотроне ОИЯИ имеет несколько другой характер, так как на распределение электрического поля дуанта в центральной области существенное влияние оказывает плазменный столб ионного источника, который существует в течение всего времени ускорения^{/4/}. В результате этого фокусирующее действие смещения не достигает максимума в центре машины, а спадает до нуля на границе плазмы дугового разряда. Влияние отрицательного напряжения на дуанте на интенсивность пучка протонов в синхроциклотроне ОИЯИ показано на рис. 1.

Отсутствие в синхроциклотроне ОИЯИ противодуантной рамки создает благоприятные возможности для формирования дополнительного электростатического поля, фокусирующего пучок в вертикальном направлении.

Для создания дополнительного электростатического поля с вертикальной составляющей напряженности в центральной области были использованы два полукруглые электрода, расположенные против дуанта симметрично относительно медианной плоскости. При подаче на них отрицательного напряжения в пространстве между дуантом и электродами вокруг столба ионного источника образуется электростатическое поле, обладающее фокусирующим действием, аналогичным действию отрицательного напряжения на дуанте. Конфигурация дополнительного электростатического поля изучалась при помощи моделирования центральной части ускорительной камеры с дуантом, ионным источником и фокусирующими электродами в электролитической ванне^{/4/}. При этом предполагалось, что плазменный столб ионного источника находится под потенциалом земли.

На рис. 2 показано распределение потенциала в медианной плоскости синхроциклотрона вблизи центра при подаче на дуант отрицательного напряжения 1,7 кв, а на электроды - 12,5 кв. Для нахождения вертикальной составляющей дополнительного электро-

статического поля производились измерения в электролитической ванне зависимостей потенциала от z по координатной сетке для ряда значений радиуса орбиты r и азимута ϕ , отсчитываемого от перпендикуляра, направленного из центра к дуанту^{/4/}. Вертикальные силы рассчитывались по формуле:

$$F_z(r, \phi) = -e \frac{d\psi(z, r, \phi)}{dz},$$

где $\psi(z, r, \phi)$ - зависимости потенциала от расстояния до медианной плоскости для значений r и ϕ , задаваемых координатной сеткой. На рис. 3 изображены графики дополнительных фокусирующих сил, действующих на протоны на расстоянии 4,5 см от медианной плоскости при подаче на электроды отрицательного напряжения в 12,5 кв. Электроды находились при этом на расстоянии 15 см от центра ускорителя. Пики на кривых в районах азимутов $\phi = 70 - 80^\circ$ и $\phi = 280 - 290^\circ$ для радиусов орбит, начиная с $r = 10$ см, объясняются влиянием дуанта на конфигурацию электростатического поля, так как в районе этих азимутов орбиты пересекают кромку дуанта. Провал фокусирующих сил около азимута $\phi = 180^\circ$ для $r = 14$ см обусловлен заходом орбит в дефокусирующую область дополнительного электростатического поля.

Усредненные по азимуту вертикальные силы дополнительного электростатического поля в зависимости от радиуса орбиты представлены на рис. 4. Следует отметить, что влиянием первой гармоники фокусирующих сил, как показали проведенные оценки, можно пренебречь. Для сравнения на рис. 4 приведен график магнитных фокусирующих сил, действующих на протоны на том же расстоянии от медианной плоскости.

Дополнительные фокусирующие силы, превышающие на малых радиусах магнитные силы, уменьшают расходимость пучка в вертикальном направлении под действием сил кулоновского расталкивания. В результате этого увеличивается число частиц, достигающих радиусов, где сумма дополнительных фокусирующих электростатических сил и фокусирующих магнитных сил превышает силы кулоновского расталкивания. На радиусах, больших 15 см, дополнительное электростатическое поле оказывает на пучок дефокусирующее действие, как это видно из рис. 4. Однако на этих радиусах магнитные фокусирующие силы значительно больше электростатических, и вертикальная устойчивость пучка не нарушается.

Схема расположения фокусирующих электродов в камере ускорителя показана на рис. 5, а фотография - на рис. 6. Электроды расположены против дуанта. Они жестко укреплены при помощи стеатитовых изоляторов на плитах, которые связаны с каретками. Каретки могут передвигаться перпендикулярно кромке дуанта по направляющим, прикрепленным к крышкам камеры. Плиты, каретки и направляющие сделаны из дюралюминия. Расстояние между электродами меняется при помощи винтов, соединяющих каретки.

ки с плитами. Подвижные части экранов могут передвигаться в вертикальном направлении и служат для формирования фокусирующего электростатического поля в пространстве между дуантом и фокусирующими электродами. На рис. 5 показано характерное направление двух силовых линий - от дуанта к электродам и от экранов к электродам - при подаче на электроды отрицательного напряжения. Конденсаторы общей емкостью 0,01 мкф на $U_{раб} = 27$ кв заземляют электроды по высокочастотному напряжению. Конструкция крепления конденсаторов между плитами и электродами предусматривает их быструю замену в случае выхода из строя, что существенно с точки зрения минимального облучения обслуживающего персонала. Напряжение подводится к фокусирующим электродам при помощи двух фидеров с изоляцией из кварцевых трубок, проложенных внутри камеры. Вводы в вакуумную камеру осуществляются через стеатитовые изоляторы раздельно для верхнего и нижнего электродов.

Экспериментальные зависимости, снятые при испытании фокусирующего устройства, подтверждают существование ограничивающего действия пространственного заряда на ток внутреннего пучка в синхроциклотроне.

На рис. 7 показана зависимость интенсивности пучка протонов на конечном радиусе от фокусирующего напряжения $U_{ф}$ при разном расходе водорода, поступающего в ионный источник при нулевом напряжении дуги. В синхроциклотроне ОИЯИ используется ионный источник с холодным катодом. При подаче небольшого количества газа большинство образовавшихся ионов захватывается в процесс ускорения. Так как величина пространственного заряда невелика и его расталкивающее действие мало, относительное увеличение тока пучка в результате действия фокусирующего поля электродов незначительно. Резкое уменьшение интенсивности пучка для случая расхода газа $3 \text{ см}^3/\text{мин}$ с увеличением $U_{ф}$ объясняется нарушением работы ионного источника при нулевом напряжении дуги. С увеличением количества поступающего в ионный источник водорода возрастает общее число ионов, а следовательно, число протонов, захватываемых в процесс ускорения, и плотность заряда в пучке. Добавка к току пучка при подаче на электроды отрицательного напряжения увеличивается, так как возросшая плотность пучка приводит к увеличению дефокусирующего действия пространственного заряда. Вместе с тем в этом случае для компенсации дефокусирующих сил требуется более высокое напряжение на фокусирующих электродах. Этот процесс продолжается, пока из-за возросшей плотности газа в центральной области ускорителя потери, вызванные рассеянием на газе, не приведут к снижению тока пучка. Максимальное увеличение тока под действием фокусировки при разном расходе газа показано в процентах на кривых рис. 7.

На рис. 8 приведены аналогичные зависимости, где в качестве дополнительного параметра выбрано напряжение дуги ионного источника. Зависимость интенсивности от напряжения дуги очень слабая.

Зависимость интенсивности пучка на конечном радиусе от фокусирующего напряжения $U_{ф}$ для разных значений ускоряющего напряжения на дуанте показана на рис. 9. Видно, что при малых амплитудах ускоряющего напряжения фокусирующее действие вспомогательных электродов невелико, так как и в этом случае из-за небольшого числа захваченных в режим ускорения протонов плотность зарядов в пучке мала и она практически не приводит к потерям пучка из-за сил кулоновского расталкивания. С увеличением ускоряющего напряжения плотность зарядов в пучке возрастает, и потери тока пучка из-за сил кулоновского расталкивания могут быть скомпенсированы электростатической фокусировкой. Относительное увеличение интенсивности при действии электростатической фокусировки указано на соответствующих кривых. С повышением ускоряющего напряжения относительное увеличение интенсивности возрастает, а максимум сдвигается в сторону больших значений фокусирующего напряжения.

На рис. 10 показана зависимость тока пучка от фокусирующего напряжения $U_{ф}$ на электродах при разных значениях отрицательного напряжения на дуанте $U_{д}$. Видно, что с увеличением $U_{д}$ оптимум смещается незначительно в сторону больших значений $U_{ф}$. При этом относительное возрастание интенсивности больше при меньшем значении $U_{д}$. При нулевом фокусирующем напряжении электростатическая фокусировка создается только отрицательным напряжением на дуанте.

Вследствие изменения направления вертикальных электростатических сил при подаче на электроды напряжения обратной полярности (+) ток пучка снижается. На рис. 11 приведена зависимость тока протонов на радиусе 60 см от величины и знака напряжения, подаваемого на фокусирующие электроды. Следует отметить, что при положительной полярности достигается устойчивость работы ускорителя в режиме пониженной интенсивности, который требуется в некоторых экспериментах. До использования этого способа снижение интенсивности осуществлялось уменьшением ускоряющего напряжения и расхода газа, при этом значительное (более чем в 100 раз) уменьшение тока пучка ограничивалось неустойчивой работой ионного источника.

На рис. 12 показана зависимость интенсивности пучка протонов от фокусирующего напряжения для нескольких расстояний между кромками дуанта и фокусирующих электродов. Возрастание тока пучка с увеличением зазора между дуантом и электродами связано с расширением фокусирующей области (см. рис. 5). Закономерен и рост напряжения, при котором ток пучка максимален - требуемая для фокусировки величина вертикальной компоненты напряженности электростатического поля должна оставаться неизменной. При увеличении зазора это достигается увеличением напряжения. Наличие оптимума фокусирующего действия от величины напряжения $U_{ф}$ связано с действием на пучок заряженных частиц горизонтальной составляющей электростатического поля,

которая вызывает дрейф орбит. Это приводит к потерям вначале ускорения частиц, совершающих большие радиально-фазовые колебания. Известно, что частоты, при которых происходит захват этих частиц, находятся вблизи верхней границы диапазона частот захвата $1/\omega$. Измерение времени захвата в зависимости от U_{ϕ} , произведенное путем постепенного обрывания частотной программы со стороны верхних частот действительно показало, что с увеличением U_{ϕ} верхняя граница диапазона частот захвата смещается в сторону более низких частот (см. рис. 13). Нижняя граница также несколько смещается в сторону нижних частот, так как частицы, потерявшие ранее из-за слишком быстрого набора энергии (т.е. слишком большой фазовой скорости) в результате дрейфа и прецессии приобретают меньшие фазовые скорости и не выпадают из процесса ускорения. Наблюдающееся уменьшение времени захвата с ростом U_{ϕ} (см. рис. 14) происходит в основном в результате потерь частиц, совершающих большие радиально-фазовые колебания. Возрастание тока из-за увеличения вертикальной фокусировки с ростом U_{ϕ} вначале превалирует над потерями частиц, захватываемых вблизи верхней границы области устойчивости, и интенсивность пучка растет. При дальнейшем увеличении U_{ϕ} возрастающие потери частиц с большой амплитудой радиально-фазовых колебаний вызывают уменьшение тока пучка.

Влияние фокусирующего напряжения на временную структуру пучка частиц показано на рис. 15. Из рис. 15 видно, что длительность импульса пучка на конечном радиусе возрастает примерно на 20%.

Изменение кривизны силовых линий, замыкающихся на экраны, объясняет зависимость фокусирующего действия устройства от зазора между электродами и экранами. Влияние на ток пучка зазора между экранами и кромками фокусирующих электродов показано на рис. 16.

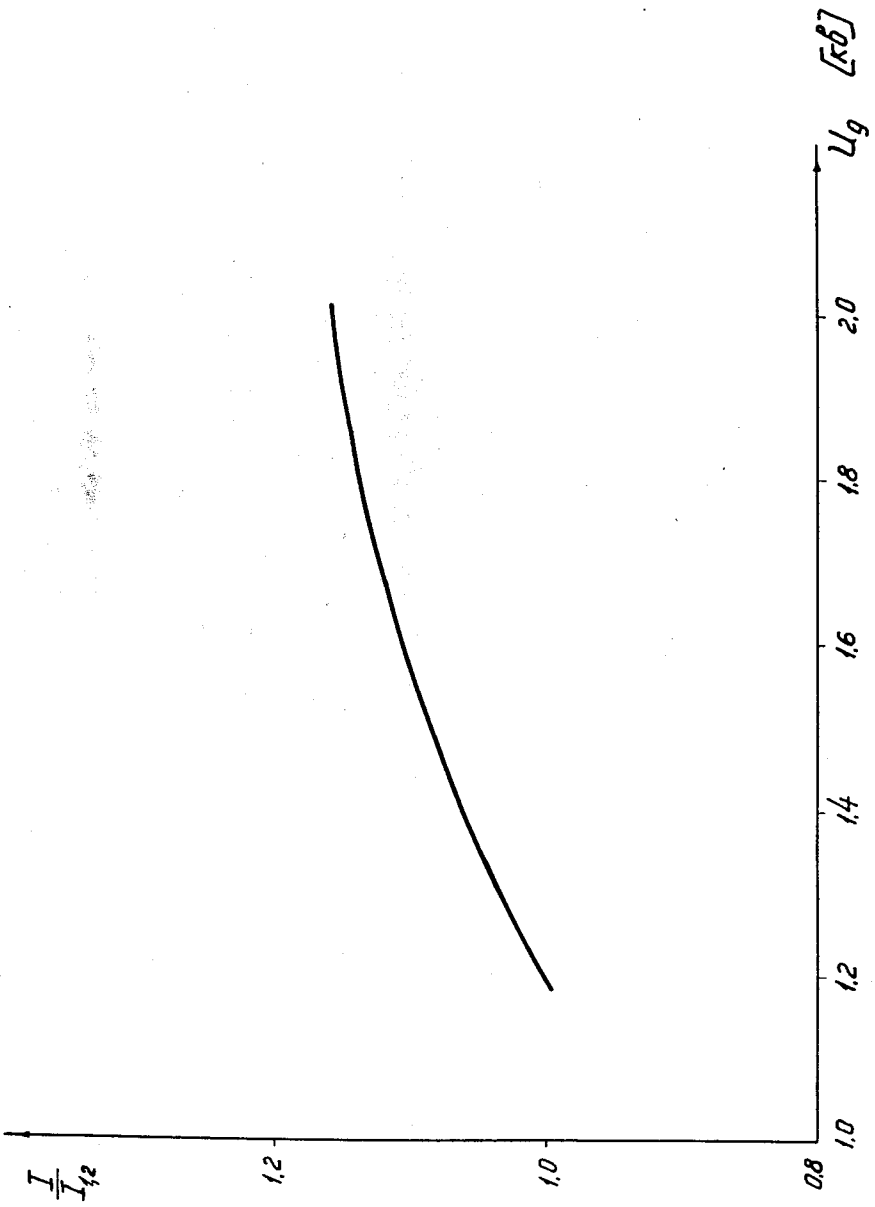
На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований апертура фокусирующих электродов была выбрана равной апертуре дуанта. Учитывая необходимость стабильной работы устройства в условиях длительной эксплуатации, зазоры между экранами и электродами установлены 30 мм, а расстояние от дуанта до электродов - 170 мм. Максимальное значение тока в этих условиях достигается при $U_{\phi} = 13$ кв.

Таким образом, в результате увеличения фокусирующих сил в центральной области ускорителя ток пучка на конечном радиусе возрос с 1,1-1,2 мка до 2,1-2,3 мка.

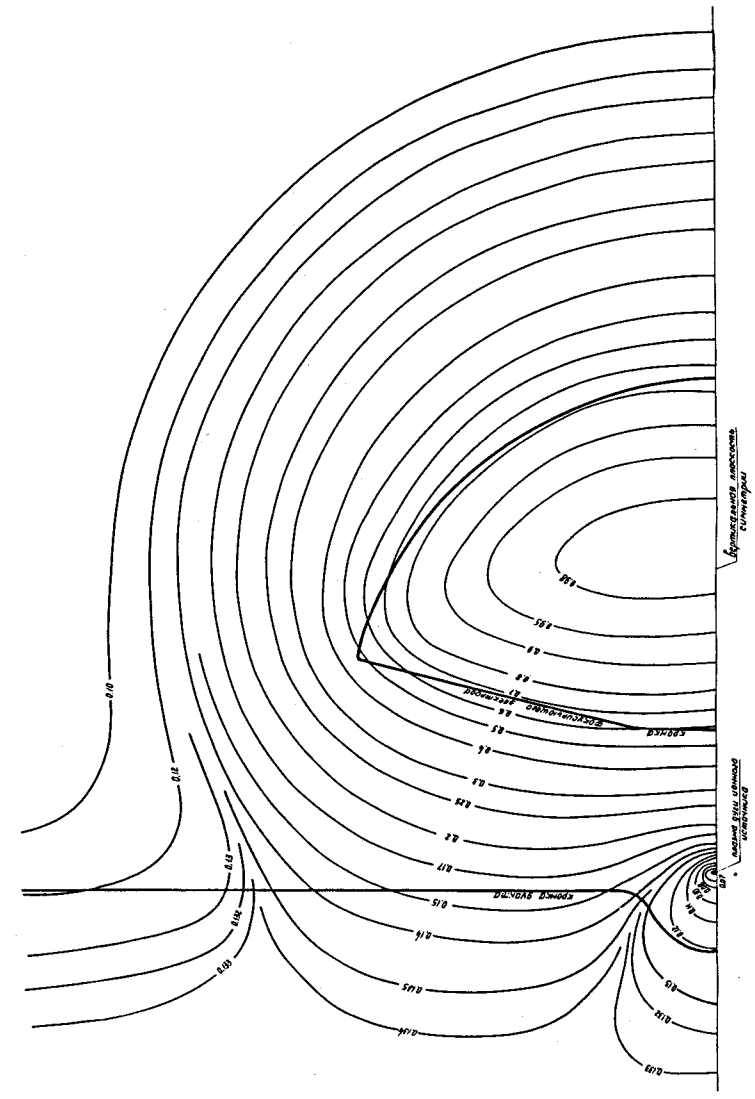
В заключение авторы выражают благодарность старшим техникам В.И. Иванову и Ю.В. Максимова за изготовление выпрямителя на 30 кв, конструктору И.Х. Ноздрину и начальнику механических мастерских Лаборатории ядерных проблем К.А. Байчеру за большие усилия по разработке и изготовлению конструкции фокусирующего устройства, а также главному инженеру Лаборатории Г.И. Селиванову за большую поддержку при ее внедрении.

1. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Д.Л. Новиков, Э.А. Полферов, А.Н. Сафонов, Б.В. Феофанов. Расчет начальной области устойчивых фазовых колебаний в синхротроне. Препринт ОИЯИ, Р-1448, Дубна, 1963.
2. L.R.Henrich, D.C.Sewe 11, J.Vale. Rev. Sci. Inst., 20, 887-898 (1949).
3. R.Keller, M.Fidecaro et M.Barbier. Calcul d'orbites dans un synchro-cyclotron d'après les données techniques en considérant la charge d'espace - l'analogie avec l'oscillateur anharmonique. CERN 57-45, 1957.
4. А.Н. Сафонов, А.В. Шестов. Исследование электрического поля в центральной области синхротрона ОИЯИ при помощи электролитической ванны. Б1-1543, ОИЯИ, Дубна, 1963.

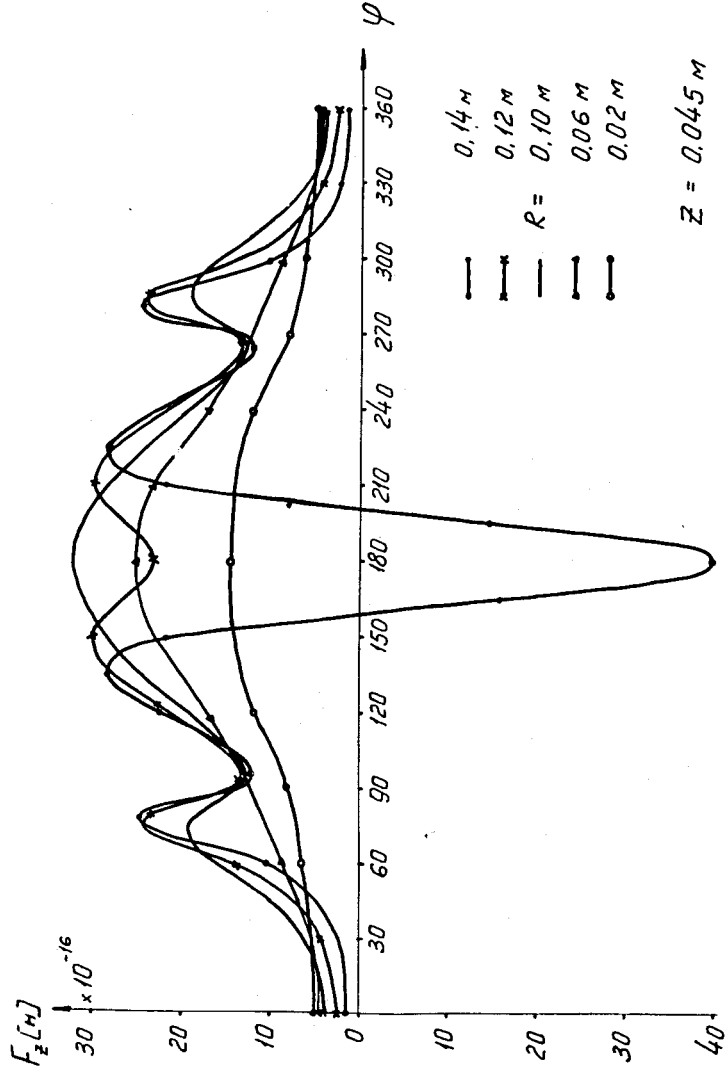
Рукопись поступила в издательский отдел
21 октября 1964 г.



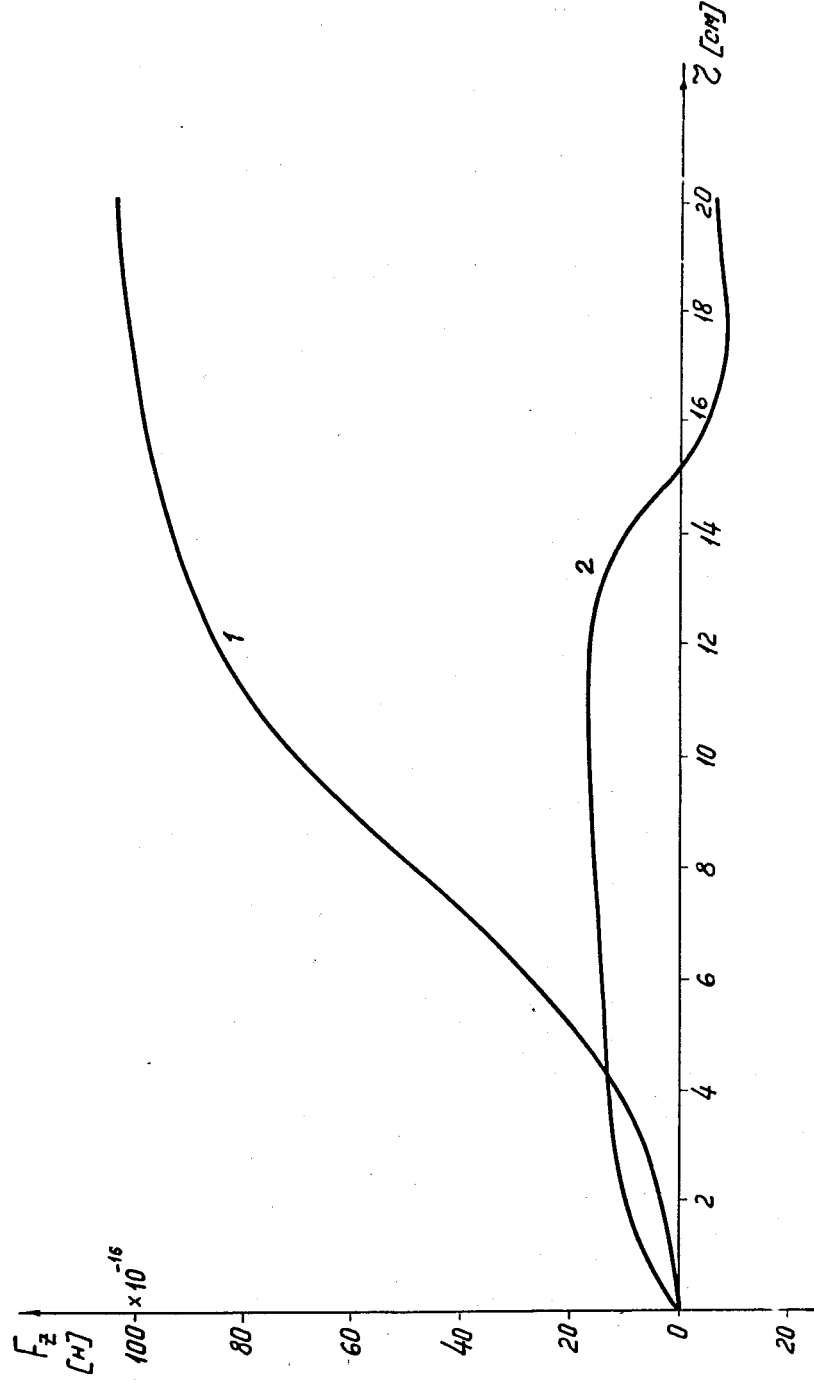
Р и с. 1. Зависимость интенсивности пучка протонов от величины отрицательного напряжения, приложенного к дуанту.



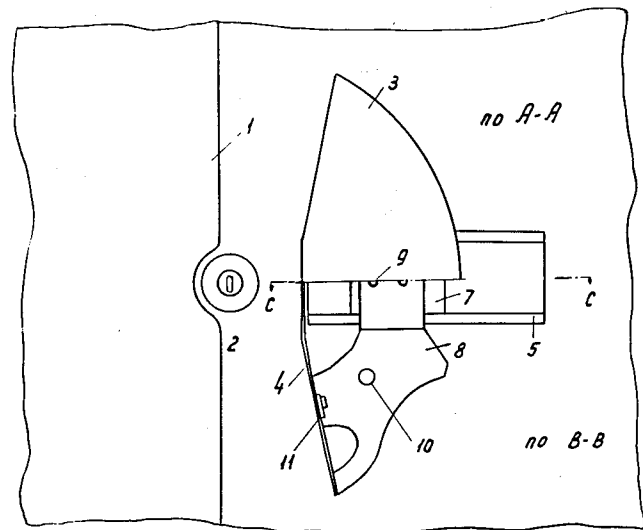
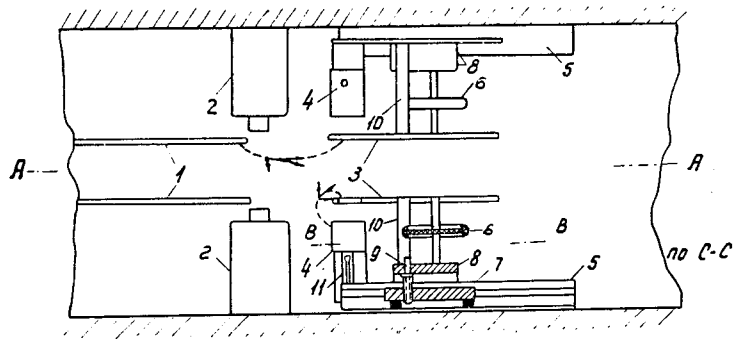
Р и с. 2. Распределение потенциала в medianной плоскости синхротрона при $U_{\phi} = 12,5$ кв и $U_D = 1,7$ кв, значение эквипотенциалей указано в долях U_{ϕ} .



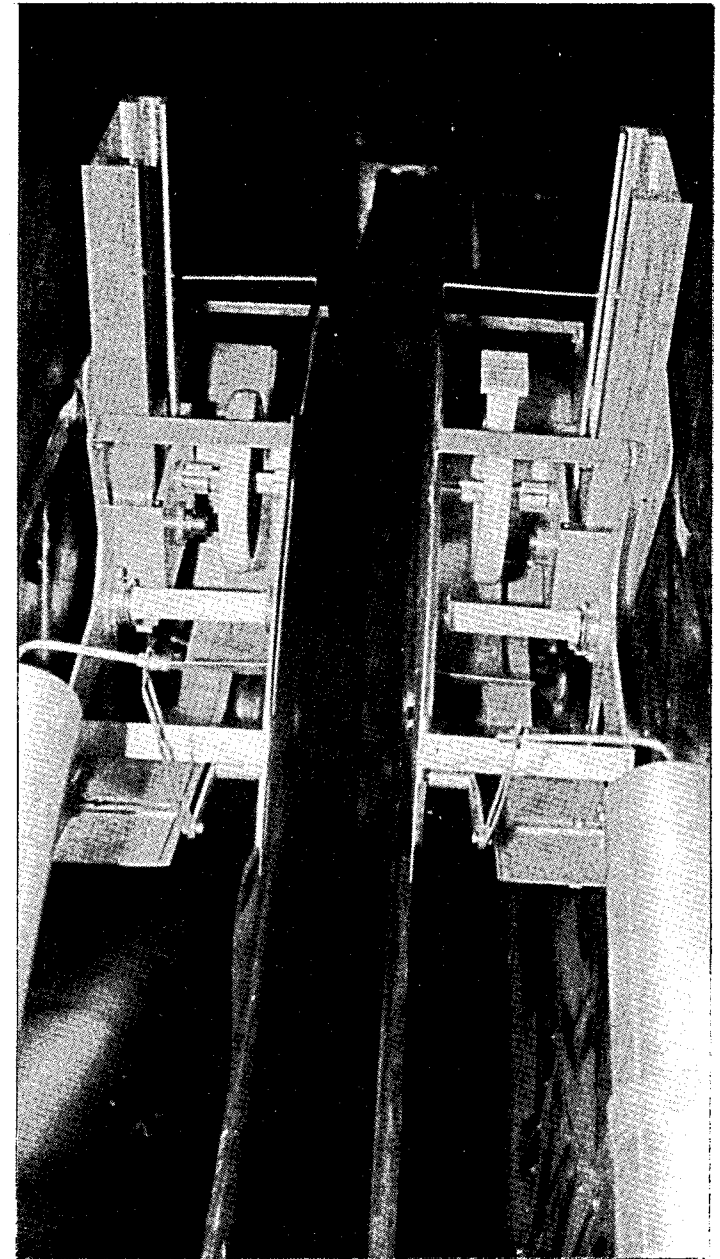
Р и с. 3. Зависимость дополнительных вертикальных сил от азимута для $U_\phi = 12,5$ кв и расстояния $z = 0,045$ м до медианной плоскости.



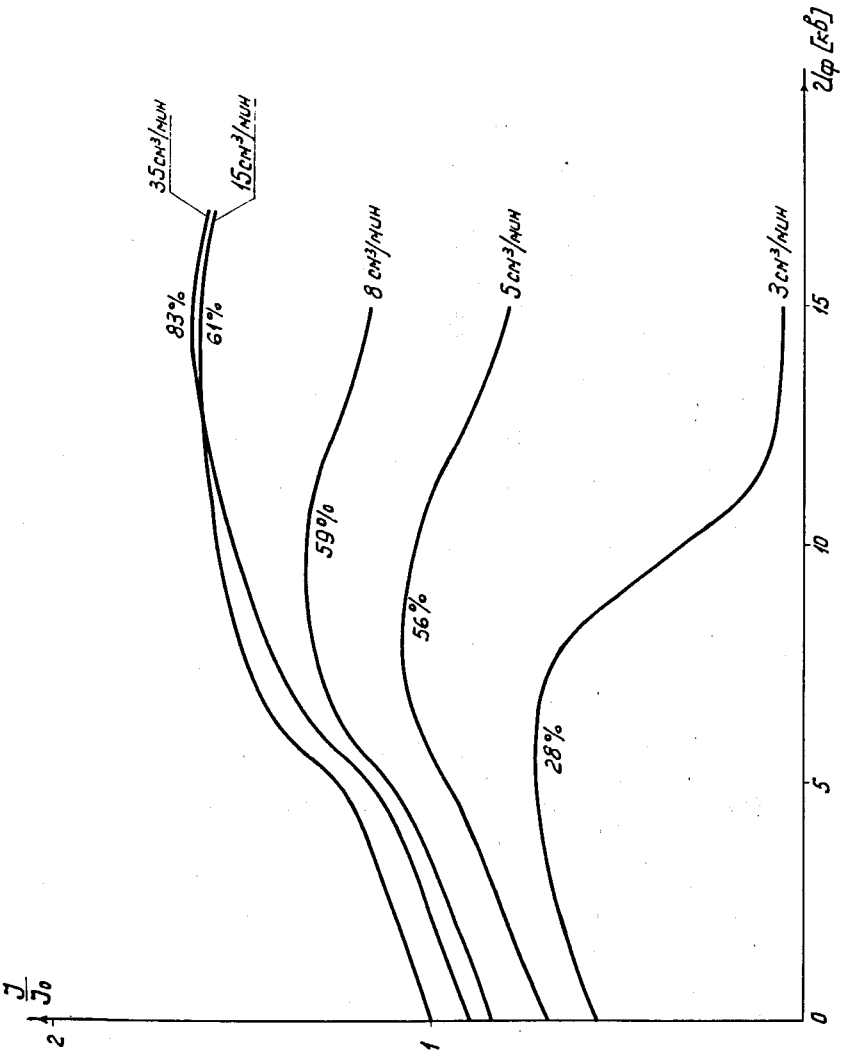
Р и с. 4. Зависимость фокусирующих сил от радиуса на расстоянии 4,5 см от медианной плоскости: 1 - магнитные силы, 2 - дополнительные электростатические силы при $U_\phi = 12,5$ кв.



Р и с. 5. . Схема расположения фокусирующих электродов в камере ускорителя.

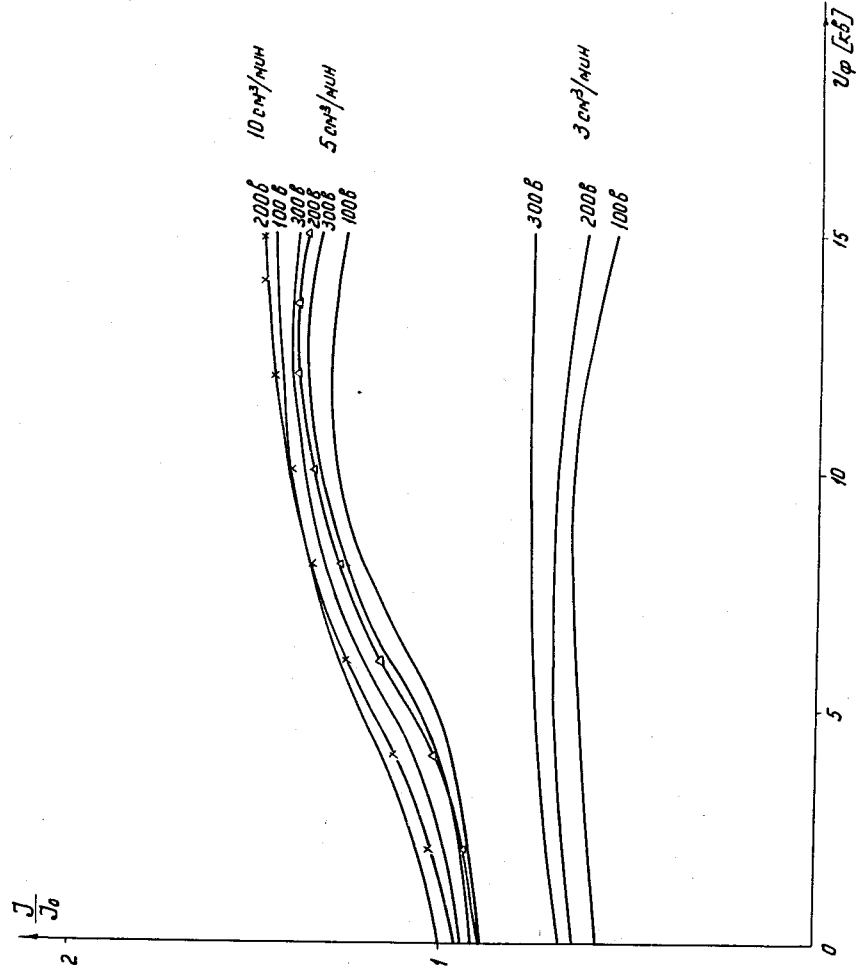


Р и с. 6.



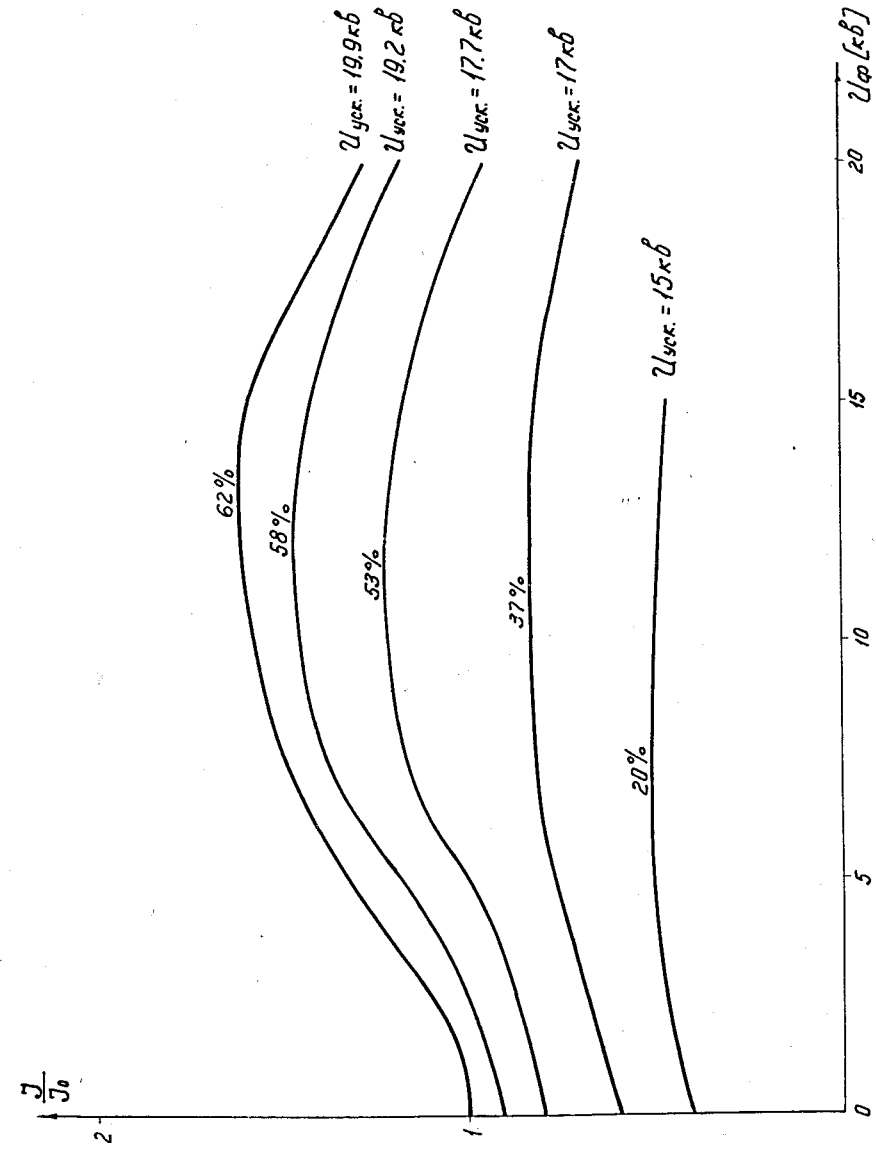
16

Р и с. 7. Зависимость интенсивности пучка протонов от величины фокусирующего напряжения при разном расходе газа (для нулевого напряжения дуги).

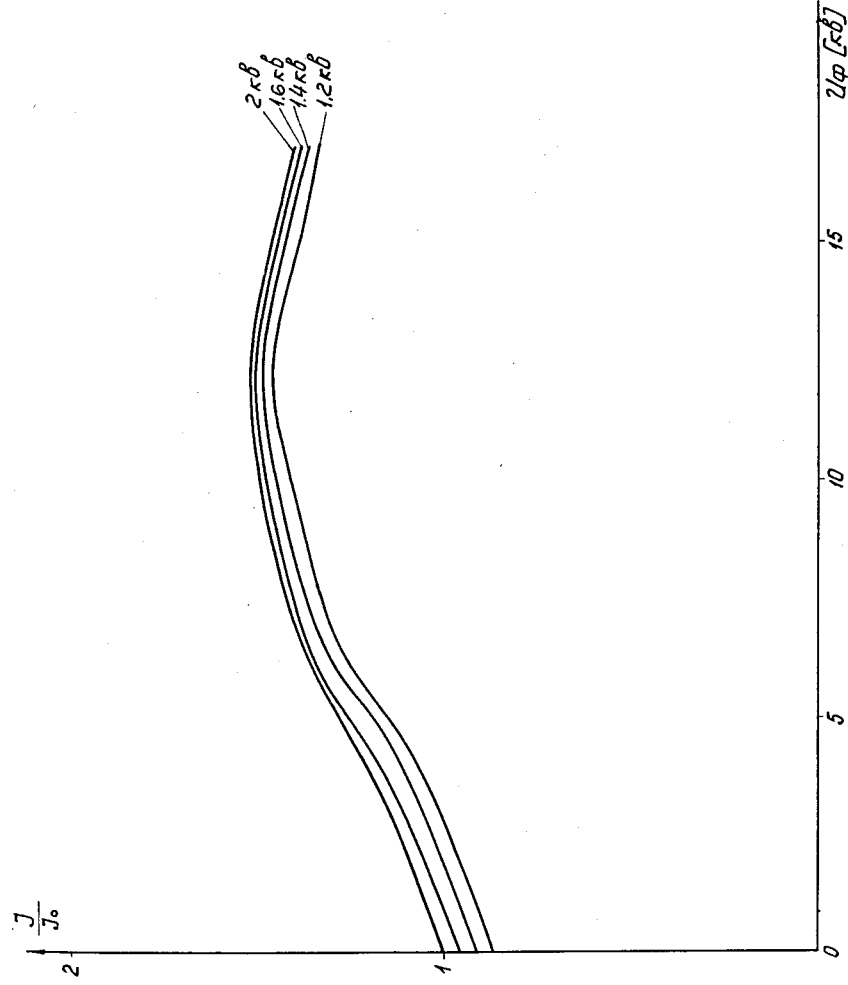


17

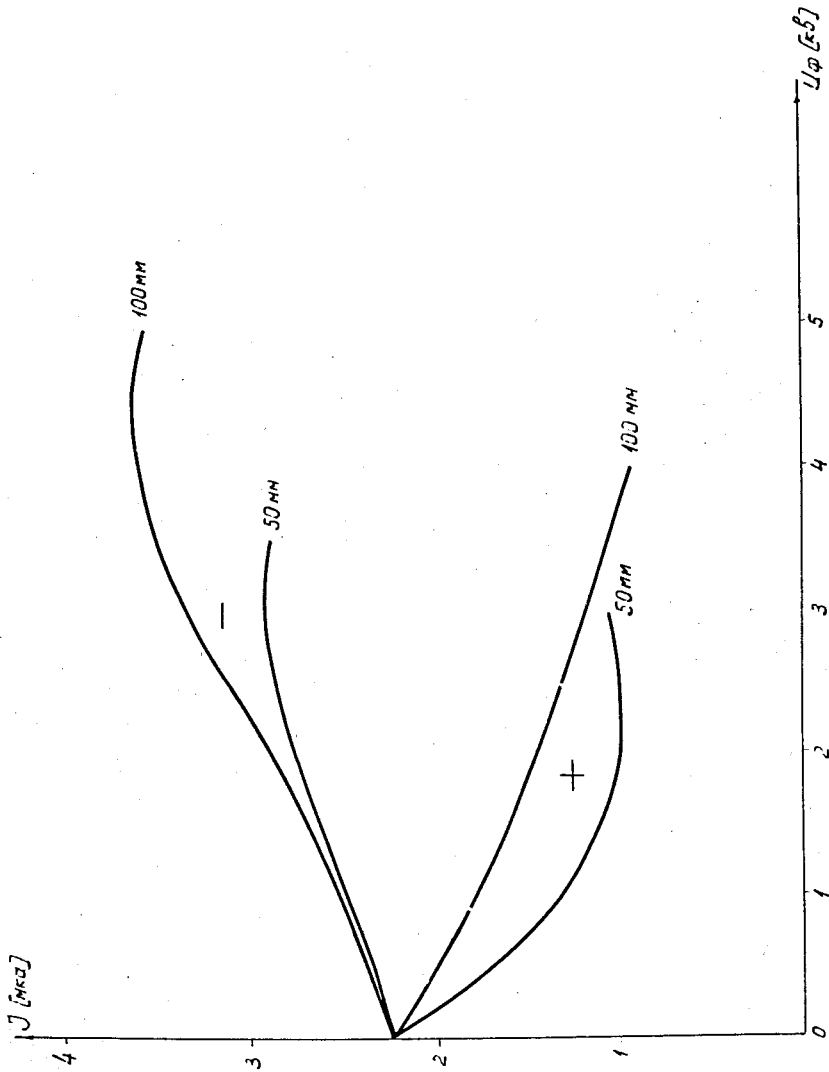
Р и с. 8. Зависимость интенсивности пучка протонов от величины фокусирующего напряжения при разном расходе газа (для нескольких напряжений дуги).



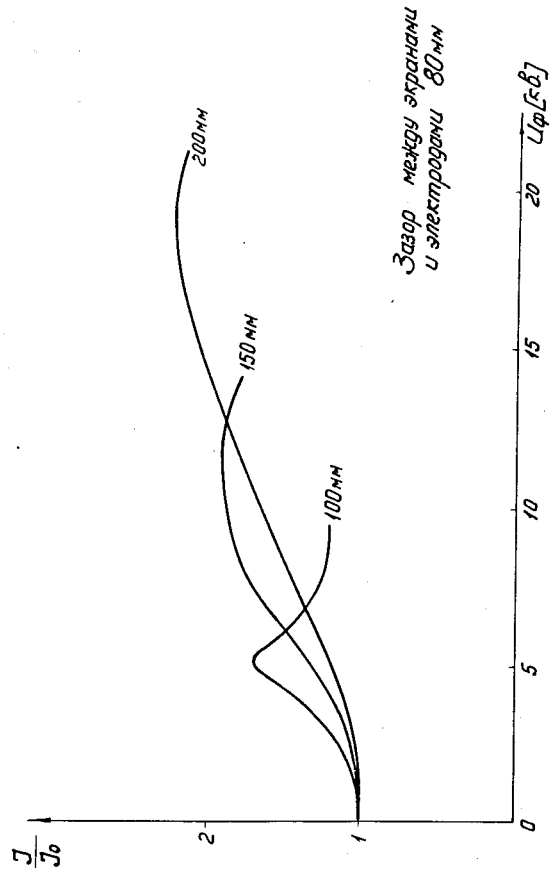
Р и с. 9. Зависимость интенсивности луча протонов от фокусирующего напряжения для разных значений ускоряющего напряжения.



Р и с. 10. Зависимость тока луча протонов от фокусирующего напряжения на электродах при разных значениях отрицательного напряжения на дуанте.

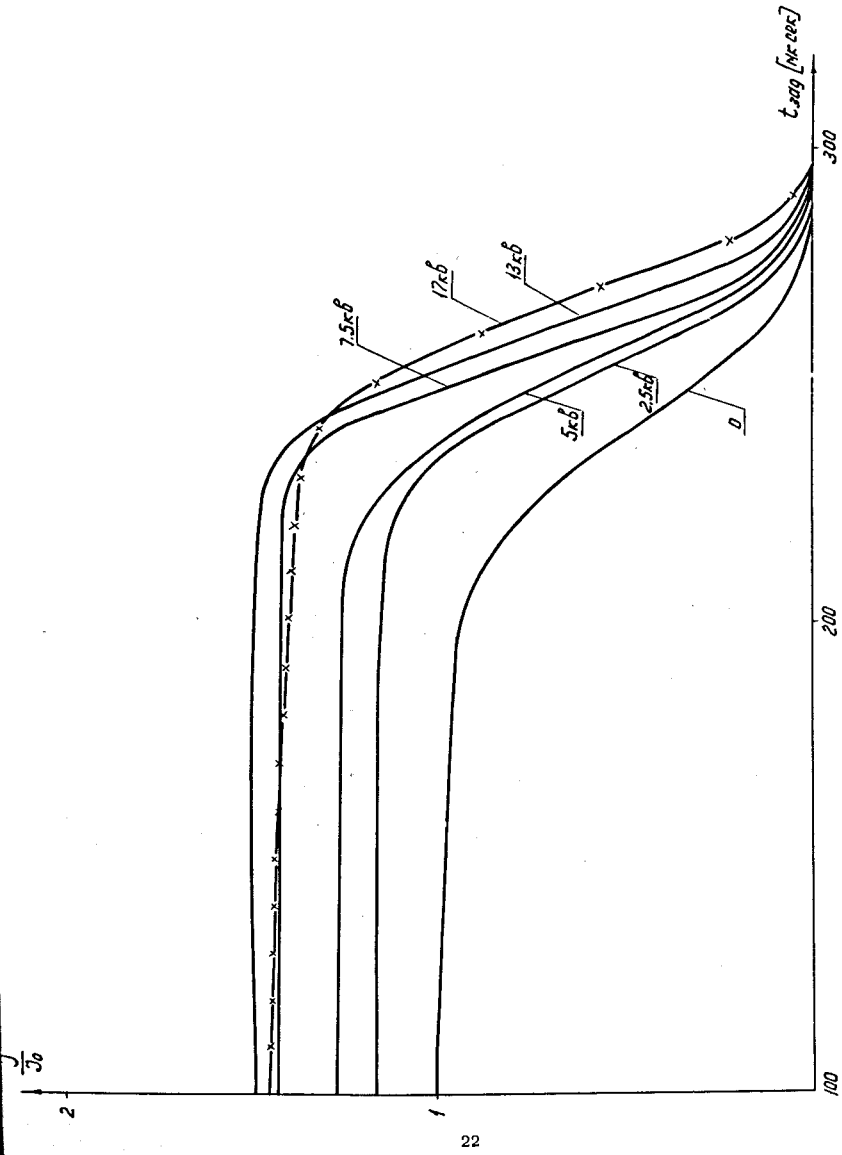


Р и с. 11. Зависимость тока протонов на радиусе 80 см от полярности фокусирующего напряжения для расстояний электродов от центра 50 мм и 100 мм.

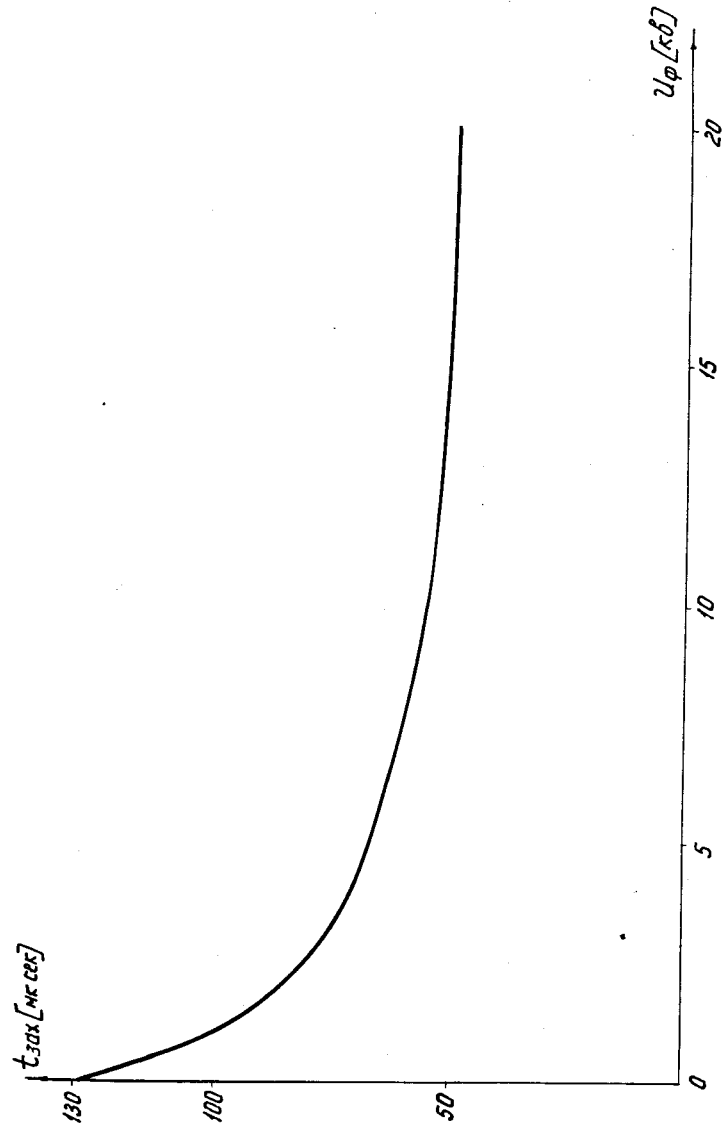


Зазор между экранами и электродами 80 мм

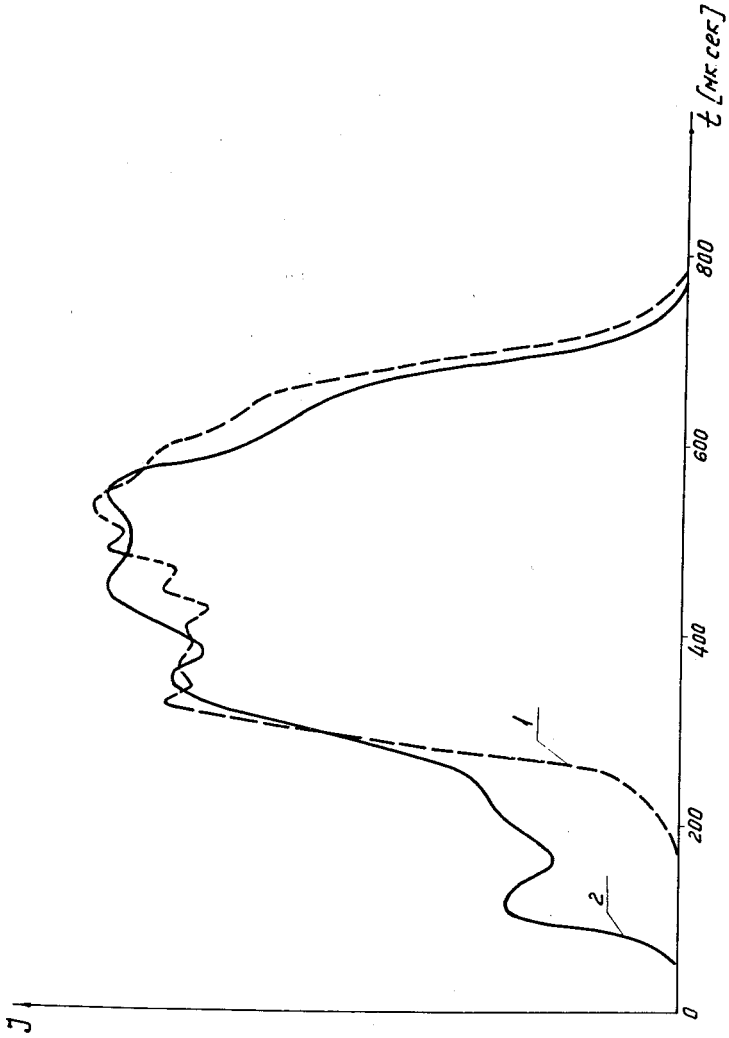
Р и с. 12. Зависимость интенсивности лучка протонов от фокусирующего напряжения U ф для расстояний между кромками дуанта и фокусирующих электродов, равных 100, 150 и 200 мм.



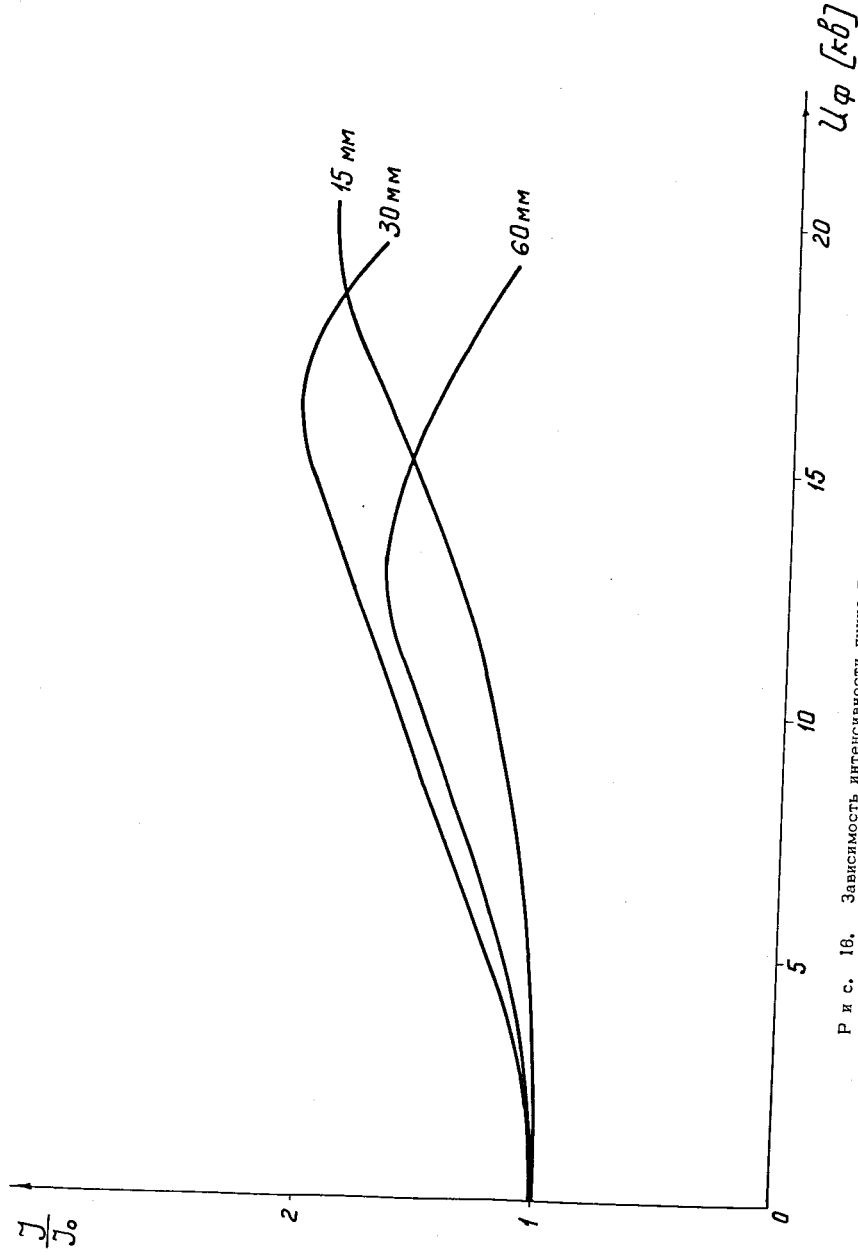
Р и с. 13. Зависимость интенсивности от величины задержки включения ускоряющего напряжения при разных значениях напряжения на фокусирующих электродах.



Р и с. 14. Зависимость времени захвата (по уровню 95%-ной интенсивности) от фокусирующего напряжения U_{ϕ} .



Р и с. 16. Влияние фокусирующего напряжения на временную структуру пучка частиц на конечном радиусе: 1 - $U_{\phi} = 0$; 2 - $U_{\phi} = 10$ кв.



Р и с. 16. Зависимость интенсивности пучка протонов от фокусирующего напряжения U_{ϕ} при зазорах между электродами и экранами, равных 15, 30 и 60 мм.