

сообщения  
Объединенного  
Института  
Ядерных  
Исследований  
Дубна

е  
т

1624/2-81

30/11-81

16-80-868

В.И. Цовбун

ПРОВЕРКА ПРОГНОЗА ПОЛЯ  
ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПЕРЕД И ЗА БАРЬЕРНОЙ ЗАЩИТОЙ  
СИЛУНДА - ИНЖЕКТОРА ЭЛЕКТРОНОВ  
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1980

В работе<sup>/1/</sup> получено идеализированное представление об инжекторе СИЛУНД коллективного ускорителя тяжелых ионов как источнике тормозного излучения, характеризуемом пространственным и энергетическим распределением. В настоящей работе проведена экспериментальная проверка относительно простых инженерных способов расчета полей тормозного излучения перед и за барьерной защитой ускорителя с использованием представлений об источнике из работы<sup>/1/</sup> и известных<sup>/5-8/</sup> параметров, используемых для инженерных расчетов полей излучения. Проверка проведена в экспериментальном зале, перегороженном бетонной барьерной защитой, отделяющей пространство вблизи ускорителя от зоны, в которой работает персонал.

## ИЗМЕРЕНИЯ

Инжектор СИЛУНД<sup>/2,3/</sup> ускорял электроны до энергии 1,5 МэВ, которые инжестировались в АДГЕЗАТОР<sup>/3/</sup>, где они сбрасывались на инфлектор с той же энергией. Осциллограммы тока пучка электронов, полученные на выходе всех 5 секций ускорителя, приведены на рис. 1. Частота циклов ускорения составляла 0,5 Гц.

В качестве монитора и измерителя экспозиционной дозы использовались ионизационные камеры ДИГ-5 приборов "Кактус", работавших в режиме накопления дозы<sup>/4/</sup>.

На рис. 2 показано расположение ускорителя и мест измерений в экспериментальном зале. Камера монитора располагалась на защитном барьере /М/, а камера измерителя - на высоте 1,6 м от пола. Электронный лучок проходил на высоте 1,7 м над полом.

Соответствие показаний монитора состоянию ускорителя устанавливалось следующим образом: одновременно с регистрацией запоминающим осциллографом наложенных друг на друга 10 осциллограмм с индукционного датчика на выходе 5-й секции производилось суммирование показаний монитора за эти 10 импульсов. Измерения экспозиционной дозы сводились к одновременной регистрации показаний измерителя и монитора, накопленных за 10-20 импульсов. В каждой из выбранных точек производилось не менее 5 измерений. В конце измерений осуществлялась проверка стабильности работы СИЛУНДа по осциллограмме с датчика на выходе 5-ой секции и регистрировались осциллограммы с остальных четы-

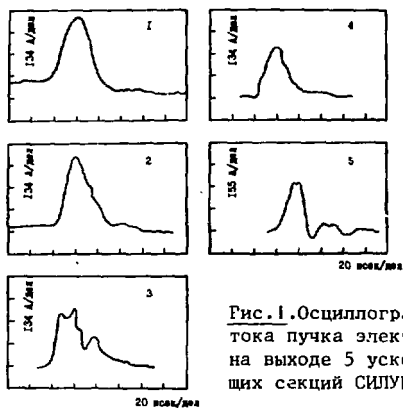


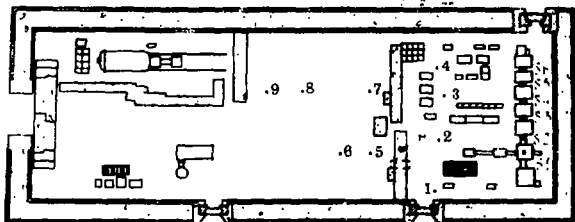
Рис. 1. Осциллограммы тока пучка электронов на выходе 5 ускоряющих секций СИЛУНДА.

рех датчиков. Осциллограммы с 5-го датчика в начале и конце измерений практически совпадали, что указывало на стабильную работу ускорителя.

Спектры отраженного от стен зала излучения за барьерной защитой могут быть мягкими<sup>15/</sup>. Поэтому возникает опасность искажения результатов измерений экспозиционной дозы камерой ДИГ-5, "ход с жесткостью" которой для энергий менее 200 кэВ может превышать 20%. Для проверки степени искажений показаний камеры ДИГ-5 произведено их сравнение с показаниями камеры такого же объема со стенками из металлизированного лавсана. Обе камеры устанавливались за защитным барьером поочередно на один датчик. Их показания, нормированные по монитору, совпали в пределах  $\pm 8\%$ . Достоверность результатов измерений, выполненных с помощью тонкостенной камеры, рассмотрена ниже.

## РАСЧЕТ

В соответствии с работой<sup>11/</sup> ускоритель представлялся в виде 6 локальных источников /рис. 2/:  $s_1$  - инфлектор АДГЕЗАТОРа,  $s_2$  - электропровод между СИЛУНДОМ и АДГЕЗАТОРОМ,  $s_3-s_6$  - межсекционные промежутки СИЛУНДА. Потери на электропроводе принимались пропорциональными току электронов на выходе 5-й секции, а коэффициент пропорциональности определялся с использованием данных<sup>11/</sup>. Для простоты источник  $s_2$  считался локализованным вблизи конца последней секции СИЛУНДА. Потери в межсекционных промежутках согласно<sup>11/</sup> устанавливались по разности



A-A

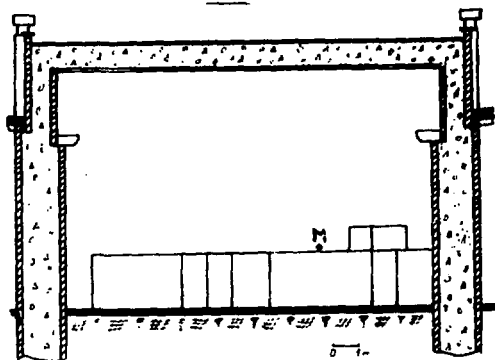


Рис. 2. План и вид в разрезе экспериментального зала.  
 • 1 - места измерений; • s<sub>1</sub> - локализация источников излучений.

площадей под осциллограммами тока электронов в соседних секциях, затем они усреднялись по длине секций, выделялась часть потерь, пропорциональная длине промежутка, которая представлялась локализованной в его центре.

Для точек 1-4, расположенных перед барьером, экспозиционная доза рассчитывалась как

$$D_{\text{п}1-4} = \sum_{s=1}^8 \frac{I_s \cdot P(\theta_{s\text{п}})}{R_{s\text{п}}^2 \cdot K_{s\text{п}} \cdot 0,88}$$

где  $P(\theta_{sn})$  - угловое распределение мощности дозы тормозного излучения /6/;  $\theta_{sn}$  - угол между вектором движения пучка электронов и вектором, направленным из источника в точку измерения;  $R_{sn}$  - расстояние от источника до места измерения;  $I_s$  - ток электронов, потерянный в источнике  $s$ ;  $K_{sn}$  - кратность ослабления излучения элементами конструкции ускорителя; 0,88 - коэффициент перехода от поглощенной к экспозиционной дозе в воздухе.

Параметры ослабления широкого пучка тормозного излучения в элементах конструкции ускорителя /гетерогенные поглотители - керамика-пластмассы-железо-медь/ принимались такими же, как для обычного бетона, в массовых единицах  $\text{см}^2/\text{г}$  /7/.

Расчет поля излучения за защитным барьером сводился к расчетам отраженного излучения, так как вклад в полную дозу ослабленного барьером излучения составляет менее 2%. Доза в точке  $n$  за защитным барьером, создаваемая источником  $s$ , равна:

$$D_{sn} = \sum_I \frac{J_s \cdot P(\theta_{sI}) \cdot a_s(\theta_0, \theta, \phi) \cdot S_{sI} \cdot \cos\theta_0 \cdot \eta(\text{PR})}{R_{sI}^2 \cdot R_{sIn} \cdot K_{sI} \cdot \cos\theta \cdot 0,88}$$

где индекс  $I$  - номер телесного угла вблизи луча, который выходит из источника и последовательно сканирует отражающие поверхности верхней полусферы;  $\theta_{sI}$  - угол между направлением движения пучка электронов и сканирующим лучом;  $S_{sI}$  - площадь отражающей поверхности;  $R_{sI}, R_{sIn}$  - расстояния от источника до пересечения сканирующего луча с отражающей поверхностью и от этого пересечения до места измерения соответственно;

$$\eta(\text{PR}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{PR} \geq 0; \\ 0, & \text{если } \text{PR} < 0; \end{cases}$$

$\text{PR} < 0$  - признак пересечения луча с барьерной защитой на пути источник - отражающая поверхность - место измерения;  $a_s(\theta_0, \theta, \phi)$  - дозовое токовое альbedo для спектра излучения источника;  $\theta_0, \theta$  - углы падения и отражения;  $\phi$  - угол поворота луча при отражении /см /5/.

Коэффициенты альbedo для источников  $s$  получались интегрированием дифференциального альbedo по дозовому энергетическому распределению источника  $d_s(E)$ .

$$a_s(\theta_0, \theta, \phi) = \int_0^{E_{\max}} a_d(E, \theta_0, \theta, \phi) \cdot d_s(E) \cdot dE.$$

Дозовые энергетические распределения  $d_s(E)$  заимствовались из работы<sup>/8/</sup>. Значения альbedo для энергий менее 200 кэВ взяты из таблиц<sup>/5/</sup>, а для более высоких энергий использовалась аппроксимация Чилтона и Хаддлестона<sup>/8/</sup>.

$$a_s(E, \theta_0, \theta, \phi) = \frac{C(E) \cdot K(E, \theta_s) \cdot 10^{26} + C'(E)}{1 + \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}};$$

$K(E, \theta_s)$  - сечения комптоновского рассеяния на угол  $\theta_s$ ;  $C(E)$ ,  $C'(E)$  - табулированные параметры для энергий 0,2-10 МэВ. Промежуточные значения табулированных величин получались квадратичной интерполяцией. Время расчета дозы за барьерной защитой в одной точке составляло ~20 минут работы центрального процессора ЭВМ CDC-6500.

#### СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице. Погрешность измерений представлена в виде абсолютной среднеквадратичной ошибки, включающей ошибки измерений, градуировки и ошибку, связанную с неидеальной энергетической зависимостью чувствительности ионизационной камеры.

Эффективность собирания зарядов в камере составляет<sup>/9/</sup> более 99% для максимальной измеренной дозы за импульс.

Энергетическая зависимость дозовой чувствительности тонкопленочной камеры /20 мкм лавсана/ в условиях установления электронного равновесия в воздушной среде практически постоянна для энергий гамма-квантов более 30 кэВ, так как поглощение квантов в пленке пренебрежимо мало. Возможное влияние на ход кривой чувствительности поглощения  $\gamma$ -квантов в каркасе камеры, изготовленном из плексигласа, и центральном электроде из алюминия, как показывают простые оценки, не исказит его более чем на 10%. При измерениях с использованием тонкопленочной камеры в точках 5-9 условие электронного равновесия в воздушной среде вокруг камеры соблюдалось. Действительно, угол однократного рассеяния излучения на пути от источника к рассеивателю и далее к месту измерения превышал  $60^\circ$ . Тогда из кинематики комптоновского рассеяния вытекает, что спектр гамма-излучения в местах измерения за барьером ограничен энергией 600 кэВ. Пробег вторичных электронов с такой энергией -

около  $2,5 \text{ м} / 10^7$ . Так как места измерений находились от рас-сеивателей /при первом отражении/ на расстоянии, большем  $2,5 \text{ м}$ , возмущения электронного потока электронами, вышедшими из материала отражателя, в воздушной среде вблизи ионизацион-ной камеры не происходит. Это также означает  $/11/$ , что в возду-хе вблизи камеры обеспечено электронное равновесие.

Результаты сравнения показаний двух камер в реальном поле и анализа возможных погрешностей измерений экспозиционной дозы были дополнительно проверены измерениями на изотопных источниках. Градуировка камеры ДИГ-5 на источнике  $\text{Th}^{170}$  с энергией квантов  $84 \text{ кэВ}$  показала, что "ход с жесткостью" по отношению к градуировке на  $\text{Co}^{60}$  составил  $/1,08 \pm 0,15/$ . Показа-ния тонкопленочной камеры сравнивались с показаниями каме-ры ДИГ-5 в поле источника  $\text{Cs}^{137}$  с энергией  $\gamma$ -квантов  $0,661 \text{ МэВ}$ . Камеры облучались на расстоянии от источника, большем, чем пробег электронов с энергией  $0,661 \text{ МэВ}$ . Отношение показаний тонкопленочной камеры и ДИГ-5 составило  $/0,86 \pm 0,08/$ .

Совокупность приведенных данных показывает, что погрешность измерений экспозиционной дозы с помощью ДИГ-5, связанная с "ходом с жесткостью", не превышает в местах измерений  $+20\%$ .

Максимальное различие результатов измерений и расчета со-ставляет  $2,3$  раза. Для мест измерений 1, 3, 4 завышение рас-четных данных частично связано с неучетом ослабления излу-чения в деталях электрооборудования, находящегося в зале между источниками и местами измерений. В остальном расхождение следует объяснить погрешностями расчета: идеализацией источ-ника, упрощениями в оценке ослабления излучения в узлах уско-рителя, допущениями об его энергетическом распределении при расчетах коэффициентов альбеда для спектра излучения, дискрет-ностью расчета. Если полученные расхождения понимать как оценку достоверности расчета, то такую достоверность можно признать удовлетворительной, так как она близка к обычно при-меняемым в расчетах радиационных полей и защиты коэффициентам запаса.

Расчет позволил проанализировать влияние различных факторов и значимость отдельных источников в формировании поля излу-чения. Например, существенным оказалось ослабление излучения в stapеле АДГЕЗАТОРа; коэффициенты ослабления для точек 1-4 составляли от  $2,8$  до  $3,5$ . Источник  $S_1$  /инфлектор АДГЕЗАТОРа/ вносил  $80-86\%$  вклада в полную дозу излучения в точках 1-4 и  $85-87\%$  в точках 5-9.

Таким образом, для ускорителя электронов инжектора типа СИЛУНД оказывается возможным прогноз поля излучения в зале ускорителя с достоверностью в пределах фактора  $2-3$  для рас-стояний от источников излучений, сравнимых с длиной ускорителя и больших ее, в том числе для поля излучения за защитным барьером.

Таблица

Экспозиционная доза за импульс излучения  $\times 10^{-10}$  Кл/кг / IP =  
 $= 2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг/

Точка №	Измерение	Расчет
1	32+8	60
2	50+13	46
3	11+3	24
4	9+2	16
5	2+0,5	4
6	1,7+0,4	3,9
7	1,4+0,4	2,6
8	1,2+0,3	2,8
9	1,2+0,3	2,6

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В., Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-11934, Дубна, 1978.
2. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
3. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Физика плазмы, 1977, 3/3/, с. 449-464.
4. Матвеев В.В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений, Атомиздат, М., 1972.
5. Булатов Б.П. и др. Альbedo гамма-излучения, Атомиздат, М., 1968.
6. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-1104, Дубна, 1973.
7. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-7834, Дубна, 1974.
8. Chilton A.V., Haddleston C.M. Nucl.Sci. and Engeneering, 1963, 17(3), p. 419-424.
9. Хайн Д., Браунелл Г. Радиационная дозиметрия. ИЛ, М., 1958.
10. Кимель Л.Р., Машкович В.Л. Защита от ионизирующих излучений. Справочник, Атомиздат, М., 1972.
11. Иванов В.И. Курс дозиметрии. Атомиздат, М., 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
 29 декабря 1980 года.