



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА АН СССР

А.А. Кропин, В.С. Роганов, А.В. Самойлов

1048

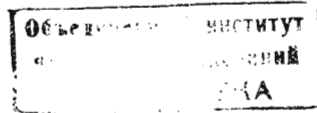
ЭФФЕКТИВНЫЙ ВЫВОД
P⁻-МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ ИЗ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.А. Кропин, В.С. Роганов, А.В.Самойлов

1048

1612/1 чз.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ВЫВОД
P⁻-МЕЗОННЫХ ПУЧКОВ ИЗ СИНХРОЦИКЛОТРОНА
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Дубна 1962 год

Обычно в экспериментах на выведенных пучках π^- -мезонов используются мезоны, вылетевшие под 0° относительно направления протонов и образованные на мишени, наиболее удаленной от центра магнита ускорителя. Увеличение интенсивности таких пучков в десятки раз является насущной, но весьма сложной задачей и требует либо построения ускорителей нового типа^{/1/}, либо создания фокусирующих трактов, состоящих из десятков квадрупольных линз^{/2/}. Кроме этих кардинальных способов решения задачи существуют и другие, более простые способы повышения интенсивности. Естественно, конечно, что они дают значительно меньший выигрыш. К таким способам относятся, например, фокусировка мезонных пучков несколькими квадрупольными линзами, формирование рассеянного магнитного поля ускорителя магнитными массами. Однако и эти методы требуют для своего осуществления больших усилий.

В настоящей работе рассматривается доступный и простой в реализации способ увеличения интенсивности мезонных пучков в несколько раз путем их эффективного вывода с внутренней мишени ускорителя. Увеличение интенсивности пучков достигается за счет использования свойств самого рассеянного магнитного поля ускорителя.

1. Использование свойств рассеянного магнитного поля ускорителя для улучшения фокусировки мезонных пучков.

Если рассматривать траектории π^- -мезонов как лучи, вышедшие из точечного источника-мишени, то окажется, что рассеянное магнитное поле синхроциклотрона, в смысле его воздействия на траектории - лучи обладает свойствами, присущими любой линзе:

а) сферической аберрацией: π^- -мезоны, вышедшие из мишени под различными углами, собираются рассеянным полем в различных точках (рис. 1, где показан ход траекторий π^- -мезонов с энергией 260 Мэв; для других энергий картина примерно такая же);

б) астигматизмом: положение изображения мишени, образованного траекториями π^- -мезонов, идущими в горизонтальной плоскости, не совпадает с положением изображения мишени, образованного траекториями, идущими в вертикальной плоскости;

в) хроматической аберрацией: π^- -мезоны, вылетающие из мишени под одним углом, но с разными энергиями, по-разному отклоняются рассеянным полем (рис.2).

Анализ движения π^- -мезонов в рассеянном поле ускорителя показывает, что сферическую аберрацию и астигматизм можно свести до минимума (а в некоторых случаях и практически уничтожить) путем рационального размещения источника лучей (мишени) и приемника (коллиматора) относительно линзы (рассеянного поля ускорителя). Совершенно ясно, что уменьшение сферической аберрации и астигматизма должно вызвать существенное увеличение интенсивности выведенных π^- -мезонных пучков. Что касается хроматической аберрации, то для ее уменьшения необходимо, как уже упоминалось выше, применять более сложные способы, которые мы здесь рассматривать не будем.

а) Сферическая аберрация.

Как отмечалось в работах /3/, наиболее сильную фокусировку в горизонтальной плоскости испытывают π^- -мезоны, вылетевшие не под углом $\theta = 0$ к направлению протонного пучка, а под углами $10^\circ - 30^\circ$ вглубь ускорителя, причем фокусировка для этих пучков в несколько раз лучше, чем для пучков под углом вылета $\theta = 0$. Если обратиться к рис. 1, то из него видно, что π^- -мезоны, вылетающие в широком угловом интервале ($10^\circ - 30^\circ$) относительно направления пучка протонов, собираются в весьма малую область - порядка 30 см, причем в принципе может реализоваться случай, когда широкий пучок даст практически лишенное сферической аберрации изображение на приемнике (например, на выходном отверстии соответствующим образом установленного коллиматора). Разумеется, что при оценке увеличения интенсивности мезонных пучков, связанных с их выводом не под углом $\theta = 0$, необходимо учитывать угловую зависимость сечения образования π^- -мезонов.

В работах /3/ также отмечалось, что изображение мишени-источника в вертикальной плоскости имеет место для π^- -мезонов с энергией < 100 Мэв, поэтому о сферической аберрации по вертикали можно говорить лишь применительно к этим энергиям. Однако ввиду малости углов вылета π^- -мезонов относительно медианной плоскости (порядка 0,01 рад), при которых они еще могут попасть в коллиматор, сферическая аберрация по вертикали будет пренебрежимо мала по сравнению с другими искажениями. Что касается π^- -мезонов с энергиями > 100 Мэв, то для них, ввиду их дефокусировки по вертикали, имеет смысл искать условия, при которых эта дефокусировка меньше.

Рассмотрим уравнение движения частицы в вертикальной плоскости в азимутально-симметричном магнитном поле:

$$m \ddot{z} - \frac{Ze}{c} v \sin \alpha \frac{dH}{dz} = 0.$$

Здесь α - угол между направлением движения частицы и радиус-вектором \vec{r} , проведенным из центра магнита в рассматриваемую точку траектории; остальные символы имеют общепринятое значение.

Для π^- -мезонов фиксированной энергии характер движения по вертикали (фокусировка или дефокусировка) в спадающем поле ускорителя определяется знаком $\sin \alpha$. Дефокусировка π^- -мезонов имеет место, когда $0 < \alpha < 180^\circ$ ($\sin \alpha > 0$), а фокусировка при $-180^\circ < \alpha < 0$ ($\sin \alpha < 0$). Если π^- -мезоны вылетают в переднюю полусферу из мишени, расположенной, как обычно, в области малых градиентов, то при этом угол α близок к $\pi/2$, $\sin \alpha$ близок к 1; π^- -мезоны дефокусируются. В процессе движения $\sin \alpha$ уменьшается, однако π^- -мезоны попадают в область больших градиентов и дефокусировка, по-прежнему, значительна. Если рассматривать движение π^- -мезонов, вылетевших из мишеней, расположенных на радиусах R_1 и R_2 , где $R_1 < R_2$, то те из них, которые вылетают из мишени, расположенной на R_1 , дефокусируются по вертикали магнитным полем ускорителя слабее. Действительно, в начальный период движения, когда угол $\alpha \approx \pi/2$, градиент в окрестности R_1 меньше, чем в окрестности R_2 , вследствие чего меньше и дефокусировка. Кроме того, частицы, вылетающие с меньших радиусов, сильнее разворачиваются полем с малым градиентом и подходят к зоне больших градиентов с меньшими значениями $\sin \alpha$,

чем частицы, вылетевшие с больших радиусов. Большой разворот этих π^- -мезонов приводит также к тому, что расширяется интервал энергий π^- -мезонов, в котором они приходят в область больших градиентов с $\sin\alpha < 0$ (фокусировка).

Таким образом, уменьшение радиуса установки мезонной мишени приводит к уменьшению дефокусировки по вертикали. Однако при этом возникает ряд сопутствующих явлений.

При уменьшении радиуса установки мишени уменьшается и энергия протонов, бомбардирующих эту мишень. Например, при $R = 277,5$ см $E_p = 680$ Мэв; при $R = 255$ см $E_p = 600$ Мэв. Согласно имеющимся сведениям^{/4,5,6/}, можно ожидать, что при уменьшении энергии протонов на величину $\sim 10\%$ выход π^- -мезонов уменьшится на величину не более 20%. Кроме этого при уменьшении энергии протонов происходит сужение интервала энергий рождающихся π^- -мезонов со стороны высоких энергий на величину, примерно равную уменьшению энергии протонов.

Пучки π^- -мезонов, вылетающих из мишени, смещенной внутрь магнита, обладают большей энергетической расходимостью (хроматической абберацией) по сравнению с пучками, идущими от мишени, установленной на большем радиусе. Это вызывает уменьшение интенсивности мезонных пучков за счет сужения интервала энергий частиц, попадающих в коллиматор. Увеличивается также минимальная энергия π^- -мезонов, при которой они еще могут выйти из магнитного поля и попасть в какой-либо коллиматор. Так, при $R = 277,5$ см $E_{min} = 80$ Мэв; при $R = 255$ см $E_{min} = 110$ Мэв.

б) Астигматизм.

Для интервала энергий π^- -мезонов, в котором траектории образуют изображение мишени как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, можно найти условия, при которых изображение мишени неастигматично, т.е. условия, при которых увеличение интенсивности будет максимальным. Если рассматривать зависимость вертикальной фокусировки от энергии^{/3/}, то видно, что по мере увеличения энергии фокусировка ослабевает; при энергии 100 Мэв пучок становится параллельным, а при энергии π^- -мезонов больше 100 Мэв пучок становится расходящимся. Отсюда ясно, что в этом интервале энергий имеется такая энергия, при которой π^- -мезоны образуют изображение по вертикали в заранее заданной точке (например, на приемнике - выходном отверстии коллиматора).

Ниже приводятся оценки увеличения интенсивности мезонных пучков с учетом всех упомянутых факторов.

II. Результаты численных расчетов увеличения интенсивности π^- -мезонных пучков за счет уменьшения сферической абберации, астигматизма и вертикальной расходимости.

Для количественной оценки предполагаемого увеличения интенсивности π^- -мезонных пучков были проведены расчеты траекторий горизонтального и вертикального движений π^- -мезонов с энергиями от 100 до 340 Мэв, вылетающих под углами θ от 0 до $\pm 30^\circ$ из мишеней, расположенных на расстояниях 277,5 см; 272,5 см; 267,5 см; 262,5 см и 255 см от центра магнита методом, описанным в^{/3/}. Была избрана типовая геометрия, имеющая место на синхроциклотроне ОИЯИ: приемник (коллиматор) длиной 4 м имеет входное отверстие на расстоянии примерно 11 м от мишени вдоль траектории. Диаметр коллиматора - 10 см.

В тех случаях, когда было необходимо учитывать угловую зависимость сечения образования π^- -мезонов, использовались данные, опубликованные в работах^{/5/}, причем недостающие сведения о сечении рождения π^- -мезонов под углом $\theta = 0$ относительно направления пучка протонов получались путем линейной экстраполяции.

На рис. 3 приведена величина углового интервала $\Delta\theta$ (вылетевшие под углом $\theta \pm \Delta\theta/2$ в горизонтальной плоскости π^- -мезоны проходят через коллиматор) в зависимости от угла вылета θ для различных энергий π^- -мезонов. Угол, при котором величина $\Delta\theta$ достигает максимума, соответствует тому случаю, когда на выходном отверстии коллиматора образуется свободное от сферической аберрации изображение мишени. Как видно из графиков, имеет место значительное увеличение углового интервала в максимуме по сравнению с вариантом вывода пучка π^- -мезонов под углом $\theta = 0$. На рис. 4 приведены аналогичные зависимости для интервала углов в вертикальном направлении. На рис. 5 показано произведение этих угловых интервалов (телесный угол), внутри которого π^- -мезоны попадают на приемник в зависимости от угла вылета π^- -мезонов из мишени. На рис. 6 показано увеличение выхода π^- -мезонов при выводе их под положительными углами с учетом зависимости сечения образования π^- -мезонов от угла. За единицу принят выход π^- -мезонов под углом $\theta = 0$. Из графиков видно, что под углом $\theta = \theta_{\text{оптим}}$ выход возрастает в 2-4 раза по сравнению с $\theta = 0$.

При количественных оценках эффектов, связанных с выводом π^- -мезонов с меньших радиусов, было обнаружено следующее. Перемещение мишени вглубь магнита сказывается на величине горизонтальной фокусировки весьма незначительно. Так, перемещение мишени с $R = 277,5$ см до $R = 255$ см приводит к изменению горизонтальных угловых размеров на величину порядка 10% для всех углов вылета. Хроматическая аберрация увеличивается примерно в 1,5-2 раза в зависимости от энергии π^- -мезонов и радиуса, с которого они вылетают. Угловая зависимость хроматической аберрации невелика: в пределах углов $\pm 30^\circ$ она изменяется на величину $\sim 20\%$.

На рис. 7 приведена зависимость углового интервала по вертикали $\Delta\beta(E_\pi)$, из которого π^- -мезоны, вылетевшие под $\theta = 0$ в горизонтальной плоскости проходят через коллиматор с выходным отверстием $d = 10$ см для различных радиусов установки мишени, а на рис. 8 - отношение числа π^- -мезонов, образованных в мишенях, расположенных на радиусах 255 см и 262,5 см, попадающих в коллиматор, к числу π^- -мезонов, попавших в коллиматор из мишени, установленной на радиусе 277,5 см, с учетом уменьшения выхода π^- -мезонов за счет уменьшения энергии протонов и увеличения хроматической аберрации. Из рис. 8 видно, что заметное увеличение выхода π^- -мезонов за счет смещения мишени вглубь ускорителя имеет место лишь при энергиях π^- -мезонов в интервале 100-150 Мэв для $R = 262,5$ см и 120-180 Мэв для $R = 255$ см. Энергии, при которых эти кривые достигают максимумов, соответствуют тому случаю, когда изображение мишени по вертикали образуется на выходном отверстии коллиматора. Для других углов вылета в горизонтальной плоскости увеличение выхода π^- -мезонов из-за уменьшения дефокусировки по вертикали по величине будет в пределах 10-20% тем же, значение же энергии, при котором выигрыш достигает максимума, отличается на 10-20% по сравнению со значением энергии для π^- -мезонов, образованных под $\theta = 0$.

Если, как упоминалось выше, установить коллиматор таким образом, чтобы на его выходном отверстии образовалось изображение мишени как по вертикали, так и по горизонтали (свести до минимума астигматизм), то выигрыш в интенсивности достигает своего наибольшего значения - десятков раз. На рис. 9 показана в относительных единицах зависимость числа π^- -мезонов с энергией 110 Мэв, проходящих через коллиматор ϕ 10 см от угла вылета в горизонтальной плоскости θ , из мишени, расположенной на $R = 262,5$ см, причем за единицу принят выход π^- -мезонов под углом $\theta = 0$ из мишени, расположенной на радиусе $R = 277,5$ см. Из графиков видно, что выигрыш в интенсивности в той геометрии, где сведена до минимума сферическая абберация и астигматизм, весьма внушителен.

З а к л ю ч е н и е

1. За счет сведения до минимума сферической абберации (вывода π^- -мезонов под углами $\theta = 10^\circ - 30^\circ$) имеет место увеличение выхода π^- -мезонов в 2-4 раза для всего рассматриваемого интервала энергий (100-340 Мэв).

2. За счет уменьшения вертикальной расходимости π^- -мезонных пучков при движении мишени вглубь ускорителя выход π^- -мезонов возрастает для мезонов малых энергий (100-180 Мэв).

3. Для пучков π^- -мезонов в интервале энергий 100 - 180 Мэв максимальное увеличение интенсивности за счет сведения до минимума сферической абберации и астигматизма, согласно расчетам, может достигать примерно 20 раз. Диафрагмирование пучков по вертикали выпускным окном вакуумной камеры (высота окна 9 см) снижает максимальное увеличение интенсивности в 3 раза. Расширение окна до 20 см практически приводит к отсутствию диафрагмирования пучков для коллиматоров диаметром 10 см.

Осуществляемое в настоящее время расширение выпускного окна и увеличение диапазона перемещений мишени синхроциклотрона по радиусу и азимуту открывает широкую возможность для эффективного вывода π^- -мезонных пучков.

Л и т е р а т у р а

1. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолотчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, А.А.Кропин, Лю Нэ-гуань, В.С.Рыбалко, А.Л.Савенков, Л.А.Саркисян. А.Э. 8, 189, 1960.
2. A.Citron, H.Øverds CERN Sc/143 (1957). A.Citron, C.Delorme, F.J.M.Farley, L.Goldzahl, J.Heintze, E.G.Michaelis, M.Morpurgo, Øverds
Материалы Берклиевской конференции по ускорителям, 1960.
3. В.Г.Кириллов-Угрюмов, А.А.Кропин, В.С.Роганов, А.В.Самойлов. ОИЯИ, Р-663 и Р-664, 1961.
4. Г.Бете, Ф. Гофман. Мезоны и поля, т. II, гл. 49, М., 1957.
5. М.Г.Мещеряков, И.К.Взоров, В.П.Зрелов, Б.С.Неганов, А.Ф.Шабудин. ЖЭТФ, 31,55,1956.
А.Г.Мешковский, Ю.С.Плигин, Я.Я.Шаламов, В.А.Шебанов. ЖЭТФ, 32, 1328,1957.
В.П.Джелепов, В.С.Киселев, К.О.Оганесян, В.В.Флягин. Труды 10-й Рочестерской конференции, 1960 г.
Л.С.Ажгирей, И.К.Взоров, В.П.Зрелов, М.Г.Мещеряков, В.И.Петрухин. ЖЭТФ, 34, 1357, 1958.
В.М.Сидоров. ЖЭТФ, 28, 727, 1955.
В.Г.Вовченко, Г.Гельфер, А.С.Кузнецов, М.Г.Мещеряков, В.Святковский. ЖЭТФ, 39, 1557, 1960.
6. А.Ф.Дунайцев, Ю.Д.Прокошкин. ЖЭТФ, 38, 747, 1960.
Ю.Д.Прокошкин, А.А.Тяпкин. ЖЭТФ, 32, 750, 1957.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июля 1962 года.

Энергия π^- -мезонов 260 Мэв

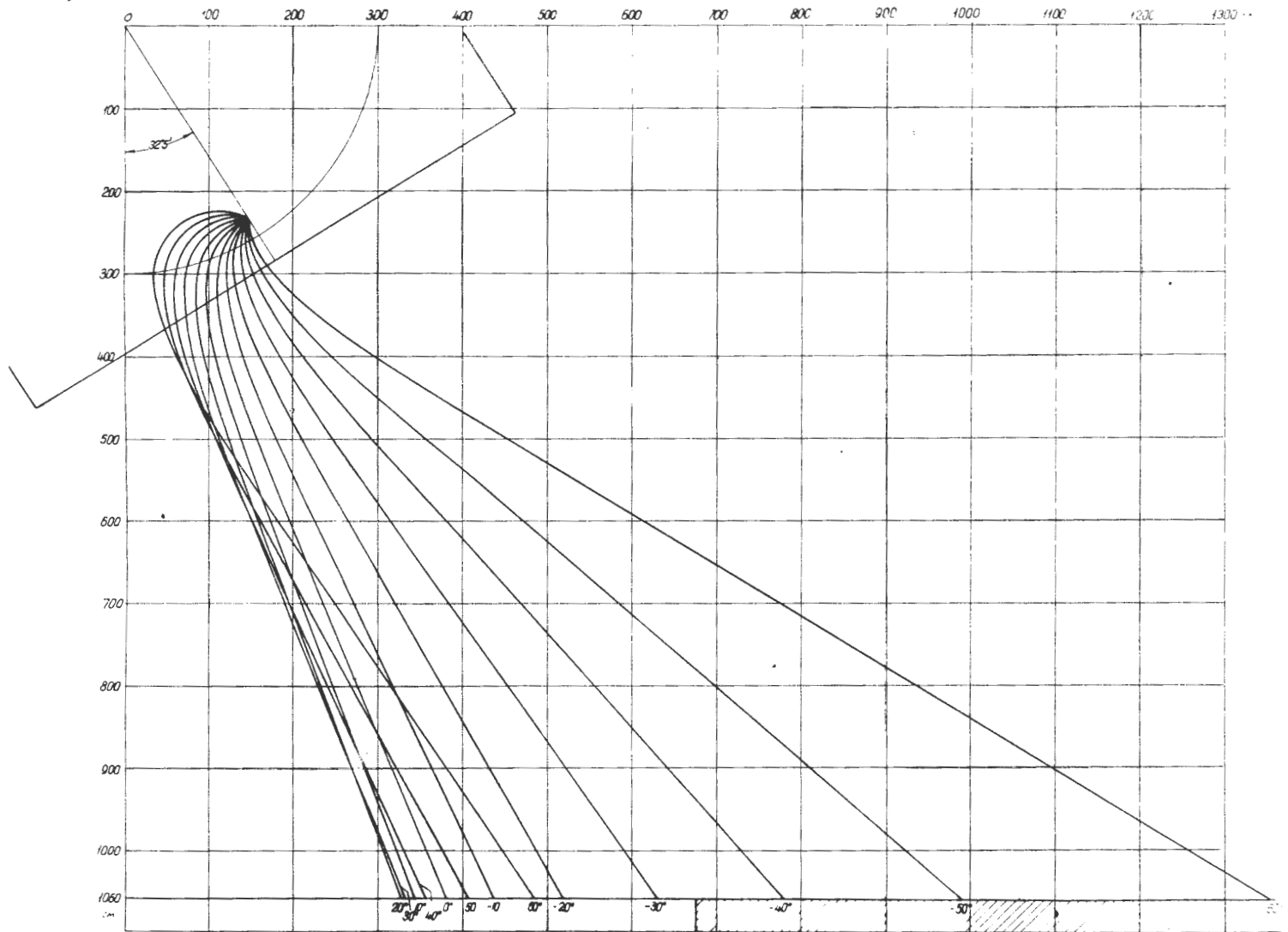


Рис. 1. Траектории π^- -мезонов с энергией 260 Мэв, образованных в мишени под различными углами θ относительно направления протонного пучка. ($R = 277,5$ см).

Траектории π^- -мезонов под 0°

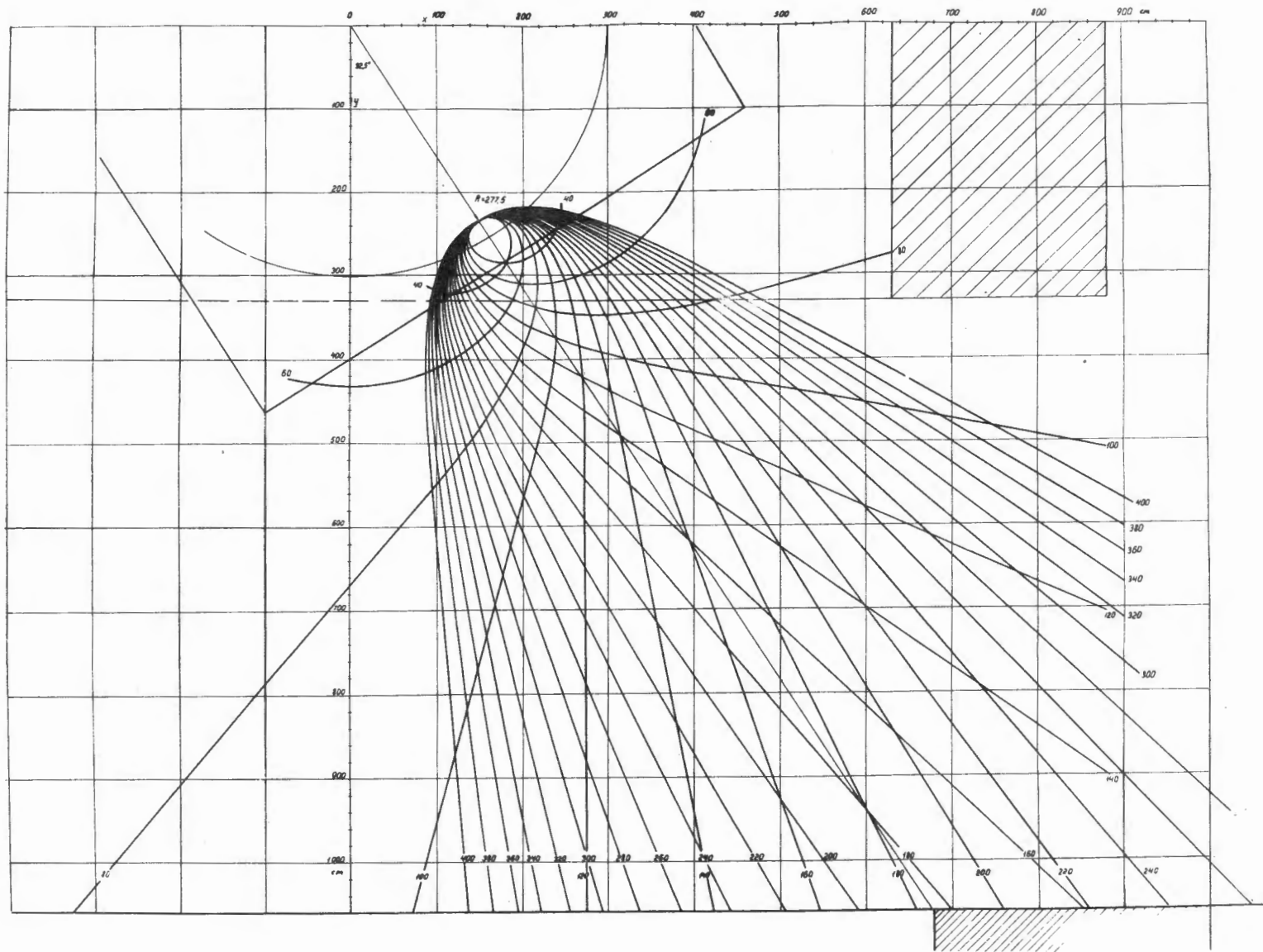


Рис. 2. Траектории π^- -мезонов различных энергий, образованные под углом $\theta=0$ относительно направления протонного пучка для прямого и обратного направления магнитного поля ускорителя. ($R = 277,5$ см).

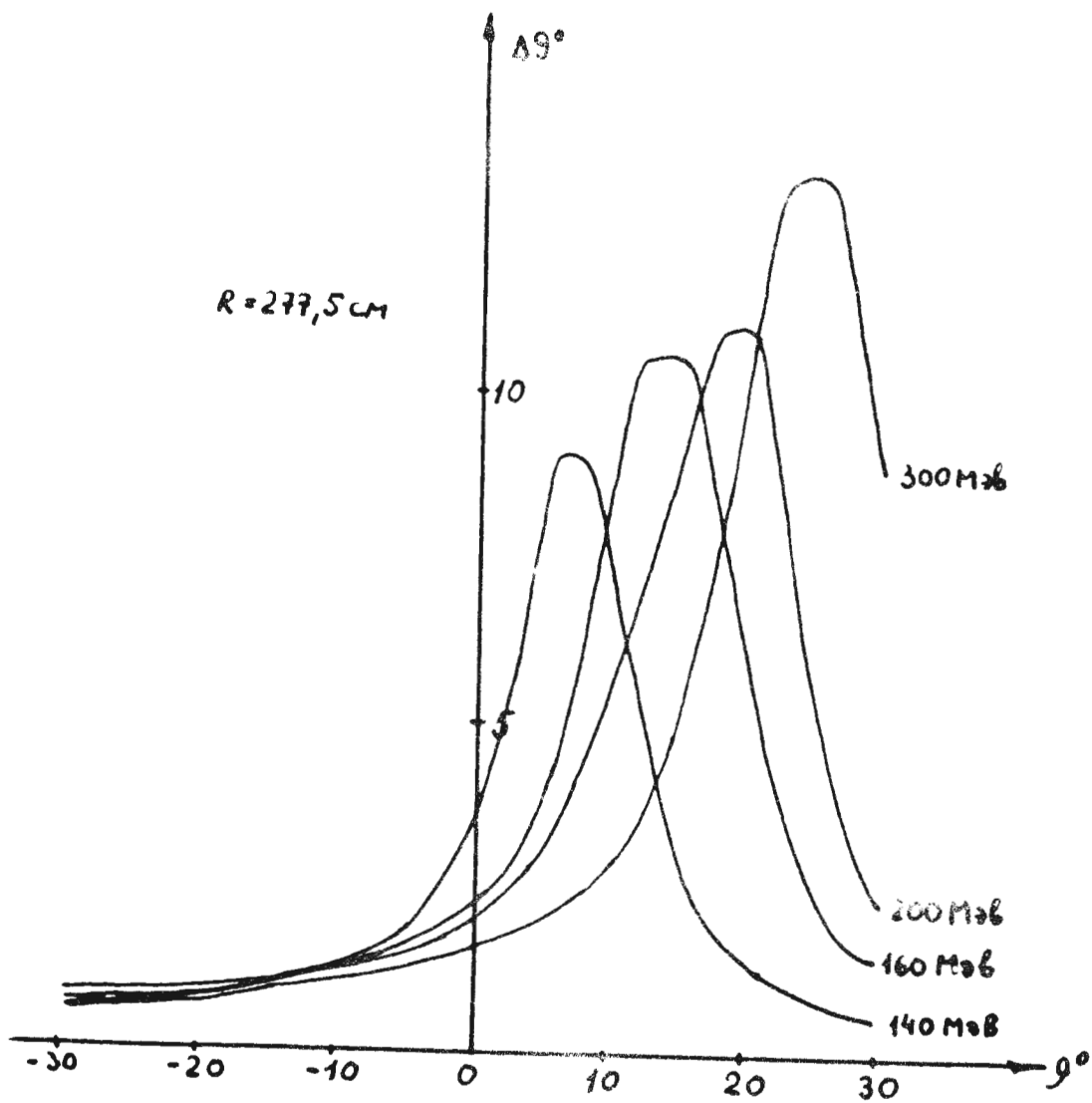


Рис. 3. Горизонтальные угловые размеры пучков π^- -мезонов различных энергий, пропускаемых коллиматором ϕ 10 см в зависимости от угла вылета θ относительно направления пучка протонов в горизонтальной плоскости ($R = 277,5$ см).

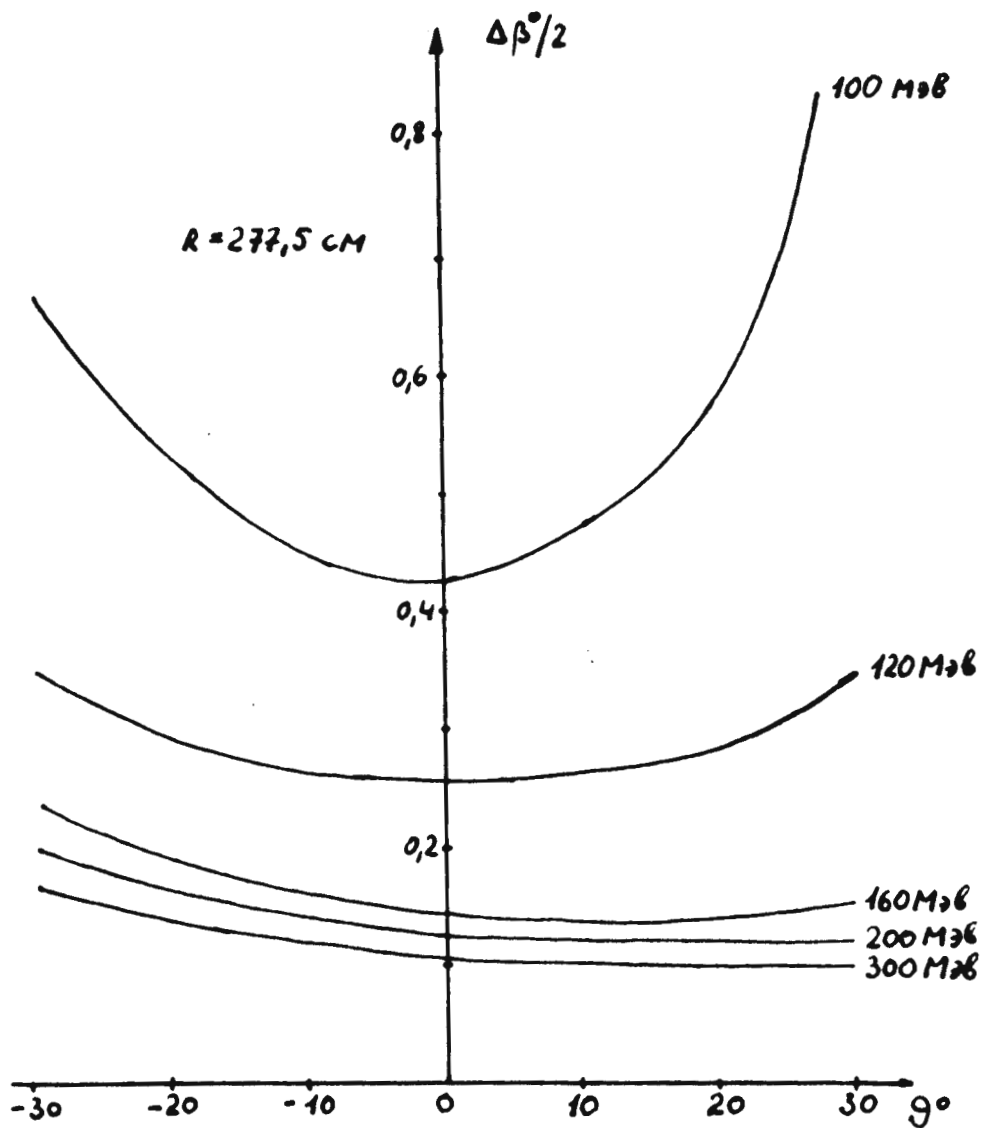


Рис. 4. Вертикальные угловые размеры пучков π^- -мезонов различных энергий, пропускаемых коллиматором ϕ 10 см в зависимости от угла вылета θ в медианной плоскости ($R = 277,5 \text{ см}$).

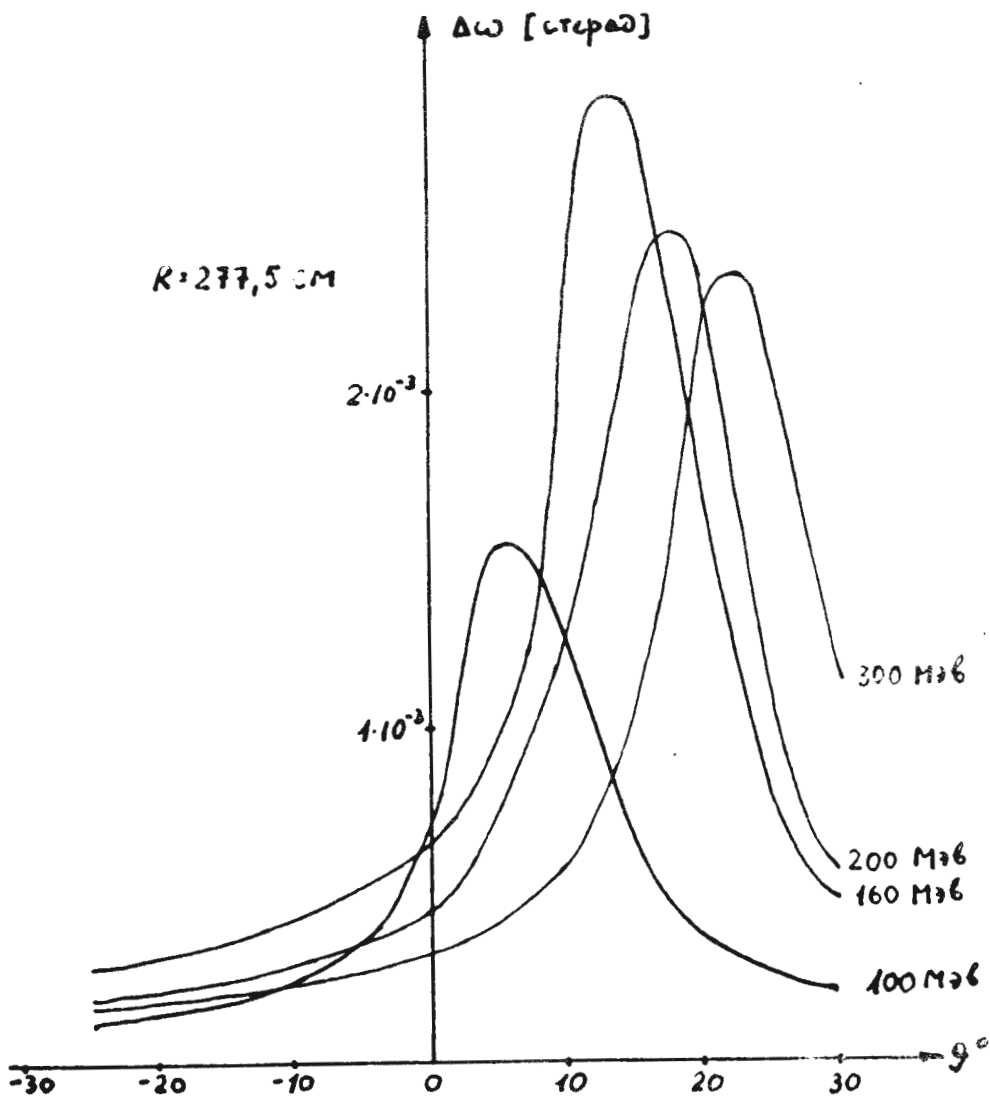


Рис. 5. Размеры телесного угла пучков π^- -мезонов различных энергий, пропускаемых коллиматором ϕ 10 см в зависимости от угла вылета θ в медианной плоскости ($R = 277,5$ см).

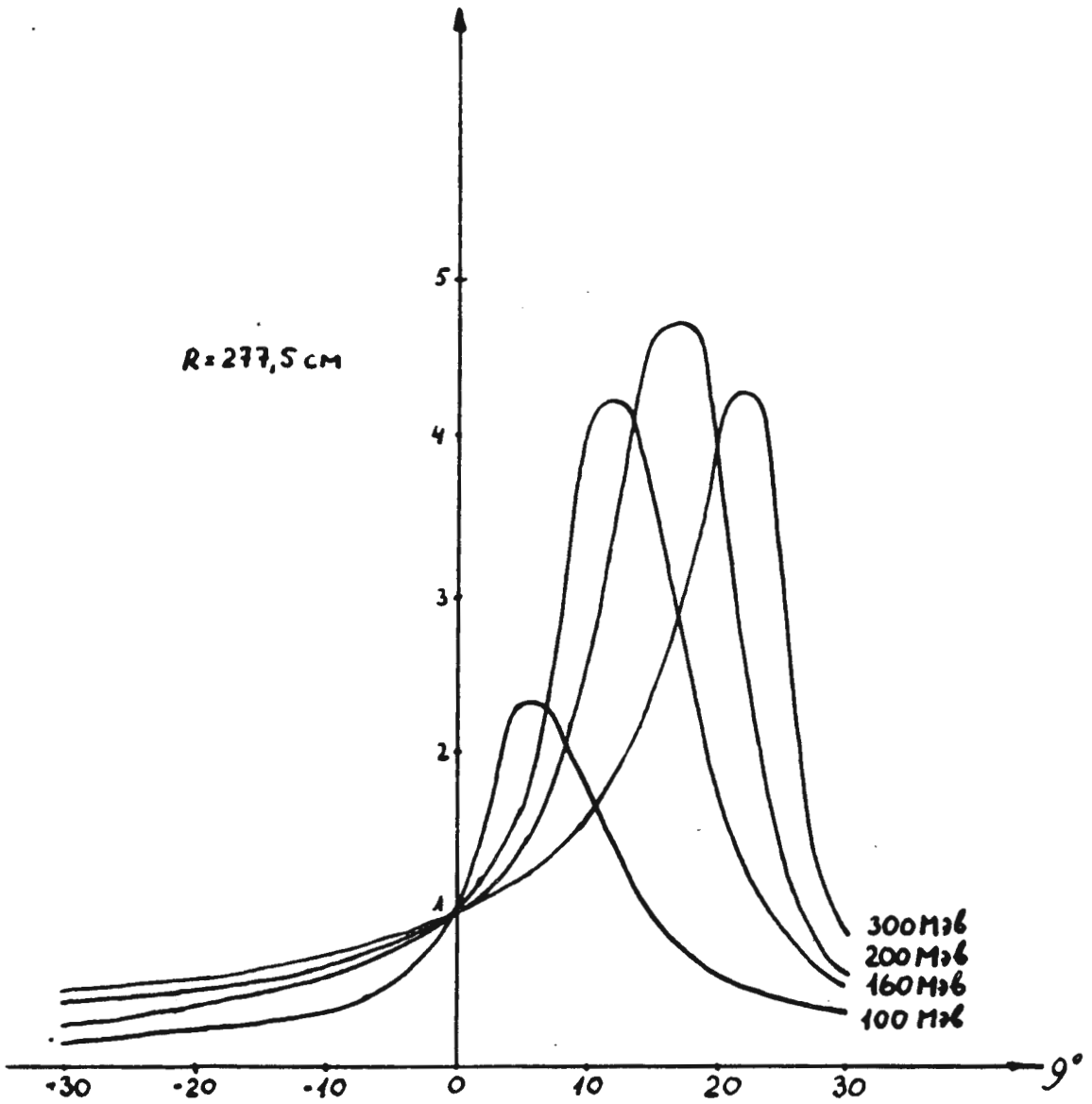


Рис. 6. Выход π^- -мезонов различных энергий в зависимости от угла вылета θ в медианной плоскости (за единицу принят выход π^- - под углом $\theta=0^\circ$; $R = 277,5$ см, диаметр коллиматора 10 см).

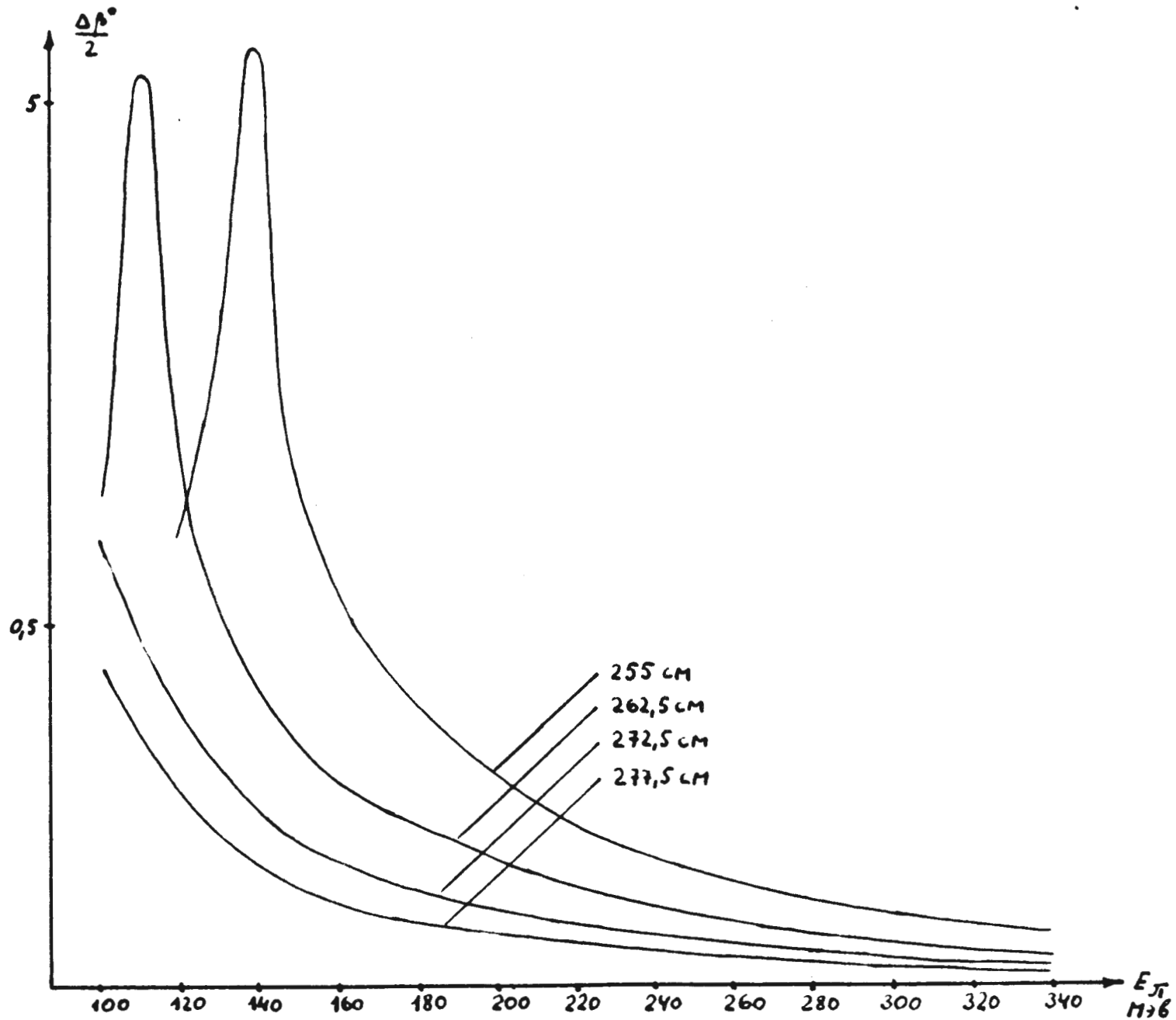


Рис. 7. Вертикальные угловые размеры пучков π^- -мезонов различных энергий, образованных под углом $\theta = 0^\circ$, пропускаемые коллиматором $\phi 10$ см, в зависимости от радиуса установки мишени.

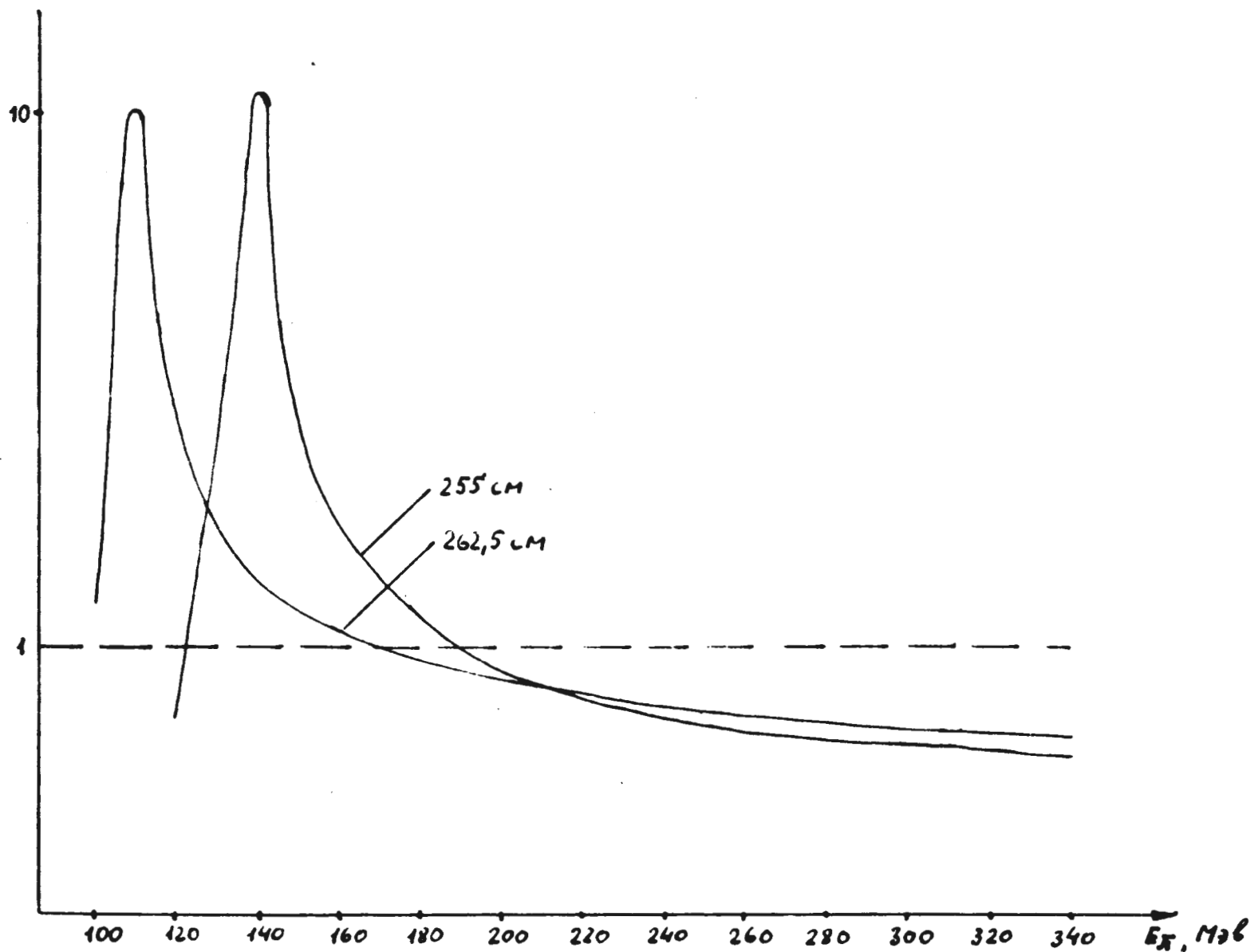


Рис. 8. Увеличение выхода π^- -мезонов различных энергий, образованных под углом $\theta = 0^\circ$ в зависимости от радиуса установки мишени (за единицу принят выход π^- -мезонов из мишени, расположенной на радиусе $R = 277,5$ см, диаметр коллиматора 10 см).

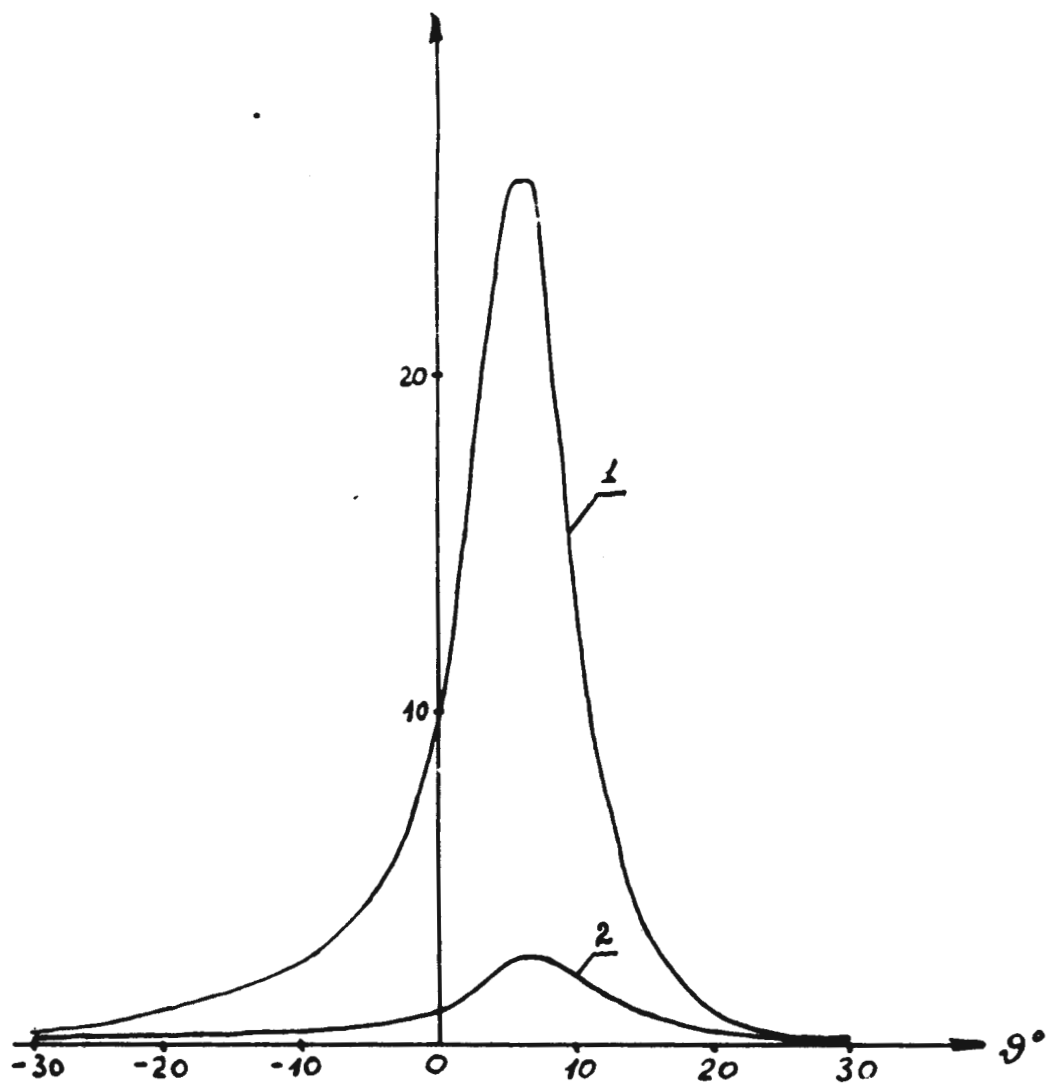


Рис. 9. Зависимость числа π^- -мезонов с энергией 110 Мэв, проходящих через коллиматор ϕ 10 см, от угла вылета θ в горизонтальной плоскости. (За единицу принят выход π^- -мезонов под углом $\theta = 0^\circ$ из мишени, расположенной на радиусе $R = 277,5$ см). Кривая 1 - выход π^- -мезонов из мишени, расположенной на радиусе $R = 262,5$ см. Кривая 2 - выход π^- -мезонов из мишени, расположенной на радиусе $R = 277,5$ см.