

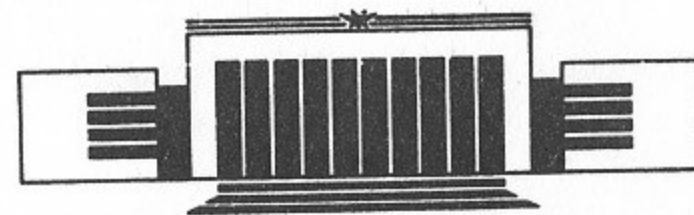


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР 8

Т.А. Всеволожская, А.А. Михайличенко,  
Е.А. Переведенцев, Г.И. Сильвестров,  
А.Д. Чернякин

**СПИРАЛЬНЫЙ ОНДУЛЯТОР  
СИСТЕМЫ КОНВЕРСИИ ВЛЭПП**

**ПРЕПРИНТ 86-129**



**НОВОСИБИРСК**

**1986**

## СПИРАЛЬНЫЙ ОНДУЛЯТОР СИСТЕМЫ КОНВЕРСИИ ВЛЭШ

Т.А.Всеволожская, А.А.Михайличенко, Е.А.Переведенцев,  
Г.И.Сильвестров, А.Д.Чернякин

### А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждается диапазон необходимых параметров ондулятора для обеспечения большего единицы коэффициента конверсии при степени поляризации во вторичном пучке  $P \approx 0.6$ , а также параметров конверсионной мишени и оптической системы для собирания вторичных частиц.

Описывается конструкция, технология изготовления и результаты испытания секций двух вариантов ондулятора — импульсного безжелезного с длиной волны  $\lambda_0 = 0.6$  см и полем на оси  $H_{\perp} = 6.0$  кЭ и сверхпроводящего с  $\lambda_0 = 1$  см и полем до 5 кЭ. Рассматривается проблема защиты ондулятора от радиационного повреждения первичным пучком и излучением.

Основными характеристиками ондуляторного излучения, существенными для получения пучков позитронов (электронов) с высокими значениями фазовой плотности и степени поляризации, является энергия излучения  $E = \frac{4\pi \hbar c \gamma^2 K}{\lambda_0 (1 + P_{\perp}^2 + \gamma^2 \theta^2)}$ ,  $K = 1, 2, 3, \dots$ , плотность спектра фотонов  $\frac{dN_{\gamma}}{dE} = \frac{\alpha P_{\perp}^2 L}{\gamma^2 \hbar c} \sum_{K} F_K \left(\frac{\omega}{\omega_K}\right)$  и степень поляризации используемых фотонов  $1/2$ . Здесь  $\gamma$  — энергия первичных электронов в единицах их массы покоя,  $P_{\perp}$  — безразмерное значение поперечного импульса частиц при движении в ондуляторе, определяемое полем  $H_{\perp}$  и длиной волны ондулятора  $\lambda_0$ ,  $P_{\perp} \propto \lambda_0 H_{\perp}$ ,  $\theta$  — угол излучения относительно направления первичного пучка,  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры,  $L$  — длина ондулятора. Функции  $F_K$  описывают относительный вклад различных гармоник в излучение с энергией  $\hbar\omega \leq \hbar\omega_K$ , где  $\hbar\omega_K$  — максимальная энергия гармоники. Зависимость степени поляризации излучения от отношения  $\omega/\omega_K$  имеет одинаковый вид для всех гармоник. Поляризованная часть спектра ( $P \geq 0.5$ ) ограничена областью  $\omega/\omega_K \geq 0.65$ . При этом поляризация высших гармоник ( $K \geq 2$ ) оказывается отрицательной в области энергий, отвечающих высокой степени поляризации первой, основной, гармоники, т.е. в области  $\omega_1 \geq \omega \geq 0.65 \omega_1$ . Поэтому для повышения степени поляризации суммарного излучения в указанной области энергий высшие гармоники должны быть максимально подавлены по сравнению с первой. Такое подавление достигается путем уменьшения  $P_{\perp}$  ниже значения, отвечающего максимуму интенсивности основной гармоники, т.е. ценой некоторой потери в плотности спектра излучения.

Зависимость плотности спектра в области ее максимума от  $\lambda_0$ , практически отсутствующая в спектре фотонов, в спектрах позитронов и электронов  $\frac{d^2N}{dE dt} = \int_{E'} \frac{dN_{\gamma}}{dE'} \frac{d\sigma(E', E)}{dE} dE'$  появляется из-за энергетической зависимости сечения рождения пар фотоном  $\sigma$ .

При малых энергиях фотонов ( $\hbar\omega \sim 5-10$  МэВ) эта зависимость является очень сильной, определяя минимальное значение энергии первичного пучка в зависимости от достижимой длины волны ондулятора. При сравнительно больших энергиях, когда многократное рассеяние на толщине  $t$  порядка 1 рад.ед.длины не приводит к заметной потере в числе частиц на выходе

конвертера, зависимость от  $\lambda_0$  становится мало существенной, влияя в основном, на поперечный эмиттанс пучков. Так что уменьшение значения  $\lambda_0$  от 6 мм до 3 мм, допустимое в предлагаемом варианте конструкции безжелезного ондулятора, означало бы, прежде всего, уменьшение необходимой энергии первичного пучка  $E_0$  до 100 ГэВ с сохранением эффективности конверсии и поляризации пучков.

Эффективность конверсии при  $E_0 = 150$  ГэВ,  $\lambda_0 = 0,6$  см,  $L = 150$  м и  $P_{\perp}^2 = 0,1$  характеризуется одной вторичной частицей на одну первичную в энергетическом интервале  $\Delta E = 8$  МэВ, поперечном эмиттансе  $E = 2$  МэВ.см, временном интервале  $c \Delta t \leq 0,4$  см при степени поляризации  $P = 0,65$  после собирания частиц с конвертера и ускорения до 50 МэВ с темпом  $dE/dx = 0,5$  МэВ/см и магнитным сопровождением продольным полем  $H_{\parallel} = 2T$ . Спектр частиц и распределение степени поляризации показаны на рисунке 1. Собираение частиц с конвертера осуществляется короткой литиевой линзой, расположенной в непосредственной близости от конвертера (Рис.2). Спектр, приведенный на рис.1, получен при линзе, расположенной на расстоянии 1 мм от конвертера - вольфрамовой пластинки толщиной 2 мм (0,5 рад.ед.длины). Длина линзы по литию 6,5 мм, диаметр 7 мм, фланцы из бериллия толщиной 1 мм - входной и 0,5 мм - выходной. Отказ от, казалось бы, естественного использования конвертера в качестве входного фланца линзы обусловлен высоким энерговыделением в конвертере, не допускающим его многократное использование. Плотность частиц на выходе конвертера достигает 6 пар на одну первичную частицу на одном мм<sup>2</sup>, что при  $10^{12}$  части в импульсе означает энерговыделение  $\sim 300$  Дж/г за импульс, не оставляющее надежды на многократную работу конвертера. Помимо конструктивного усложнения задачи собирания частиц это приводит и к потере в фазовой плотности пучков - к увеличению энергетического интервала, содержащего одну вторичную частицу на одну первичную от 6 до 8 МэВ.

Высокое энерговыделение создает трудности и в работе линзы из-за опасности перегрева ее входного фланца. Действительно, нагрев фланца в месте входа пучка составляет 300°C за импульс. Хотя малый размер нагретой области приводит к быстрому, в отношении  $T(t) = T(0) \langle r^2 \rangle / (\langle r^2 \rangle + 8\lambda t)$ , где  $\lambda$  - коэффициент тем-

пературопроводности, уменьшению температуры со временем за счет перераспределения тепла по фланцу, так что к моменту прихода следующего импульса температур (в предложении бесконечного радиуса фланца) составит 2°C, тем не менее задача надежного теплоотвода от фланцев является актуальной. Дополнительной гарантией ее успешного решения является использование в линзе жидкого лития, прокачиваемого через систему, что позволяет осуществлять теплоотвод со всей поверхности фланца. Подробно конструкция линзы рассмотрена в /3/.

Ондулятор (Рис.3) представляет собой двузаходную спираль с токами, текущими навстречу друг другу. Для лабораторных исследований была изготовлена секция длиной 1,01 м. Выбор сечения шинки производился на основе оптимизации его по минимуму активных потерь для заданных значений  $\lambda_0$  и  $P_{\perp}$ . Результат расчета активных потерь представлен на Рис.4 в зависимости от радиальной толщины витка. Внутренний диаметр витка принимался равным 4,5 мм, длительность импульса тока 50 мксек. Минимум потерь достигается при  $\Delta r = \lambda_0/4$ . Для достижения проектных параметров  $\lambda_0 = 6$  мм и  $P_{\perp} = 0,34$ , т.е. поля на оси  $H_{\perp} = 6$  кЭ ток в проводе сечением 1,45x1,45 мм должен быть 10 кА.

Шина изготавливалась путем прокатки медной проволоки круглого сечения между профилированными валками после предварительного отжига. Навивка спирали осуществлялась на калиброванную проволочную отправку диаметром  $\phi = 4,5$  мм. После съема с оправки изменения диаметра не наблюдалось.

Поскольку базирование осуществляется по наружному диаметру спирали, то перед съемом осуществлялась калибровка наружного диаметра прогоном между металлическими пластинами с заданным расстоянием между ними. Результирующий разброс диаметра спирали по длине не превышает 0,1 мм. Для фиксации шага в штанге 2 имеется нарезка, в которую входят витки спирали. Штанги со спиралью между ними помещены в корпус, выполненный с точностью  $\pm 0,05$  мм. Прижим верхней штанги к спирали и далее к цилиндрическим штангам 2 осуществляется ленточной пружиной 7. Штанги стягиваются между собой лентами 8. Штанги изготавливаются из керамики. Для отработки технологии сборки применялись штанги из стеклотекстолита. Внутри спирали проходит камера 5

из нержавеющей стали 4 мм, которая отделяет вакуумную часть от внутренней части корпуса, где пропускается вода, охлаждающая витки спирали. Вода входит через центральные штуцеры, проходит между витками спирали и далее симметрично с обеих сторон выходит наружу через отверстия 9.

Применялся дистиллят двойной перегонки с сопротивлением I Мом см. Максимальный расход составлял 0,1 л/сек. Система теплосъема полностью обеспечивала работоспособность ондулятора. Верхняя крышка 4 прижимается к корпусу гайками с шайбами. Между крышкой и корпусом проложена индиевая проволока, герметизирующая корпус. Герметизация в местах присоединения торцевых фланцев также делается индиевой проволокой. Токоввод, как отмечалось, производится в центральной части спирали. Он оформлен в виде коаксиала с последующим переходом в разрыв одного из витков. Камера имеет толщину стенок 0,2 мм, так что она не создает ослабления магнитного поля. Изоляция камеры осуществляется полиимидной пленкой марки Б 6 в четыре слоя (толщина одного слоя равна 0,015 мм).

В рабочем режиме напряжение между камерой и витками может достигать 1,5 кВ. Для обеспечения уверенной работы, после сборки изоляция испытывалась на напряжение до 2,5 кВ с помощью меггера.

Измерение распределения поля вдоль оси ондулятора производилось на постоянном токе с помощью датчика Холла, перемещаемого на медном штоке с помощью шагового двигателя. По измеренным значениям производилось разложение поля в ряд Фурье по продольным гармоникам.

Амплитуда второй гармоники в регулярной части спирали, усредненная по длине, не превышает 4% от основной гармоники. Величина остальных — менее 1,5%.

В импульсном режиме для защиты ондулятора применялся тиристорный генератор с малоиндуктивным трансформатором с коэффициентом трансформации 5:1, с которым велась работа вплоть до частоты повторения 25 Гц. В рабочем варианте предполагается запитывать несколько секций от одного генератора через общий понижающий трансформатор. Общее время наработки к настоящему времени составило 10000 импульсов.

Общие параметры секции импульсного ондулятора приведены в таблице:

Период	6 мм
Фактор ондуляторности	0,35
Поле на оси	6000 Э
Ток	10000 А
Длительность импульса	30 мксек
Энерговыделение	0,18 Дж/виток
Индуктивность	1,3 мкГн
Напряжение	1,19 кВ
Сопротивление	0,064 Ом

Параллельно с разработкой импульсного ондулятора была рассмотрена возможность создания ондулятора со сверхпроводящей обмоткой. Одной из самых привлекательных особенностей такого рода ондулятора обеспечение работоспособности вне зависимости от частоты повторения, с которой работает комплекс.

Сверхпроводящий ондулятор имеет период 10 мм, диаметр апертуры 6 мм, толщина намотки по радиусу 5 мм, по  $Z$  — 3 мм. Токовые витки представляют собой двузаходную спираль, уложенную в пазы железного магнитопровода, участвующего в формировании поля. Число витков в обмотке — 15, провод диаметром 0,7 мм. Для улучшения распределения поля, токовые витки и магнитопровод окружен ярмом из железа (см. рис. 5). Обмотка пропитывается эпоксидным компаундом с наполнителем из окиси алюминия или титаната бария и замоноличивается.

Центральный узел окружен термоизолирующей рубашкой 9 из 25 слоев стекловуали и алюминизированной лавсановой пленки и тонкостенным полированным стаканом 5 из нержавеющей стали, служащим одновременно фиксатором стержней 10.

По расчетам, вплоть до значений фактора ондуляторности  $P_L = 0,42$  не происходит насыщения железа, а ток в одном витке составляет при этом около 200 А.

Испытания изготовленной секции производились в наливном криостате. Производилось измерение распределение поля в жидком гелии. Как и для теплого ондулятора производилось изучение спектрального состава поля по гармоникам продольного распределения в краевых полях. Защита секции осуществлялась

от сильноточного источника с тиристорным выпрямителем.

Контроль тока осуществлялся по калиброванному шунту с выводом показаний на цифровой вольтметр.

Протяжка датчика Холла осуществлялась с помощью штока из нержавеющей стали, герметизированного для предотвращения выхода из криостата газообразного гелия. Датчик Холла располагался на конце трубчатого штока, внутри которого проходили четыре провода датчика. Толщина стенок трубки составляет 0,2 мм, длина 1200 мм диаметр 6 мм. Измерение зависимости величины поля на оси ондулятора от питающего тока полностью подтвердили результаты расчетов. Достигнуто поле на оси 5000 Эрстед при величине питающего тока в одном витке 400 А., т.е. при суммарном токе 6000 А.

Спектральный состав гармоник показал, что вторая гармоника в продольном распределении поля составляет 1,1% от амплитуды первой гармоники, третья - 0,23%, остальные гармоники имеют пренебрежимо малые амплитуды. Измерение проводилось при величине тока в одном витке 200 А ( $P_L = 0.4$ ).

Производилось также измерение зависимости интеграла поля по всей длине от величины питающего тока.

Результаты испытаний сверхпроводящего ондулятора позволяют рассматривать его как возможный вариант ондулятора для конверсионной системы второй очереди комплекса ВЛЭШ на энергию 2х500 ГэВ, где ослабляются требования на малость  $\lambda_0$ , если условия засветки ондулятора за счет нестабильности положения пучка, обусловленной неточностью нацеливания в месте встречи, обеспечит достаточную надежность его работы.

С точки зрения радиационной безопасности ондулятора совершенно необходимой является защита его от лобового попадания первичного пучка в торец структуры, что привело бы к мгновенному разрушению ее в области максимума образующего электромагнитного ливня. Эта задача может быть решена путем надежной коллимации пучка на выходе в ондулятор, так чтобы угол возможного входа в стенку ондулятора не превышал  $10^{-5}$  радиана. В этом случае при попадании центральной части пучка с гауссовски распределенной с  $\langle r^2 \rangle = 0,4 \text{ см}^2$  плотностью

частиц в стенку из меди, максимальный нагрев в стенке при числе частиц в пучке  $10^{12}$  и энергии 500 ГэВ, составит  $\sim 300^\circ\text{C}$ . Распределение температуры по глубине будет иметь очень малую ширину, с максимумом на расстоянии  $10^{-4}$  см от поверхности. Вход в стенку хвостов поперечного распределения пучка отстоящих на расстояние от его центра, приведет к нагреву на  $40^\circ\text{C}$ .

Осуществление конверсии при энергии первичного пучка 500 ГэВ, хотя на первый взгляд и является более простым, чем при энергии 150 ГэВ, так как снимает жесткое ограничение снизу длины волны ондулятора  $\lambda_0$  в действительности встречается с принципиальной трудностью, состоящей в пропорциональном  $1/\gamma^2$  уменьшении плотности спектра фотонов и спектра вторичных частиц. Это приведет к соответствующему расширению энергетического интервала захвата частиц в режим ускорения, которое невозможно без применения монохроматизации пучка перед пуском в накопитель. Возможность такой монохроматизации имеется в схеме ВЛЭШ. Действительно, перестройка временной структуры - растяжение сгустков на входе в накопитель /1/ с соответствующим разворотом пучка в продольном фазовом пространстве с помощью линейного ускорителя, позволяет уменьшить энергетический разброс частиц в том же отношении, в котором увеличивается длина сгустков, т.е. в  $\sim 10$  раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скринский А.Н. "Линейные встречные пучки". Доклад XII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Батавия, США, 1983 г., стр.104.  
V.E. Balakin, A.A. Mikhailichenko, prepr INP 79-85
2. Алферов Д.Ф. и др. "Ондулятор как источник электромагнитного излучения". *Particle accelerators*, 1979 г., т.9, стр.223.
3. Сильвестров Г.И. "Проблемы получения интенсивных пучков вторичных частиц". Доклад на XIII Международной конференции по ускорителям высоких энергий, Новосибирск, 1986 г.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1. Спектр и распределение степени поляризации позитронов после собирания с конвертера и ускорения на 50 МэВ с темпом  $dE/dX = 50$  МэВ/м и магнитным сопровождением продольным полем  $H_{||} = 2T$ . Первичный пучок с энергией  $E = 150$  ГэВ, ондулятор длиной  $L = 150$  м, с периодом  $\lambda_0 = 6$  мм,  $P_L^2 = 0,1$ .
- Рис.2. Схема конверсионного узла.  
1 - мишень, 2 - рабочий объем литиевой линзы, 3 - ее фланцы, 4 - входной фланец ускоряющей секции, 5 - обмотки соленоида.
- Рис.3. Конструкция импульсного ондулятора.  
1 - спираль, 2 - штанги, 3 - корпус, 4 - крышка, 5 - камера, 6 - изолирующая пленка, 7 - пружина, 8 - стяжка, 9 - канал для охлаждающей жидкости.
- Рис.4. Активные потери в витках при  $\lambda_0 = 6$  мм.
- Рис.5. Конструкция ондулятора со сверхпроводящими обмотками.  
1 - камера, 2 - магнитопровод, 3 - kern, 4 - внутренний корпус, 5 - полированный стакан, 6 - внешний корпус, 7 - витки обмотки, 8 - ярмо, стекловуаль, 10 - стержни крепления внутреннего корпуса.

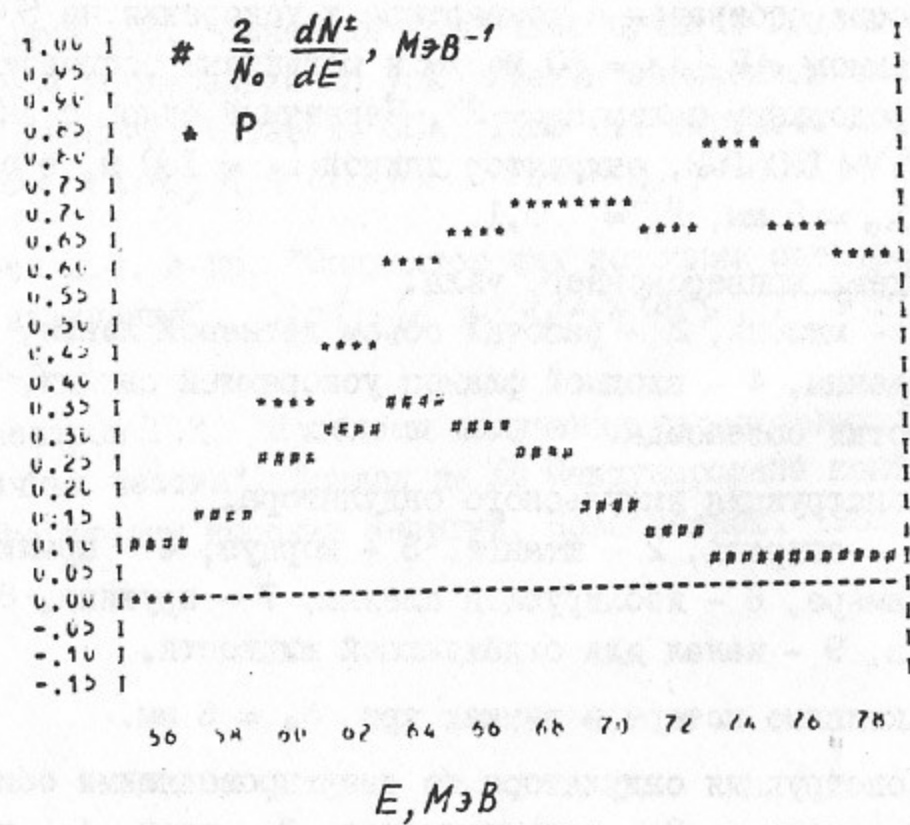


Рис.1.

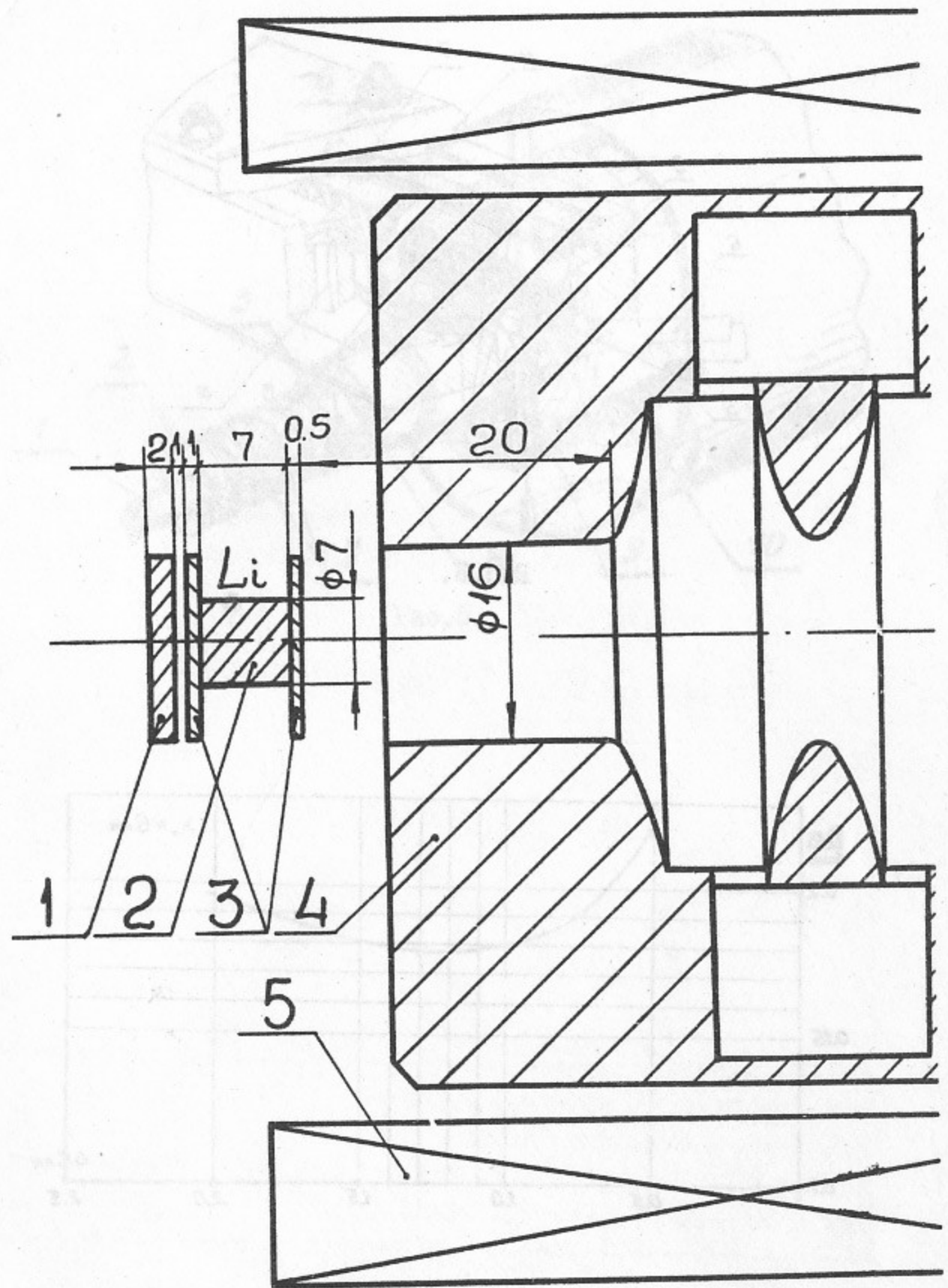


Рис.2.

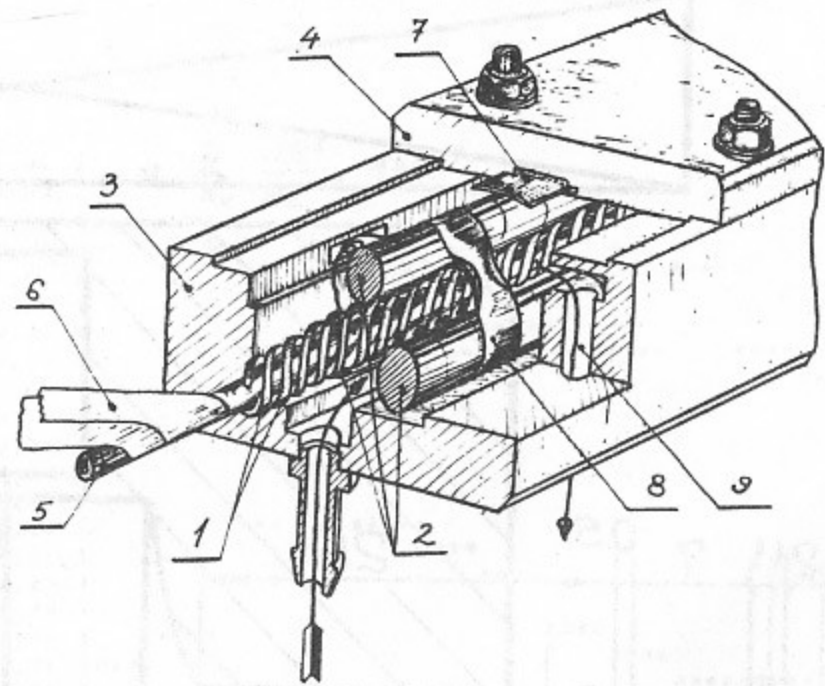


Рис.3.

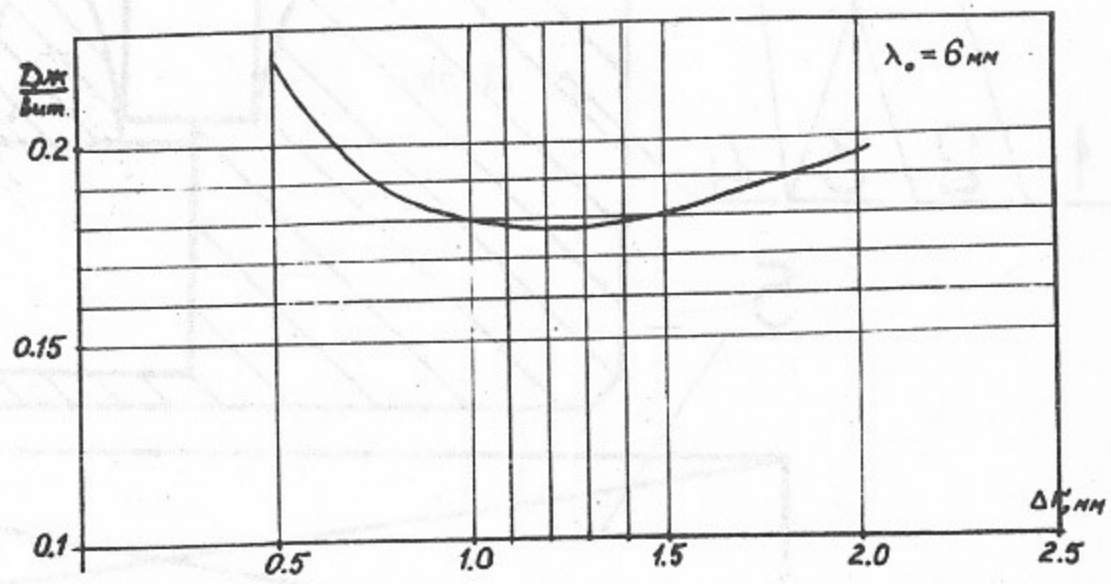


Рис.4.

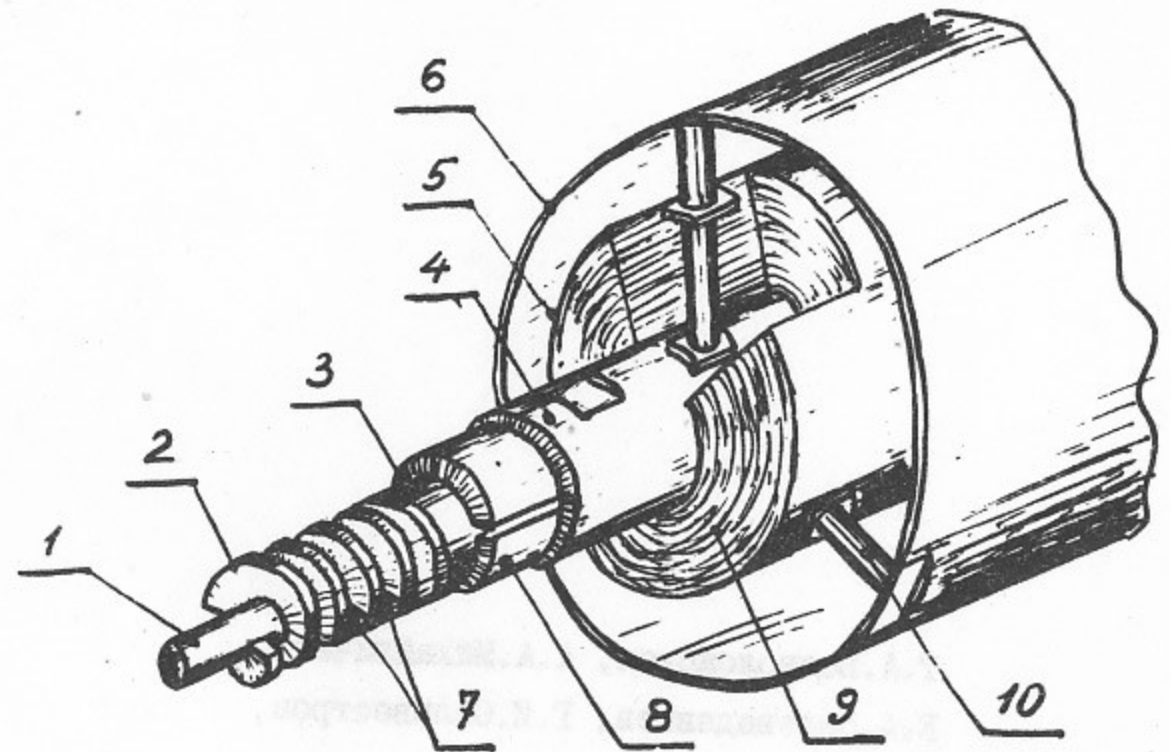
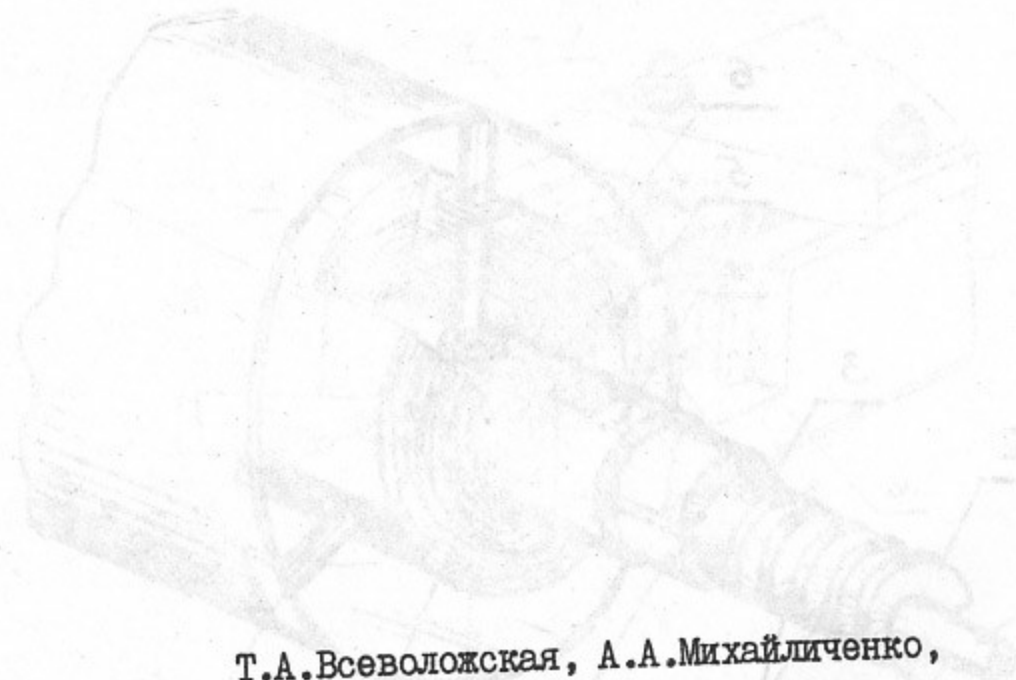


Рис.5.





Т.А.Всеволожская, А.А.Михайличенко,  
Е.А.Переведенцев, Г.И.Сильвестров,  
А.Д.Чернякин

СПИРАЛЬНЫЙ ОНДУЛЯТОР СИСТЕМЫ КОНВЕРСИИ  
ВЛЭШ

Препринт № 86 - 129

Работа поступила 7 августа 1986 г.

---

Ответственный за выпуск С.Г.Попов  
Подписано к печати 4.09.86г. МН 11815  
Формат бумаги 60x90 1/16. Усл.1,1 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 129

---

Ротопринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90.