

к к. п. д. обычного трансформатора (95—98%). В настоящее время обрабатывается конструкция ускорителя на 1,5 Мэв, предназначенного для серийного выпуска.

В заключение считаем своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Института ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, принявших активное участие в конструировании и наладке установки: инженеров Г. Крайнова, В. Николаева, И. Шалашова, механиков В. Бирюкова, Г. Балыкова, М. Воронова,

М. Губина, Ю. Ефременкова, А. Косачева, М. Степанова и техника В. Кирова.

Поступила в Редакцию 24/1 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Абрамян, В. А. Гапонов. Устройство для ускорения заряженных частиц с высоким к. п. д. Авторское свидетельство № 906570 от 31.08.1964 г.
2. M. Cleland, K. Morganstern, Nucleonics, No. 8, 52 (1960).

Экспериментальное определение фактора качества излучения вблизи ускорителей высокой энергии

В. Н. ЛЕБЕДЕВ, М. ЗЕЛЬЧИНСКИЙ, М. И. САЛАЦКАЯ

УДК 577.391

Приведены экспериментальные данные, характеризующие величину эффективного фактора качества QF многокомпонентного импульсного излучения на различных участках синхрофазотрона на 10 Гэв. Измерения проводились на основе рекомбинационного метода. Величина QF изменяется от 3 до 11. Результаты измерений сравниваются с величинами, определенными на других ускорителях высокой энергии. Даны также некоторые значения QF , полученные в экспериментах на пучках частиц синхроциклотрона на 680 Мэв.

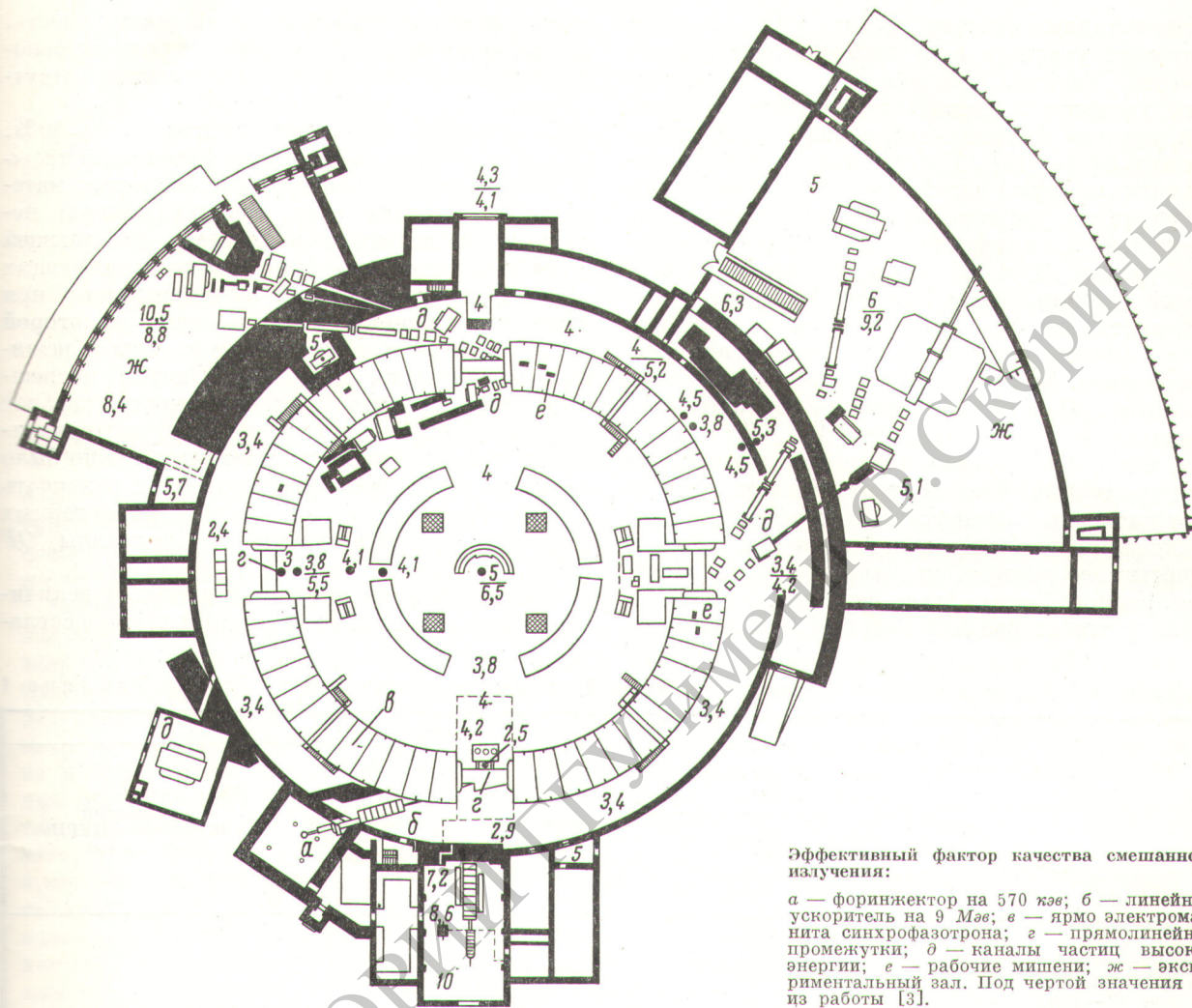
Современные ускорители протонов до высоких энергий порождают мощное вторичное излучение с очень сложным компонентным составом. Энергетический диапазон каждого компонента простирается от долей электронвольта до энергии, близкой к максимальной энергии ускоренных протонов. Такое разнообразие наряду с импульсным характером излучения чрезвычайно затрудняет определение степени радиационной опасности. Практически в подобной ситуации удастся исследовать лишь компоненты, дающие наибольший вклад в дозу в местах пребывания персонала [1—3]. При этом для оценки вклада нуклонов очень высоких энергий, как правило, пользуются различными упрощающими предположениями, удовлетворительными лишь в первом приближении.

Однако даже в случае абсолютной справедливости этих предположений неизбежно возникает дополнительная погрешность в результате того, что соотношение между потоком нейтронов высоких энергий и дозой, рекомендованное правилами [4], нельзя считать строго обоснованным.

Выходом из этого положения может служить использование известного экспериментального соотношения между плотностью линейных потерь энергии и фактором качества QF^* [6, 7]. С помощью такого соотношения можно вычислить эффективную величину QF любого излучения, если известен спектр линейной потери энергии (ЛПЭ) этого излучения. Зная величину QF , легко оценить значение дозового эквивалента в бэрадах. Спектр ЛПЭ в свою очередь можно определить с помощью тканеэквивалентного пропорционального счетчика Росси [8, 9]. Оценку среднего значения ЛПЭ возможно получить также путем анализа треков в ядерных эмульсиях или на снимках с трековых камер [10, 11]. Однако любой из перечисленных методов непригоден для быстрых и оперативных измерений в практических условиях.

Предложенный недавно рекомбинационный метод [12, 13] дает возможность преодолеть некоторые из этих трудностей и определить эффективный фактор качества неизвестного излучения одновременно с измерением поглощенной дозы, не прибегая к анализу спектра ЛПЭ. Этот метод был использован для определения величины фактора качества смешанного импульс-

* Термин «фактор качества» излучения предложен Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) [5] для обозначения физически измеримого параметра излучения, характеризующего это излучение с точки зрения ожидаемого биологического эффекта, в отличие от термина «относительная биологическая эффективность» (ОБЭ), который теперь рекомендуют использовать только в радиобиологии.



Эффективный фактор качества смешанного излучения:

а — форинжектор на 570 кэв; б — линейный ускоритель на 9 Мэв; в — ярмо электромагнита синхрофазотрона; г — прямолинейные промежутки; д — каналы частиц высокой энергии; е — рабочие мишени; ж — экспериментальный зал. Под чертой значения QF из работы [3].

ного излучения вблизи ускорителей высокой энергии ОИЯИ.

Измерения производились в помощью двояной тканеэквивалентной рекомбинационной камеры, подробно описанной в работе [14]. Величиной, пропорциональной фактору качества, служило отношение ионных токов двух камер, одна из которых работала в режиме насыщения, а в другой были созданы условия для коллонной рекомбинации. В режиме коллонной рекомбинации количество рекомбинирующих ионов зависит от линейной плотности ионов в треках частиц.

Результаты измерений, усредненные по всему объему камеры, соответствуют эффективной глубине ткани 2—5 см, что обусловлено конструктивными особенностями тканеэквивалент-

ной камеры. Погрешность, возникающая за счет довольно больших (30 × 30 см) размеров камеры (неоднородность поля излучения, изменение спектра в объеме камеры и т. д.), не учитывалась.

Результаты измерений эффективного фактора качества излучения в наиболее характерных точках внутри здания синхрофазотрона на 10 Гэв представлены на рисунке. Как ожидалось, QF достигает минимального значения (≤ 3) на участках, непосредственно прилегающих к открытым прямолинейным промежуткам ускорителя. В этих местах основной вклад в дозу дают первичные и вторичные частицы высокой энергии — релятивистские протоны и нейтроны, мезоны и электрон-фотонный компонент, — обладающие минимальными удель-

ными потерями энергии. По мере удаления от открытых участков вакуумной камеры фактор качества заметно увеличивается и в центре зала ускорителя достигает величины 5 (средняя энергия быстрых нейтронов в этой точке равна 0,6 Мэв [3]). Против окон в ярме электромагнита [ярмо электромагнита состоит, как показано на рисунке, из четырех квадрантов, в каждом из которых имеется 12 окон овальной формы (1 × 1,5 м) и 12 вертикальных щелей шириной 0,2 м] фактор качества равен 3,8, против щелей — 4,5, что также определяется различным вкладом высокоэнергетического компонента. За стеной из силикатного кирпича толщиной 60 см фактор качества увеличивается незначительно. По-видимому, это обусловлено тем, что поток быстрых нейтронов, убывающий при прохождении через стену, восполняется за счет каскадных процессов. За толстой защитой в экспериментальных залах величина фактора качества возрастает до максимального значения, равного 6—10. Такая величина QF хорошо согласуется со средней энергией нейтронов на

этих участках (0,4—0,8 Мэв), если учесть, что в малом экспериментальном зале высокоэнергетичный компонент практически отсутствует.

Погрешность измерений составляет ~30%. Она обусловлена следующими факторами; прежде всего неполной тканеэквивалентностью материала, из которого изготовлена камера; неполным насыщением в камере, работающей в режиме насыщения (для сильно ионизирующих частиц); погрешностями, возникающими при измерении ионного тока камеры; некоторой нелинейностью характеристик камеры в режиме рекомбинации [15, 16]. Однако погрешность при относительных измерениях (разброс показаний одного и того же прибора) существенно меньше и не превышает, как можно было ожидать, 15%. Этот факт позволяет различать в зале ускорителя несколько характерных участков в зависимости от величины QF (табл. 1).

Приведенные на рисунке и в табл. 1 величины в пределах ошибки измерений хорошо согла-

Эффективный фактор качества излучения, определенный на различных ускорителях

Таблица 1

Характеристика участков	Ускоритель				
	синхрофазотрон ОИЯИ на 10 Гэв		космотрон на 3 Гэв	бэватрон на 6,2 Гэв	протонный синхротрон ЦЕРНа на 28 Гэв
	рекомбинационный метод (см. рисунок)	оценка на основании состава излучения			
Расположены в непосредственной близости (2—3 м) от неэкранированной вакуумной камеры ускорителя	3	—	—	—	} 4,3—4,1—6,0—5,9 * [16]
Внешняя и внутренняя кольцевые зоны вдоль ярма электромагнита (в том числе центр зала)	3,4—5	4,1—6,5 [3]	} 5 [40]; 8,1 [14]	1,8±20% [9]	
Расположены за тонкой (до 60 см) защитой (места возможного пребывания персонала)	5—6	4,5 [3]		} 13—11—8—14 * [16]	2,8±20% [9]
Расположены за толстой (в плоскости равновесной орбиты) защитой (места постоянного пребывания персонала)	6—10	8,8—9,2 [3]	—		

* В различных точках.

Сопоставление эффективных факторов качества излучения для высокоэнергетических частиц

Таблица 2

Тип излучения	Фактор качества		
	данные настоящей работы	литературные данные	ОБЭ
Нейтроны, $E_{n \text{ макс}} = 680 \text{ Мэв}$	$2,7 \pm 0,8$	—	—
Протоны, $E_p = 680 \text{ Мэв}$	$1,8 \pm 0,6$	$1,4^* [18]$	$0,7-2^{**} [19-23]$
Рассеянное излучение в экспериментальных залах за толстой защитой	—	$5,3 \pm 0,5 [9];$ $10-13-3,6-4^{***} [16]$	—

* Для протонов с энергией 100—400 Мэв.
 ** Для протонов с энергией 510—730 Мэв (данные относятся к острым облучениям).
 *** В различных точках.

суются (за исключением одной точки) с результатами оценки, выполненной при заведомо пессимистических предположениях о спектре и составе излучения [3].

Величину эффективного фактора качества излучения вблизи других ускорителей высокой энергии оценивали многие авторы [9—11, 16]. Однако провести сравнение всех известных результатов довольно трудно, поскольку геометрия защиты на разных ускорителях различна и, кроме того, расположение точек измерения по отношению к ускорителю в этих работах указано не вполне конкретно. Тем не менее авторы настоящей работы попытались обобщить эти данные в табл. 1. Как следует из этой таблицы, результаты измерений и оценок довольно хорошо совпадают, за исключением данных, относящихся к бэватрону и полученных на основании анализа спектра ЛПЭ, т. е. наиболее достоверных по способу получения информации. Весьма сомнительно, чтобы эти данные были ошибочными, однако нет оснований приписывать величину $QF = 1,8 \div 2,8$ излучению на удаленных от ускорителя участках (например, пульте управления), сильно обогащенному в мягкой области [17]. Можно предположить, что это связано с наличием в местах измерения большого количества релятивистских частиц, хотя прямого указания на это в работе [9] нет.

Результаты измерения фактора качества излучения в коллимированных пучках частиц от синхротрона ОИЯИ на 680 Мэв приведены в табл. 2.

Для пучка нейтронов с максимальной энергией 680 Мэв [24] измерения проводились в водном фантоме [25]. Максимум поглощенной дозы соответствовал 24 см воды. Изменение фак-

тора качества с глубиной незначительно и не превосходит ошибки измерений вплоть до 1,2 м. Измерения фактора качества в пучке протонов с энергией 680 Мэв выполнялись без фантома.

В третьей и четвертой графах табл. 2 представлены для сравнения результаты вычислений или измерений величины QF по данным других авторов и, кроме того, для сопоставления величины ОБЭ, полученные, как правило, при острых облучениях животных (мышей и собак).

В заключение авторы пользуются случаем выразить благодарность В. Г. Буянину и Э. И. Обьезднову за проведение измерений.

Поступила в Редакцию 21/X 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Валлес и др. Сборник материалов симпозиума по отдельным вопросам дозиметрии. М., Госатомиздат, 1962, стр. 175.
2. В. М о у е r. Conference on Shielding of High-Energy Accelerators. New York, 1957, p. 38.
3. Л. С. З о л и н, В. Н. Л е б е д е в, М. И. С а л а ц к а я. Препринт ОИЯИ № 2251. Дубна, 1965.
4. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, № 333-60. М., Госатомиздат, 1960.
5. «Измерит. техника», 10, 54 (1963).
6. Рекомендации Международной комиссии по защите от излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
7. Health Phys., 9, 357 (1963).
8. H. R o s s i, W. R o s e n z w e i g. Radiation Res., 10, 532 (1959).
9. H. R o s s i et al. Health Phys., 8, 331 (1962).
10. K. B r i e n et al. In book «Neutron Dosimetry». Vol. II. Vienna, IAEA, 1963, p. 199.
11. J. H a n d l o s e r. Health Phys., 2, 165 (1959).
12. М. З е л ь ч и н с к и й. В сб. «Neutron Dosimetry». Vol. II. Vienna, IAEA, 1963, p. 397.
13. A. S u l l i v a n, J. B a a r l i. Preprint CERN 63-17 (1963).

14. М. Зельчинский, В. Н. Лебедев, М. И. Салацкая. «Приборы и техника эксперимента», 6, 73 (1964).
15. М. Зельчинский. Nukleonika, 7, 175 (1962).
16. J. Vaarli. Report CERN DI(HP), 1964.
17. R. Lehman, O. Fekula. Nucleonics, № 1, 35 (1964).
18. J. Turner et al. Health Phys., 10, 783 (1964).
19. П. П. Саксонов и др. «Докл. АН СССР», 162, 688 (1965).
20. Ю. Г. Григорьев и др. В сб. «Biological Effects of Neutron and Proton Irradiation». Vol. I. Vienna, IAEA, 1964, p. 223.
21. Сб. «Материалы по биологическому действию протонов высоких энергий» Изд. Института гигиены труда и профзаболеваний Академии медицинских наук СССР. Москва, 1962, стр. 10, 65.
22. P. Bonét-Maury et al. In book «Biological Effects of Neutron and Proton Irradiation». Vol. I. Vienna, IAEA, 1964 p. 261.
23. J. Ashikawa et al. In book «Biological Effects of Neutron and Proton Irradiation». Vol. I. Vienna, IAEA, 1964, p. 249.
24. В. С. Киселев и др. ЖЭТФ, 35, 812 (1958).
25. М. Зельчинский. Nukleonika, 10, 77 (1965).

Спиральные магнитные конфигурации с минимумом \bar{B}

Н. М. ЗУЕВА, Л. С. СОЛОВЬЕВ

УДК 533.9

Проведено общее рассмотрение магнитных конфигураций с минимумом \bar{B} , обладающих винтовой симметрией. Получено приближенное аналитическое выражение для удельного объема $V'(\Phi)$ в окрестности винтовой магнитной оси. Точные формулы для удельного объема $V'(\Phi)$ и среднего угла прокручивания силовых линий $\iota = 2\pi\chi'(\Phi)$ выражены через однократные интегралы. На основании численных расчетов этих интегралов построены графики $V'(\Phi)$ и $\chi'(\Phi)$ вплоть до сепаратрисы магнитных поверхностей.

В работе [1] приведен пример прямого периодического поля с минимумом \bar{B} , т. е. поля, у которого удельный объем $V'(\Phi) = \int \frac{dl}{B}$ на оси системы максимален. Как показал Фюрт [2], обладать минимумом \bar{B} может и поле, имеющее винтовую симметрию. Магнитные поверхности такого поля представляют собой вложенные друг в друга винтовые магнитные трубки постоянного поперечного сечения. В настоящей работе были рассмотрены магнитные конфигурации, обладающие винтовой симметрией.

Общие соотношения

Безвихревое магнитное поле \mathbf{B} , обладающее винтовой симметрией, может быть описано как скалярным потенциалом $\mathbf{B} = \nabla \Phi_m$, так и функцией потока ψ . В цилиндрической системе координат r, Φ, z винтовое поле зависит от двух переменных $\mathbf{B} = \mathbf{B}(r, \theta)$, $\theta = \Phi - \alpha z$, где $\alpha = 2\pi/L$, L — шаг винта. Общее выражение для скалярного потенциала винтового поля имеет вид

$$\Phi_m = B_{z0}z - A\Phi + \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(arn) \sin n\theta, \quad (1)$$

где Z_n — бесселевы функции $Z_n(x) = a_n I_n(x) + b_n K_n(x)$. Такое поле представляет собой суперпозицию однородного поля B_{z0} , параллельного оси z , поля нити с током, натянутой вдоль оси z , и поля винтовых обмоток, расположенных на цилиндрических поверхностях $r = R_1$ и $r = R_2$, т. е. рассматривается случай, когда $R_1 < r < R_2$.

Функция потока ψ , являющаяся комбинацией компонент векторного потенциала $\psi = A_z + \alpha r A_\Phi$, удовлетворяет уравнению

$$r \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{r}{\beta} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = \frac{2\alpha r^2}{\beta^2} I, \quad (2)$$

где $\beta \equiv 1 + \alpha^2 r^2$, причем в рассматриваемом случае безвихревого поля $I \equiv B_z + \alpha r B_\Phi = \text{const}$. Компоненты поля \mathbf{B} выражаются через ψ :

$$r B_r = \frac{\partial \psi}{\partial \theta}; \quad \alpha r B_z - B_\Phi = \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (3)$$

При известном магнитном поле $\mathbf{B}(r, \theta)$ функция $\psi(r, \theta)$ может быть определена интегрированием по r при фиксированном θ : $\psi = \int_0^r (\alpha r B_z - B_\Phi) dr$. Функция ψ , соответствующая полю (1), имеет вид

$$\psi = B_{z0} \frac{\alpha r^2}{2} + A \ln r - r \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(arn) \cos n\theta. \quad (4)$$

Таким образом, получены точные выражения для поля и магнитных поверхностей $\psi = \text{const}$ в цилиндрической системе координат. Выведем приближенные аналитические выражения для удельного объема и среднего угла прокручивания силовых линий в окрестности