

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ 14

В.И.Давыденко, Г.В.Росляков, Н.Г.Хавин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХЭЛЕКТРОДНОЙ
МНОГОЩЕЛЕВОЙ СИСТЕМЫ
ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА

ПРЕПРИНТ 80 - 35



Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ МНОГОЩЕ- ЛЕВОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА

В.И.Давыденко, Г.В.Росляков, Н.Г.Хавин

А Н Н О Т А Ц И Я

Проведено численное и экспериментальное исследование ионно-оптических свойств электростатической четырех-
электродной многощелевой системы формирования ионного
пучка из газоразрядной плазмы. При относительно простой
и технологичной системе электродов, имеющих форму круг-
лых проволочек, экспериментальное значение угловой расхо-
димости пучка при эмиссионной плотности тока $0,8 \text{ А/см}^2$
и энергии 25 кэВ в направлении поперек щелей составляет
 $\pm 0,6^\circ$. Рассмотренная система формирования допускает
 $\sim 10\%$ изменение первеанса при сохранении мини-
мального значения угловой расходимости. Экспериментально
оценены тепловые нагрузки на электроды.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ МНОГОЩЕ- ЛЕВОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА

В.И.Давыденко, Г.В.Росляков, Н.Г.Хавин

Для формирования интенсивных пучков атомов изотопов водорода с целью их инъекции в термоядерные установки с магнитным удержанием плазмы широко применяются перезарядные ионные источники с электростатическим вытягиванием ионов из газоразрядной плазмы [1-4]. Используемые в них многоапертурные 3-х электродные системы формирования ионного пучка позволяют получать пучки с энергией до 40 кэВ, плотностью тока протонов $0,3 \pm 0,5$ А/см² и угловой расходимостью $\sim 1,5 \pm 3^\circ$. В настоящей работе описаны результаты исследования ионнооптических свойств 4-электродной системы формирования ионного пучка, в которой в отличие от 3-электродной системы извлечение и ускорение пучка происходит в разных промежутках. Это может облегчить формирование пучков с высокой плотностью тока эмиссии $\sim 0,5$ А/см² при энергиях масштаба сотни килоэлектронвольт 5,6 вследствие прогнозируемого [3] улучшения электрической прочности. Кроме того с использованием 4-х электродной системы удастся получить высокие ионнооптические характеристики пучка при простой и технологичной форме плазменного электрода. Нами были исследованы ионнооптические свойства 4-х электродной многощелевой системы формирования протонного пучка из газоразрядной плазмы импульсного дугового источника, описанного в [7]. Все 4 электрода системы формирования пучка представляют собой сетки из натянутых на обечайки металлических проволок круглого сечения. Диаметры проволок во всех электродах выбирались равными, их величина составляла 25-30% от шага сеток S -расстояния между центрами проволок, варьировавшегося в опытах от 0,8 до 4 мм. Элементарная ячейка исследованной многощелевой четырехэлектродной системы показана на рис.1. Основное отличие

такой системы от обычной 3-х электродной состоит в том, что импульс, направленный к центральной плоскости элементарной ячейки, необходимый для компенсации суммарного действия рассеивающей выходной электростатической линзы и пространственного заряда частицы пучка получают не на самом начальном этапе формирования — вблизи искривленной с помощью электрода специальной формы плазменной границы, а в поперечном электрическом поле, локализованном вблизи электрода 2. Фокусирующее действие электрода 2 аналогично действию широко применяемой в электронной оптике катодной линзы, а каждая элементарная ячейка в целом представляет иммерсионный объектив [8].

Ионнооптические характеристики выбранной четырехэлектродной системы находились численным моделированием на ЭВМ с использованием комплекса программ КСИ-БЭСМ [9]. Искалось решение двумерной, самосогласованной задачи движения ионов водорода в электрическом поле электродов элементарной ячейки формирующей системы при заданных их потенциалах и плотности тока ионной эмиссии. Положение плазменной границы определялось итерационным способом. Условием для определения окончательного положения плазменной границы являлось обращение на ней в нуль всех компонент электрического поля. Постановкой периодического граничного условия — равенства нулю нормальной производной потенциала на прямых, проходящих через центры электродов, учитывалось влияние остальных элементарных ячеек. Поток ионов, стартующих с плазменной границы, разбивался на 80 "больших" частиц. Начальная скорость ионов из плазмы выбиралась соответствующей энергии 5 эВ [10] в направлении движения пучка. Поперечная скорость ионов принималась равной нулю, т.е. влияние начальной поперечной ионной температуры ионов в расчетах не учитывалось. На рис.1. приведены положение плазменной границы, соотношения напряжений на электродах и траектории ионов в оптимизированном варианте элементарной ячейки. Оптимизация проводилась подбором начальных условий — потенциалов на электродах, плотности тока ионов, таким образом, чтобы при максималь-

ной плотности тока получить минимальную угловую расходимость пучка. Величина отрицательного напряжения на электроде 3, при котором еще существовал потенциальный барьер для электронов вторичной, нейтрализующей пучок плазмы выбиралась минимальной. Эмиссионная плотность тока ионов с поверхности плазменной границы в приведенном варианте соответствовала закону "трех вторых" с коэффициентом 0,7 $j = 0,7 \frac{2e}{m} U^{3/2} / 9\pi d^2 (1)$. На рис.2 (кривая 1) приведено расчетное угловое распределение частиц в сформированном пучке. Как видно из рисунка, все частицы сосредоточены в интервале углов $\pm 0,01$ рад. Из проведенного анализа траекторий следует, что увеличение эффективного поперечного фазового объема элементарного пучка по мере формирования происходит ступенчатым образом: ~ 40% от окончательного поперечного фазового объема пучок получает вблизи плазменного электрода на самом начальном этапе формирования, 30% после прохождения электрода 2 и 30% на выходе из системы формирования.

При энергии протонов до 40 кэВ сечение перезарядки в водороде больше, чем сечение ионизации, поэтому присутствие молекул газа в системе формирования приводит в основном к перезарядке первичного ионного пучка. Образовавшиеся вторичные ионы и быстрые атомы на выходе из системы формирования имеют более широкое угловое распределение. Это связано с тем, что их поперечный импульс, приобретаемый в одной из линз, не скомпенсирован действием другой. Численными расчетами проведенными способом, изложенным в [11, 12], находились угловые распределения вторичных частиц на выходе из системы формирования. Так для $d = 4$ мм и $U = 25$ кВ получившиеся угловые распределения аппроксимируются гладкими колоколообразными кривыми со следующими параметрами: для вторичных ионов полуширина распределения по основанию $\pm 0,2$ рад и $\pm 0,05$ рад по полувысоте, быстрые атомы имеют распределение с полушириной по основанию $\pm 0,1$ рад и $\pm 0,04$ рад по полувысоте. Согласно проведенным расчетам вторичные ионы попадают лишь на электрод 3. Доля их довольно мала ~ 15% от всех вторичных ионов, причем это ионы, образовавшиеся

в непосредственной близости от электрода 3, так что средняя энергия приносимая ими невелика $\sim 0,1eU$. Траектории возникающих при перезарядке быстрых атомов не пересекают электроды вовсе. Оцениваемая величина мощности приносимой на электрод 3 при 10% перезарядке составляет $\sim 0,15\%$ от полной мощности пучка.

При изготовлении системы возможны технологические случайные смещения проволок от их расчетного положения, что приводит к случайному отклонению каждой струйки, сформированной ячейкой и вследствие этого к увеличению расходимости всего пучка. Наиболее нежелательными в этом смысле являются смещения проволок электродов 2 и 3 в плоскости электродов. Оценки увеличения угловой расходимости, выполненные в линейном приближении для этого случая дают величину $\alpha \approx \delta/2d$, где δ — величина случайного смещения каждой из проволок электродов 2 и 3. Для $\delta = 5$ мм и $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-3}$ рад допустимы смещения проволок $\delta \leq 5 \cdot 10^{-2}$ мм, что накладывает жесткие, но вполне выполнимые требования на технологию изготовления электродов.

Для проведения основных экспериментальных исследований в соответствии с рис.1 была изготовлена модель системы, в которой расстояние между электродами 1 и 3 $d = 10,9$ мм и напряжение на плазменном электроде $U = 9$ кВ. Импульсный дуговой источник водородной плазмы был установлен на расстоянии 8 см от системы формирования. Сразу на выходе из системы формирования из центральной части сформированного пучка экраном с щелью 10 x 4 мм, ориентированной вдоль проволок, вырезался пучок, соответствующий одной элементарной ячейке. Угловая расходимость этого пучка определялась с помощью подвижного щелевого датчика, установленного на расстоянии 50 см от системы формирования. Повернув систему формирования на 90° аналогичным образом можно было определить расходимость пучка вдоль проволок, обусловленную только поперечной температурой ионов плазмы. Во время измерений ширина углового распределения в направлении поперек проволоке минимизировалась подстрой-

кой напряжения на электроде 2 и полученное при этом соотношение напряжений на электродах совпало с расчетным. Измеренные угловые распределения приведены на рис.2. Кроме того, на рис.2 кривой 3 представлено угловое распределение пучка, сформированного в отсутствие фокусирующего электрода 2 (3-х электродной системой) при оптимальной плотности тока, обеспечивающей минимальную расходимость пучка. Из сравнения кривых 1,2 и 3 на рис.2 видно, что экспериментальная угловая расходимость пучка в направлении поперек проволок, сформированного 4-х электродной системой, более чем в 5 раз меньше, чем в 3-х электродной с той же формой электродов и несколько больше расчетной. Последнее отличие обусловлено конечной температурой ионов плазмы. Как видно из рис.1 и измерений ширины следа, оставленном пучками на экране с ограничивающей щелью, на выходе из системы формирования каждый элементарный пучок сжимается приблизительно вдвое. Вследствие сохранения фазового объема поперечная температура ионов в этом направлении возрастает в ~ 4 раза. К этой поперечной энергии также добавляется энергия, связанная с оптическими аберрациями, и в результате среднеквадратичная расходимость пучка в направлении проволок составит $\alpha_1 = \sqrt{\alpha_0^2 + 4T/eU}$ (2), где α_0 — среднеквадратичный угол, обусловленный оптическими аберрациями, определенный в результате расчетов, T — температура ионов плазмы. Приведенная оценка для α_1 , хорошо согласуется с полученными распределениями при $T = 0,3$ эВ, а экспериментальная зависимость $\alpha_1(U)$ совпадает с расчетной.

Представленное кривой 3 на рис.2 угловое распределение пучка в направлении поперек проволок имеет большие "хвосты". Это связано с обсуждавшимися выше процессами перезарядки в системе формирования. При изменении плотности газа в системе формирования менялась величина этих "хвостов". Увеличение расходимости пучка вследствие перезарядных процессов было пренебрежимо мало в варианте системы формирования с $d = 4,2$ мм, $S = 0,8$ мм и $U = 25$ кВ, что демонстрируется кривой 4 на рис.2.

Измерение эмиссионной плотности тока проводилось калориметрическим способом. Для этого при помощи термопары измерялся нагрев медной пластины под действием пучка. Определенная отсюда эмиссионная плотность тока с поверхности плазмы при оптимальном формировании пучка совпала с плотностью тока, рассчитанной по формуле (1) с точностью $\pm 5\%$.

Для конструирования систем формирования необходимо знание зависимости основных рабочих характеристик: эмиссионной плотности тока и угловой расходимости от соотношений расстояний между электродами. В нашем случае эта зависимость выяснялась экспериментально: изменением полного зазора между электродами 1 и 3 - d и зазора между электродами 1 и 2 - b при неизменном шаге сеток $s = 4$ мм. Полученные данные приведены в таблице 1, где α - угловая полуширина распределения на уровне 0,5; j - эмиссионная плотность тока с поверхности плазмы.

Таблица 1.

d мм	6,9	6,9	8,9	8,9	10,9	10,9	14,9	14,9
b мм	3,15	4,15	3,15	4,15	4,15	5,15	6,15	7,15
d 10^{-2} рад	1,60	1,55	1,45	1,35	1,10	1,05	0,95	0,90
j mA/cm ²	64	61	38	35	27	25	20	18

Из таблицы видно, что плотность тока падает с увеличением полного зазора, а угловая расходимость уменьшается. Уменьшение угловой расходимости связано с уменьшением ионно-оптических aberrаций. Сближение электродов 1 и 2 при постоянном полном зазоре несколько увеличивает плотность тока, но при этом увеличивается угловая расходимость.

На основании приведенных в таблице данных оптимальным представляется следующее соотношение расстояний между электродами $s:b:d = 1:1:2,5$ при отношении диаметра проволочек к шагу сеток равному 0,2.

Экспериментально полученная V - образная зависимость угловой расходимости от перванса системы приведена на рис. 4. Суммарный 10% уровень флуктуаций плотности тока и напряжения приводит к незначительному 10% увеличению угловой расходимости.

Приведенные выше расчетные и экспериментальные характеристики ионно-оптических свойств 4-х электродной системы формирования ионного пучка относятся к центральной части пучка, отстоящей от края на расстоянии $\sim d$, где можно пренебречь краевым эффектом пространственного заряда. На меньших расстояниях от края локальная расходимость пучка резко возрастает и без принятия специальных мер может достигать величины $\sim 0,1$ рад. С целью снижения краевых эффектов экспериментально исследовалось влияние пирсовского электрода, устанавливавшегося на плазменный электрод. Минимальная расходимость целого пучка была получена в том случае, когда плоский торец пирсовского электрода находился в плоскости, проходящей через центры проволочек плазменного электрода.

В экспериментах с системой формирования с $s = 4$ мм, $d = 10,9$ мм и диаметром проволочек 0,8 мм калориметрически определялась мощность, приносимая пучком на электроды 2,3. Измеренные величины мощности, выделяемой на фокусирующем и вытягивающем электродах составили 0,6% от полной мощности пучка. Токи на эти же электроды составили - 4% (электрод 3) и 0,5% (электрод 2) от полного тока пучка. Отличие в токовых нагрузках связано повидимому с тем, что на электрод 3 приходят в основном медленные ионы вторичной плазмы, а на электрод 2 - электроны, выбитые из электрода 3 и ускоренные почти до полной энергии.

С целью применения в мощных импульсных атомарных инжекторах мы исследовали вариант формирующей системы, в которой: расстояние между электродами 1 и 3 $d = 4,2$ мм, а между электродами 1 и 2 $b = 0,7$ мм, шаг сеток $s = 0,8$ мм, никелевые проволочки имели $\Phi 0,15$ мм, напряжение на плазменном электроде $U = 25$ кВ. При

этом был получен пучок $\varnothing 3$ см, полным током 4,5 А, длительностью 200 мксек. Эмиссионная плотность тока с поверхности плазмы - 800 mA/cm^2 , и угловая расходимость $\pm 1,5 \cdot 10^{-2}$ рад полученного пучка находятся в соответствии с расчетными значениями.

В результате проведенных исследований установлено, что 4-х электродная многоселевая система формирования ионного пучка позволяет формировать пучок с малой расходимостью $\sim 10^{-2}$ рад и обеспечивает достаточно малые тепловые потоки на электроды, слабо чувствительна к изменениям первеанса вблизи минимума угловой расходимости, достаточно проста в изготовлении. Отмеченные характеристики исследованной системы формирования пучка являются перспективными для применения в мощных инжекторах быстрых атомов.

Авторы выражают благодарность Г.И.Димову за полезные обсуждения, П.А.Журавлеву за помощь в изготовлении электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. W.S.Cooper, K.H.Berkner, R.V.Pyle, *Nucl Fusion*, 12, 263, 1972.
2. Коупленд, Грин, Хэммонд, Ривьер, ПНИ, № 9, 101, 1973
3. Proc. 2nd Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, 1974.
4. В.М.Кулыгин, А.А.Панасенков, Н.Н.Семашко, И.А.Чухин, ЖТФ, 49, 168, 1979.
5. J. Kim, J.H.Wheaton, G. Schilling, *J. Appl. Phys.*, 49, 517, 1978.
6. Ким, Гарднер, Меннон, ПНИ, № 2, 63, 1979.
7. Г.И.Димов, Г.В.Росляков, ПТЭ, № 1, 29, 1974.
8. В.М.Кельман, С.Я.Явор. Электронная оптика. Ленинград, "Наука", 1968.
9. В.П.Ильин. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск, "Наука", 1974.
10. Г.В.Росляков, Препринт ИЯФ СО АН СССР № 79-111, Новосибирск, 1979.
11. O.A.Anderson, LLL Report UCID-17581, 1978.
12. В.И.Давыденко, Н.Г.Хавин, Препринт ИЯФ СО АН СССР № 79-27, Новосибирск, 1979.

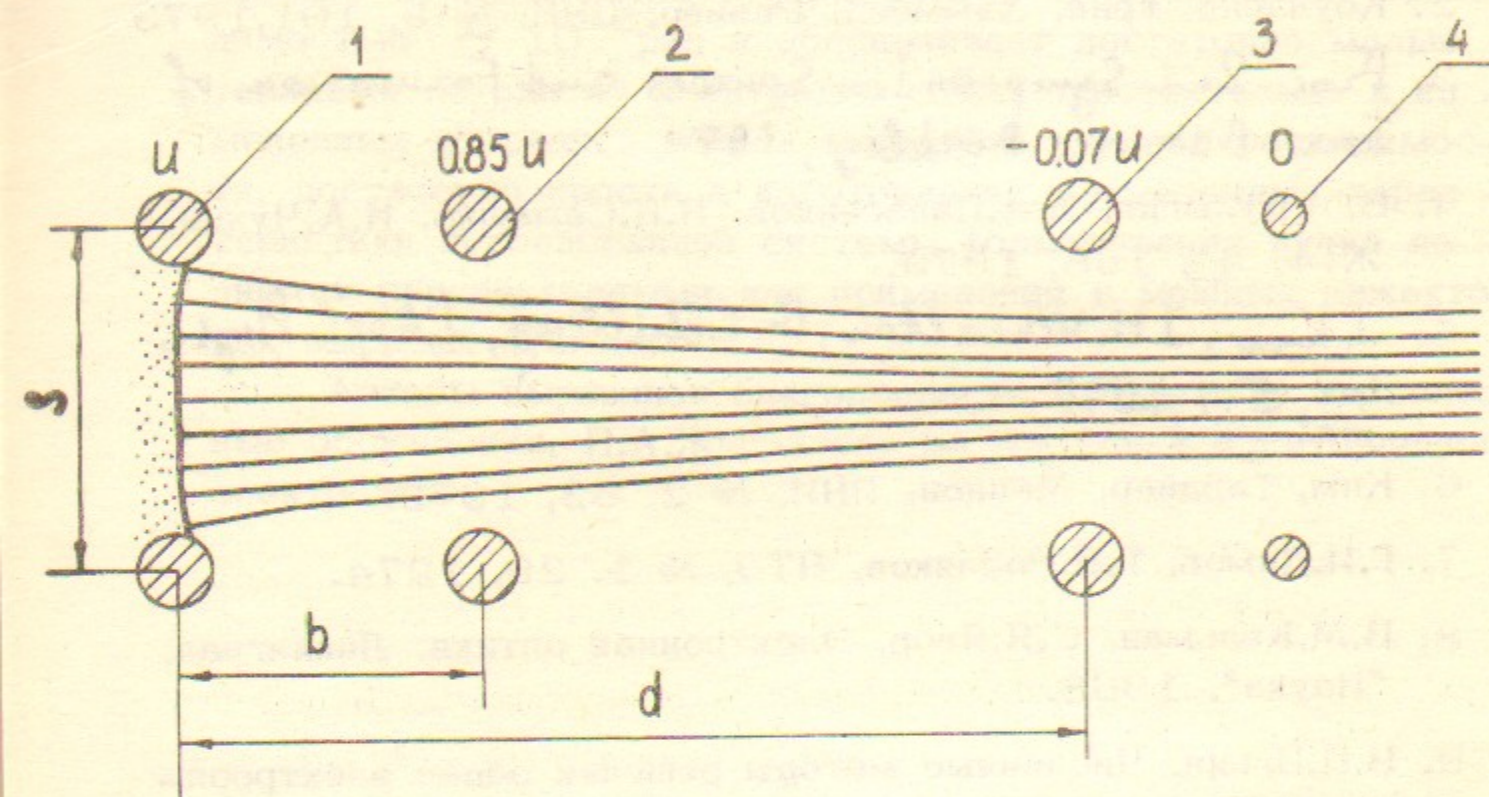


Рис.1. Ячейка четырехэлектродной многослелевой системы формирования ионного пучка.

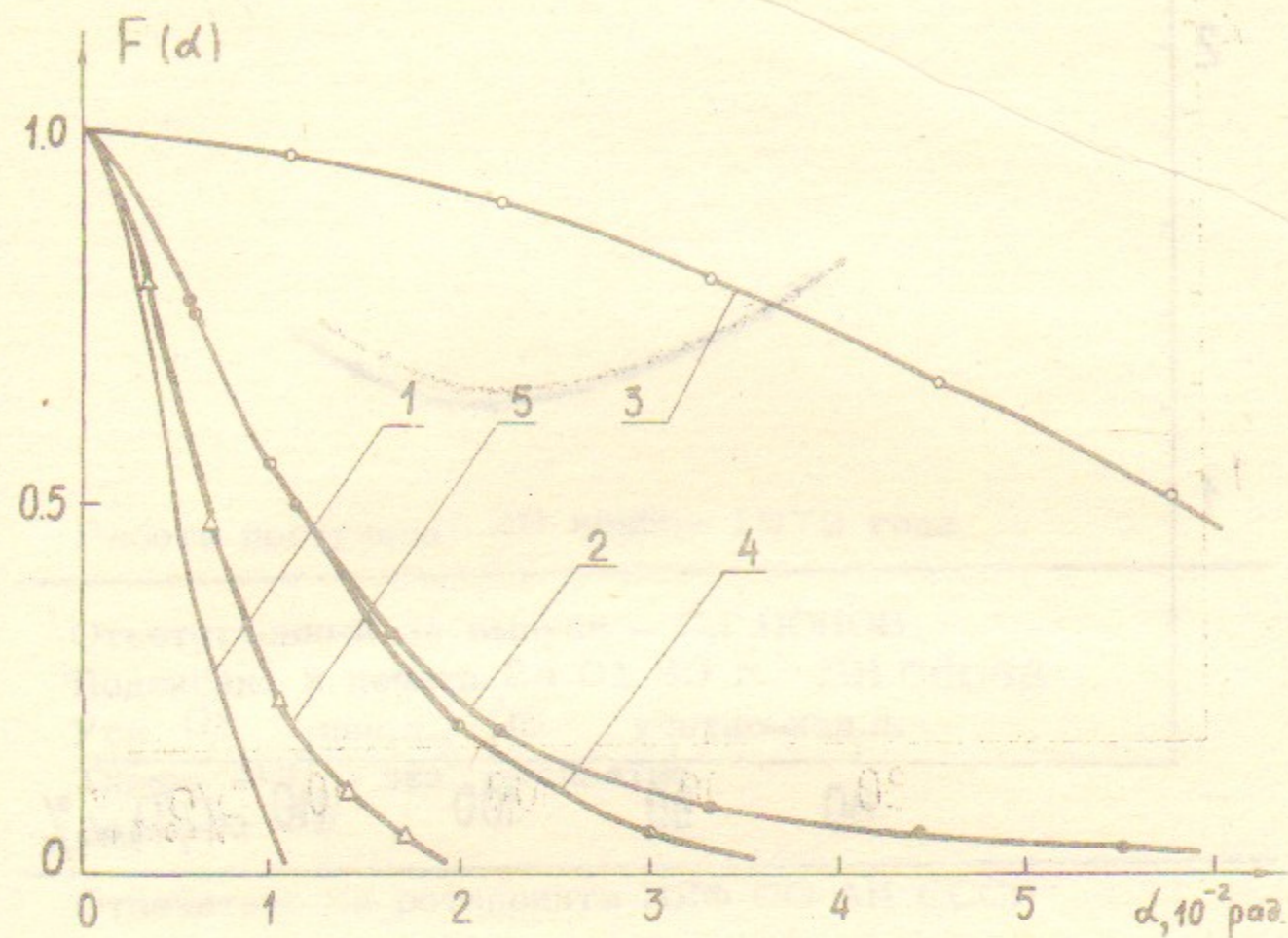


Рис.2. Угловые распределения пучка из одной ячейки.
 1 — расчетное поперек проволочек, 2 — экспериментальное поперек проволочек, 3 — экспериментальное поперек проволочек в отсутствие фокусирующего электрода, 4 — экспериментальное поперек проволочек при $U = 25$ кВ и $d = 4,2$ мм, 5 — экспериментальное вдоль проволочек.

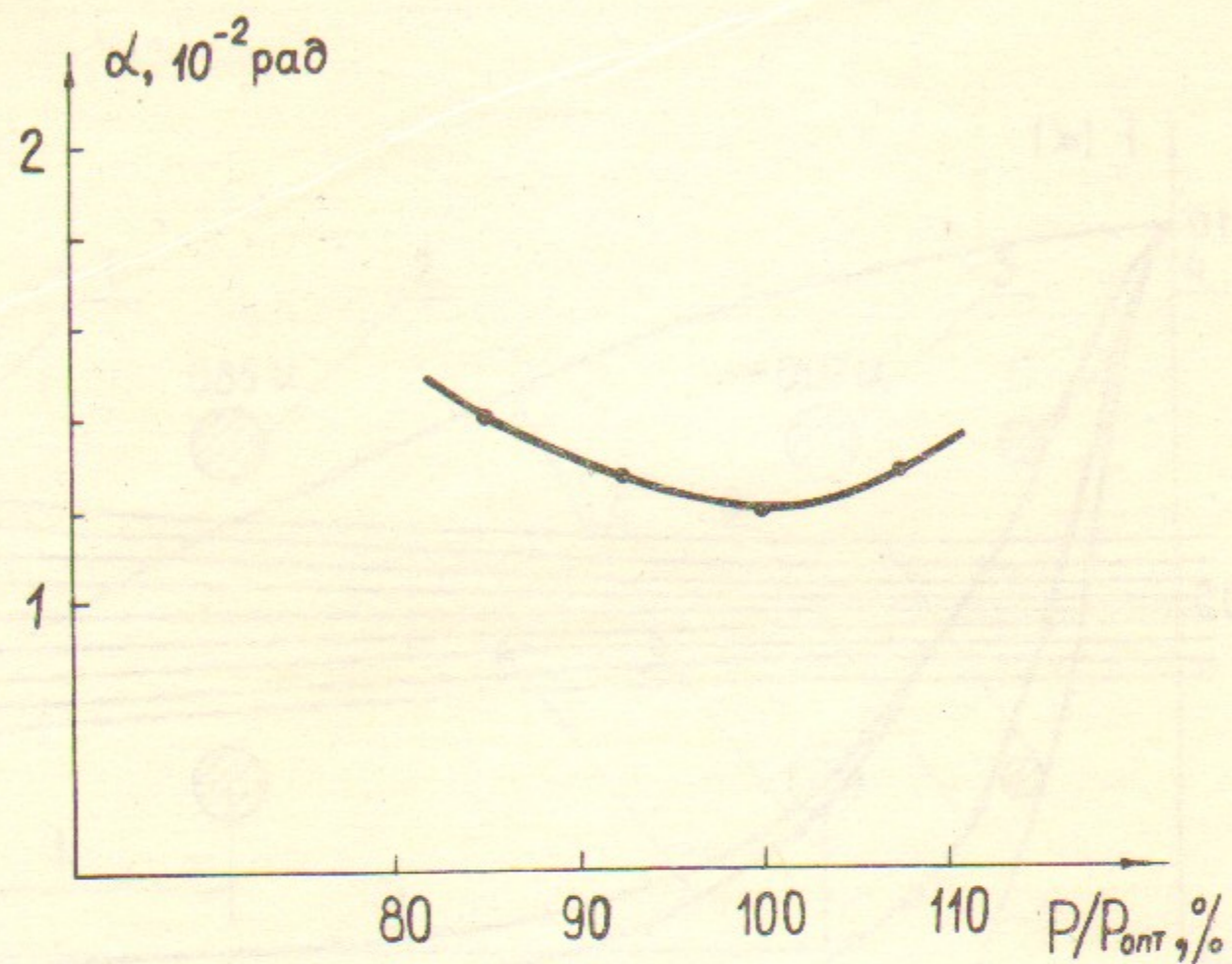


Рис.3. Зависимость угловой расходимости пучка от пер-
веанса системы.

Работа поступила 29 ноября 1979 года

Ответственный за выпуск — С.Г.ПОПОВ
 Подписано к печати 24.01.80 г. МН 06068
 Усл. 0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 35

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР