

5

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 78-13

Л.М.Барков, В.Б.Барышев, Г.Н.Кулипанов,
Н.А.Мезенцев, В.Ф.Пиндюрин, А.Н.Скринский,
В.М.Хорев

ПРОЕКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ "ЗМЕЙКИ" ИЗ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ ДЛЯ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3

Новосибирск

1978

А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждается проект постановки на накопитель ВЭШ-3 "змейки" из сверхпроводящих магнитов для повышения жесткости и интенсивности генерируемого синхротронного излучения. Дано обоснование выбора параметров "змейки", исходя из желания иметь максимальную яркость источников в области $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$. Рассчитаны параметры пучка синхротронного излучения, генерируемого "змейкой" (полная мощность, спектральное и угловое распределение).

Приведена конструкция двадцатипольной "змейки" длиной $\sim 1 \text{ м}$ с максимальным полем $H_0 \sim 35 \text{ кЭ}$, максимальным зазором $1,6 \text{ см}$ и свободной вертикальной апертурой для пучка $\sim 0,8 \text{ см}$. Используемая схема постановки "змейки" в прямолинейный промежуток накопителя предусматривает возможность проводить накопление электронов вне "змейки" в полный фазовый объем накопителя, затем с помощью локального искажения равновесной орбиты вводить электронный пучок в "змейку".

Рассмотрен вопрос о влиянии магнитной "змейки" на движение частиц в накопителе (искажение равновесной орбиты, сдвиг частот бетатронных колебаний, появление кубической нелинейности и т.д.).

L.M.Barkov, V.B.Baryshev, G.N.Kulipanov,
N.A.Mezentsev, V.F.Pindyurin, A.N.Skrinsky,
V.M.Khorev

A PROPOSAL TO INSTALL A SUPERCONDUCTING
WIGGLER MAGNET ON THE STORAGE RING VEPP-3
FOR GENERATION OF THE SYNCHROTRON RADIATION

Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk

A proposal to install a superconducting wiggler magnet on the storage ring VEPP-3 in order to shift the spectrum of the synchrotron radiation to a shorter wavelength range and to enhance the SR intensity is discussed. The basic considerations for choosing optimum wiggler parameters to produce the maximum brightness of SR beam in the range of $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ are presented. Total radiated power, spectral and angular distribution and other characteristics of the SR beam have been calculated.

A 20-pole wiggler design is presented with the total length of about 1 m, maximum magnetic field strength of 35 kGs, poles spaced by 16 mm, vertical aperture accessible for the electron beam of about 8 mm. The used scheme for wiggler installation in a storage ring straight section provides the possibility to store the electrons apart from the wiggler aperture using the complete admittance of the storage ring with the subsequent shifting of the stored beam into the wiggler by means of local displacement of the orbit.

The appearance of the closed orbit distortion, betatron oscillations frequency shift, contribution to the cubic nonlinearity in the presence of wiggler field has been considered.

Практически все накопители, используемые в настоящее время для экспериментов с синхротронным излучением (СИ), разрабатывались, прежде всего, как установки со встречными электрон-позитронными пучками. Несмотря на высокие параметры пучков СИ, эти накопители заведомо не являются оптимальными генераторами такого излучения.

Весьма эффективным способом улучшения характеристик пучков СИ существующих накопителей является постройка магнитных "змеек" /1-7/, создающих на участке орбиты накопителя знакопеременное периодическое магнитное поле, позволяющее концентрировать в малый телесный угол излучение с достаточно большого участка траектории. Использование "змеек" может быть полезно

при решении разнообразных задач, связанных с генерацией СИ: - получение сверхмощных и сверхжестких пучков СИ; эффективное преобразование высокочастотной энергии в синхротронное излучение; повышение яркости пучков СИ; трансформация спектральных характеристик СИ (повышение спектральной плотности в нужном участке спектра, ослабление коротковолновой части и т.д.); получение пучков СИ с определенными поляризационными свойствами.

Весьма многообещающим является предложение использовать постройку "змеек" в электронный накопитель для создания лазера на свободных электронах /8, 9/.

Параметры "змеек" (величина магнитного поля, период 2δ , полная длина змейки L_{3M}) выбираются в зависимости от решаемых задач. Отчетливо видны два крайних варианта использования магнитных "змеек": 1) с предельно большими магнитными полями (до $60+100 \text{ кЭ}$) для максимального увеличения энергии квантов синхротронного излучения в данном накопителе; 2) с предельно коротким периодом изменения магнитного поля и малой величиной поля ($0.1+1 \text{ кЭ}$) для получения так называемого "ондуляторного" излучения /4, 5/.

В настоящей работе рассмотрен вариант использования на накопителе ВЭПП-3 сверхпроводящей "змеек" длиной $\sim 1 \text{ м}$, сравнительно большим полем (35 кЭ), с малым пространственным периодом ($2\delta = 9 \text{ см}$) и малым вертикальным зазором между полюсами (1.5 см). Параметры "змеек" выбирались из условия повышения яркости пучка СИ в области $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$. /11/

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ "ЗМЕЙКИ"

Для "змеек" с большими магнитными полями длина формирования излучения много меньше периода изменения магнитного поля. Характеристики СИ с каждого участка траектории определяются локальной кривизной этого участка, и для описания результирующего излучения в некоторой точке наблюдения пригодны формулы синхротронного излучения для случая движения электронов по круговой траектории соответствующим образом проинтегрированные по траектории электронов. Достаточно подробный анализ характеристик излучения "змейки" для рассматриваемого случая приведен в работе [7, II], поэтому здесь мы ограничимся изложением только наиболее существенных параметров такого излучения. Для простоты также будем считать, что точка наблюдения P находится от "змейки" на расстоянии, значительно превышающем ее длину.

Вертикальная составляющая магнитного поля вблизи оси "змейки" может быть представлена в виде:

$$H_z(s) = H_0 \sin \frac{\pi s}{\beta} \quad (1)$$

где: s — продольная координата; 2β — период изменений магнитного поля; H_0 — максимальное поле. Траектория электронов в "змеijke" описывается отклонением $\chi(s)$ электрона от оси и углом $\chi'(s)$ между вектором скорости \vec{v}_e электрона и осью (рис. I):

$$\chi(s) = \chi_0 \sin \frac{\pi s}{\beta}; \quad \chi'(s) = \alpha_0 \cos \frac{\pi s}{\beta} \quad (2)$$

Здесь:

$$\alpha_0 = \frac{eH_0\beta}{\sigma E}; \quad \alpha_0 [\text{мрад}] = 9,5 \cdot 10^{-2} \frac{H_0 [\text{кЭ}] \cdot \beta [\text{см}]}{E [\text{ГэВ}]} \quad (3)$$

$$\chi_0 = \frac{\alpha_0 \beta}{\sigma} = \frac{eH_0\beta^2}{\sigma^2 E}; \quad \chi_0 [\text{мм}] = 3 \cdot 10^{-4} \frac{H_0 [\text{кЭ}] \beta^2 [\text{см}^2]}{E [\text{ГэВ}]} \quad (4)$$

$E = mc^2\gamma$ — энергия электронов в накопителе.

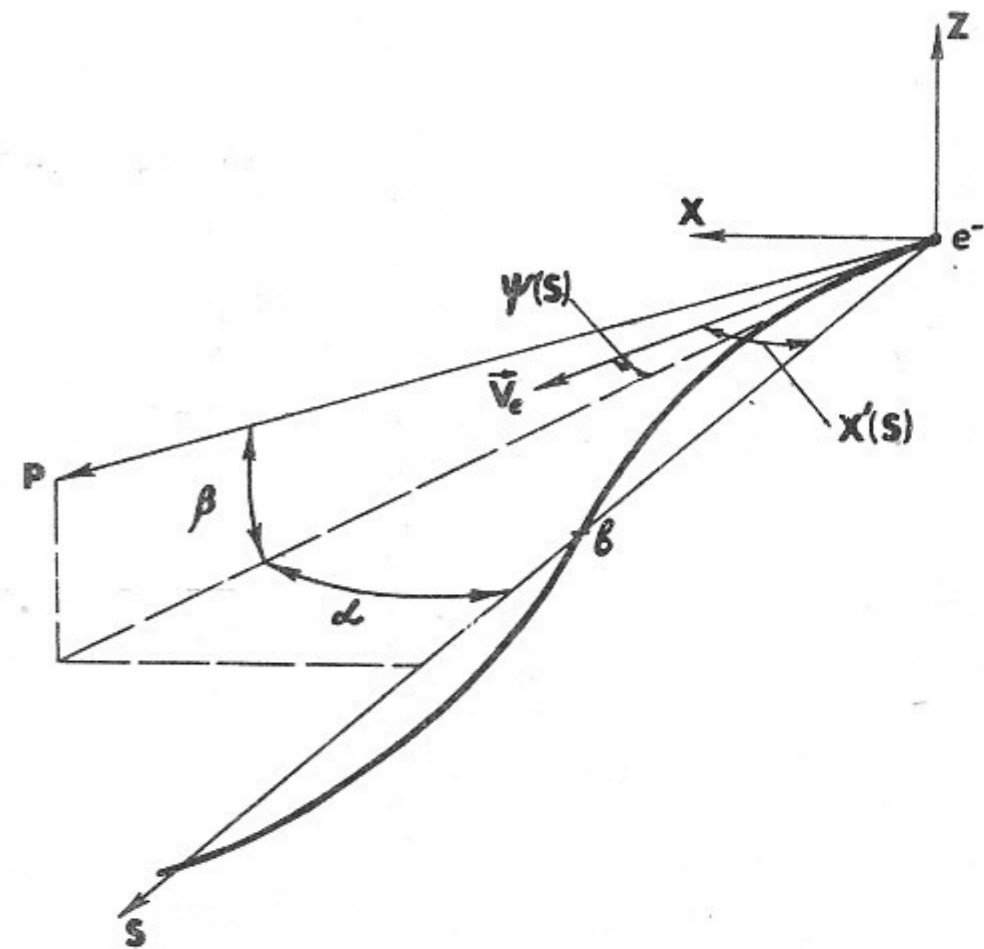


Рис. I. Система координат и принятые обозначения.

Для магнитного поля, описываемого зависимостью (I), полные потери энергии пучка ультрарелятивистских электронов в виде синхротронного излучения из "змейки" составляют:

$$W [B\tau] = 1,27 \cdot 10^{-4} E^2 [\text{ГэВ}] \cdot H_0^2 [\text{кЭ}] \cdot I [\text{мА}] \cdot \beta [\text{см}] \cdot n \quad (5)$$

где I — электронный ток в накопителе; n — полное число периодов магнитного поля "змейки".

Существенной характеристикой излучения является спектральный поток фотонов $\dot{N}(\lambda)$ или спектральная мощность $W(\lambda)/\tau$ — мощность излучения на данной длине волны λ в относительном интервале $\Delta\lambda/\lambda$:

$$\dot{N}(\lambda) \left[\frac{\text{фот}}{\text{сек}} \right] = 1,5 \cdot 10^{13} H_0 [\text{кЭ}] \cdot n \cdot \beta [\text{см}] \cdot I [\text{мА}] \cdot \eta_w(y_0) \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (6)$$

$$W(\lambda) [B\tau] = 2,9 \cdot 10^{-2} H_0 [\text{кЭ}] \cdot \frac{n\beta [\text{см}]}{\lambda [\text{А}]} \cdot I [\text{мА}] \cdot \eta_w(y_0) \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (7)$$

Здесь: $y_0 = \frac{\lambda_{co}}{\lambda}$; $\lambda_{co} = \frac{4\pi mc^2}{3eH_0\gamma^2}$; $\lambda_{co} [\text{Å}] = \frac{186.4}{E^2 [\text{ГэВ}] \cdot H_0 [\text{кЭ}]} \quad (8)$

λ_{co} — так называемая "критическая длина волны синхротронного излучения" при максимальном магнитном поле H_0 ; $\eta_w(y_0)$ — универсальная спектральная функция "змейки" — аналог универсальной спектральной функции СИ при движении электронов по круговой траектории. Графики спектрального потока фотонов из сверхпроводящей "змейки" ($H_0 = 35 \text{ кЭ}$, $2\theta = 9 \text{ см}$, $n = 10$) при некоторых значениях энергии E в накопителе представлены на рис.2

Представляет также интерес спектрально-угловое распределение мощности излучения (или потока фотонов) в плоскости "змейки", просуммированное по вертикальному углу β . В приближении $\alpha_0 \gg 1/\gamma$, что соответствует интересующему нас случаю (угол поворота электронов в "змейке" значительно больше угла формирования излучения), угловое распределение мощности определяется ис-

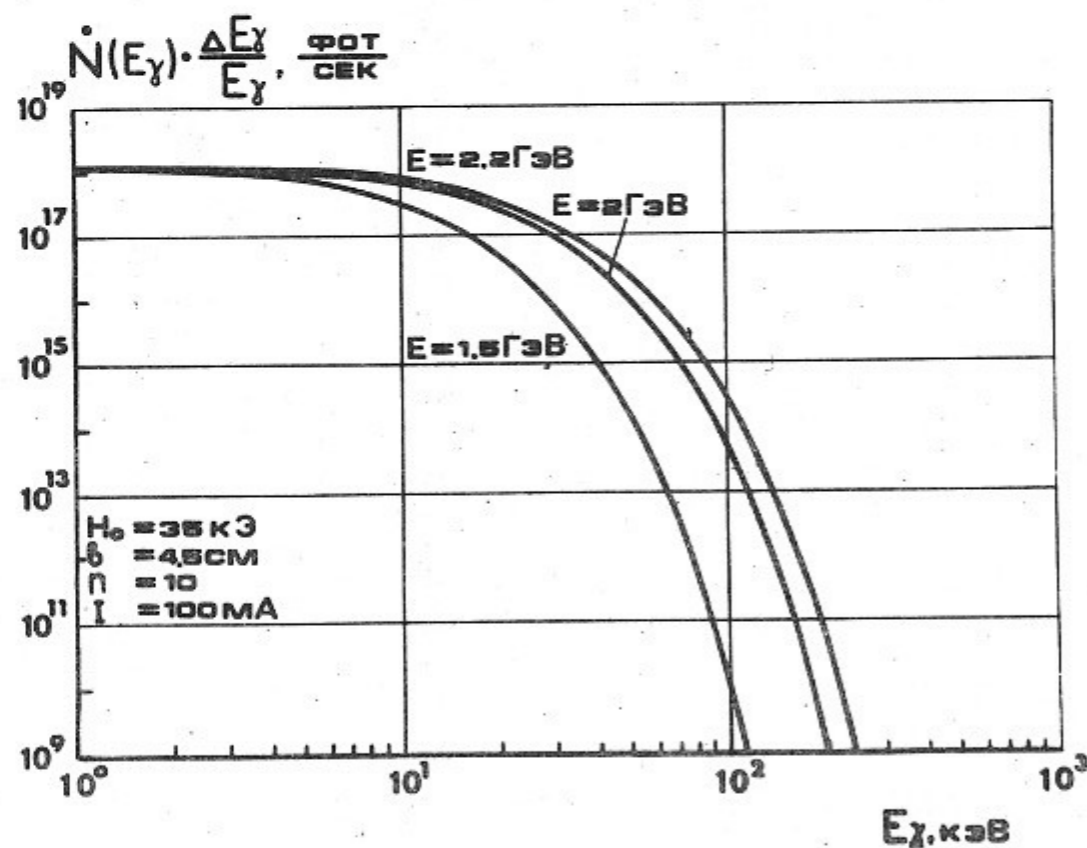


Рис.2. Спектральная плотность потока фотонов из "змейки".

ключительно траекторией электронов в "змейке", и мощность излучения при $\alpha > \alpha_0$ практически равна нулю. В явном виде спектрально-угловой поток фотонов и мощность излучения определяются выражениями:

$$\dot{N}(\lambda, \alpha) \left[\frac{\text{Фот}}{\text{сек. мрад}} \right] = 4.9 \cdot 10^{13} E [\text{ГэВ}] \cdot I [\text{мА}] \cdot n \cdot \eta(y_\alpha) \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (9)$$

$$W(\lambda, \alpha) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{мрад}} \right] = 9.8 \cdot 10^{-2} \frac{E [\text{ГэВ}] \cdot I [\text{мА}] \cdot n \cdot \eta(y_\alpha) \cdot \Delta\lambda}{\lambda [\text{Å}]} \quad (10)$$

Здесь:

$$y_\alpha = y_0 \cdot \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 - \alpha^2}} \quad (11)$$

$\eta(y_\alpha)$ — универсальная спектральная функция обычного СИ. На рис.3 показана зависимость спектрально-углового потока фотонов $\dot{N}(\lambda, \alpha)$ от горизонтального угла α при $E = 2 \text{ ГэВ}$ и некоторых значениях длины волны λ излучения.

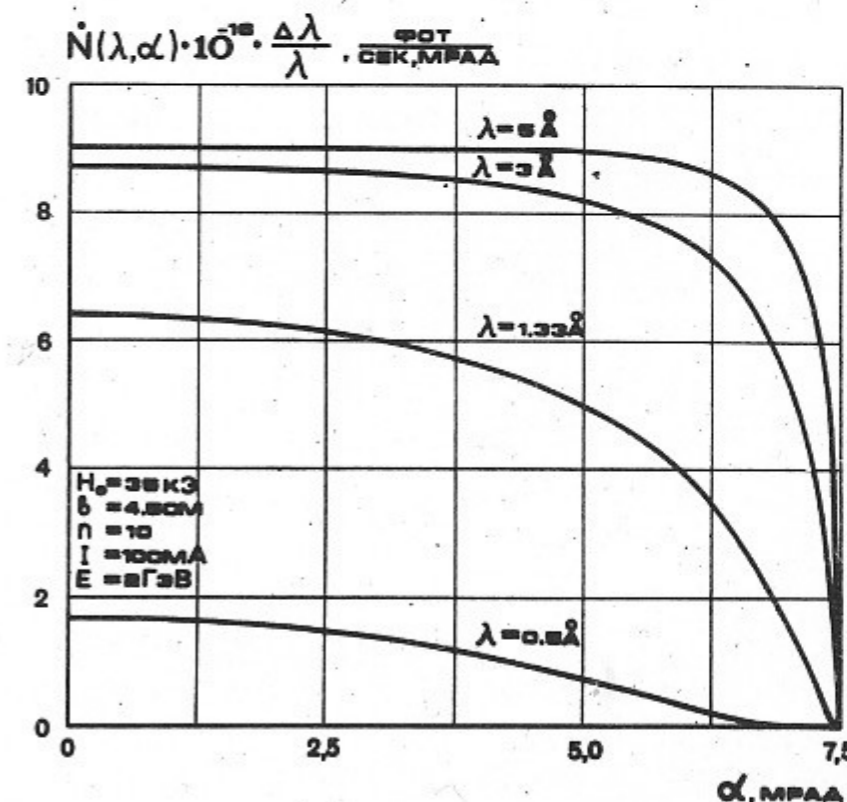


Рис.3. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из "змейки" (α — горизонтальный угол).

Спектрально-угловое распределение мощности излучения в вертикальном направлении при фиксированном горизонтальном угле α аналогично распределению в случае круговой траектории электронов. Поэтому угловая расходимость излучения в вертикальном направлении при заданном α может быть определена по обычным формулам [7] с заменой $y = \lambda c / \lambda$ в случае обычного СИ на аргумент y_α , где y_α дается (II):

$$2\beta_{\lambda\alpha} [\text{мрад}] = \frac{0.82}{E[\text{ГэВ}]} \cdot \xi(y_\alpha) \quad (I2)$$

Угол $2\beta_{\lambda\alpha}$ характеризует полуширину углового распределения, а ξ - универсальная угловая функция [7, II].

Аналогичная замена y на y_α в формулах для линейной поляризации, усредненной по вертикальному углу обычного СИ с заданной длиной волны λ , делает применимыми эти формулы для описания линейной поляризации $P(\lambda, \alpha)$ излучения "змейки", идущего под горизонтальным углом α и просуммированного по β :

$$P(\lambda, \alpha) = \frac{y_\alpha K_{3/2}(y_\alpha)}{y_\alpha} \quad (I3)$$

Зависимости полуширины углового распределения $2\beta_{\lambda\alpha}$ и степени линейной поляризации $P(\lambda, \alpha)$ излучения "змейки", как функции горизонтального угла α , при некоторых значениях λ и $E = 2$ ГэВ приведены на рис. 4 и Рис. 5, соответственно.

Наиболее показательной характеристикой источника излучения является его спектральная яркость [7]. Для "змейки" под нулевым горизонтальным углом спектральная яркость $B(\lambda, \alpha = 0)$ больше в $2n$ раз яркости накопителя-источника обычного СИ при тех же значениях λ , H_0 и E . При увеличении угла α яркость уменьшается как за счет уменьшения спектральной мощности излучения "змейки" в заданный телесный угол, так и за счет увеличения эффективной площади источника. Характер зависимости спектральной яркости от горизонтального угла для рассматриваемой конструкции "змейки" иллюстрируется Рис. 6. При этом за характерные размеры ΔX , ΔZ источника излучения при $\alpha = 0$ приняты: $\Delta X = \sqrt{2} \pi r_k$,

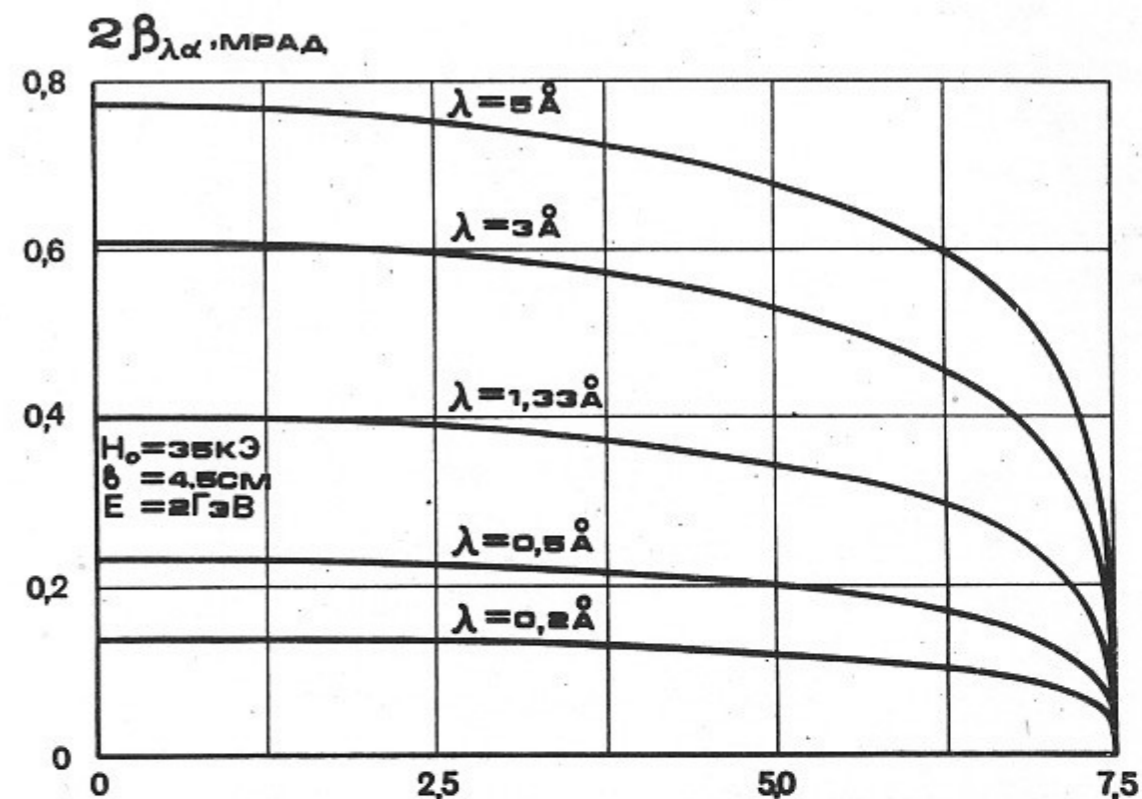


Рис. 4. Полуширина вертикального распределения потока фотонов как функция горизонтального угла α и длины волны.

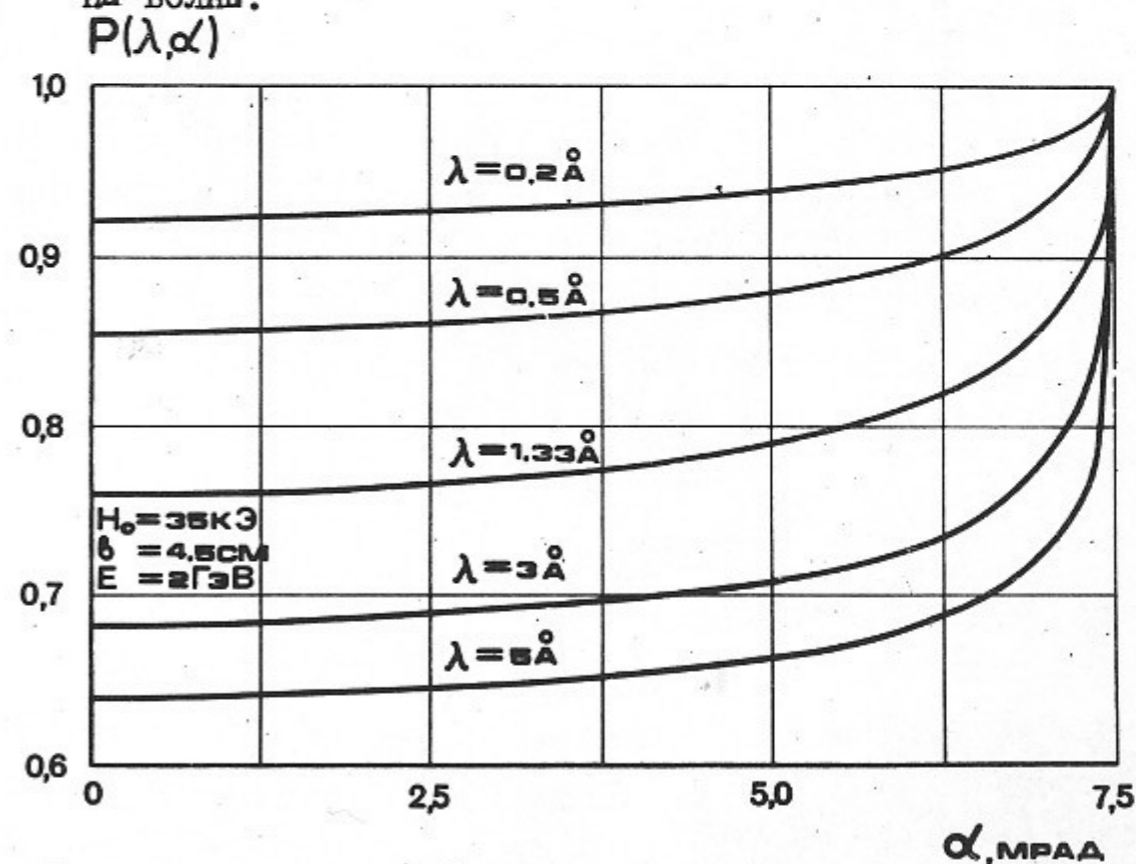


Рис. 5. Степень линейной поляризации излучения "змейки" $P(\lambda, \alpha)$ в зависимости от горизонтального угла α при некоторых значениях длины волны λ .

$\Delta z = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z$, где $\sigma = 1$ мм, $\sigma_z = 0,1$ мм – стандартные горизонтальный и вертикальный, соответственно, размеры электронного пучка в накопителе ВЭШ-3 при $E = 2$ ГэВ в месте постановки "змейки".

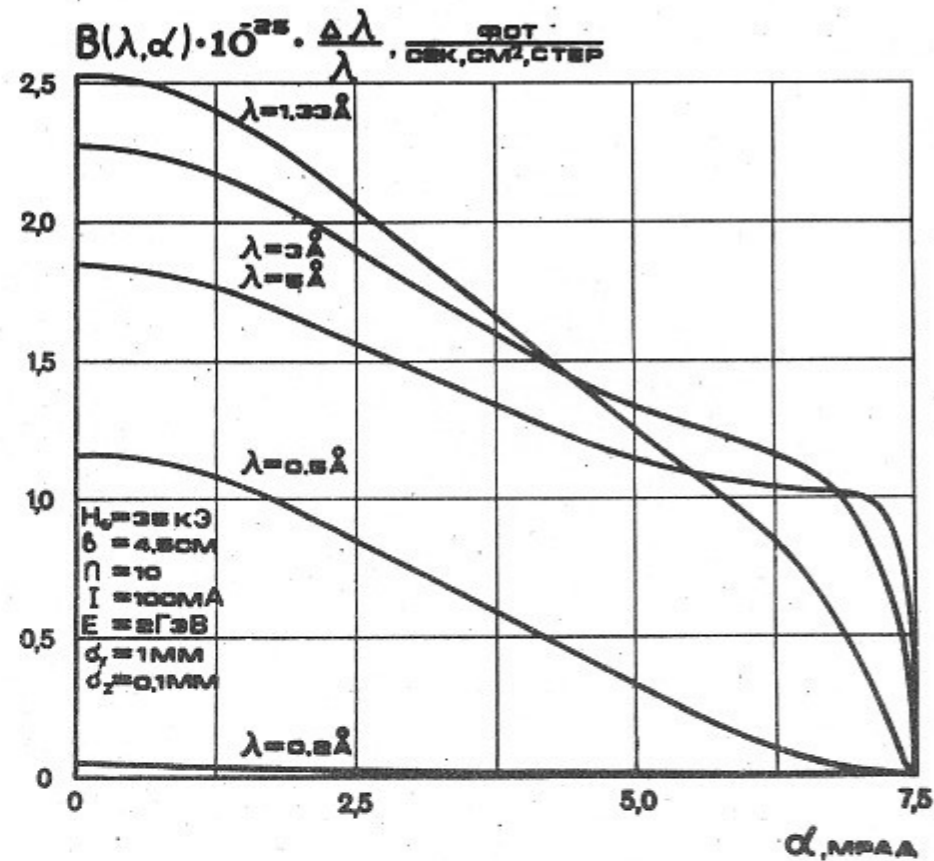


Рис.6. Зависимость спектральной яркости "змейки" от горизонтального угла α .

Основные параметры пучка синхротронного излучения из сверхпроводящей "змейки" ($H_0 = 35$ кЭ, $2b = 9$ см, $n = 10$), которая будет установлена на ВЭШ-3 ($E = 2$ ГэВ, $I = 100$ мА), приведены в таблице I.

ВЛИЯНИЕ ЗМЕЙКИ НА ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ В НАКОПИТЕЛЕ

При рассмотрении различных вариантов "змеек" для генерации синхротронного излучения очевидны преимущества "змеек" с малым периодом изменения магнитного поля, т.к. при заданной полной длине такая "змейка" позволяет иметь большее число полюсов ($2n_{3M}$) и соответственно лучшие характеристики пучков синхротронного из-

лучения. Однако такая "змейка" одновременно требует уменьшения вертикальной апертуры, поскольку при заданном максимально допустимом поле на обмотке (~ 80 кЭ) для получения поля 30-50 кГс на орбите период изменения магнитного поля должен быть в несколько раз больше вертикальной апертуры.

Уменьшение вертикальной апертуры с одной стороны полезно, т.к. при этом уменьшается, как объем, охлаждаемый гелием, так и внешние габариты установки, существенно уменьшается энергия, запасенная в сверхпроводящих магнитах, упрощается эксплуатация "змейки". С другой стороны малый размер вакуумной камеры в "змейке" делает затруднительным накопление электронов.

Для обеспечения возможности использования полного фазового объема накопителя при накоплении электронов принятая схема постановки "змейки" в прямолинейный промежуток ВЭШ-3 предусматривает возможность проводить накопление вне "змейки" в полный фазовый объем накопителя. После накопления необходимого тока и подъема энергии "затухший" пучок электронов несколькими корректорами плавно вводится в "змейку" при включенном магнитном поле (рис.11).

Силы корректоров подобраны таким образом, чтобы не возмущать орбиту в остальной части накопителя. Для того, чтобы положение пучка электронов не зависело от величины поля в "змейке", по краям стоят доворотные магниты, создающие угол $\alpha_0/2$. После проведения необходимой коррекции плавно включается поле в "змейке" одновременно с полем в доворотных магнитах.

Магнитное поле "змейки" в рабочей области приближенно можно описать в виде:

$$\begin{aligned} H_x &= -H_0 \sin \frac{\sigma x}{a} \sin \frac{\sigma z}{b} \left(\frac{\sigma}{a} z + K_x z^3 + \dots \right) \\ H_z &= H_0 \cos \frac{\sigma x}{a} \sin \frac{\sigma z}{b} \left[1 + \frac{\pi^2 (a^2 + b^2)}{2a^2 b^2} z^2 + \dots \right] \\ H_s &= H_0 \cos \frac{\sigma x}{a} \cos \frac{\sigma z}{b} \left(\frac{\sigma}{b} z + K_s z^3 + \dots \right) \end{aligned} \quad (14)$$

где: x, z, s – соответственно радиальное, вертикальное и продольное направления; a – эффективный радиальный размер "змейки"; K_x, K_s – эффективные коэффициенты разложения поля H_x, H_s реальной "змейки" по мультиполям.

При анализе влияния поля "змейки" на движение частиц в накопителе достаточно очевидным является следующее:

1) Для равновесной частицы, проходящей в "змейке" с координатой $\xi = 0$ существует только поле $H_{z0} = H_0 \cos \frac{\pi \kappa}{\alpha} \sin \frac{\pi s}{\beta}$, определяющее траекторию электронов в "змейке" (отклонение по углу и координате $\kappa(s)$ и $\kappa'(s)$ определяется формулами (3), (4)).

2) Частицы в накопителе при прохождении "змейки" испытывают дополнительную фокусировку. Обратное фокусное расстояние эффективной линзы для вертикального движения равно:

$$\frac{1}{F_z} = \frac{H_0^2 \beta}{(HR)^2} \left(1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right) n \quad (15)$$

Первый член в круглых скобках отвечает краевой фокусировке, второй член возникает благодаря тому, что равновесная частица проходит участки с полем в "змейке" с координатой $\kappa \neq 0$ и секступольный член в разложении поля H_z вызывает появление квадрупольного поля, которое фокусирует по вертикали и дефокусирует по радиусу.

Обратное фокусное расстояние по радиусу имеет вид:

$$\frac{1}{F_x} = - \frac{H_0^2 \beta^3}{(HR)^2 \alpha^2} n \quad (16)$$

Для радиальных бетатронных колебаний фокусировка благодаря повороту частиц в магнитном поле точно компенсирует краевой эффект.

Формулы (15), (16) справедливы при условии $F_{x,z} \gg L_{3M}$. Влиянием мультиполей более высокого порядка можно пренебречь, т.к. малый параметр $\frac{H_0 \beta}{HR} \sim 10^{-2}$ будет иметь более высокую степень.

Сдвиги частот бетатронных колебаний можно оценить, используя известную формулу:

$$\Delta V_{\kappa z} = \frac{1}{4\pi} \frac{\beta_{\kappa z}}{F_{\kappa z}} \quad (17)$$

где: $\Delta V_{\kappa z}$ - сдвиги частот радиального или вертикального направлений; $\beta_{\kappa z} = \beta$ - функция основной магнитной структуры накопи-

теля в месте расположения "змейки".

Основные сдвиги частот определяются выражениями:

$$\Delta V_x = - \frac{\beta_x H_0^2 \beta^3}{4\pi (HR)^2 \alpha^2} n \quad (18)$$

$$\Delta V_z = \frac{\beta_z H_0^2 \beta}{4\pi (HR)^2} \left(1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}\right) n \quad (19)$$

где n - число периодов "змейки".

Величины ΔV_x и ΔV_z при включении "змейки" предполагается компенсировать плавным изменением токов линз прямолинейного промежутка, в котором расположена "змейка". Линзы имеют раздельное питание.

3) Наличие квадратичного по z члена в разложении H_z и кубичных членов в разложении H_x и H_s приводит к появлению зависимости фокусного расстояния "змейки" по вертикали от амплитуды бетатронных колебаний и соответственно $\frac{\partial V_z}{\partial \alpha_z^2}$.

Наличие в разложении поля H_z членов $\sim \kappa^4$ и учет того, что равновесная орбита проходит участки с полем в "змейке" с координатой $\kappa \neq 0$, приводит к зависимости фокусного расстояния "змейки" от амплитуды радиальных бетатронных колебаний и, соответственно, появлению $\frac{\partial V_x}{\partial \alpha_x^2}$ и $\frac{\partial V_z}{\partial \alpha_x^2}$. Кубические нелинейности, возникающие при включенной "змейке", могут быть оценены из формул:

$$\frac{\partial V_x}{\partial \alpha_x^2} = \frac{3\pi}{32} \frac{\beta_x H_0^2 \beta^3}{(HR)^2 \alpha^4} \quad (20)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial \alpha_x^2} = \frac{3\pi}{32} \frac{\beta_z H_0^2 (\alpha^2 + \beta^2)^2}{(HR)^2 \alpha^4 \beta} \quad (21)$$

Из выражений (18-21) видно, что увеличение параметра всегда приводит к уменьшению сдвига частот и кубических нелинейностей. Накладывая требования на величины кубических нелинейностей из соображений хорошего времени жизни пучка, можно определить нижнюю границу параметра α .

Для накопителя ВЭШ-3 с β -функциями в месте "змейки":
 $\beta_x = 200$ см, $\beta_z = 200$ см; и "змейки" с параметрами: $H_0 = 35$ кГс, $b = 4,5$ см, $a = 6$ см, $n = 10$ - оценки нелинейностей и сдвигов частот бетатронных колебаний равны:

$$\frac{\partial V_x}{\partial a_x^2} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/см}^2 \quad \frac{\partial V_z}{\partial a_z^2} \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ 1/см}^2$$

$$\Delta V_x \approx 2 \cdot 10^{-2} \quad \Delta V_z \approx -0,1$$

КОНСТРУКЦИЯ "ЗМЕЙКИ" ДЛЯ ВЭШ-3

Магнитная дорожка содержит 20 пар сверхпроводящих магнитов (СПМ), создающих знакопеременное поле с амплитудой 35 кГс и полупериодом 4,5 см.

При проектировании "змейки" предусмотрена возможность ее постановки и удаления без нарушения вакуума в кольце ВЭШ-3. Магнитное поле создается только только в части вакуумной камеры с малой вертикальной апертурой. Блок сверхпроводящих магнитов может быть заменен на другой в зависимости от требований к пучку СИ.

Конструкция "змейки" схематически показана на Рис. 7, 8, 9. Вакуумная камера накопителя (9₁) в поперечном сечении имеет два участка с различной вертикальной апертурой. Накопление электронов ведется в широкой части камеры. Блок сверхпроводящих магнитов (9₂) охватывает ее участок с меньшей апертурой. Перевод пучка в узкую часть камеры осуществляется с помощью внешних (не сверхпроводящих) магнитов при выключенном магнитном поле "змейки". Стенки камеры охлаждаются жидким азотом. Это позволит разместить ее в зазоре блока магнитов без промежуточного теплового экрана.

СПМ помещены в герметичный корпус (8₇), выполняющий роль силового каркаса и резервуара с жидким гелием. Корпус прикреплен с помощью подвесок (9₂) к азотному экрану (8₆). Азотный экран подвешен внутри вакуумного кожуха (8₅) на двух нержаве-

щих пластинах (8₄). Схема подвески обеспечивает сохранение положения блока магнитов после охлаждения.

Жидкий гелий поступает из сосуда дьюара (7₅) емкостью 100л. Через сосуд проходят токовводы (7₂) и трубка для подачи жидкого гелия (7₁). Рабочий ток токовводов 250 А, их конструкция аналогична описанной Эфферсоном в /10/. Запас жидкого гелия в сосуде обеспечивает 12 часов непрерывной работы "змейки".

Для изготовления обмоток СПМ выбран частично стабилизированный ниобий-титановый кабель диаметром 0,7 мм. Конструктивная плотность тока около 35 кА/см² при максимальном поле на обмотке 55 кГс. Электрическая стабильность обмоток обеспечивается выбором кабеля с достаточно малым диаметром СП-нити (15 мкм), пропиткой обмотки компаундом, ограничивающим подвижку витков, и увеличением сечения сверхпроводника в местах вывода из катушки и соединения. Соединение концов катушек производится спайкой внахлест чистым индием на длине 40 мм. Конструкция СПМ показана на рис. 9.

Все СПМ "змейки" включены последовательно. Это позволило иметь лишь одну пару токовводов. При выходе одной из обмоток из сверхпроводящего состояния предусмотрена ее защита от перегрева и электрического пробоя. Схема электропитания СПМ изображена на рис. 10. Пассивная защита обмоток СПМ осуществляется секционированием с помощью кремниевых вентилях Д/П/ , помещенных в жидкий гелий. Пороговая зависимость тока вентиля от напряжения исключает дополнительные потери гелия при вводе или модуляции тока в обмотках СПМ. Предусмотрена также эвакуация запасенной энергии из криостата на внешнее сопротивление R_r с помощью быстрого тиристорного выключателя. . Время вывода энергии 0,5 сек при напряжении до 800 В. Пучок СИ, генерированный "змейкой", выводится из камеры накопителя в герметичную трубу через двойное окно из бериллия толщиной 100 мкм. В зазоре двойного окна обеспечен охранный вакуум. Расстояние от центра "змейки" до первой фольги окна около 4 м, размер пятна СИ на выходном окне 70x2 мм², рассеиваемая мощность 0,5 кВт. Выходные фольги имеют водяное охлаждение по периметру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время ведется изготовление и испытание элементов сверхпроводящей "змейки". Постановка ее на ВЭШ-3, планируемая на 1978 год, позволит иметь источник синхротронного излучения с полной излучаемой мощностью до 3 кВт при угловой расходимости пучка 17 мрад. Более 0,8 от этой мощности составляет СИ с энергией γ - квантов от 2 до 40 КэВ.

На длине волны $\lambda = 1 \text{ \AA}$ яркость пучка СИ из "змейки" примерно в 200 раз больше, чем в первом канале СИ накопителя ВЭШ-3. Ведется строительство бункера и пультовой для экспериментов на пучках СИ. Длина канала СИ до входа в бункер около 13 м. Предусматривается возможность одновременной работы до 10 экспериментальных установок.

ТАБЛИЦА I.

Основные параметры пучка СИ из сверхпроводящей "змейки", установленной на ВЭШ-3

1. Полная мощность пучка СИ из "змейки", кВт	- 2,8
2. Критическая длина волны λ_{co} синхротронного излучения, Å	- 1,33
3. Угловая расходимость пучка СИ по горизонтали при $\beta = 0$, мрад	- 15
4. Угловая расходимость пучка СИ по вертикали при $\alpha = 0$, мрад	- 0,4
5. Размер пучка СИ на расстоянии $l = 15$ м от "змейки", мм^2	- 225x6
6. Спектральный поток фотонов при $\lambda = \lambda_{co}$, фот/сек	- $7,5 \cdot 10^{17}$
7. Освещенность при $l = 15$ м, $\lambda = \lambda_{co}$ и $\alpha = 0$, фот/сек· мм^2	- $3,5 \cdot 10^{14}$
8. Яркость пучка СИ из "змейки" при $\lambda = \lambda_{co}$ и $\alpha = 0$, фот/сек· см^2 ·стер	- $2,5 \cdot 10^{25}$

ТАБЛИЦА 2.

Основные параметры сверхпроводящей магнитной системы "змейки"

1. Амплитуда магнитного поля на оси пучка, кЭ	- 35
2. Количество СП магнитов	- 40
3. Число периодов поля	- 10
4. Длина одного полупериода поля, см	- 4,5
5. Наружные размеры сверхпроводящей обмотки одного магнита, см	
вдоль пучка	- 4,5
поперек пучка	- 6,0
высота	- 3,7
6. Конструктивная плотность тока, кА/см ²	- 32
7. Полный запас энергии, кДж	- 20
8. Диаметр кабеля, мм	- 0,7
9. Рабочий ток, А	- 220
10. Зазор между полюсами магнитов, см	- 1,5
II. Вертикальная апертура камеры накопителя внутри "змейки", см	- 0,76
12. Общая длина области с магнитным полем, м	- 0,9

Л и т е р а т у р а

1. В.Л.Гинзбург. Изв.АН СССР, сер.физ., т.11, 165(1974).
2. H.Motz. *J. Appl. Phys.*, v. 22, 527(1951); v. 24, 826(1953).
3. Г.И.Будкер. Труды Международной конференции по ускорителям, Ереван, 1969.
4. Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков, Е.Г.Бессонов. ЖТФ, т.42, 1921 (1972).
5. В.Н.Байер, В.М.Катков, В.М.Страховенко. ИЭФ, т.63, 2121 (1972).
6. G.Chu. *Wiggler Magnets and Synchrotron Radiation Spectra, SSRP Report No 76/100, 195(1976)*
7. Г.Н.Кулипанов, А.Н.Скринский. Использование синхротронного излучения - состояние и перспективы, УФН, т.122, 309 (1977).
8. L.R.Elias, W.H.Fairbank, J.M.J.Madey et al., *in Proceedings of the Synchrotron Radiation Facilities Quebec Summer Workshop, Quebec, 5-27 June, 1976.*
9. Н.А.Винокуров, А.Н.Скринский. Генераторный клистрон оптического диапазона на ультрарелятивистских электронах, пр.ИЯФ 77-59. О предельной мощности оптического клистрона, установленного на электронный накопитель, пр.ИЯФ 77-67.
10. K.R.Efferson, *Rev. Sci. Instr.*, 1967, 38, N 12, 1776
11. L.M.Barkov, V.B.Baryshev, G.M.Kulipanov, N.A.Mezentsev, V.F.Pindyurin, A.N.Skrinsky, V.M.Khorev. *A Proposal to Install a Superconductive Wiggler Magnet on the Storage Ring VEPP-3 for Generation of the Synchrotron Radiation. In Proceedings of the Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation and Developments. Orsay (France), September 12-14, 1977.*

Приложение

ТАБЛИЦА 3.
Значение функций $\eta(y)$ и $\eta_w(y)$

$y = \lambda_c/\lambda$	y^{-1}	$\eta(y)$	$\eta_w(y)$
1	2	3	4
10^{-5}	10^{+5}	0,04629	0,03301
10^{-4}	10^4	0,09959	0,07097
10^{-3}	10^3	0,2131	0,1515
0,01	100	0,4450	0,3122
0,05	20	0,7016	0,4765
0,1	10	0,8182	0,5395
0,2	5	0,9034	0,5681
0,3	3,3333	0,9177	0,5549
0,4	2,5	0,9019	0,5269
0,5	2	0,8708	0,4931
0,6	1,6667	0,8315	0,4576
0,7	1,4286	0,7879	0,4223
0,8	1,25	0,7424	0,3882
0,9	1,1111	0,6966	0,3558
1,0	1,0	0,6514	0,3255
1,1	0,909	0,6075	0,2973
1,2	0,8333	0,5653	0,2712
1,3	0,7692	0,5250	0,2471
1,4	0,7143	0,4967	0,2249
1,5	0,6667	0,4506	0,2046
1,6	0,625	0,4167	0,1861
1,7	0,5882	0,3849	0,1691
1,8	0,5556	0,3552	0,1536
1,9	0,5263	0,3274	0,1395
2,0	0,5	0,3016	0,1266
2,2	0,4545	0,2554	0,1043
2,4	0,4167	0,2158	0,08579

1	2	3	4
2,6	0,3846	0,1818	0,07053
2,8	0,3571	0,1530	0,05796
3,0	0,3333	0,1286	0,04760
3,2	0,3125	0,1079	0,03908
3,4	0,2941	0,09037	0,03208
3,6	0,2778	0,07564	0,02632
3,8	0,2632	0,06324	0,02159
4,0	0,25	0,05283	0,01771
4,2	0,2381	0,04409	0,01453
4,4	0,2273	0,03677	0,01191
4,6	0,2174	0,03065	$9,764 \cdot 10^{-3}$
4,8	0,2083	0,02553	$8,004 \cdot 10^{-3}$
5	0,2	0,02125	$6,561 \cdot 10^{-3}$
5,5	0,1818	0,01340	$3,990 \cdot 10^{-3}$
6	0,1667	$8,426 \cdot 10^{-3}$	$2,425 \cdot 10^{-3}$
6,5	0,1539	$5,285 \cdot 10^{-3}$	$1,473 \cdot 10^{-3}$
7	0,1429	$3,308 \cdot 10^{-3}$	$8,950 \cdot 10^{-4}$
7,5	0,1333	$2,066 \cdot 10^{-3}$	$5,436 \cdot 10^{-4}$
8	0,125	$1,288 \cdot 10^{-3}$	$3,301 \cdot 10^{-4}$
8,5	0,1177	$8,023 \cdot 10^{-4}$	$2,004 \cdot 10^{-4}$
9	0,1111	$4,989 \cdot 10^{-4}$	$1,217 \cdot 10^{-4}$
9,5	0,1053	$3,099 \cdot 10^{-4}$	$7,385 \cdot 10^{-5}$
10	0,1	$1,922 \cdot 10^{-4}$	$4,483 \cdot 10^{-5}$
20	0,05	$1,197 \cdot 10^{-8}$	$2,049 \cdot 10^{-9}$
30	0,03333	$6,581 \cdot 10^{-13}$	$9,321 \cdot 10^{-14}$
40	0,025	$3,430 \cdot 10^{-17}$	$4,236 \cdot 10^{-18}$
50	0,02	$1,735 \cdot 10^{-21}$	$1,925 \cdot 10^{-22}$

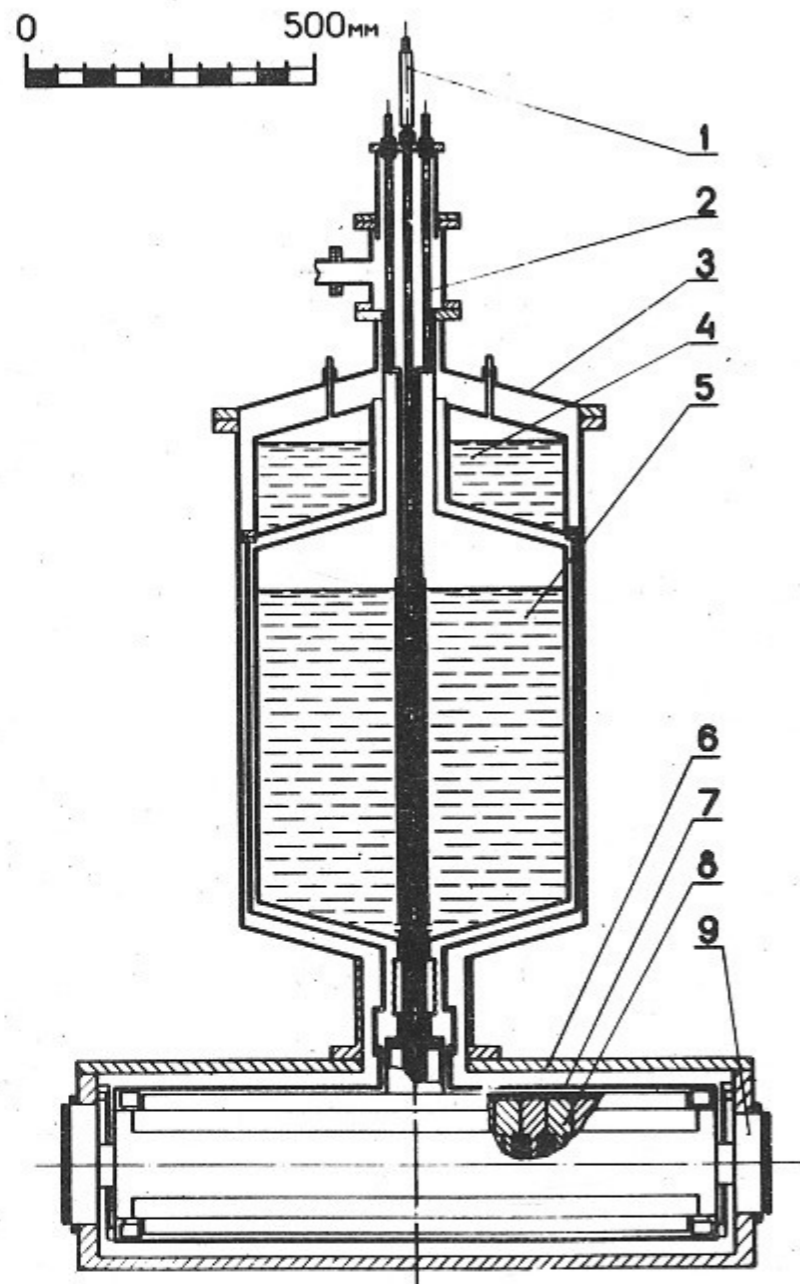


Рис.7. Общий вид "змейки" для накопителя ВЭШ-3
 1-трубка для подачи жидкого гелия; 2 - токоввод;
 3 - корпус сосуда с жидким гелием; 4 - жидкий азот; 5 - жидкий гелий; 6 - вакуумный кожух; 7 - азотный экран; 8 - сверхпроводящие магниты; 9 - фланцы вакуумной камеры накопителя.

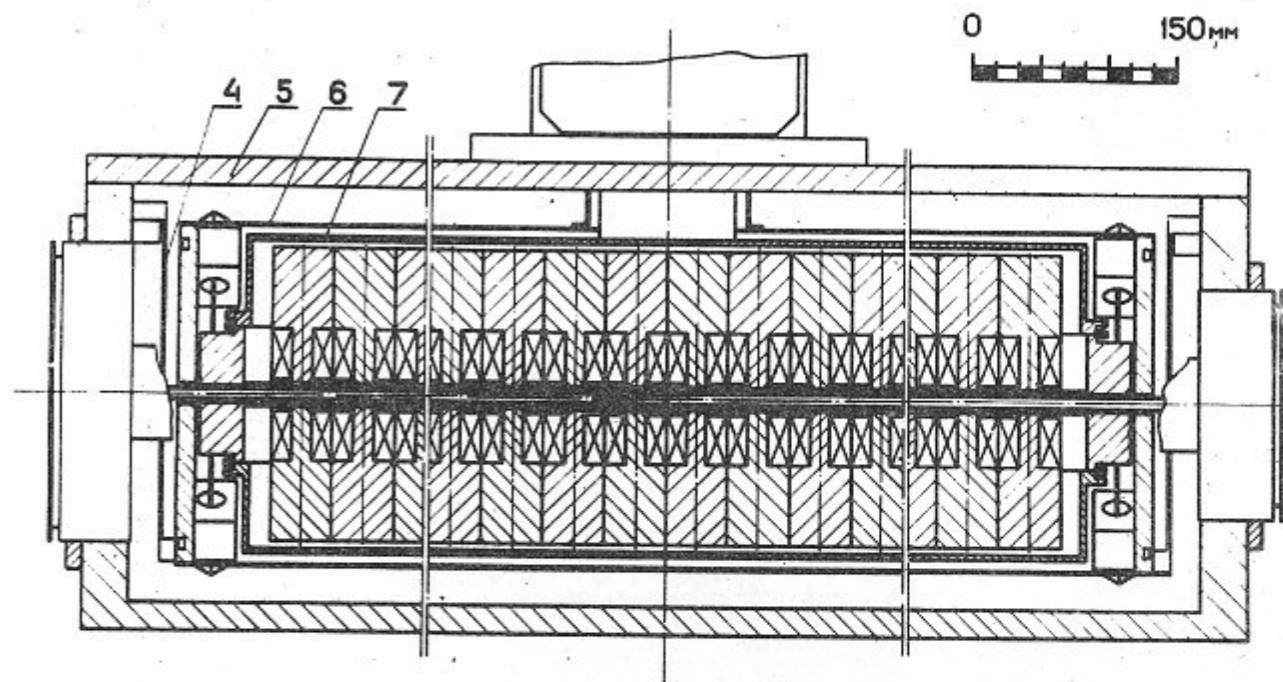


Рис.8. "Змейка" для ВЭШ-3 (разрез)
 4 - подвеска азотного экрана; 5 - вакуумный кожух; 6 - азотный экран; 7 - герметичный корпус блока сверхпроводящих магнитов.

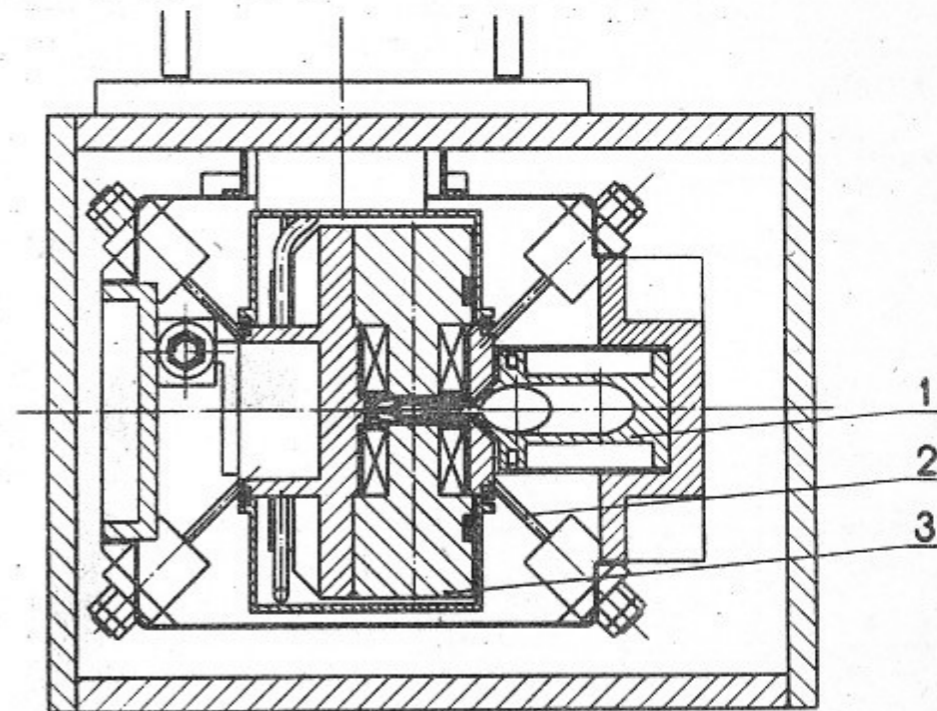


Рис.9. "Змейка" для ВЭШ-3 (поперечный разрез)
 1 - вакуумная камера; 2 - подвеска блока магнитов; 3 - сверхпроводящий магнит.

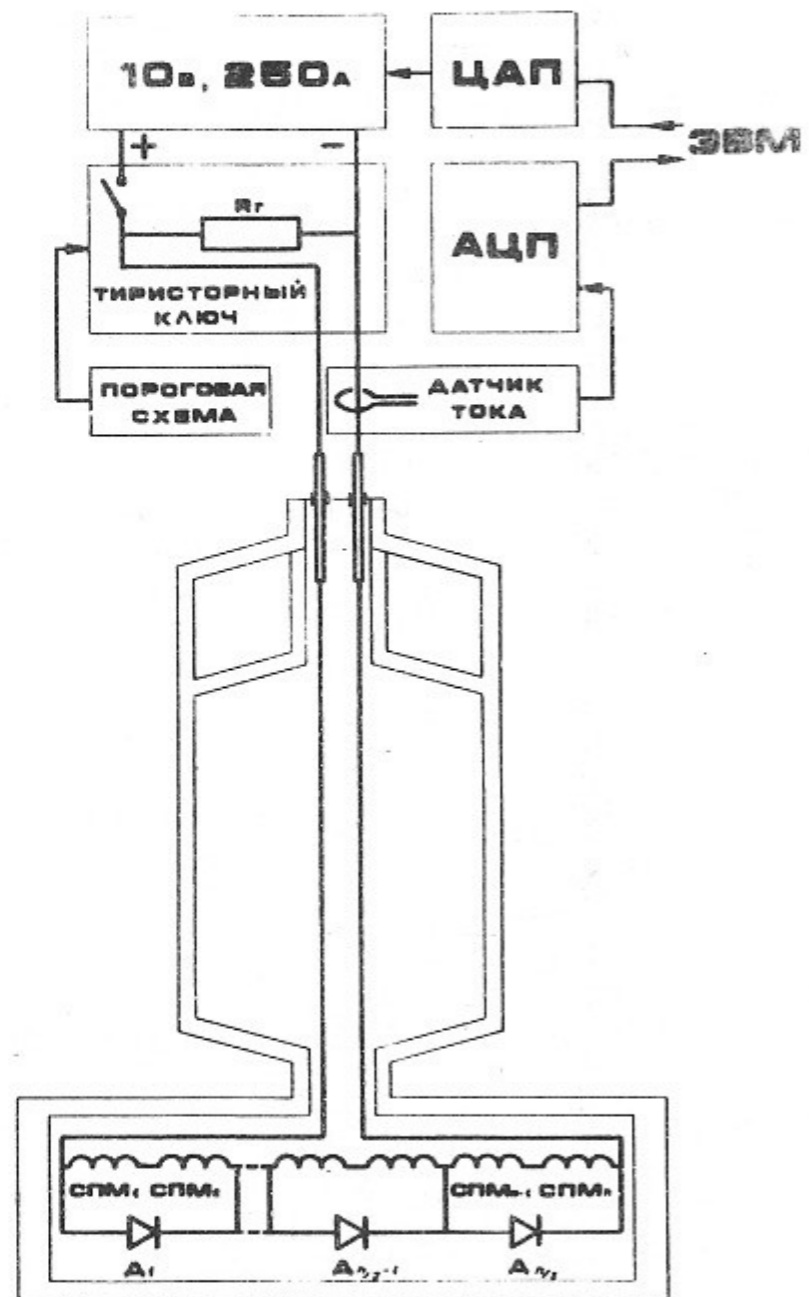


Рис.10. Схема электропитания "змейки".

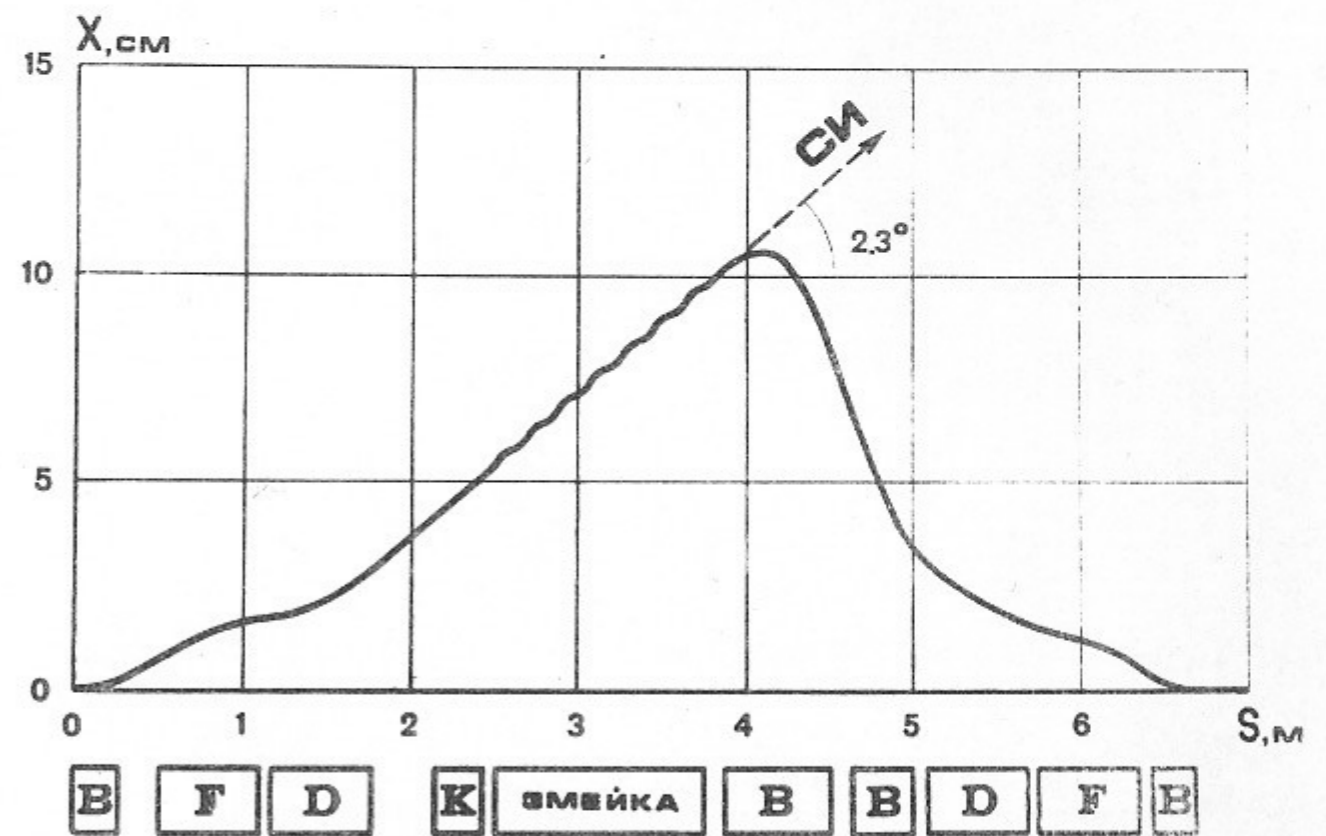


Рис.11 Схема проводки пучка через "змейку".

В-откл. магнит; F, D -линзы; К-корректор.

Работа поступила 3 августа 1977г.

Ответственный за выпуск С.Г.ПОПОВ

Подписано к печати 27.II-1978 г. МН 02706

Усл. 1,6 печ.л., 1,3 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно.

Заказ № 13.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР