



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

17

О.Н.Гордеев, В.А.Киселёв, Г.А.Корнюхин,  
С.А.Никитин, Е.Л.Салдин, А.Н.Скринский,  
Г.М.Тумайкин

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В  
КАНАЛЕ ИНЖЕКЦИИ ВЭПП-3 - ВЭПП-4

ПРЕПРИНТ 83-110



НОВОСИБИРСК



## УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В КАНАЛЕ

### ИНЖЕКЦИИ ВЭШ-3 - ВЭШ-4

О.Н.Гордеев, В.А.Киселев, Г.А.Корнюхин,  
С.А.Никитин, Е.Л.Салдин, А.Н.Скрипский  
Г.М.Тумайкин

#### Аннотация

В проекте получения продольной поляризации на ВЭШ-4 при энергиях до 2 ГэВ в качестве источника поляризованных электронов и позитронов предполагается использовать бустерный накопитель ВЭШ-3. При этом возникает необходимость в согласовании направления вектора спина инжектируемых частиц с равновесным направлением поляризации в ВЭШ-4, которое в данном случае лежит в медианной плоскости. С этой целью проведен анализ кинематики спина в канале инъекции ВЭШ-3 - ВЭШ-4. Показано, что требуемое согласование можно осуществить при помощи импульсного соленоида. Наличие этого соленоида в канале инъекции позволяет приготавливать в накопителе ВЭШ-4 встречные пучки с произвольной комбинацией спиральностей. Показано, что возмущение, вносимое соленоидом в фокусировку пучков может быть компенсировано перестройкой градиентов линз канала. Рассматриваются также вопросы, связанные с технической реализацией предлагаемой схемы инъекции.



## Введение

В работе [1,2] была показана возможность применения в реальных условиях электрон-позитронного накопителя ВЭШ-4 схемы получения продольной поляризации частиц, основанной на использовании соленоида, который поворачивает спин вокруг вектора скорости на угол  $180^\circ$  [3,4]. Конкретный вариант, рассчитанный на энергии до 2 ГэВ, предусматривает размещение в техническом промежутке накопителя на участке впуска пучков сверхпроводящего соленоида с интегралом поля до 210 кГс.м. Кинематические свойства схемы таковы, что периодическое с азимутом  $\theta$  устойчивое направление поляризации  $\vec{n}(\theta) = \vec{n}(\theta + 2\pi)$  ( $|\vec{n}| = 1$ ) [5] всюду лежит в плоскости орбиты. При этом в экспериментальном промежутке, диаметрально противоположном техническому, вектор  $\vec{n}$  независимо от энергии частиц  $E$  ориентирован по скорости (см. рис.1), а в техническом промежутке направление  $\vec{n}$  зависит от  $E$  и составляет с вектором скорости угол  $\pi V$  ( $V = E [\text{МэВ}] / 440,65$ ).

В качестве источника поляризованных электронов и позитронов предполагается использовать бустерный накопитель ВЭШ-3, имеющий короткое время радиационной поляризации на энергии перепуска (порядка 20 минут при  $E = 2,1$  ГэВ).

В данной работе представлен проект модификации канала инжекции ВЭШ-3 - ВЭШ-4 с целью обеспечения оптимального согласования направления поляризации инжектируемых частиц с вектором  $\vec{n}$  в месте впуска пучков в ВЭШ-4. Проведенный анализ кинематики спина показал, что требуемое согласование может быть достигнуто без изменения геометрии канала инжекции путем размещения в нем специального соленоида. При этом имеется возможность за счет изменения поля соленоида приготавливать в ВЭШ-4 встречные пучки с произвольной комбинацией спиральностей. Согласно проекту на прямолинейном участке канала длиной 8 м предполагается установить импульсный соленоид длиной 6 м с полем до 25 кГс (рабочий диапазон углов поворота спина от  $\pi/4$  до  $3\pi/2$ ). В предлагаемой схеме возмущение, вносимое таким соленоидом в фокусировку пучков, компенсируется перестройкой градиентов имеющихся в канале линз.



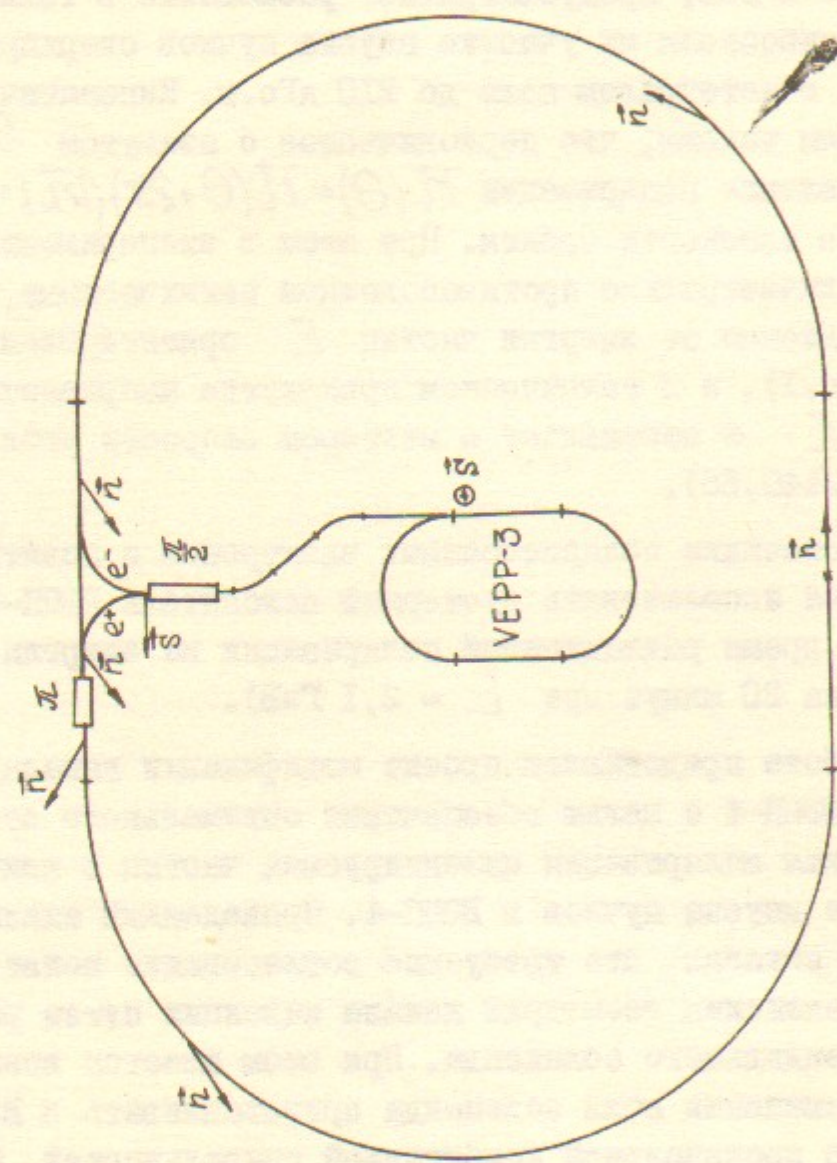


Рис. 1. Кинематическая схема получения продольно поляризованных встречных пучков на накопителе ВЭПП-3.

## 2. Кинематика спина

Состояние поляризации электрона определяется 3-вектором спина  $\vec{S}$  в системе покоя частицы ( $|\vec{S}| = 1$ ). Эволюция вектора  $\vec{S}$  при движении релятивистского электрона во внешних электромагнитных полях описывается квазиклассическим уравнением, полученным Томасом в 1926 году [6]:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{W} \times \vec{S} \quad (I)$$

Здесь  $t$  - время в лаб. системе,  $\vec{W}(t)$  - имеет смысл угловой скорости вращения вектора  $\vec{S}$  относительно лабораторного базиса. При отсутствии электрических полей  $\vec{W}$  равно ( $C=1$ ):

$$\vec{W} = - (1+\nu) \frac{q_0 \vec{H}}{\gamma} + \frac{q'(\gamma-1)}{\gamma} \frac{\vec{v}(\vec{H} \cdot \vec{v})}{v^2}$$

где  $\gamma = (1-v^2)^{-1/2}$  - релятивистский фактор,  $\vec{H}$  - вектор магнитного поля в лаб. системе,  $q_0 = e/m$  и  $q'$  - соответственно нормальная и аномальная часть гиромагнитного отношения электрона

$$\nu = \gamma \frac{q'}{q_0} = \frac{E [M \div B]}{440,65}$$

Согласно уравнению (I) кинематика спина во внешних полях выглядит как вращение вектора в трехмерном пространстве. Известно, что группа трехмерных поворотов  $O(3)$  изоморфна группе унитарных преобразований  $SU(2)$ , поэтому при вычислении изменения направления поляризации  $\vec{S}$  вдоль траектории движения электрона удобно использовать формализм спинорных матриц [7].

Спинорная матрица произвольного вращения определяется следующим образом

$$M = I \cos \frac{\Phi}{2} - i \sin \frac{\Phi}{2} (\vec{\sigma} \cdot \vec{n})$$

Здесь  $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$  - матрицы Паули.



$$\bar{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Индексами  $x, y, z$  - обозначены оси правой тройки декартовых координат. Угол  $\varphi$  - имеет смысл угла поворота спина вокруг направления, задаваемого единичным вектором  $\vec{\eta} = (\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ . Результирующая спиновая матрица  $M$ , соответствующая последовательности  $N$  поворотов, имеет вид

$$M = M_N \cdot M_{N-1} \dots M_2 \cdot M_1$$

причем, в силу свойств матриц Паули

$$M = I C_0 - i \bar{\sigma}_x C_x - i \bar{\sigma}_y C_y - i \bar{\sigma}_z C_z,$$

$$C_0^2 + C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 = 1$$

Любая последовательность трехмерных поворотов эквивалентна одному повороту вокруг определенной оси  $\vec{\eta}^*$  на некоторый угол  $\varphi$ . Эти параметры определяются с помощью следующих соотношений:

$$C_0 = \cos \frac{\varphi}{2}, \quad C_x = \eta_x^* \sin \frac{\varphi}{2}, \quad C_y = \eta_y^* \sin \frac{\varphi}{2}, \quad C_z = \eta_z^* \sin \frac{\varphi}{2}.$$

Полное преобразование вектора  $\vec{S}$  после прохождения электроном последовательности из  $N$  магнитных элементов<sup>\*)</sup> записывается в виде

$$\vec{S} = T \vec{S}_0, \quad \text{где}$$

$$T = \begin{pmatrix} (C_x^2 - C_y^2 - C_z^2 + C_0^2) & 2(C_y C_x - C_z C_0) & 2(C_z C_x + C_y C_0) \\ 2(C_x C_y + C_z C_0) & (C_y^2 - C_z^2 - C_x^2 + C_0^2) & 2(C_y C_z - C_x C_0) \\ 2(C_z C_x - C_y C_0) & 2(C_y C_z + C_x C_0) & (C_z^2 - C_x^2 - C_y^2 + C_0^2) \end{pmatrix}$$

\*) Предполагается, что вращение на каждом из магнитных элементов происходит в постоянном по направлению поле.

При рассмотрении кинематики спина в канале инъекции ВЭШ-3 - ВЭШ-4 будем пользоваться лабораторным базисом. Проекция единичного вектора  $\vec{\eta}$ , задающего направление прецессии спина в поворотных магнитах канала, находится из выражения

$$\vec{\eta} = \frac{\vec{e}_0 \times \vec{e}_1}{\sin \varphi_0}$$

где  $\vec{e}_0$  и  $\vec{e}_1$  - единичные орты вдоль направления движения электрона на входе и выходе магнита соответственно,  $\varphi_0$  - угол поворота скорости частицы в плоскости вращения. Угол поворота спина вокруг оси  $\vec{\eta}$  при этом равен

$$\varphi_s = (1 + \nu) \varphi_0$$

Схема канала приведена на рис.2 и включает в себя 13 поворотных магнитов. Пучок, выпущенный из ВЭШ-3, магнитами М1-М4 поднимается по вертикали на  $8^\circ$ , затем параллельно переносится по горизонтали на  $32^\circ$  магнитами М5-М6, с одновременным поворотом по вертикали вниз на угол  $8^\circ$  и подводится к накопителю ВЭШ-4 перпендикулярно техническому промежутку. Магнитом-стрелкой М7 пучки электронов и позитронов разводятся в разные стороны и поворачиваются на  $90^\circ$  по радиусу и  $10^\circ$  по вертикали. Впускными магнитами М10, М13 и пластинами инфлекторов пучки выводятся на равновесную орбиту. В качестве координатного базиса выберем правую тройку декартовых координат так, чтобы ось  $Y$  была направлена по скорости частицы в промежутке выпуска из ВЭШ-3. За счет радиационной поляризации спина электронов выстраиваются против поля, а позитронов - по полю накопителя. Для ВЭШ-3 это означает, что в указанном координатном базисе (см.рис.2) поляризация пучков электронов и позитронов направлена противоположно направлению оси  $Z$ . В таблице I приведены углы поворота и направляющие косинусы оси вращения для каждого из элементов канала.

Степень поляризации пучка, инжектированного в ВЭШ-4, равна  $\zeta (\vec{S} \cdot \vec{n})$ , где  $\zeta$  - степень поляризации пучка в бустере - ВЭШ-3 ( $\max \zeta = 0,92$ ),  $\vec{n}$  - динамически устойчивое направление поляризации в ВЭШ-4 на участке выпуска,  $\vec{S}$  - единичный вектор спина на выходе канала:



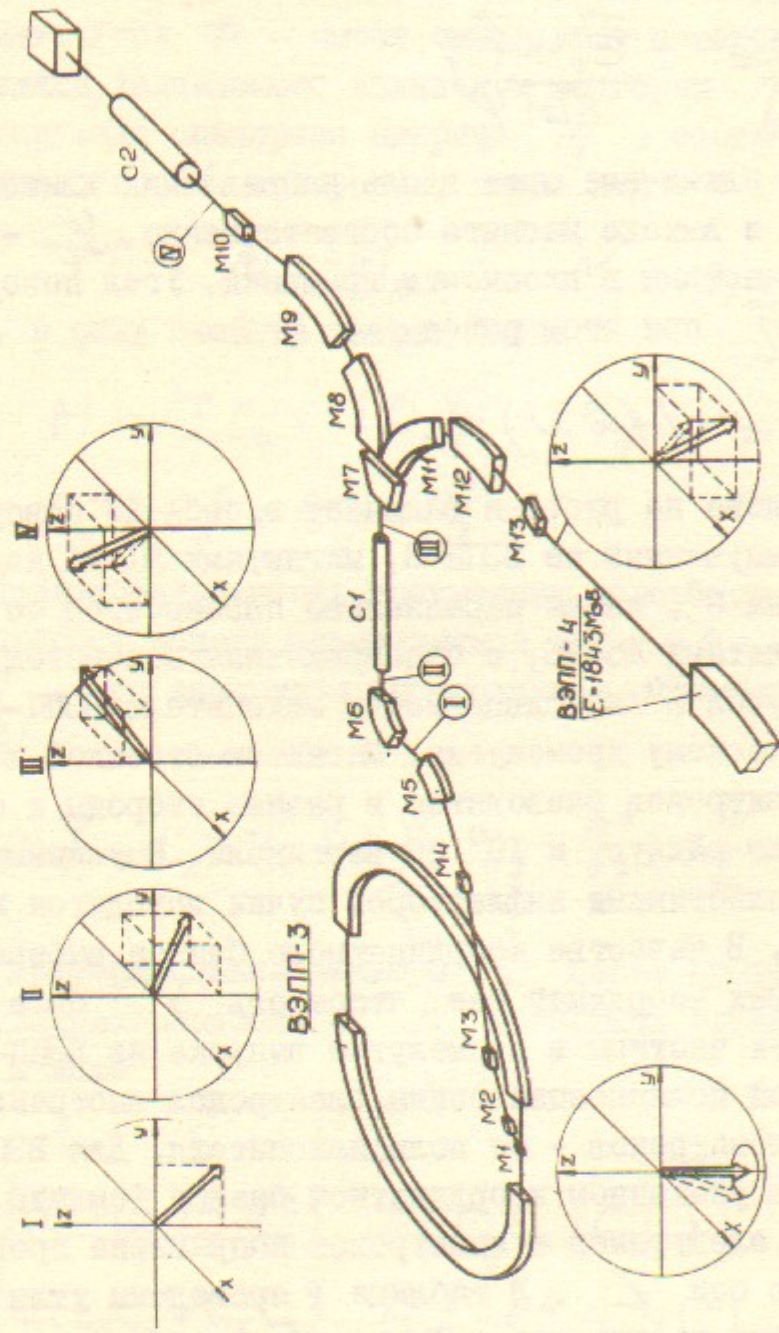


Рис.2. Схема канала илжеции ВЭП-3 - ВЭП-4

Элемент	$\varphi_{\sigma}^{\circ}$	$\eta_x$	$\eta_y$	$\eta_z$
M1	3°41'	1.0		
M2	6°18'5"	1.0		
M3	6°34'30"	-1.0		
M4	4°39'	1.0		
M5	33°8'30"	0,00063	-0,1403	0,99011
M6	34°	-0,21013	0	-0,977
C1	0 ÷ 150°	0	± 1.0	0
M7+M8	48°59'28"	0	0	1.0
M9	42°	0,1703	0,19582	0,96573
M10	10°	0	-1.0	0
M7+M11	48°59'28"	0	0	-1.0
M12	42°	0,1703	-0,19582	-0,96573
M13	10°	0	1.0	0

Таблица I



$$\vec{S} = T \vec{S}_0$$

Здесь  $T$  —  $3 \times 3$  транспортная матрица канала для спина,  $\vec{S}_0$  — начальный вектор спина на участке выпуска частиц из ВЭШ-3, ориентированный противоположно оси  $Z$  (см. рис. 2).

Вектор  $\vec{S}$  и вектор  $\vec{n}$  принимают различные направления в зависимости от энергии инжекции  $E$ . Расчет кинематики спина показал, что в рабочем диапазоне энергий<sup>\*</sup>  $1,76 < E < 2$  ГэВ при существующем канале инжекции не удастся получить достаточно высокую степень продольной поляризации электронов и позитронов в ВЭШ-4. Перепуск пучка без уменьшения степени поляризации можно обеспечить путем размещения на прямолинейном участке канала соленоида, который позволяет управлять поляризацией без изменения геометрии канала. На рис. 3 приведена зависимость проекции  $(\vec{S} \cdot \vec{n})$  от величины поля  $H$  соленоида, который имеет длину 6 м и расположен между магнитами М6 и М7 (см. рис. 2), при различных значениях энергии инжекции. Положительное значение поля  $H$  соответствует направлению его вдоль оси  $Y$ . Знак проекции  $(\vec{S} \cdot \vec{n})$  соответствует выбору направления  $\vec{n}$ , показанному на рис. 1. Приведенные результаты показывают, что уменьшение степени поляризации при перепуске в рассматриваемом варианте будет составлять менее 10% как для электронов, так и для позитронов. Изменением знака поля  $H$  можно обращать направление поляризации электронного пучка и тем самым готовить любые комбинации спиральностей встречных пучков.

Отметим, что наличие в канале такого соленоида дает дополнительные возможности по получению в ВЭШ-4 встречных поперечно поляризованных пучков (при выключенном соленоиде в ВЭШ-4, поворачиваемым спин на угол  $180^\circ$ ) с произвольным знаком проекции  $S_z$  (см. рис. 4).

\* Поляризация пучка в ВЭШ-3 происходит на энергии 2,1 ГэВ. Уменьшение энергии поляризованного пучка до энергии инжекции возможно только при условии, что при этом не происходит пересечения машинных спиновых резонансов. Поэтому диапазон энергий инжекции ограничивается снизу по крайней мере целым спиновым резонансом ( $E = 1,76$  ГэВ). Сверху энергия инжекции ограничивается техническими параметрами системы питания канала.

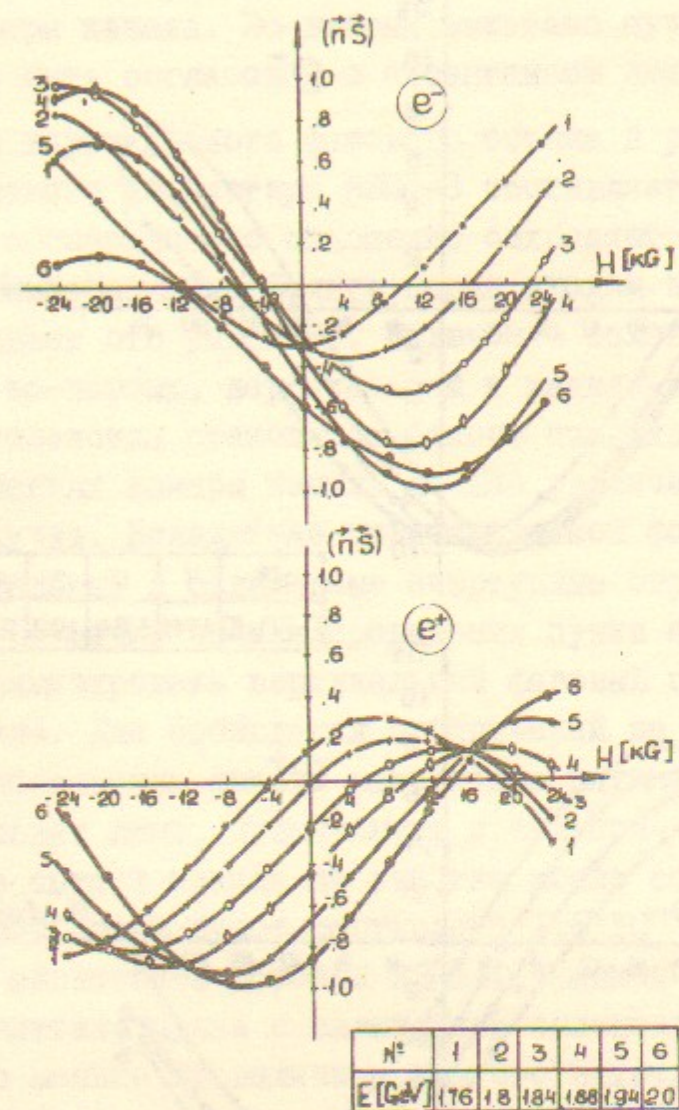


Рис. 3. Зависимость степени продольной поляризации инжектированного пучка от величины поля импульсного соленоида и энергии частиц.



### 3. Учет влияния соленоида на фокусировку частиц в канале

Задача компенсации искажения вносимого соленоидом в фокусировку включает в себя два пункта. Во-первых, необходимо обеспечить, чтобы поперечные размеры пучка вписывались в апертуру вакуумной камеры канала. Во-вторых, эмиттанс пучка на выходе канала должен быть согласован с аксептансом накопителя ВЭШ-4.

Отношение вертикального фазового объема к радиальному для пучка выпускаемого из бустера ВЭШ-3 составляет один к десяти. В отсутствие соленоида это отношение сохраняется по всей длине канала, однако наличие фольги перед входом в накопитель ВЭШ-4 сглаживает это различие. Включение соленоида приводит к тому, что, во-первых, вертикальный и радиальный эмиттансы пучка после соленоида становятся одного порядка, во-вторых, в отдельных сечениях камеры канала сильно увеличиваются поперечные размеры пучка. Вследствие цилиндрической формы вакуумной камеры вертикальные и радиальные апертурные ограничения одинаковы. Поэтому с точки зрения проведения пучка по каналу не требуется минимизировать вертикальный фазовый объем на участке после соленоида. Для соблюдения ограничений на размеры пучка по апертуре достаточно ввести раздельное питание двух дуплетов квадрупольных линз, примыкающих к соленоиду ( $D4$  и  $D5$ ). В такой схеме оптики канала на участке после соленоида вертикальный фазовый объем будет составлять  $1,5 \cdot 10^{-4}$  рад.см. при вертикальном аксептансе дорожки ВЭШ-4, равном  $8 \cdot 10^{-4}$  рад.см. Радиальный эмиттанс пучка с включением соленоида меняется слабо и будет много меньше по величине, чем соответствующий аксептанс. Это позволяет надеяться на получение эффективности захвата близкой к 100%.

На рис.5 приведены размеры  $A_x$  и  $A_z$  пучка на уровне  $\sqrt{2} \tilde{\sigma}_{x,z}$ , где  $\tilde{\sigma}_{x,z}$  - параметр гаусовского распределения поперечной плотности пучка с учетом энергетического разброса  $\Delta p/p \sim 10^{-3}$ . Оптика канала перестраивается на участке от дуплета примыкающему к соленоиду ( $D4$ ) до выхода канала (MIO). Верхний график на рис. 5 соответствует существующей схеме оптики канала, нижний - перестроенной оптике с соленоидом ( $H = 24$  кГс,  $E = 1,9$  ГэВ). На рис.6 показаны радиальная

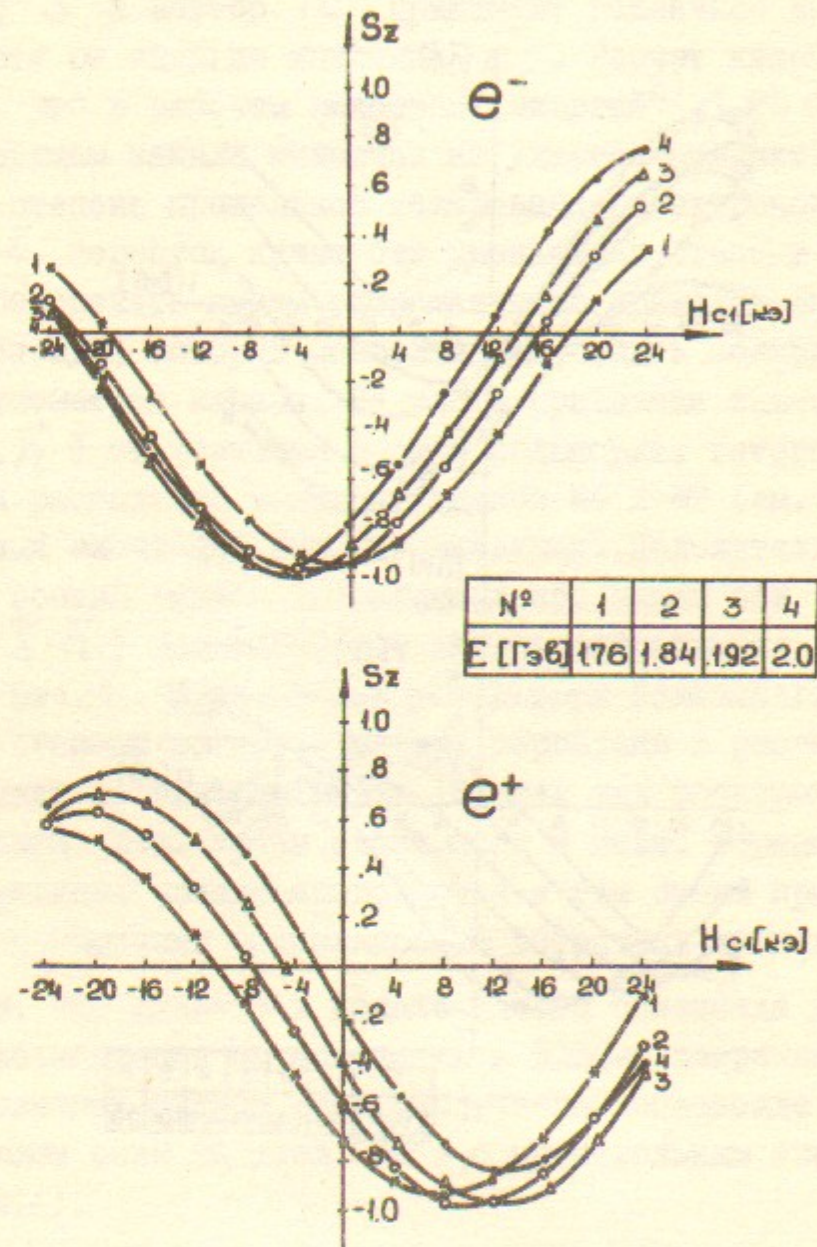


Рис.4. Зависимость поперечной поляризации инжектированного пучка от величины поля импульсного соленоида и энергии частиц.



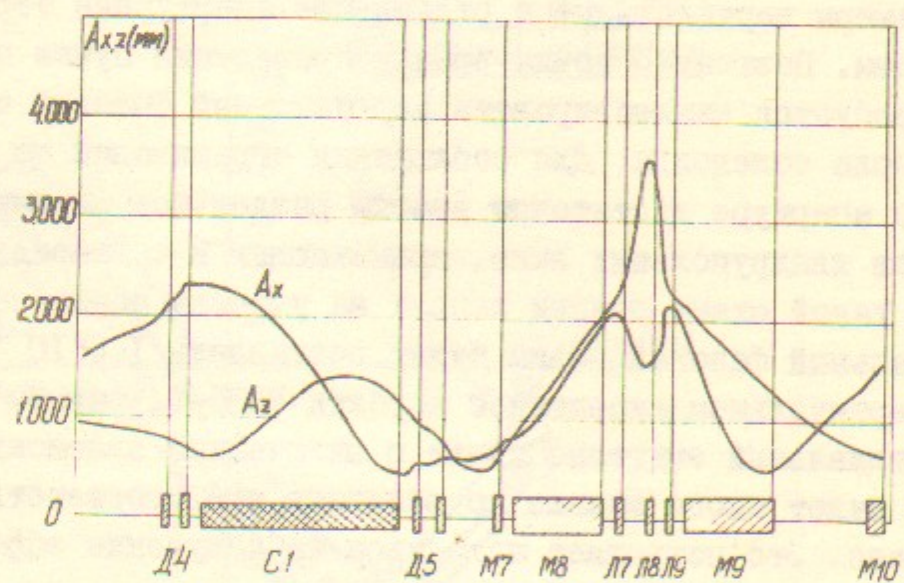
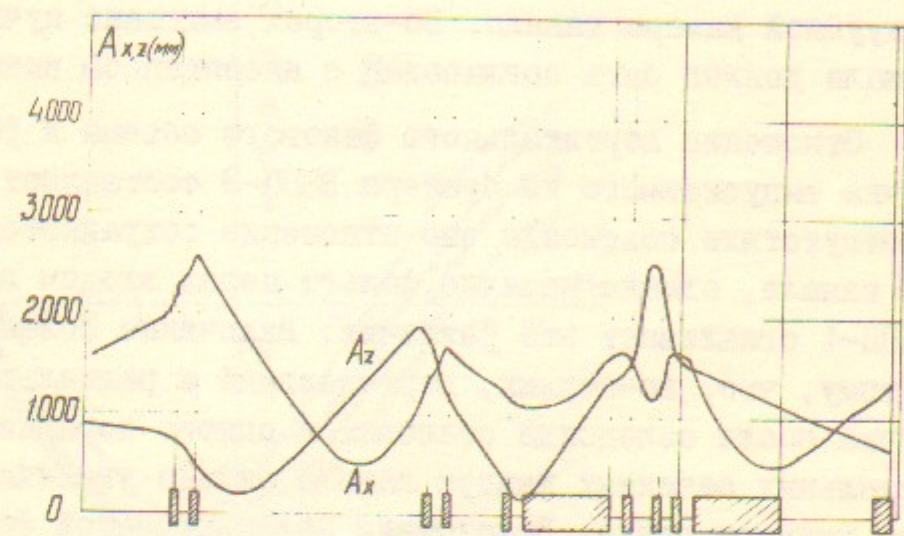


Рис.5. Поперечные размеры пучка в канале инжекции.

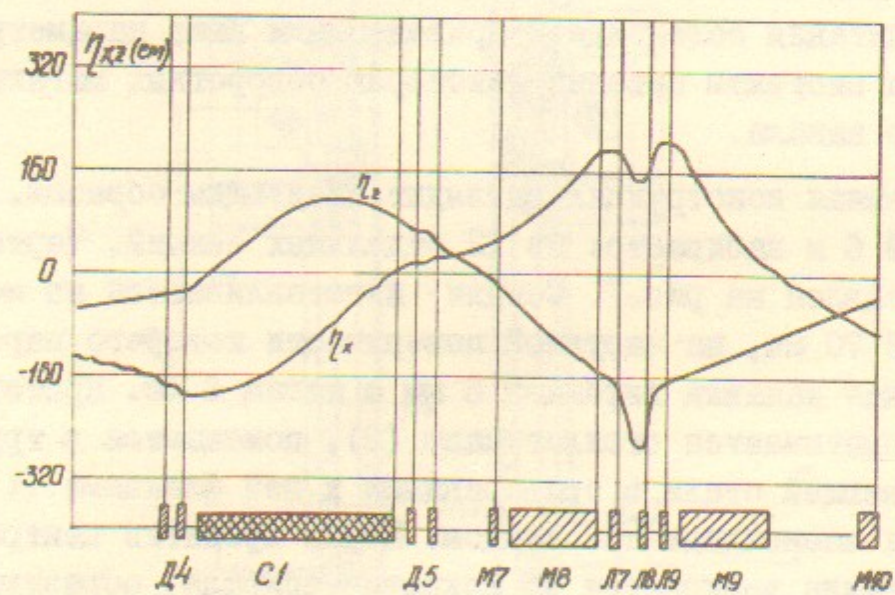
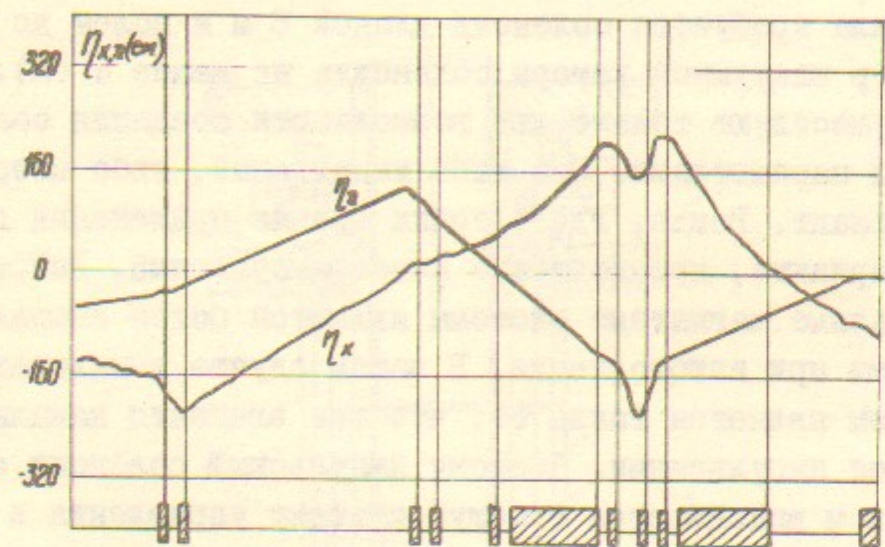


Рис.6. Радиальная и вертикальная дисперсионные функции канала инжекции.



$\eta_x$  и вертикальная  $\eta_z$  дисперсионные функции канала.

#### 4. Технический проект

Согласно проведенному выше анализу для согласования направления поляризации инжектируемых пучков при неизменной геометрии канала требуется соленоид длиной 6 м и полем до 25 кГс (диаметр вакуумной камеры соленоида не менее 4 см). Практически существуют только две возможности создания соленоида с такими параметрами. Это либо импульсный, либо сверхпроводящий вариант. Везде, где с точки зрения применения допустимы оба варианта, предпочтение имеет импульсный. Действительно, импульсные магнитные системы являются более компактными и дешевыми при изготовлении. В нашем случае немаловажным обстоятельством является также то, что все элементы канала инжекции являются импульсными. Поэтому импульсный соленоид естественным образом вписывается в общую систему управления и эксплуатации канала инжекции. Это дополнительно облегчается тем, что система питания соленоида с приведенными выше параметрами будет подобна системам питания некоторых поворотных магнитов существующего канала.

Разработанная конструкция выглядит следующим образом. Соленоид длиной 6 м набирается из 12 отдельных секций. Чертеж секции представлен на рис.7. Секции изготавливаются из медного прутка  $\phi$  70 мм, на наружной поверхности которого нарезается спиральная канавка глубиной 8 мм с шагом 6 мм. Проточенная деталь обматывается стеклотканью (2), помещается в трубку (3) из нержавеющей стали с приваренными к ней фланцами (4) и пропитывается эпоксидным компаундом. После пропитки центральная часть металла выбирается до вскрытия спирали, образуя таким образом обмотку соленоида. Внутри соленоида вставляется тонкостенная вакуумная камера (5) из немагнитной стали. Для центровки трубы относительно оси соленоида предусмотрены опорные изоляторы (6). Подвод тока осуществляется гибким кабелем к токоподводам (7,8). На противоположном конце соленоида торцевая коммутация обеспечивает перетекание тока с центральной шины на внешнюю трубу (3), являющуюся обратным токопроводом.

Система питания представляет собой накопительную емкость ( $C \approx 10^{-2} \phi$ ), которая через тиристорный ключ разряжается на

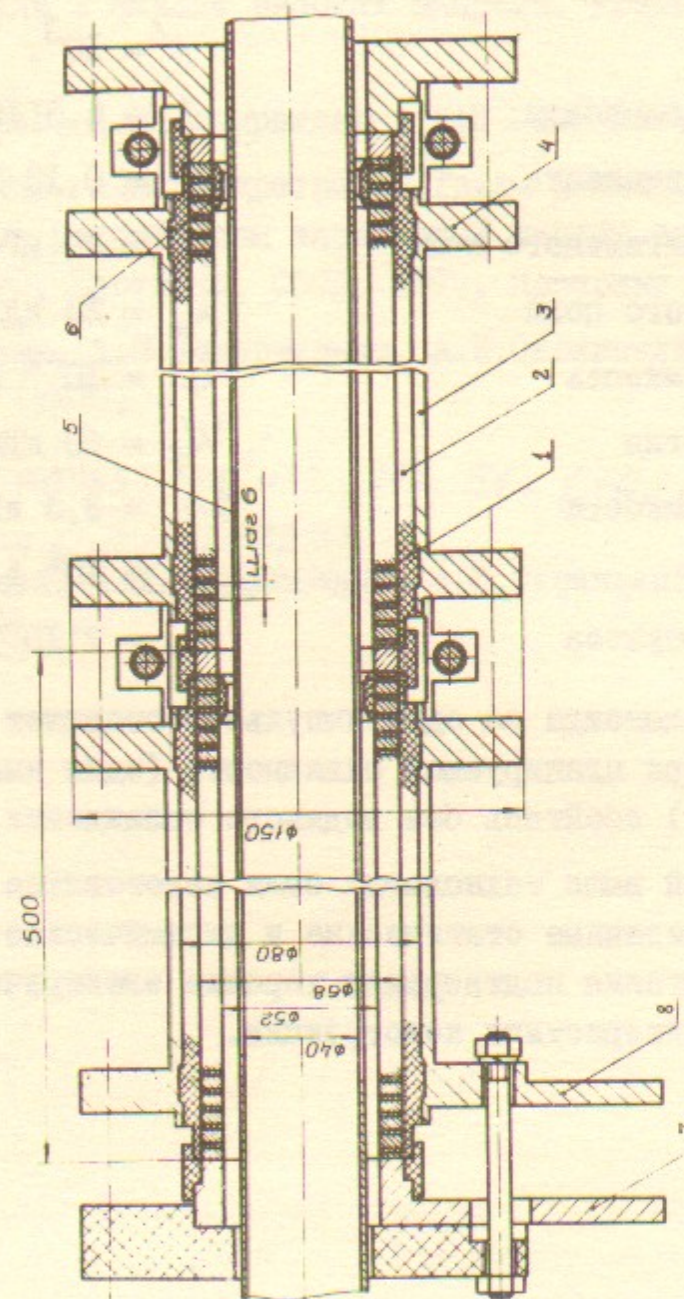


Рис.7. Конструкция импульсного соленоида.



индуктивность соленоида. Емкость заряжается от двуполярного управляемого источника серии ГИМН-5.0 (5 кВт), обеспечивающего стабильность напряжения лучше чем  $10^{-3}$ .

Параметры системы:

Длина соленоида	$l = 600$ см.
Число витков	$N = 10^3$ .
Индуктивность соленоида	$L = 4,5 \cdot 10^{-4}$ Гн.
Омическое сопротивление	$R = 0,13$ Ом.
Напряженность магнитного поля	$H = 20$ кГс.
Энергия магнитного поля	$W_H = 25$ кДж.
Электрическая емкость	$C = 10^{-2}$ ф.
Запасенная энергия	$W_C = 60$ кДж.
Напряжение на емкости	$U_C = 3,3$ кВ.
Ток	$I = 10^4$ А.
Длительность импульса	$\tau = 7 \cdot 10^{-3}$ с.

Перегрев соленоида за один импульс составляет  $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ . Это позволяет при планируемой скважности (один импульс за несколько минут) обойтись без водяного охлаждения.

По описанной выше технологии была изготовлена одна секция соленоида. Проведенные статические и динамические (при поле до 26 кГс) испытания подтвердили хорошие электрические и механические характеристики конструкции.

Л и т е р а т у р а:

1. С.А.Никитин, Е.Л.Салдин. Препринт ИЯФ 81-19, 1981 (Новосибирск).
2. С.А.Никитин, Е.Л.Салдин, М.В.Юрков. "Спин в физике высоких энергий". Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, СССР, 1982, стр.291.
3. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. ДАН СССР 223, 830 (1975).
4. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. т.2, стр.70, Протвино, СССР, 1977. Препринт ИЯФ 78-74 (1978).
5. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский. ДАН СССР 192, 1255 (1970).
6. L. H. Thomas, *Nature*, 117, 514 (1926);  
*Phil. Mag.*, 3, 1 (1927)
7. Я.С.Дербенев, А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский. ЖЭТФ 60, 1216 (1971).



О.Н.Гордеев, В.А.Киселев, Г.А.Корнюхин,  
С.А.Никитин, Е.Л.Салдин, А.Н.Скринский  
Г.М.Тумайкин

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В КАНАЛЕ  
ИНЖЕКЦИИ ВЭП-3 - ВЭП-4

Препринт  
№ 83-110

Работа поступила 19 августа 1983г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 14.09-1983 г. МН 03349

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.л., I печ.л., 0,9 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 110.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90