

С 3496

Л-331

3/11/65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P-2177



В.Н. Лебедев, Л.С. Золин, М.И. Салацкая

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ПРЕДЕЛАХ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ
СИНХРОФАЗОТРОНА НА 10 ГЭВ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1965

P-2177

3392/2 чр.

В.Н.Лебедев, Л.С.Золин, М.И.Салацкая

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ
ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ПРЕДЕЛАХ САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ
СИНХРОФАЗОТРОНА НА 10 ГЭВ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

В в е д е н и е

При проектировании комплекса защитных сооружений синхрофазотрона на 10 Гэв учитывалась максимальная интенсивность внутреннего пучка - 10^{10} протонов·цикл⁻¹ при частоте повторения 4,3 цикла в минуту. К настоящему времени в результате увеличения интенсивности внутреннего пучка до $1 \cdot 10^{11}$ протонов·цикл⁻¹ и увеличения частоты повторения до 6,8 цикла в минуту (что соответствует повышению средней интенсивности в 14 раз), а также в связи с повышением требований, предъявляемых новыми Санитарными правилами^{х)} (что эквивалентно повышению интенсивности еще в 3 раза), имевшийся первоначальный запас практически исчерпан.

В связи с планируемым дальнейшим увеличением интенсивности представляется интересным исследовать распределение основных компонент поля излучения вокруг здания синхрофазотрона с тем, чтобы выделить наиболее слабые места в защите, определить локальные источники излучения и дать необходимые рекомендации по радиационной защите окружающей местности.

Состав и распределение поля проникающего излучения снаружи здания ускорителей высокой энергии, обусловленные проникновением излучения через защиту, изучены сравнительно мало. Так, по данным Р.Валлеса и других^{/2/} известно, что плотность потока нейтронов вблизи беватрона уменьшается по закону обратной квадратичной зависимости, причем поглощение излучения воздухом до расстояний порядка 500 м практически отсутствует. Величина средней энергии нейтронов колеблется в пределах 0,1-2 Мэв. По данным С.Линденбаума^{/3,4/}, плотность потока нейтронов вблизи космофона приблизительно пропорциональна $1/r$, где r - расстояние от ускорителя. Б.Мойер^{/5/} и Р.Валлес^{/8/} дифференцируют поток нейтронов на несколько энергетических групп: нейтроны с энергией $E > 150$ Мэв, нейтроны с $E = 20-150$ Мэв и нейтроны с $E = 1$ Мэв. Нейтроны первой и второй группы распространяются от ускорителя

х) В соответствии с действующими Санитарными правилами^{г/1/} "поле ионизирующего излучения на наружных поверхностях зданий и в проемах (двери, окна) не должно превышать 0,3 мр/час", т.е. так называемый предельно-допустимый уровень при непрофессиональном облучении не должен превышать 0,1 от предельно допустимого уровня для профессионального облучения, равного 3 мр/час."

как от точечного источника, а нейтроны с энергией $E \approx 1$ Мэв - пропорционально $1/r$. Х. Патерсон /7/ экспериментально определил среднюю энергию нейтронов: на расстоянии 150 м $\bar{E} = 0,5$ Мэв, а на расстоянии 450 м - $\bar{E} = 1,5 - 2$ Мэв. Наибольший вклад в полную дозу (около 80%) дают, по его оценке, нейтроны с энергией от 0,5 до 20 Мэв.

Методы вычисления поля излучения вне здания ускорителей высокой энергии, предложенные, например, С. Линденбаумом /3,4/, не выходят из рамок приближения.

Таким образом, задача определения состава и распределения поля излучения вне здания синхрофазотрона продолжает быть достаточно актуальной. В данной работе изложены первые результаты исследований нейтронной компоненты этого поля, полученные в течение лета 1963 г.

Методика и результаты измерений

Распределение поля излучения вне здания синхрофазотрона ОИЯИ определяли по восьми радиальным направлениям, указанным на рис. 1, где представлен условный план района измерений. Поскольку продолжительность серии измерений по одному направлению сравнительно велика, для обеспечения воспроизводимости результатов при последующем сшивании кривых по разным радиальным направлениям были намечены 16 контрольных точек, лежащих на расстоянии $r_1 = 105$ м и $r_2 = 155$ м от центра здания. Плотность потока нейтронов в этих точках измеряли многократно с хорошей статистической точностью. На этом же рисунке указано местоположение мишеней для трех наиболее характерных режимов работы синхрофазотрона: мишеней 5В и 17Р - в районе первого выводного промежутка и мишени 15Р - на втором выводном промежутке. Все мишени "тонкие": их толщина не превышала 50 мм. Во всех случаях на эти мишени сбрасывали 95-98% внутреннего пучка частиц. Из этого количества около 10% испытывали ядерные взаимодействия с материалом мишени (дюраль), остальные - более или менее равномерно распределялись по всему периметру вакуумной камеры синхрофазотрона. При измерениях использовали пропорциональный BF_3 -счетчик типа СНМ-5 (или СНМО-5) с полиэтиленовым фильтром толщиной 4 см, обеспечивающим практическую независимость скорости счета от энергии нейтронов в диапазоне энергий 1 эв - 1 Мэв /8/ (рис. 2). При измерении очень малых потоков нейтронов на дальних расстояниях от ускорителя большую ошибку могут внести флуктуации фона. Для уменьшения этой погрешности измерительная аппаратура отбиралась только в момент сброса ускоренного пучка на нужную мишень. Таким путем удалось практически исключить влияние флуктуаций фона при измерении плотности потоков нейтронов вплоть до 10 нейтр.м⁻²сек⁻¹. Для исключения ошибки, вызываемой нестабильностью работы

ускорителя, колебаниями интенсивности внутреннего пучка и т.д., все измерения проводили при тщательном мониторинговании, причем число мониторов, установленных в различных точках, доходило до 4-х. Погрешность мониторингования, как правило, составляла небольшую долю полной ошибки измерений.

На рис. 3 дана развертка ярма магнита и здания ускорителя со всеми наружными пристройками. Толщина зачерненных участков на рисунке пропорциональна толщине защитных стен в плоскости орбиты протонного пучка. Кривые характеризуют распределение поля излучения (преимущественно промежуточных и быстрых нейтронов с энергией порядка 1 эв-1 Мэв, см. рис. 2) на расстояниях r_1 и r_2 от центра при трех упомянутых выше режимах работы ускорителя. Большие азимутальные колебания уровней излучений на расстоянии 105 м от центра здания синхрофазотрона (нижние кривые) обусловлены как различием в толщине защиты, так и неодинаковой высотой основных защитных стен (при небольшой высоте нейтроны проникают за защиту в результате многократного рассеяния в воздухе).

На рис. 4 приведены результаты измерений плотности потока нейтронов по всем радиальным направлениям в зависимости от расстояния от центра здания ускорителя. Все данные здесь и далее относятся к интенсивности 10^{11} прот./цикл. Начиная со 120 метров плотность потока нейтронов мало зависит от "местной" (на данном радиальном направлении) защиты, будь это 0,6 или несколько метров бетона. Плотность потока нейтронов на таких расстояниях, по-видимому, целиком определяется потоком нейтронов, проникших через "тонкую" крышу и диффузно отраженных от верхней полусферы. Полученные результаты дают возможность представить распределение в виде одной усредненной кривой изменения плотности потока нейтронов в зависимости от расстояния. Иначе говоря, задача определения состава излучения вне здания синхрофазотрона может быть сведена к определению состава излучения вдоль одного из радиальных направлений. Следует отметить, что такое усреднение правомерно лишь в отношении нейтронов низких и средних энергий и не распространяется на нейтроны с энергией выше 20 Мэв. Для анализа состава излучения вдоль выбранного радиального направления (R_2 на рис.1 для нейтронов с $E < 20$ Мэв, и R_4 для нейтронов с $E > 20$ Мэв) весь энергетический спектр нейтронов приблизительно разбивали на следующие группы:

- 1) тепловые нейтроны ($E = 0,025$ эв),
- 2) промежуточные нейтроны (0,5 эв-0,1 Мэв),
- 3) быстрые нейтроны (0,1 - 20 Мэв),
- 4) очень быстрые нейтроны ($E > 20$ Мэв).

Плотность потока нейтронов с энергией менее 20 Мэв измеряли с помощью специальной быстродействующей аппаратуры. В качестве чувствительного детектора нейтронов использовали, как и в прежних измерениях, пропорциональный BF₃-счетчик типа

СНМ-5 (СНО-5) с фильтрами-замедлителями толщиной 20, 40 и 120 мм. Величину средней энергии быстрых нейтронов и их долю в общем потоке по отношению к промежуточным, полагая для последних спектр $1/E$ (при $E < 0,1$ Мэв), находили путем комбинированных измерений с тремя указанными фильтрами-замедлителями по методу, предложенному Ханкинсом^{/8/}. Графики, по которым определяли эти величины, приведены в работе^{/8/}. Плотность потока тепловых нейтронов измеряли при полностью открытом ВР₃-счетчике. Плотность потока очень быстрых нейтронов и протонов ($E > 20$ Мэв) оценивали по активации углерода в реакции $C^{12}(n,2n)C^{11}$ по методике, описанной в^{/9/}. Вследствие сравнительно невысокой чувствительности такого детектора удалось получить экспериментальные результаты только для расстояний от мишени, не превышающих 80 м. На больших расстояниях плотность потока нуклонов высокой энергии можно вычислить, полагая, что имеет место экспоненциальный закон ослабления этой компоненты в воздухе и квадратичная зависимость от расстояния^{/4-5/}:

$$f(\ell) = \frac{A}{\ell^2} e^{-\frac{\ell}{L}}, \quad (1)$$

где A - постоянная, ℓ - расстояние от мишени, L - длина ослабления нейтронов соответствующей энергии в воздухе.

Вычисленные по этой формуле значения при соответствующей нормировке к измеренной плотности потока неплохо согласуются с упомянутыми результатами измерений до 80 м на радиальном направлении R_4 , на азимуте которого установлена рабочая мишень.

На рис. 5 приведены дозовые распределения отдельных компонент нейтронного излучения, а также кривая полной дозы, равная их сумме, в зависимости от расстояния. Все кривые дозового распределения отдельных компонент вычислены на основании экспериментально измеренных величин потока излучения, за исключением нуклонной компоненты (кривая 4), рассчитанной по формуле (1). При вычислениях использовали табличные значения предельно-допустимых потоков, как указано в^{/1/}, причем нейтронам с энергией более 20 Мэв приписывали как наиболее вероятную среднюю энергию порядка 150-200 Мэв (длина ослабления в воздухе около 740 м). При определении потоков быстрых и промежуточных нейтронов угловую зависимость эффективности примененного цилиндрического детектора нейтронов не учитывали, поскольку произведенные оценки показали, что связанная с этим погрешность невелика и не превышает аппаратной ошибки измерений.

На рис. 5 приведены кроме того непосредственно измеренные значения величины дозы, обусловленной быстрыми нейтронами. Эти измерения выполнены при помощи дозиметра, аналогичного дозиметру Де Пангера^{/10/}, энергетическая характеристика которого в области быстрых нейтронов близка к дозовой кривой для мягкой ткани. Из ри-

сунка видно, что значения дозы, вычисленные на основании измерений потоков нейтронов, и непосредственно измеренные величины доз в пределах ошибок измерений совпадают.

На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что преобладающий вклад в дозу на расстояниях свыше 100–150 м от здания ускорителя дают быстрые нейтроны. Средняя энергия этих нейтронов, определенная по методу Ханкинса, изменяется при удалении от здания с 0,6–0,8 (на расстоянии 200 м) до 2–4 Мэв (на расстоянии 500 м).

Снижение уровней излучения вне здания синхрофазотрона

Снижение уровней проникающего излучения вне здания ускорителя может быть достигнуто различными способами, однако, не все они одинаково эффективны и экономичны. К примеру, сооружение кольцевого вала для защиты от диффузно-рассеивающихся нейтронов медленной компоненты явно нецелесообразно, так как нейтроны будут огибать его сверху. Это положение иллюстрируется рис. 6, на котором представлено распределение нейтронов по радиальному направлению R'_3 , пересекающему короткий защитный вал, сооруженный для защиты от прямого пучка частиц высокой энергии. Видно, что за валом имеется небольшое теневое пространство (сплошная линия), а далее поток нейтронов спадает по уже известному закону, как если бы вал отсутствовал. Совершенно очевидно, что защитный вал может быть необходимым только в местах выхода из здания пучков частиц высокой энергии.

Снижение уровней излучения внутри зоны с наиболее высокой плотностью потока (радиусом 100–200 метров) может быть осуществлено, как это следует из сопоставления рис. 4 и 6, путем установки дополнительной защиты у наружных стен здания и заделкой оконных проемов, ослабляющих защиту. Количественное увеличение прозрачности защиты в месте расположения оконных проемов иллюстрируется рис. 7, на котором приведено распределение поля излучения по вертикали на расстоянии нескольких метров от стены здания. Распределение поля излучения вне зоны с радиусом 100–200 м изменится при этом незначительно, так как определяющий вклад в полный поток излучения дает излучение, проникшее через крышу и отраженное от верхней полусферы.

Существенное снижение уровней излучения одновременно на всех участках может быть достигнуто, очевидно, путем экранирования всех мест генерации быстрой компоненты. Как показывают измерения, даже посредственная экранировка прямолинейного промежутка приводит к существенному уменьшению плотности потока излучения пропорционально на всем радиальном направлении. В качестве примера на рис. 8 приведены

кривые изменения плотности потока нейтронов с расстоянием при полностью открытом выводном прямолинейном промежутке и при промежутке, наполовину экранированном бетонными блоками. Плотность потока нейтронов при такой экранировке уменьшилась на ближнем направлении более чем в 3 раза, а на диаметрально противоположном направлении - на 20-30%. Этот способ защиты, по-видимому, наиболее целесообразен в наших условиях, так как позволяет перевести большую часть высокоэнергетической компоненты в низкоэнергетическую, которая эффективно ослабляется стенами здания синхрофазотрона.

З а к л ю ч е н и е

На основании приведенных выше результатов измерений поля проникающего излучения на различных расстояниях от здания синхрофазотрона можно сделать следующие выводы:

1) основной вклад в полную нейтронную дозу на больших расстояниях от здания - более 80-90% - дают быстрые нейтроны с энергией 0,1-20 Мэв. Следовательно, для оценки дозы нейтронного излучения вне здания ускорителя достаточно произвести измерения только детектором быстрых нейтронов.

2) Поток нейтронов с энергией > 20 Мэв, по-видимому, имеет значение лишь на близких (до 80-100 м) расстояниях от центра здания.

3) Наиболее эффективным и экономичным вариантом защиты следует признать тот, при котором непосредственно защищаются места генерации высокоэнергетической компоненты, в частности, районы установки мишеней и прямолинейные промежутки.

В заключение пользуемся случаем выразить благодарность А.Д.Никитину, В.Г.Жбанкову, Э.И.Объезднову и И.М.Канаеву за большую помощь при выполнении работы.

Л и т е р а т у р а

1. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений № 333-80. Госатомиздат, М. 1980.
2. Р.Валлес и др. Сб. материалов по отдельным вопросам дозиметрии, стр. 175. Госатомиздат, М. 1982.
3. S.J.Lindenbaum. Ann Rev. of Nucl. Science., 11, 213-258 (1961).
4. S.J.Lindenbaum. First Intern Conf. on Shielding around High-Energy Accelerators. Saclay Paris 1962, p. 43.

5. B.Moyer. First Intern. Conf. on Shielding around High-Energy Accelerators. Saclay Paris 1962, p. 65.
6. H.Patterson. First Intern. Conf. on Shielding around High-Energy Accelerators. Saclay Paris 1962, p. 95.
7. R.Wallace. Nucl. Instr. and Methods., v. 18-19, 405-416 (1962).
8. D.Hankins. Neutron dosimetry, IAEA, Vienna 1963, v. II, p. 123-136.
9. В.Н.Лебедев, М.И.Салапкая. В сб. Приборы и методы анализа излучений, вып. III стр. 164-181, Госатомиздат, М. 1962 г.
10. De Pangher. Nucl. Instr. and Methods, v. 5, 61-74 (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел
15 мая 1965 г.

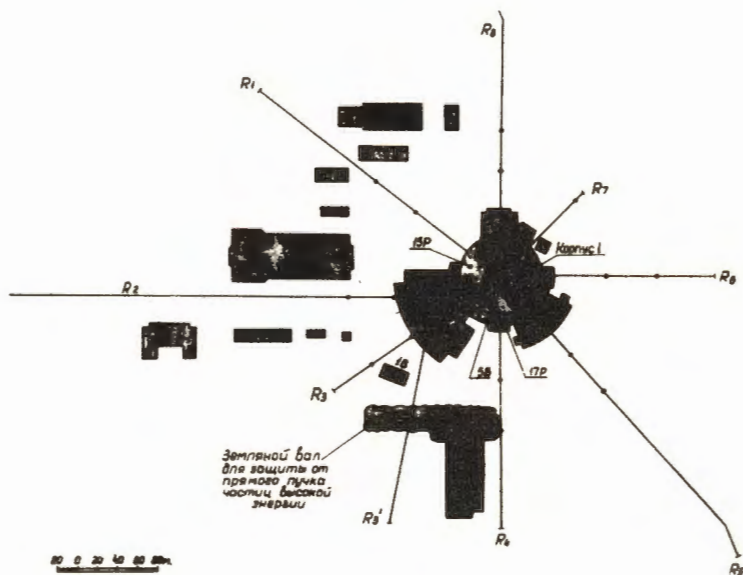


Рис. 1. План района измерений (указано местоположение рабочих мишеней в здании ускорителя при различных режимах работы, радиальные направления, по которым производились измерения, и контрольные точки).

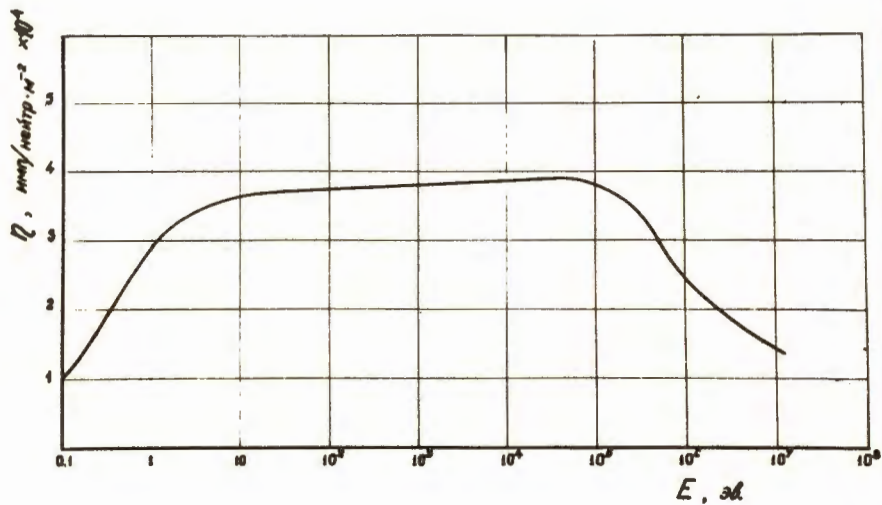


Рис. 2. Зависимость эффективности примененного детектора от энергии нейтронов.

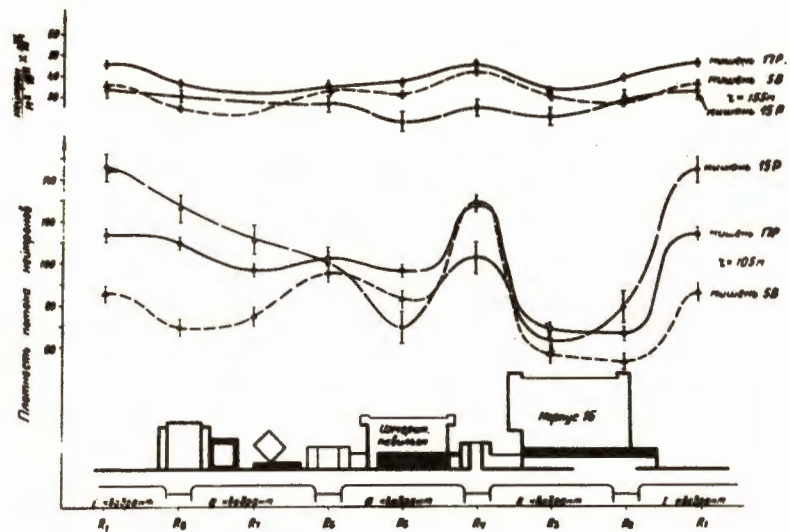


Рис. 3. Пространственное распределение потока промежуточных и быстрых нейтронов на расстоянии $r_1=105$ м и $r_2=155$ м от центра здания ускорителя при различных режимах работы.

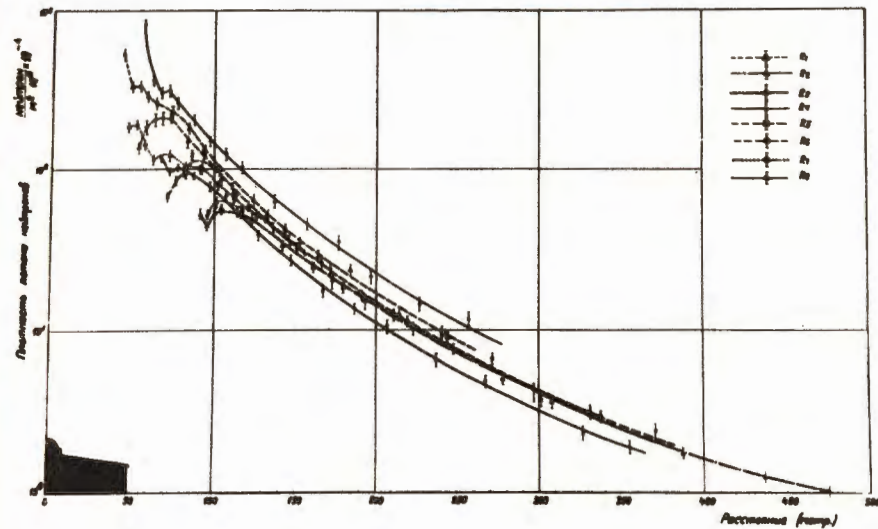


Рис. 4. Зависимость плотности потока промежуточных и быстрых нейтронов по всем радиальным направлениям от расстояния до геометрического центра здания ускорителя.

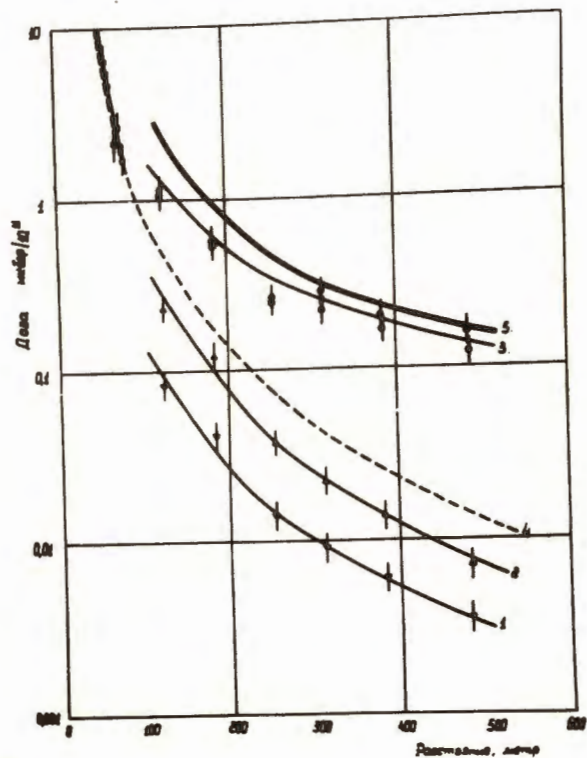


Рис. 5. Зависимость полной нейтронной дозы и ее компонент, обусловленных нейтронами разных энергетических групп, от расстояния до центра здания. 1 - тепловые нейтроны, 2 - промежуточные нейтроны, 3 - быстрые нейтроны (о-вычислено на основе измерений плотности потока и средней энергии нейтронов, ● - измерено непосредственно), 4 - очень быстрые нейтроны (предположительно), 5 - полная нейтронная доза.

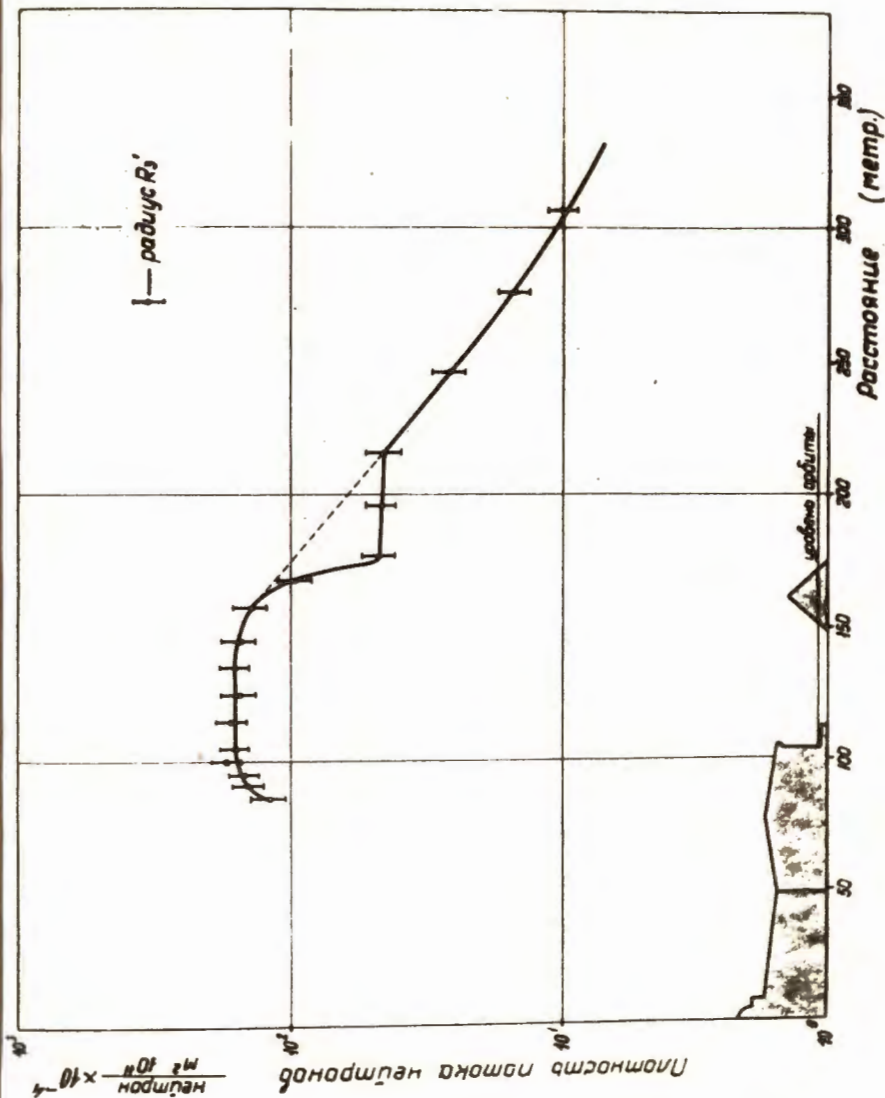


Рис. 6. Влияние защитного вала на радиальное распределение плотности потока нейтронов. Пунктирная линия - поток нейтронов при отсутствии защитного вала.

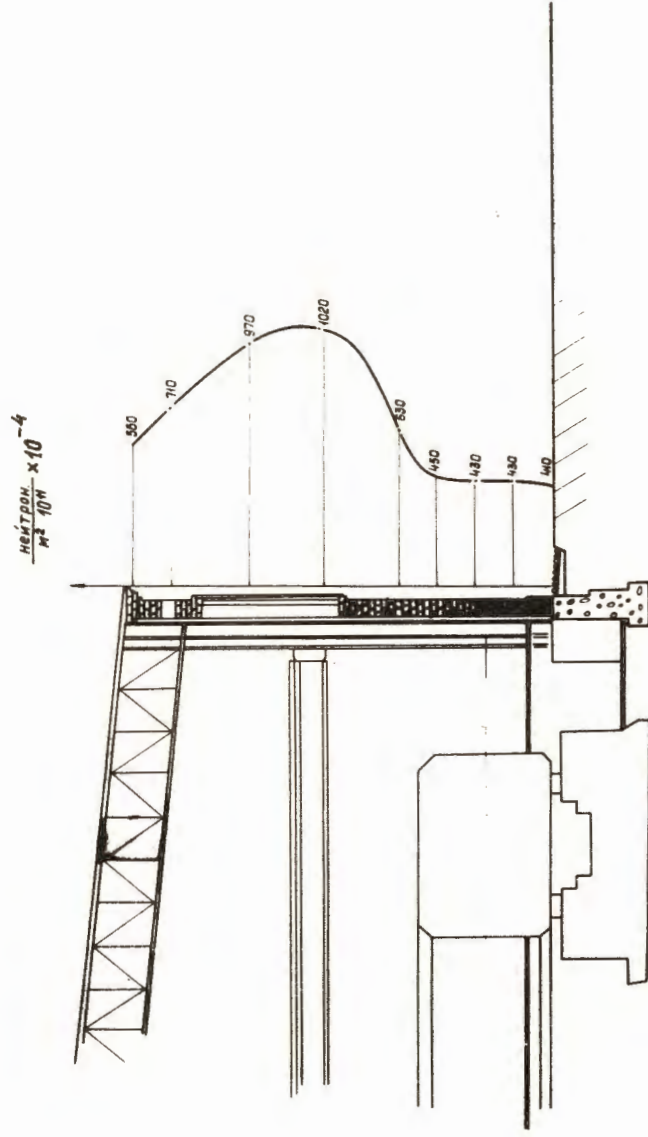


Рис. 7. Распределение поля излучения в вертикальной плоскости вдоль стены здания синхрофазотрона.

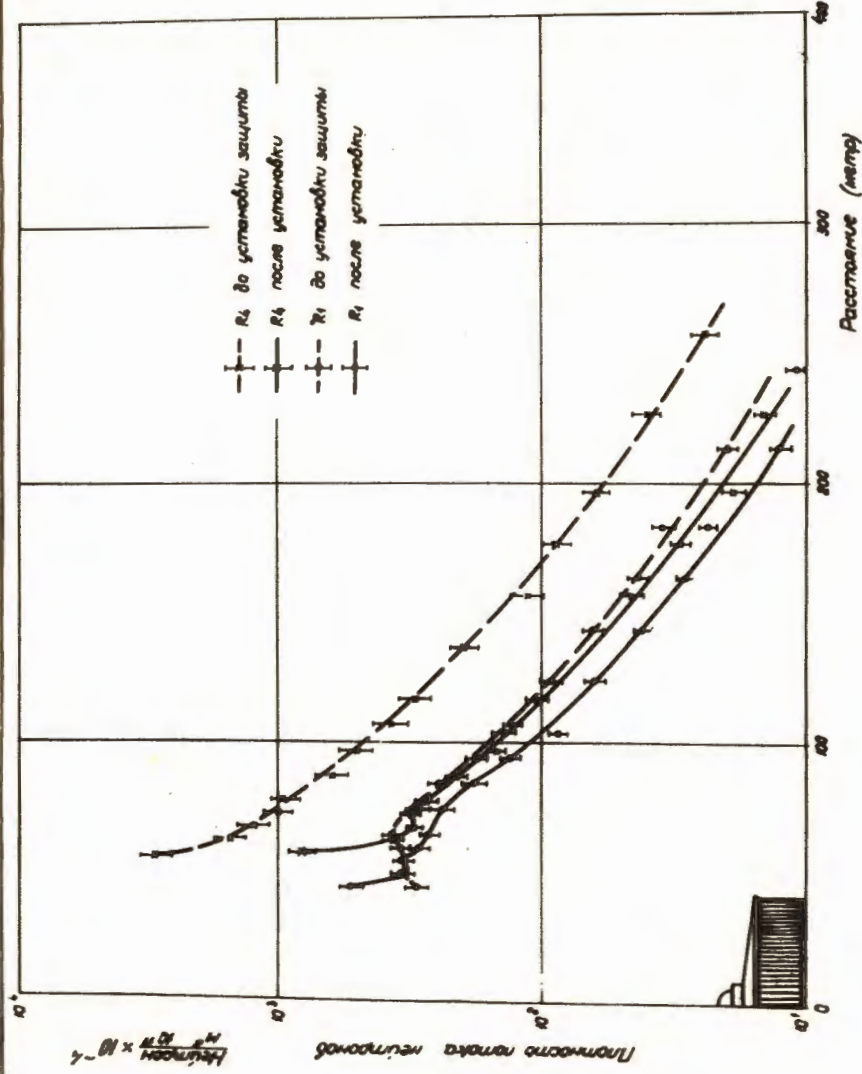


Рис. 8. Влияние частичной защиты одного из выводных участков на распределение поля излучения вне здания ускорителя.