

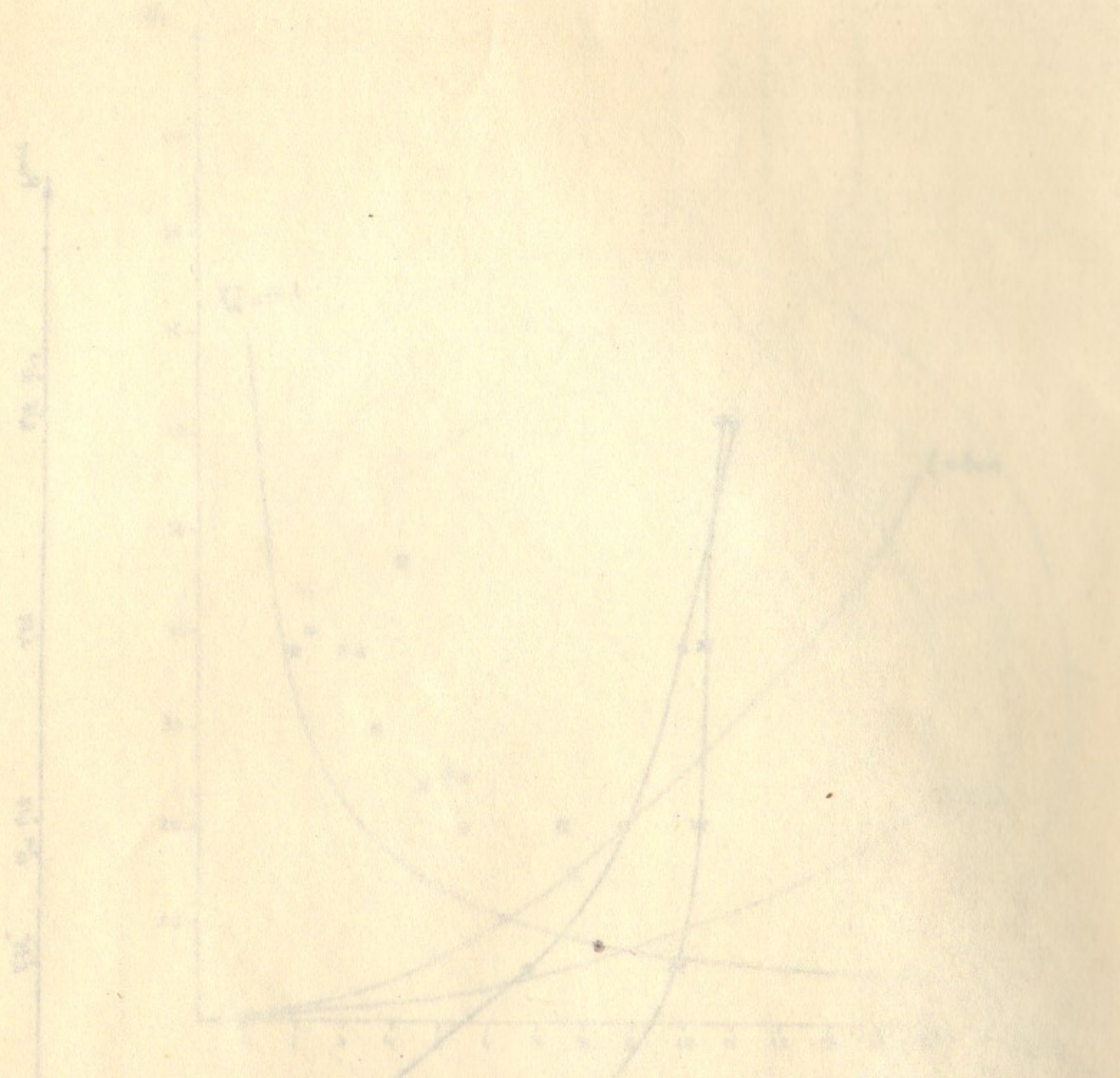
Институт ядерной физики Сибирского отделения АН СССР

Препринт

233

В.Н.Бочаров, В.И.Волосов, А.В.Комин, В.М.Панасюк,
Ю.Н.Юдин

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИИ
СТОХАСТИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ



Ответственный за выпуск Ю.Н.Юдин
 Подписано к печати 10.УП-1968г.
 Усл.0,6 печ.л., тираж 300 экз.
 Заказ № 233, бесплатно.

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР. нв.

Новосибирск

1968

Возможность использования метода стохастического нагрева электронов в замкнутой тороидальной ловушке обсуждалась в работе /1/. Для осуществления этого метода в ловушке должны существовать замкнутые магнитные поверхности, а время жизни частицы в ловушке должно быть достаточно большим. Высокочастотное ускоряющее напряжение приложено к одному или нескольким разрезам металлической вакуумной камеры. Частота в.ч. поля должна быть в несколько раз выше средней частоты обращения электрона вокруг тора. Фаза в.ч. напряжения в момент прохождения частицей ускоряющего промежутка и соответственно прирост энергии частицы ΔW будут случайными величинами за счёт нелинейной зависимости между энергией частицы и временем её обращения /2/. При этом частица может увеличивать свою энергию до тех пор, пока частота её обращения вокруг тора не станет приблизительно равна частоте в.ч. поля; в этом случае фаза в.ч. поля уже не является случайной и механизм стохастического нагрева электронов не работает. Одновременно с нагревом электронов, при условии, что их средняя энергия выше 10-20 эв, идёт ионизация остаточного газа; потери энергии электронами на ионизацию быстро возмещаются за счёт стохастического ускорения. Таким образом, данный метод нагрева одновременно является и методом создания плазмы. Равновесная плотность плазмы определяется равенством скоростей процесса ионизации нейтральных атомов и процесса диффузии плазмы поперёк ловушки.

Рассмотрим на простейшем примере как изменяется во времени энергия группы частиц с нулевой начальной энергией при стохастическом ускорении (для примера возьмём 128 частиц). Пусть ускоряющее напряжение меняется скачками от $-U$ до $+U$ с частотой в.ч. поля. После первого прохождения ускоряющего промежутка половина частиц приобретает скорость, направленную вдоль магнитного поля (энергия $+eU$), другая половина — против поля ($-eU$). При последующих прохождениях промежутка энергетический спектр частиц продолжает изменяться и их энергия в среднем возрастает (см. рис.1). Если энергия частицы достигает некоторого критического значения $W_{кр}$ механизм набора энергии прекращается (будем для простоты считать, что частица с $W=W_{кр}$ может только терять энергию). Как видно из рис.1 "спектр" частиц по скоростям приближается к прямоугольному (в установившемся режиме). Время установления равновесного спектра по порядку величины в $(W_{кр}/\Delta W)^2$ раз больше времени однократного прохождения частицей ускоряющего зазора. В действительности процесс

нагревания идёт значительно сложнее: существенную роль играют неупругие соударения с нейтралами (ионизация и возбуждения атомов); картина движения частиц в фазовом пространстве имеет специфические резонансные области, в окрестности которых движение частиц замедляется; начало ускорения зависит от структуры ускоряющего электрического поля и т.д.

Отметим некоторые особенности метода стохастического нагрева.

Так как установление равновесного спектра частиц происходит за счёт взаимодействия с внешним полем, этот метод позволяет создавать в ловушке достаточно редкую (бесстолкновительную) плазму с функцией распределения, близкой к максвелловской. Средняя энергия электронов довольно легко может быть изменена за счёт изменения параметров в.ч. напряжения.

В режиме, когда амплитуда в.ч. напряжения меньше потенциала ионизации, а средняя энергия частиц выше потенциала ионизации, разряд может гореть только внутри сепаратрисы. Если сепаратриса вписывается в камеру, то частицы попадают на стенки камеры лишь за счёт диффузии поперёк магнитного поля. Это даёт возможность получать плазму с малым процентом примесей.

К недостаткам метода можно отнести дополнительное рассеивание частиц на ускоряющем промежутке. В стеллараторе силовые линии магнитного поля находятся под некоторым углом к оси камеры, и наложение продольного в.ч. поля должно приводить к дополнительному дрейфу частиц на стенки. Однако оценка, проведенная для нашего случая показала, что этот эффект незначителен /1/.

В наших экспериментах вакуумная камера имела два промежутка (рис.2) с толщиной изоляции 2-3 мм. Высокочастотное напряжение подавалось на них от генератора, который был настроен на частоту 5 МГц. Амплитуду в.ч. напряжения можно было менять в пределах от 0 до 150 в; мощность генератора ~ 1 квт.

Процесс создания плазмы стохастическим методом требует выполнения дополнительного условия. Так как средняя энергия электронов должна быть больше потенциала ионизации газа в камере, существует нижняя граница, ниже которой это условие не выполняется. Согласно /1/ выражение для максимальной энергии частиц W_{max} имеет вид:

$$W_{max} = (R \cdot f \cdot U_0 / 5K)^{2/3}$$

где R_{cm1} - большой радиус камеры, f - частота МГц, U_0 - напряжение на разрезе в., K - количество разрезов. Откуда условие зажигания разряда можно представить в виде:

$$(R \cdot f \cdot U_0 / 5K)^{2/3} > A \cdot e U_i$$

где U_i - потенциал ионизации, A - постоянный множитель порядка 2-5. С другой стороны условие вхождения частиц в режим стохастического ускорения имеет вид /1/:

$$3e U_0 > m \omega^2 r^2$$

Отсюда может быть найдена граница зажигания разряда. В частном случае для Az и параметров установки, описанной в /3/, были построены теоретические кривые, показанные на рис.3. Там же нанесены экспериментальные точки, полученные нами при давлении $Az \sim 8 \cdot 10^{-6}$ тор. На основании этих результатов можно считать, что оптимальная частота в.ч. поля для нашего случая равна 8-9 МГц.

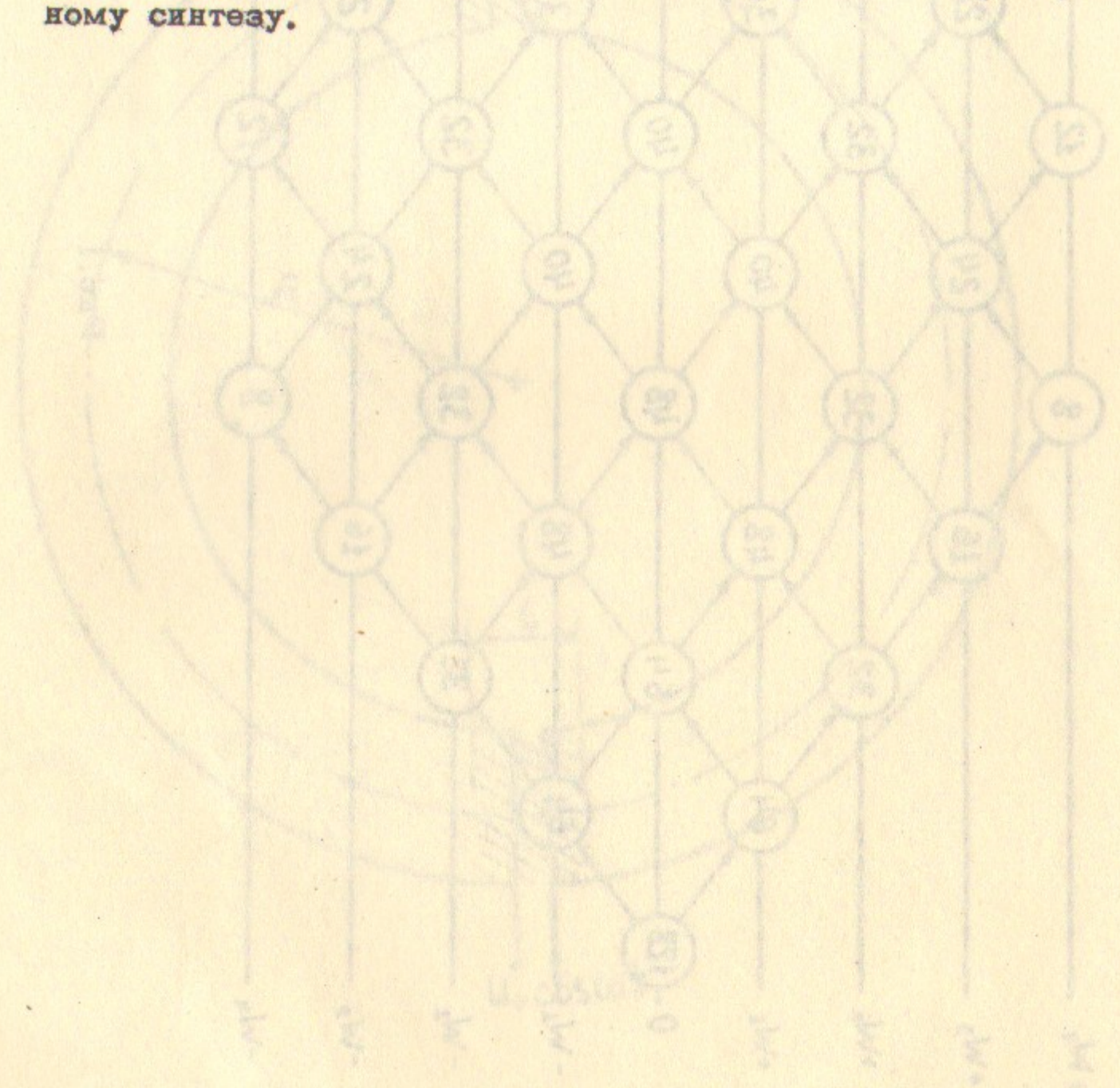
Оценки, приведенные в работе /1/, показали, что максимальная плотность, которую можно получить в нашем эксперименте $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ наибольшая плотность, полученная при экспериментах, была $\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$. Зависимость $n = n(p)$ показана на рис.4. Максимальное значение плотности плазмы было достигнуто при вакууме $10^{-4} - 10^{-2}$ тор. Рост плотности плазмы в этом режиме может быть ограничен интенсивным уходом частиц на стенки за счёт колебаний. При давлении $10^{-6} - 10^{-5}$ тор предельная плотность ограничивалась, по-видимому, малым временем жизни отдельной частицы в ловушке. Это подтверждается тем, что предельный вакуум, при котором еще горел разряд, равен $7-8 \cdot 10^{-6}$ тор.

Измерения энергетического спектра электронов, проведенные с помощью многосеточного зонда, показали, что спектр близок к максвелловскому и средняя температура совпадает с оценкой, которую даёт формула (1). При амплитуде в.ч. напряжения ~ 30 вольт и частоте 5 МГц средняя энергия электронов была порядка 100 эв.

Приведенные выше экспериментальные данные показывают, что метод стохастического нагрева может быть использован для создания не очень плотной плазмы. Авторы предполагают провести более детальное изучение особенностей этого метода.

Л и т е р а т у р а

1. В.И.Волосов, А.В.Комин. ЖТФ, т.38, 5, 846 (1968).
2. Г.М.Заславский, Б.В.Чириков. О механизме ускорения Ферми в одномерном случае. Новосибирск, изд.НГУ, 1964.
3. В.Н.Бочаров, В.И.Волосов и др. Доклад на III Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу.



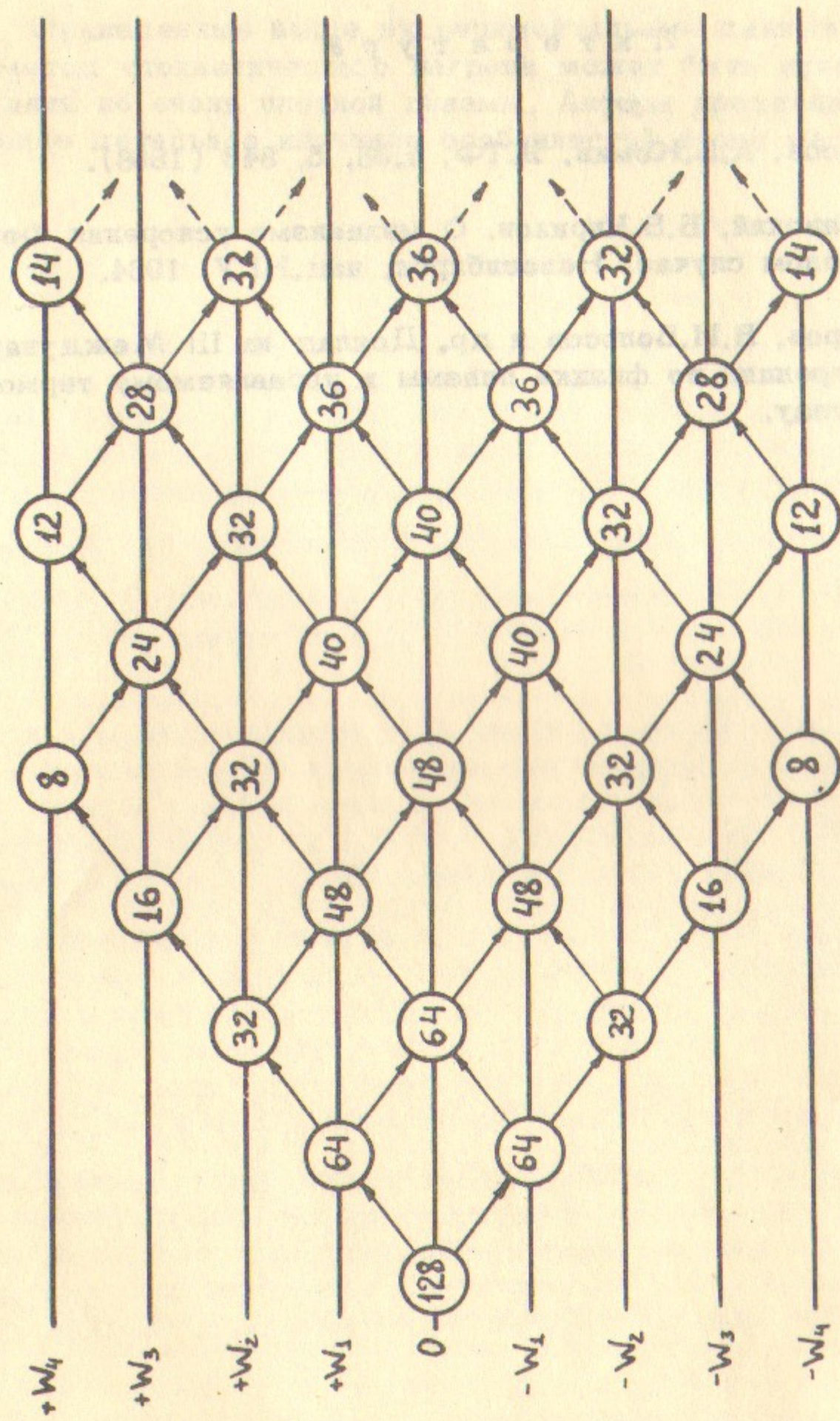


Рис.1

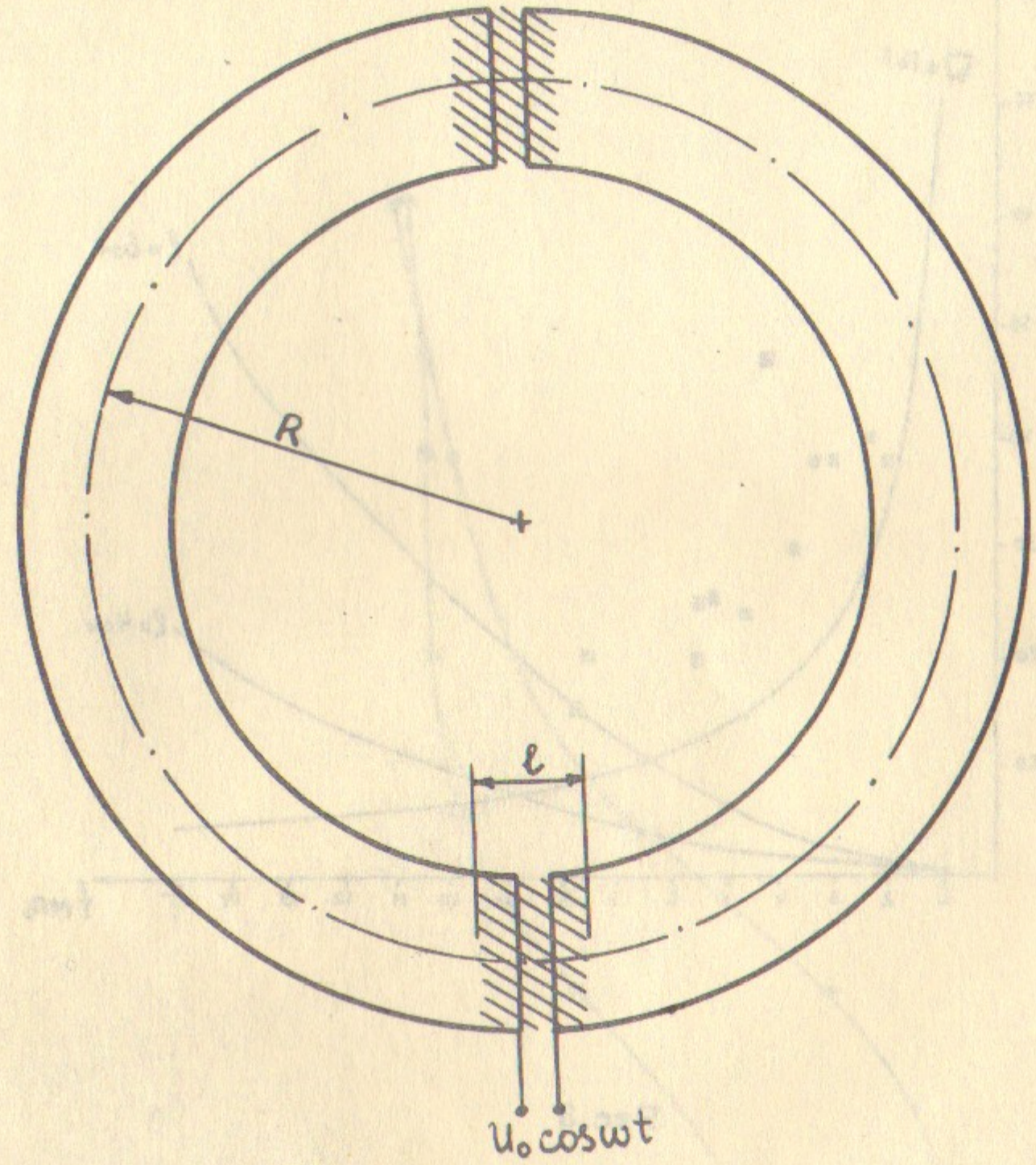


Рис.2

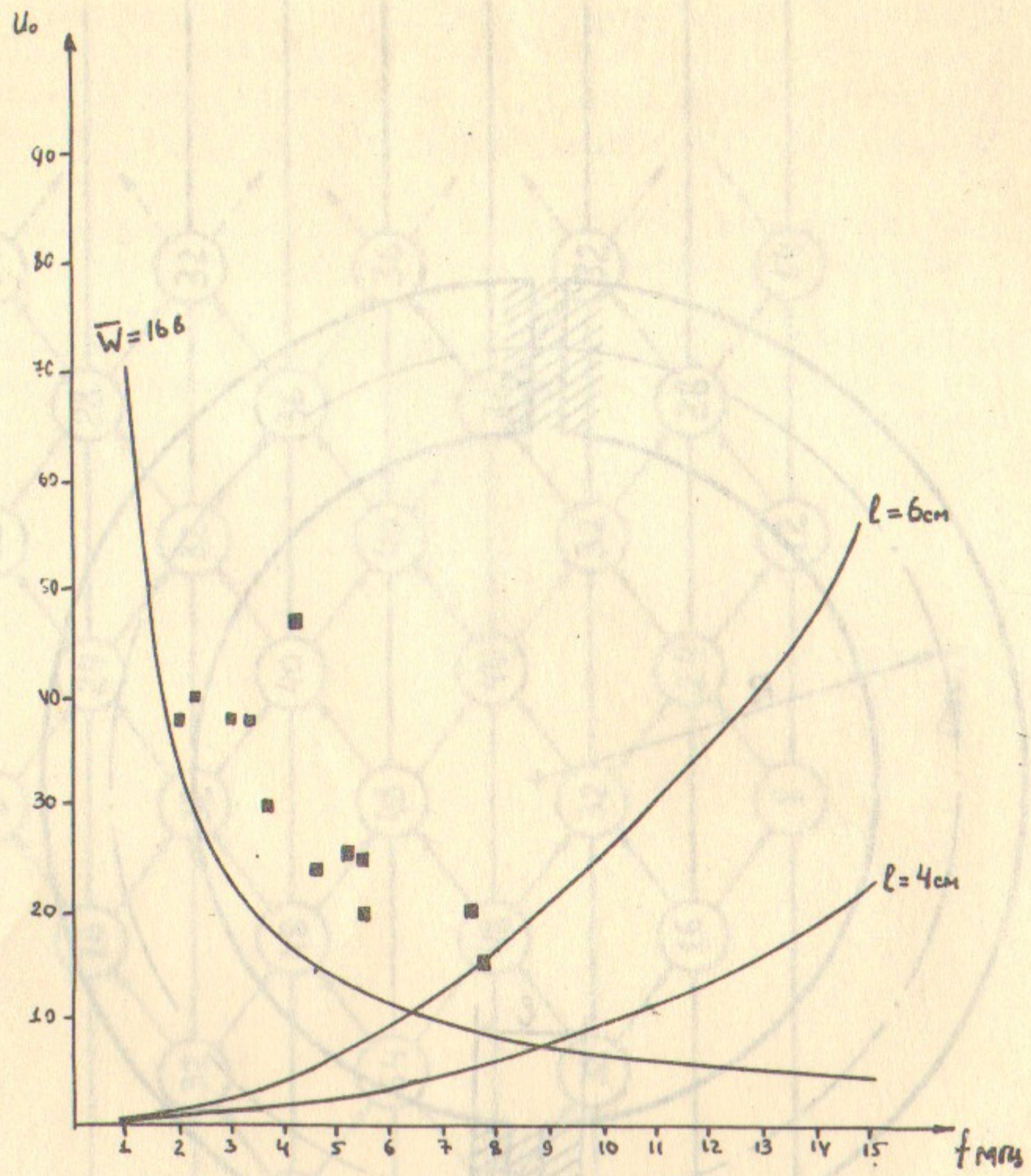


Рис.3

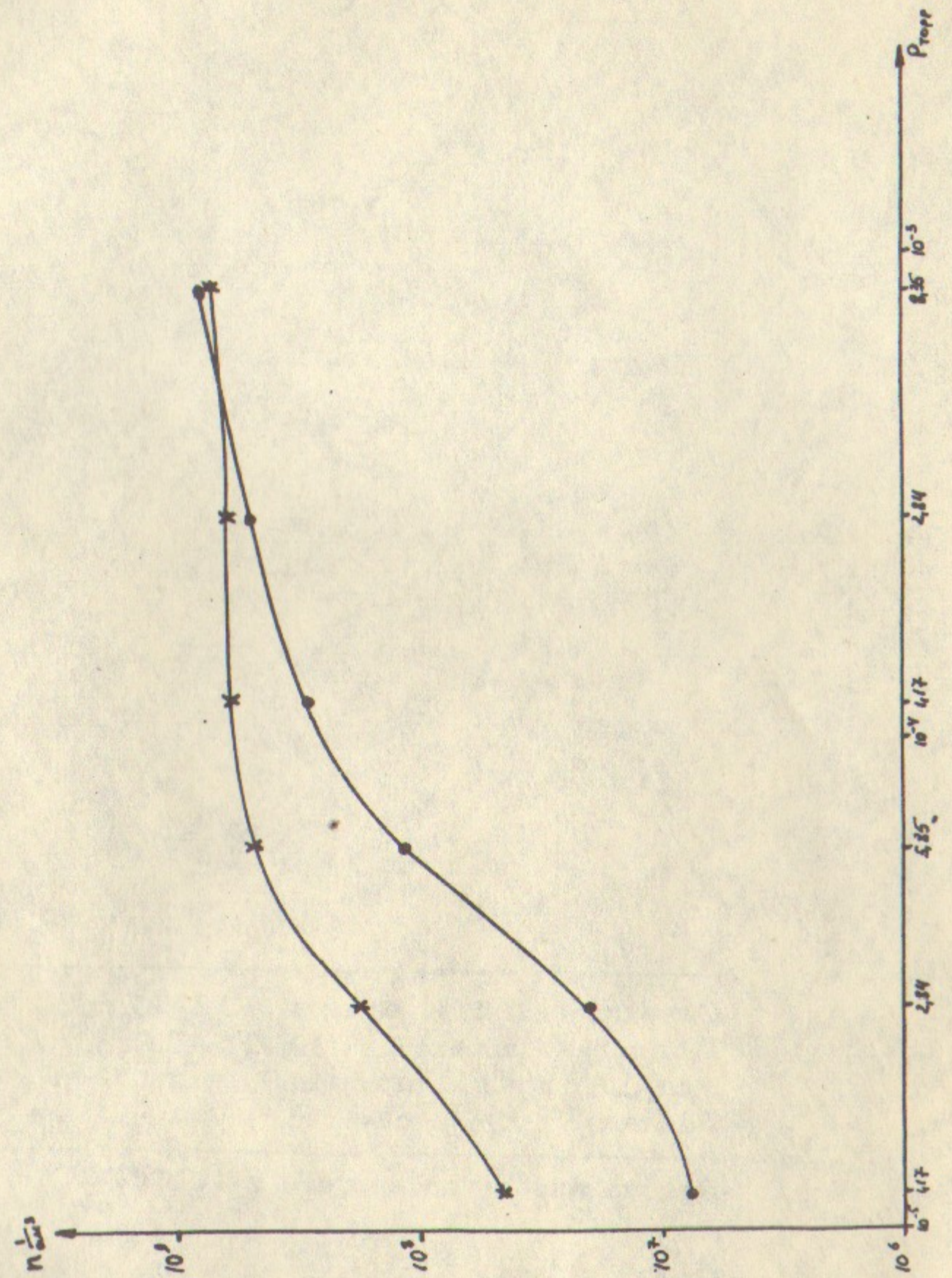


Рис.4