

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

P-410

В.С. Кладницкий

ФАКТОР ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА
ДЛЯ ПРОТОННОГО ЛИНЕЙНОГО
УСКОРИТЕЛЯ

ЖуТиф, 1960, т30, в.2, с178-185.

P-410

В.С. Кладницкий

ФАКТОР ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА
ДЛЯ ПРОТОННОГО ЛИНЕЙНОГО
УСКОРИТЕЛЯ

484/6

Объединенный институт
ядерного исследования
БИБЛИОТЕКА

А н н о т а ц и я

С помощью электролитической ванны исследован характер распределения напряженности электрического поля по оси ускоряющей системы протонного линейного ускорителя для симметричного зазора и зазора с сеткой клистронного типа. На основе этих измерений определена зависимость фактора времени пролета T от длины периода ускоряющей системы L_n и полученные результаты сопоставлены с известными расчетными формулами. Показано, что учет проникновения поля за плоскость сетки является существенным при определении T , особенно для малых L_n . Для увеличения эффективности ускоряющей системы желательно обеспечить отношение длины периода системы к апертуре дрейфовых трубок $L_n/d' \geq 4$.

В в е д е н и е

В линейном протонном ускорителе используется цилиндрический резонатор, нагруженный расположенными по его оси дрейфовыми трубками. Такой ускоритель может быть представлен как последовательность жестко связанных между собой единичных отсеков /рис.1/, возбуждаемых на одинаковой частоте. Протоны ускоряются продольной компонентой электрического высокочастотного поля, действующего на частицы в зазорах между трубками.

Если время прохождения протоном ускоряющего зазора мало по сравнению с периодом высокочастотных колебаний, то прирост энергии частицы, проходящей по оси системы, будет равен

$$\Delta W = q E_g \cos \phi,$$

где E_g - амплитудное значение аксиальной компоненты электрического поля, а ϕ - фаза поля в момент пролета частицы. Однако в реальном ускорителе приходится принимать во внимание изменение поля за время пролета зазора. Кроме того, в зазоре конечной протяженности поле в той или иной степени провисает внутри дрейфовых трубок через центральную апертуру для прохода пучка и распределение поля на оси зависит от геометрических факторов, характеризующих ускоряющую систему.

Введенное Пановским /1/ понятие фактора времени пролета T учитывает влияние указанных выше обстоятельств на величину истинного прироста энергии протона в данном зазоре:

$$T = \int E_z(z) \cos \frac{2\pi z}{L_n} / \int E_z(z) dz, \quad /1/$$

где E_z аксиальная компонента электрического поля и L_n длина периода ускоряющей системы. По существу, T представляет собой отношение реального прироста энергии частицы к идеальной величине $q E_g \cos \phi$. Если предположить, что поле в зазоре однородно и равно нулю в дрейфовых трубках /2/, то интегрирование /1/ дает

$$T = \sin \frac{\pi g_n}{L_n} / \frac{\pi g_n}{L_n}, \quad /2/$$

где g_n/L_n представляет собой отношение длины зазора к длине всего периода; в нашем случае оно постоянно для всей ускоряющей системы и равно 0,25.

Однако для расчета ускоряющей системы необходимо знать истинный характер распределения поля на оси. Точному расчету это поле не поддается. Приведенные в литературе выражения для фактора времени пролета^{/2,3/} получены с помощью теоретической аппроксимации распределения поля в зазоре.

Для симметричного зазора, в котором не имеется сетки или фольги на входе в дрейфовую трубку, фактор времени пролета определяется таким выражением :

$$T = \frac{\sin \pi g_n / \mathcal{L}_n}{\pi g_n / \mathcal{L}_n} \frac{I_0(2\pi r / \mathcal{L}_n)}{I_0(2\pi A_n / \mathcal{L}_n)} \quad /3/$$

где I_0 функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента, а A_n диаметр центрального отверстия дрейфовых трубок. Появление здесь дополнительного множителя по сравнению с /2/ связано с учетом проникновения поля внутрь дрейфовых трубок. Для линейного ускорителя-инжектора бэватрона в котором вход в каждую дрейфовую трубку закрыт сеткой клистронного типа^{/2,3/}, этот дополнительный множитель приобретает такой вид:

$$F = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{I_0(2\pi r / \mathcal{L}_n)}{I_0(2\pi A_0 / \mathcal{L}_n)} \right] \quad /4/$$

До настоящего времени в литературе нет экспериментальных данных относительно фактора времени пролета для трубок с сетками такого типа. Для вычисления T надо знать распределение поля в зазоре. Напряженность поля может быть измерена непосредственно в резонаторе по методу локального возмущения поля небольшим проводником или диэлектриком, вносимым в зазор^{/4/}. Это связано с необходимостью создания специальной модели отсека резонатора.

Другая возможность заключается в моделировании поля в зазоре с помощью электролитической ванны. Использование уравнения Лапласа для представления электрического высокочастотного поля справедливо, если размер интересующей нас области мал по сравнению с длиной волны λ . При длине волны высокочастотных колебаний в резонаторе порядка 1,5 - 2 метров это условие достаточно хорошо выполняется во всей интересующей нас области длин зазоров. Если нам известно распределение поля в зазоре, то для вычисления пролетного фактора можно воспользоваться непосредственно выражением /1/.

Электролитическая ванна была использована впервые для определения пролетного фактора протонного линейного ускорителя в ФТИ АН УССР в 1948 году. На основе измерения распределения потенциала в зазоре был получен фактор времени пролета для системы с сетками, существенно отличающимися по своей конструкции от берклиевских.

1. Экспериментальная установка

Для измерения распределения напряженности поля или потенциала в ускоряющем зазоре можно воспользоваться цилиндрической симметрией ускоряющей системы и поместить в ванну модель, представляющую собой продольное сечение дрейфовых трубок плоскостью, проходящей через ось системы. Модель устанавливалась в ванне таким образом, чтобы поверхность электролита совпадала с плоскостью разреза.

1.1. Электролитическая ванна

Электролитическая ванна вместе с устройством для крепления модели показана на рис. 2. Ванна изготовлена из оргстекла и представляет собой сосуд прямоугольной формы размером (700 x 550 x 300) мм. На раме из дюралевого уголка /а/, опирающейся на четыре стойки, жестко связанные общим основанием ванны, собран механизм перемещения зонда. Высота стоек регулируется, что позволяло устанавливать плоскость рамы параллельно уровню жидкости в ванне. Каретка /б/ с зондом /г/ перемещалась по двум направляющим параллельно короткой стороне ванны и могла быть закреплена в любом месте с помощью стопорного устройства. Ползунок /в/, на котором укреплен зонд, передвигался вдоль каретки по направляющей типа "ласточкин хвост" с помощью ходового винта /д/ с маховичком. Механизм вертикального перемещения зонда позволяет производить тонкую регулировку глубины погружения зонда в электролит. За один оборот подающего механизма зонд перемещается на 0,2 мм.

Внутри цилиндрической верхней части зонда установлена небольшая лампочка, освещающая крест из тонкой проволоки /е/. Этот крест проектировался на прозрачный лист оргстекла /ж/, закрепленный на специальных стойках над

центральной частью ванны. На листе укреплялась бумага, на которой отмечалось положение зонда.

При измерении распределения напряженности поля или потенциала на оси системы каретка устанавливалась таким образом, чтобы зонд находился на осевой линии, и закреплялась на этом положении. Вращением маховичка ходового винта зонд перемещался вдоль оси.

1.2. Выбор материала электродов и электролита

Помимо удовлетворения обычных требований относительно однородности и легкой заменимости электролита, при его выборе стремятся чтобы электролит не вступал в химические реакции с веществом модели и зонда и чтобы поляризационные явления /5/ на границе электрод-электролит были возможно меньшими. В результате предварительных экспериментов с различными материалами модели и различными электролитами было найдено, что в наибольшей степени указанным выше требованиям удовлетворяет комбинация электродов из посеребренной меди с обычной водопроводной водой в качестве электролита.

Рабочая частота напряжения, подаваемого на электроды, при всех измерениях была равна 500 гц.

1.3. Устройство модели

Период ускоряющей системы моделировался двумя половинами дрейфовых трубок, укрепленных с помощью изолирующих подвесок на общем основании /з/, рис. 2/. Система крепления обеспечивала соосность трубок и позволяла изменять зазор между ними для моделирования периодов различной длины. Использовались модели трубок без сеток с 20-ти миллиметровым центральным отверстием для пучка, а также трубок с сетками клистронного типа /рис.3/ с апертурой 20 и 35 мм. Сетка, изготовленная из вольфрамовой полосы толщиной 50 микрон и шириной 2 мм, устанавливалась так, что ее край находился в 1 мм от среза трубки.

1.4. Электрическая схема

Измерения распределения потенциала в зазоре проводились по обычной схеме, широко используемой при работе с электролитической ванной /рис.4 а//.

С помощью генератора звуковой частоты между трубками создавалась разность потенциалов 20-30 вольт. Напряжение на зонд задавалось мостом из 2-х стандартных магазинов сопротивления типа Р 14 с общим сопротивлением 2 ком. Определение нулевого положения зонда производилось на слух по телефону или визуально с помощью катодного вольтметра А4-М2.

Для измерений напряженности электрического поля /рис.4 /б/ / в ванну помещалось два зонда, расстояние между которыми составляло 3 мм. Уменьшить расстояние между зондами не представлялось возможным из-за влияния мениска, образующегося вокруг одного зонда, на распределение потенциала в точке измерения другим зондом. Сигналы с зондов подавались на вход дифференциального усилителя, а результирующий сигнал отсчитывался по катодному вольтметру.

1.5. Точность измерений

Ошибка при измерении напряженности поля или потенциала в зазоре обусловлена главным образом неточностью в установке модели в ванне и в переносе положения зонда на бумагу. Она составляет в нашем случае $\pm 0,2 - 0,3\%$. С учетом ошибки, вносимой электрической схемой измерений, полная относительная ошибка составляет $\pm 0,5\%$.

2. Результаты измерений и обсуждение

Изучался характер распределения напряженности электрического поля по оси ускоряющей системы при различных длинах ускоряющих периодов для симметричного зазора и зазора с сеткой клистронного типа. Преимущество метода электролитической ванны состоит в том, что малые размеры зонда по сравнению с размерами пробного тела позволяют измерить величину напряженности поля на оси в плоскости сетки и непосредственно за сеткой.

Характер распределения напряженности электрического поля по оси симметричного зазора для нескольких значений ускоряющего периода показан на рис. 5. Распределение обладает симметрией относительно геометрического центра зазора, который в этом случае совпадает с электрическим центром /2/. Величина апертуры дрейфовых трубок - 20 мм и отношение диаметра дрейфо-

вых трубок к апертуре $d/d' = 3,8$ оставались при этом неизменными. Можно видеть, что по мере уменьшения длины ускоряющего периода проникновение поля внутрь дрейфовых трубок начинает играть все более заметную роль в распределении. С ростом величины отношения длины периода к апертуре L_n/d' в средней части распределения появляется характерный провал, глубина которого увеличивается.

Сопоставление распределения поля в симметричном зазоре и равном ему по длине зазоре с сеткой клистронного типа, приведенное на рис. 6, показывает, что сетка на выходе из зазора мало влияет на распределение поля в его первой половине. Однако электрический центр зазора с сеткой смещается относительно геометрического и на выходе из зазора поле спадает более круто. Несовмещение электрического и геометрического центров зазора заметно до величины ускоряющего периода 14-16 см, что соответствует $g/d' = 2$. Существенно отметить, что поле в плоскости сетки и непосредственно за ней еще достаточно велико. Реальную сетку клистронного типа нельзя отождествлять с непрозрачной для поля мембраной и учет проникновения поля в апертуру трубки с сеткой вносит существенный вклад в величину T , особенно для малых L_n .

Полученная на основе этих измерений зависимость T от длины ускоряющего периода для симметричного зазора и зазора с сеткой клистронного типа при апертуре 20 мм приведена на рис. 7. Кривая для симметричного зазора в пределах ошибок измерений совпадает с кривой, рассчитанной по формуле /3/. Кривая для зазора с сеткой в своей начальной части, соответствующей малым L_n , значительно отличается от полученной по /4/.

Расчеты показали, что если в экспериментальных графиках распределения напряженности поля по оси зазоров с сеткой отбросить ту часть, которая соответствует проникновению поля за сетку и считать, что в плоскости сетки поле спадает до нуля, то расхождение между кривыми 1 и 2 на рис. 7 существенно уменьшается. Таким образом, напрашивается вывод, что формула /4/ получена в предположении полной непрозрачности сетки для проникновения поля. Быстрый спад T с уменьшением L_n объясняется проникновением поля в апертуру дрейфовых трубок. По теоретическим формулам /3/ и /4/ T должно монотонно возрастать с ростом L_n до величины $T=0,9$. На самом

деле в пределах исследованной области значение T растет только до некоторой сравнительно небольшой величины и далее остается постоянным, а возможно и спадает. Сопоставление кривых для зазора с сеткой и симметричного зазора показывает, что при $g/d' \geq 3$ влияние сетки на T мало.

На рис. 8 приведена зависимость T от \mathcal{L}_n для дрейфовых трубок с сетками клистронного типа при апертуре 35 мм /отношение $d/d' = 2,17/$. Кривая располагается значительно ниже, чем соответствующая кривая для трубок с 20-ти миллиметровой апертурой и эффективность ускоряющей системы при прочих равных условиях сильно снижается.

Представляется разумным предположение^{1/6/}, что характер распределения аксиального поля в зазоре зависит от отношений геометрических параметров d/d' , g/d' , определяющих "форму" зазора. При таком предположении полученные кривые применимы для систем с любым значением d/λ . При расчете ускоряющей системы разумно выбрать $\mathcal{L}_n/d' \geq 4$.

Пользуюсь возможностью выразить благодарность сотрудникам экспериментальных мастерских Лаборатории высоких энергий, принимавшим участие в изготовлении экспериментальной установки, а также А.Б.Кузнецову и Н.Б.Рубину за полезное обсуждение результатов.

Рукопись поступила в издательский отдел 29 сентября 1959 года.

Л и т е р а т у р а

1. W. Panofsky UCRI-1216 (February, 1951).
2. L. Alvarez et al. Rev. Sci. Instr. 26, 111 (1955).
3. B. Cork. Rev. Sci. Instr. 26, 210 (1955).
4. M. Septier. Journ. Phys. et Rad. 16, 108 (1955).
5. P. Einstein. Brit. Journ. Appl. Phys. 2, 49 (1951).
6. D. Wilkins. A.E.R.E. GP/R 1613 (March, 1955).

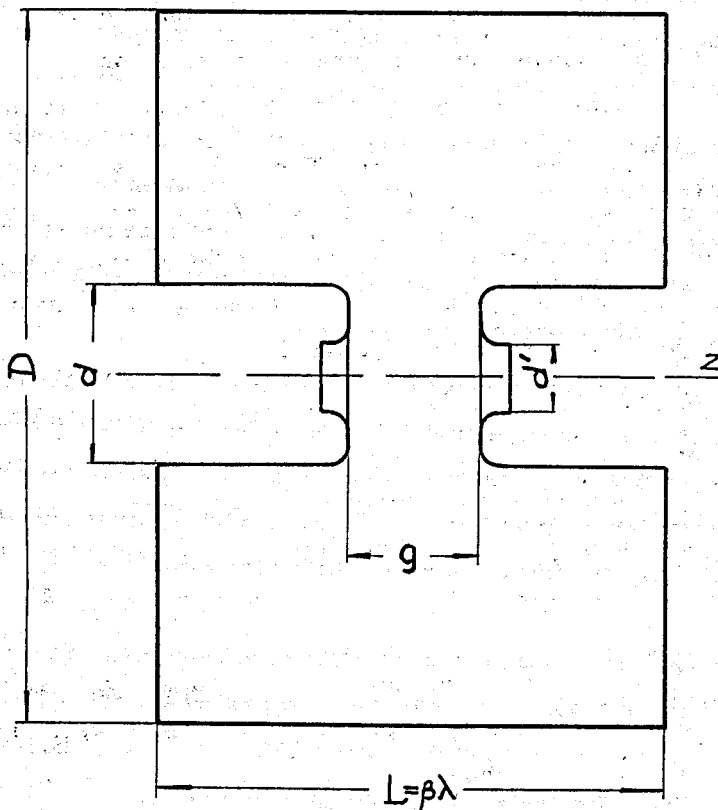


Рис. 1. Единичный отсек протонного линейного ускорителя.

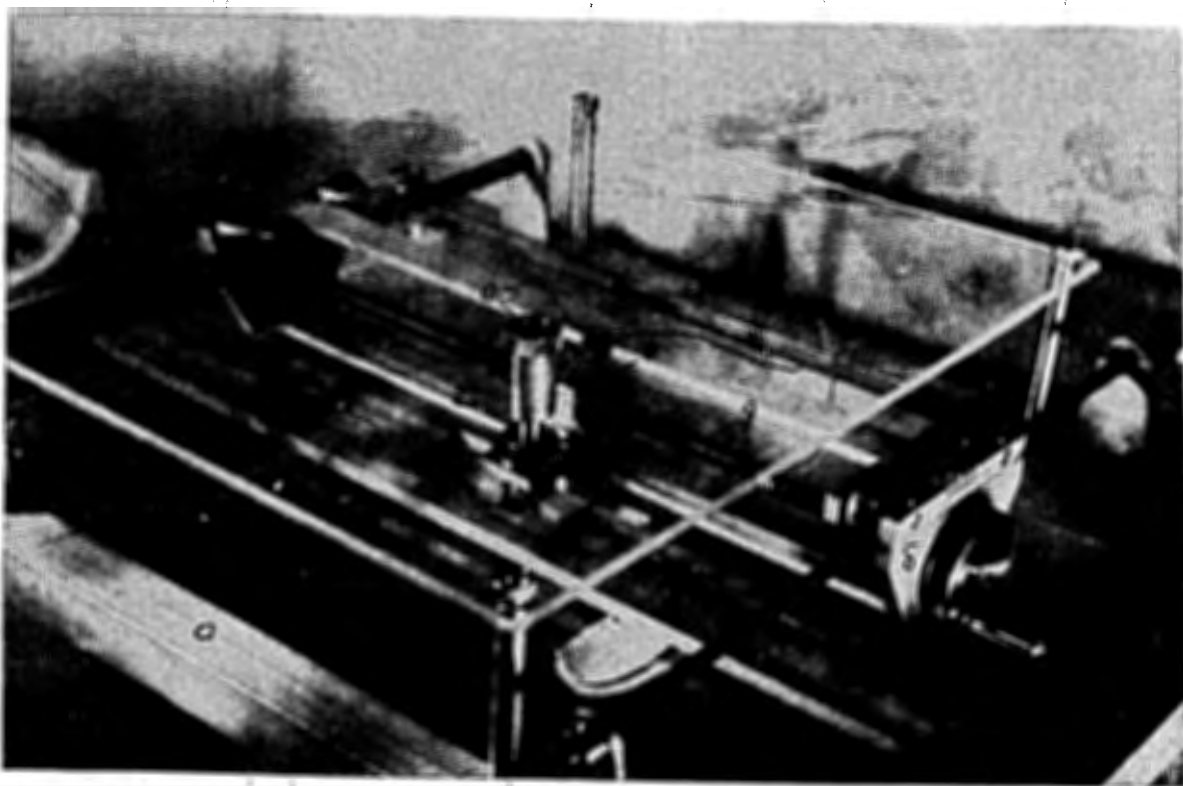


Рис. 2. Электролитическая ванна.

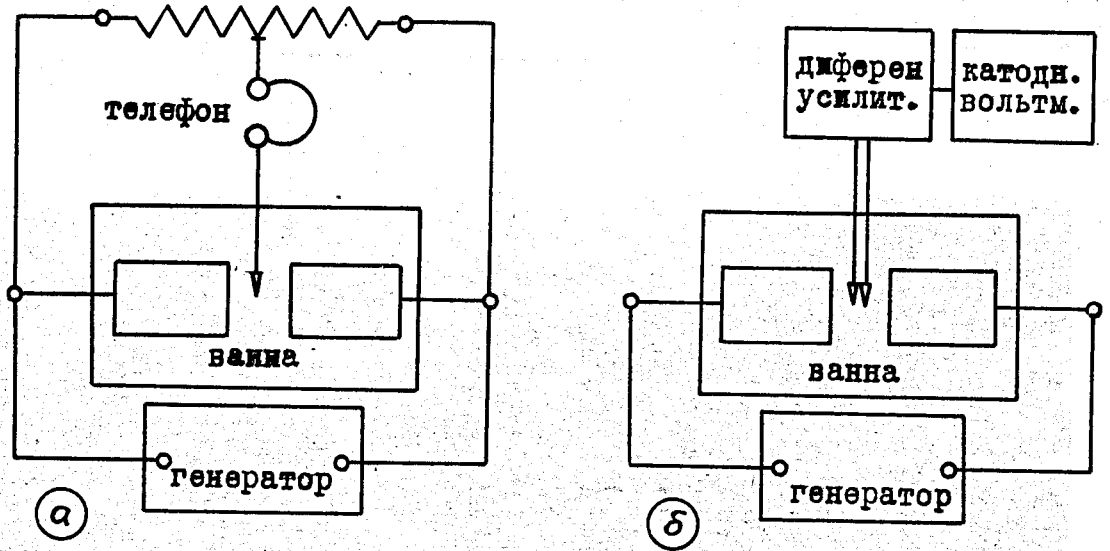


Рис. 3. Электрическая схема измерения /а/ потенциала и /б/ напряженности электрического поля.

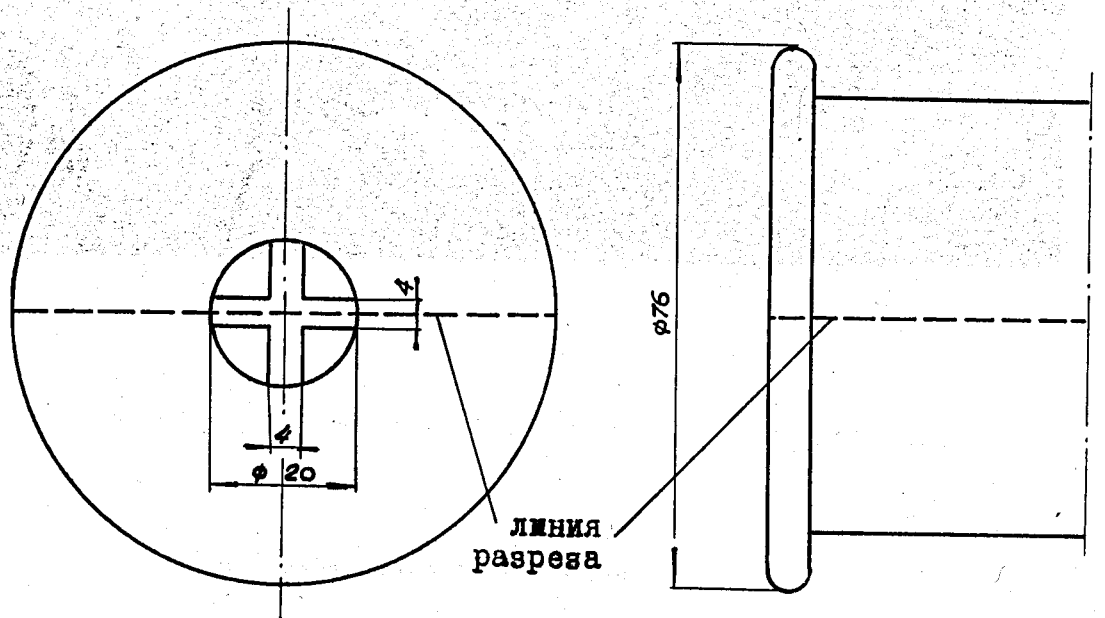


Рис. 4. Дрейфовая трубка.

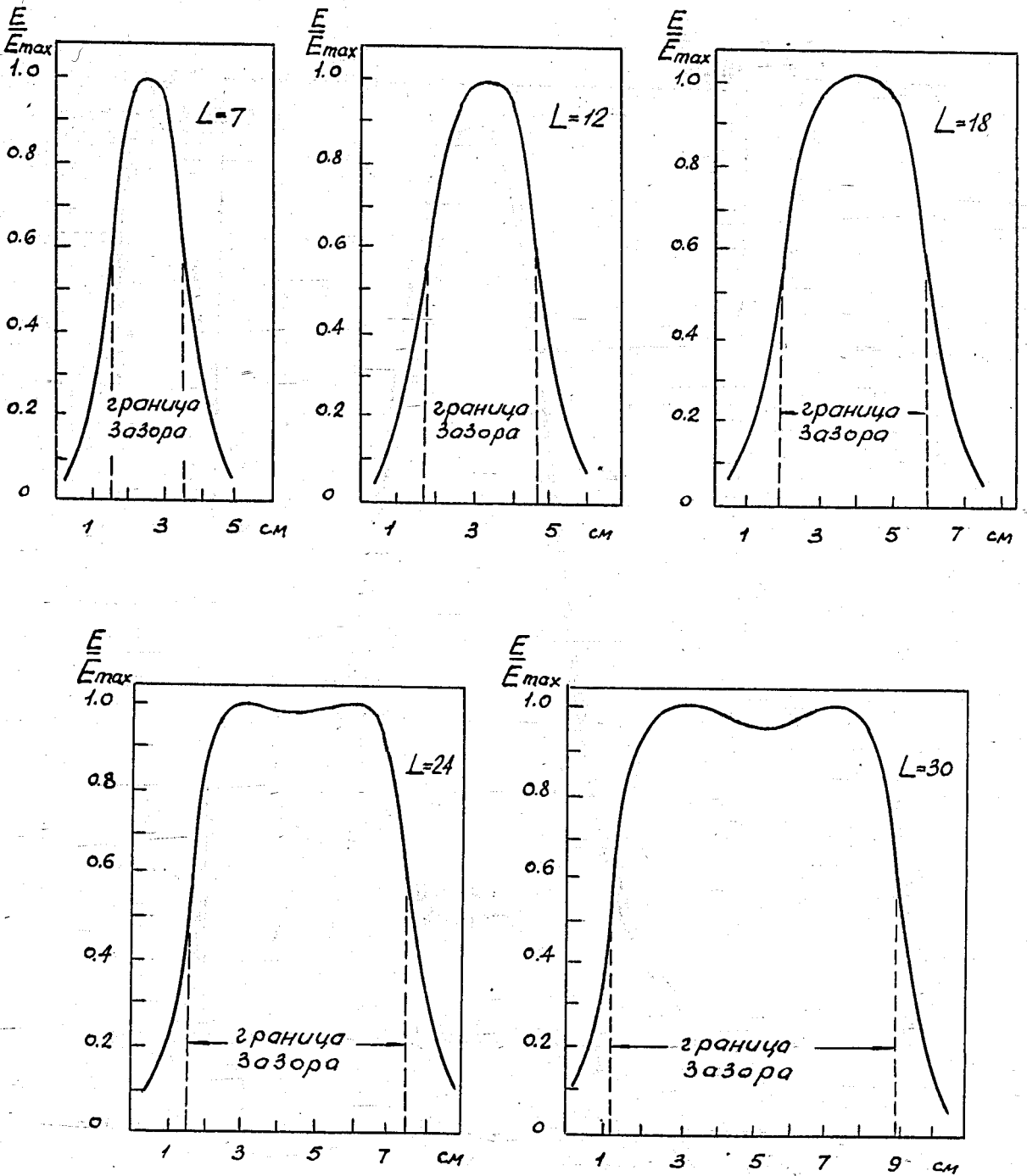


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля по оси симметричного зазора для различных значений ускоряющего периода.

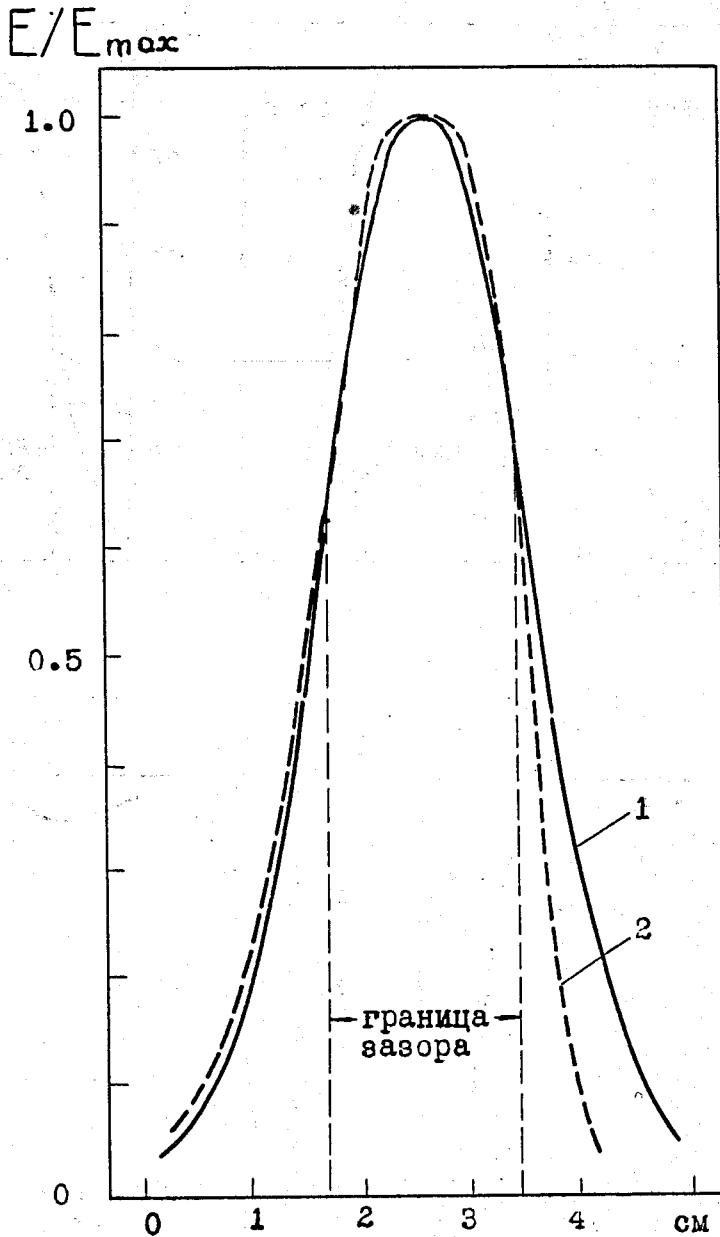


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля по оси периода ускоряющей системы $L = 7$ см.
1 - для симметричного зазора,
2 - для зазора с сеткой клистронного типа.

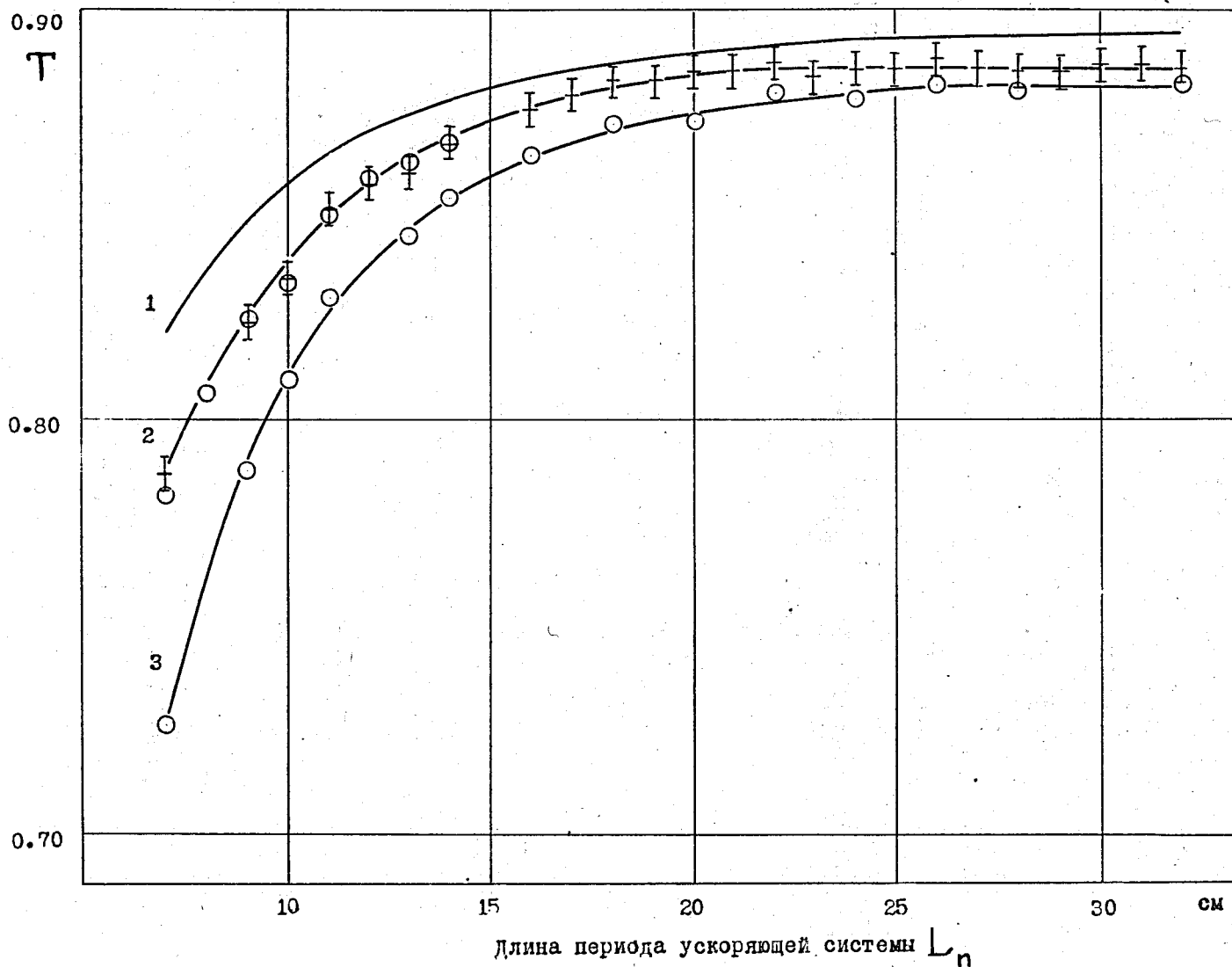
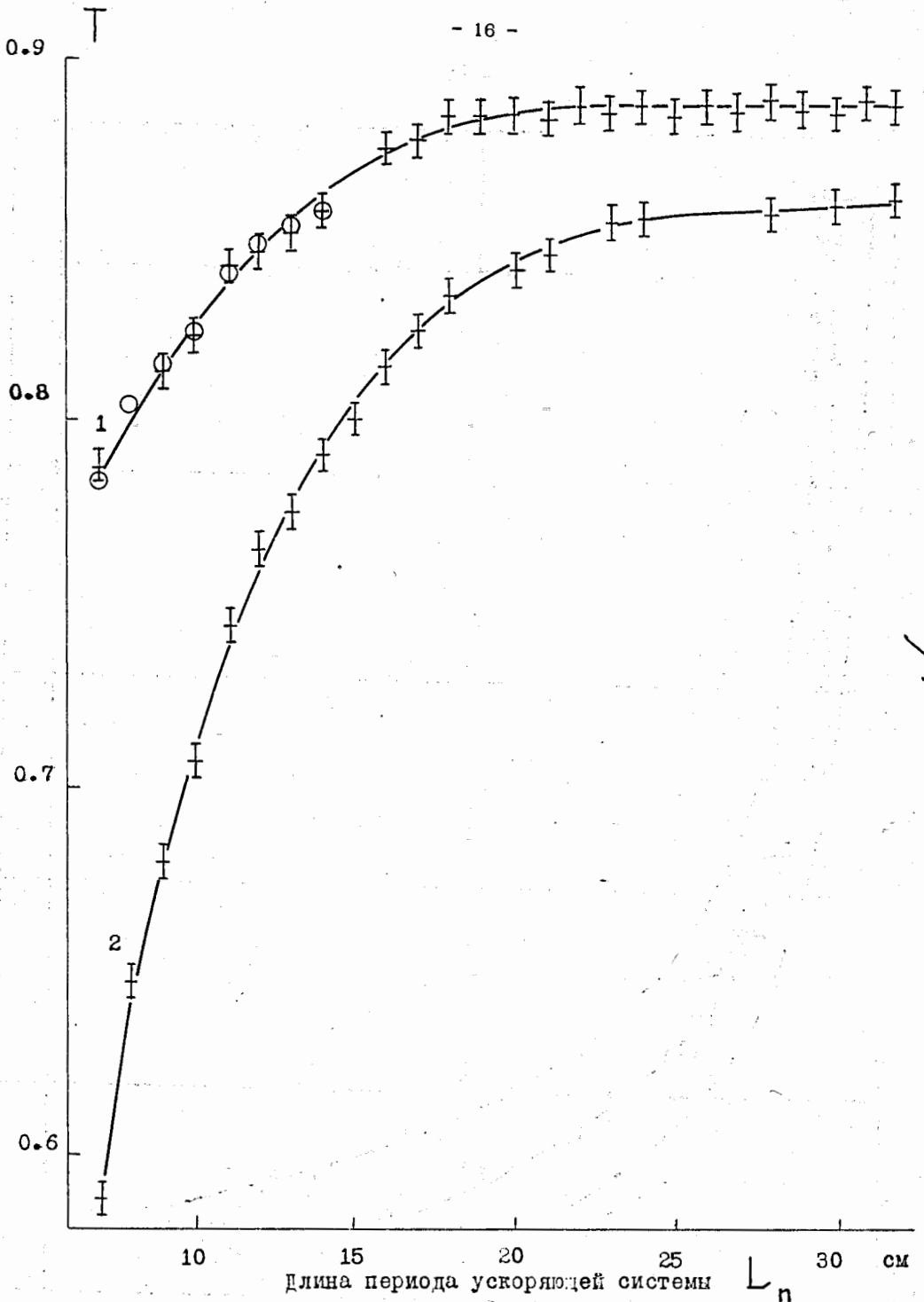


Рис. 7. Фактор времени пролета для протонного линейного ускорителя:
 1 - для зазора с сеткой клистронного типа по формуле /4/,
 2 - для зазора с сеткой клистронного типа по измерению напряженности поля \circ и потенциала \ddagger .



484/6

Рис. 8. Зависимость фактора времени пролета от величины апертуры дрейфовых трубок:
1 - апертура дрейфовых трубок 20 мм
2 - апертура дрейфовых трубок 35 мм.