

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

Е.В. Кремянская, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков,  
Н.Ю. Мучной, Ю.А. Пахотин

ПРИМЕНЕНИЕ КОРОНОГРАФА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
В НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3

ИЯФ 2004-33

Новосибирск  
2004

**Применение коронографа для исследования  
поперечного распределения плотности электронного пучка  
в накопителе ВЭПП-3**

*Е.В. Кремьянская, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков,  
Н.Ю. Мучной, Ю.А. Пахотин*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

**Аннотация**

Исследование процессов, формирующих поперечное распределение пучка в циклическом ускорителе электронов, позволяет ответить на вопросы, касающиеся времени жизни частиц, светимости установок со встречными пучками, яркости синхротронного излучения и пр. В ИЯФ СО РАН разработан и установлен на накопителе ВЭПП-3 оптический коронограф для изучения профиля пучка электронов на размерах, превышающих  $7\sigma$ . Результаты экспериментов с коронографом приводятся в данной статье.

**Application of the optical coronagraph  
for studying of the “tails” of electron beam  
at the VEPP-3 storage ring**

*E.V. Kremyanskaya, E.B. Levichev, O.I. Meshkov,  
N.Yu. Muchnoi, Yu.A. Pakhotin*

Budker Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, Russia

**Abstract**

The studying of the processes that form a transversal distribution of a beam in a cycling accelerator of electrons enables to elucidate some problems, in particular collider luminosity, SR brightness, beam life time, etc. The optical coronagraph is applied at VEPP-3 storage ring for studying of the beam tails at the size, exceeding  $7\sigma$ . The first results are presented at this paper.

---

## 1. Введение

Накопитель ВЭПП-3 [1] способен ускорять ток электронов 100 – 150 мА до энергии 2 ГэВ. Инжекция в накопитель производится в продольном фазовом пространстве из бустера-синхротрона Б-4 при  $E = 350$  МэВ; затем пучок ускоряется с помощью ВЧ-системы, работающей на 2 гармонике частоты обращения до 600 МэВ, где происходит «перехват» пучка в ускоряющую систему 18-ой гармоники частоты обращения.

Система управления накопителя позволяет останавливать процесс ускорения, так что имеется возможность проведения экспериментов при различных энергиях. Характерное время жизни пучка в диапазоне  $E = 350 \div 1800$  МэВ меняется от 600 до 10000 сек.

Средний вакуум в кольце во время проведения экспериментов составлял  $2 \cdot 10^{-9}$  Торр. Эта величина могла регулируемо меняться при отключении секций распределенных магниторазрядных насосов. В результате имелась возможность изучить влияние концентрации атомов остаточного газа, массовый состав которого преимущественно определяется ионами СО ( $Z = 7$ ) и Аг ( $Z = 18$ ), на формирование поперечного распределения пучка электронов.

## 2. Распределение частиц в пучке циклического ускорителя

Плотность частиц в пучке циклического ускорителя по всем трем степеням свободы  $x, y, s$  (где  $x$  и  $y$  – поперечные, а  $s$  – продольная координаты) имеет распределение, близкое к нормальному, с характерным среднеквадратичным размером  $\sigma_{x,y,s}$ . При этом в пучке можно выделить две области: центральную (в пределах  $5 \div 6\sigma$ ) и «хвостовую» (за пределами  $6\sigma$ ). Центральная часть, где сосредоточена основная доля частиц, определяет такие характеристики как светимость коллайдера или яркость источника синхротронного излучения, в то время как «хвостовая» отвечает за время жизни частиц в накопителе и фоновое состояние детектора. Перечисленные параметры являются важнейшими характеристиками современных установок. Поэтому для выбора оптимального состояния функционирования ускорителя необходимо иметь достоверное представление о распределении частиц в пучке, причем не только в центральной части, но и в «хвостах».

Для оптимизации параметров ускорителя необходимо уметь быстро измерять распределение «хвостовой» области пучка. В настоящее время для исследования распределений «хвостов» широко применяются два метода: скрепер [2] и пересечение пучка тонкой металлической нитью [3]. В первом случае в вакуумную камеру ускорителя вводится поглотитель из тяжелого металла, обычно вольфрама, а информация о распределении «хвостов» в пучке извлекается из измерений потерь частиц в зависимости от координаты скрепера. Во втором случае камера ускорителя пересекается тонкой металлической нитью и распределение плотности частиц в пучке определяется, опять таки, путем регистрации потерь, как правило, с помощью сцинтилляционного счетчика..

Обе методики являются контактными диагностиками, воздействующими на пучок, изменяя его свойства или даже приводя к гибели. Кроме того, исследование «хвостов» при помощи скрепера требует заметных затрат времени и плохо сочетается с другими экспериментами на ускорителе, а результаты измерений не всегда трактуются однозначно. Достоинством обеих методик является большой, до  $10^6$  динамический диапазон.

Представляется актуальной разработка бесконтактной диагностики, позволяющей оперативно исследовать функцию распределения пучка за пределами размера в  $5\sigma$ . В качестве такого устройства в нашем эксперименте использовался «коронограф». Следует отметить, что выбор оказался удачным. Удалось достаточно точно измерить распределение «хвостов» пучка на уровне лучше  $10^{-4}$ , и провести сравнение с результатами аналитических расчетов.

### **3. Оптическая диагностика пучка на ВЭПП-3**

ВЭПП-3 оснащен оптической диагностикой (ОД, рис.1) для измерения поперечных ( $x, z$ ) и продольных ( $\varphi$ ) размеров пучка. Диагностика расположена на оптической скамье вблизи поворотного магнита М1-1. Синхротронное излучение пучка в оптическом диапазоне, отраженное охлаждаемым металлическим зеркалом, через кварцевое окно вакуумной камеры выводится на оптическую доску и с помощью полупрозрачных зеркал разветвляется на несколько каналов (рис.2). Измерение поперечных размеров пучка производится ПЗС-матрицей [4], которая с помощью сетевого интерфейса Ethernet подключена к персональному компьютеру. Измеренная минимальная чувствительность матрицы соответствует приблизительно  $10^3$  частиц, циркулирующих в накопителе (ток пучка  $J \approx 0.6$  нА). Для измерения продольного размера пучка применяется  $\varphi$ -диссектор [5].

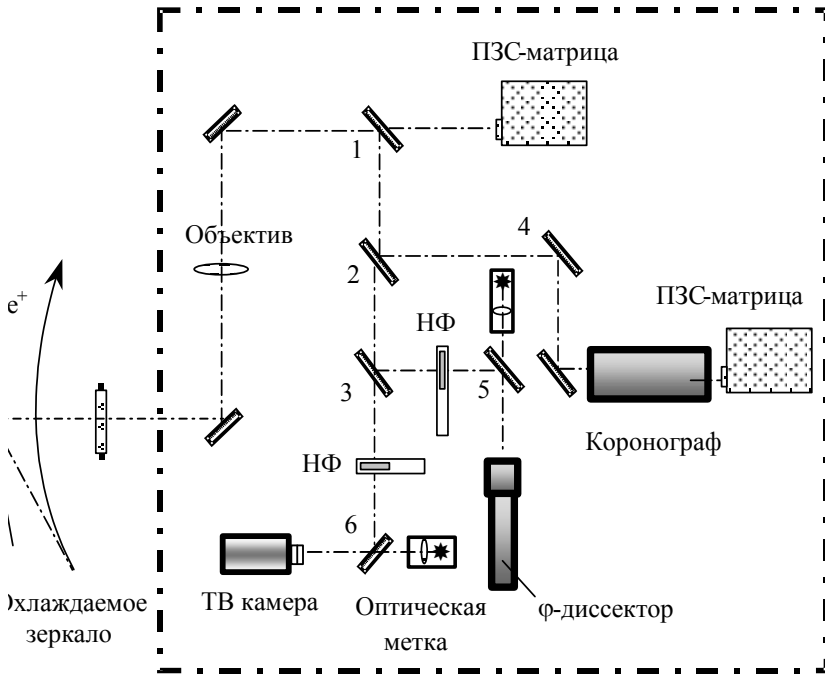


Рис. 1. Схема оптической диагностики пучка. 1 ÷ 6 – полупрозрачные зеркала. НФ – переключаемые нейтральные фильтры.

#### 4. Короннограф

Для исследования поперечного распределения частиц в пучке на расстояниях от оси более  $7\sigma_z$  использовался короннограф белого света, устроенный по классической схеме Лيو (рис.2). Короннограф располагался на свободном канале оптической диагностики, ранее занятом  $rz$ -диссектором [5].

Короннограф – прибор, применяемый в астрономических исследованиях для наблюдения короны Солнца [6]. Корона Солнца представляет собой разреженную водородную плазму, интенсивность свечения которой на несколько порядков ниже интенсивности свечения солнечного диска, поэтому в естественных условиях корона может наблюдаться только во время солнечных затмений. Для подавления свечения диска в классическом короннографе Лيو используется зачерненный конус – искусственная «Луна». Кроме того, оптическая система короннографа спроектирована так, чтобы минимизировать влияние света, рассеянного и дифрагировавшего на оптических элементах прибора, на исследуемое изображение короны. Типичная величина подавле-

ния излучения солнечного диска в астрономических коронографах составляет  $10^3 \div 10^4$  на расстоянии 2-3  $R_{\text{солнца}}$  от центра светила. Дополнительное подавление на полтора-два порядка достигается применением узкополосного светофильтра, т.к. излучение короны сосредоточено вблизи спектральной линии  $H_{\alpha}$ , а спектр излучения диска Солнца близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой  $6000^{\circ}\text{C}$ . К сожалению, в нашем случае использование этого приема невозможно.

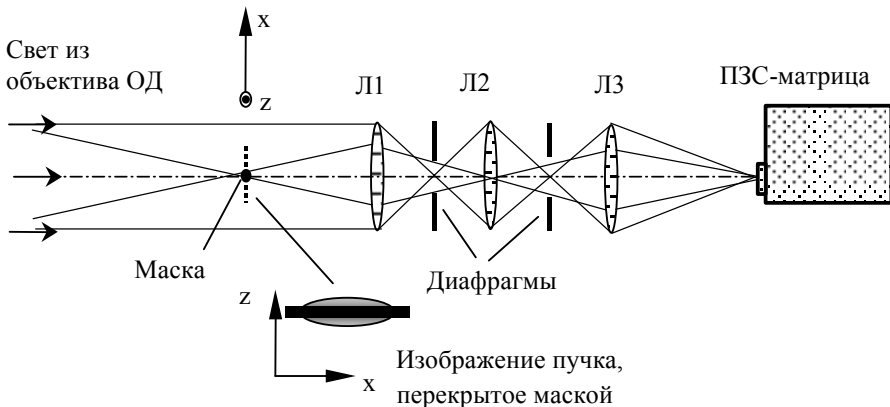
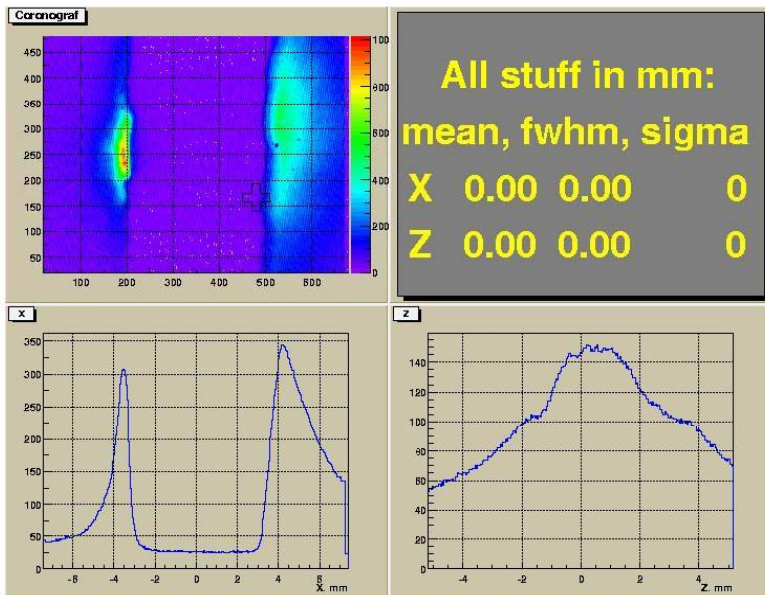


Рис. 2. Оптическая схема коронографа..

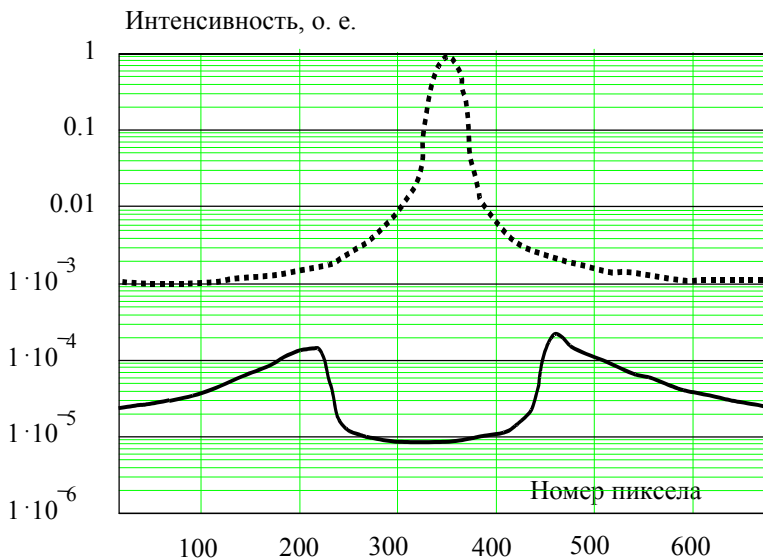
Устройство коронографа, установленного на ВЭПП-3, показано на рис.2. В качестве искусственной «луны» использовалась маска из зачерненной проволоки  $\varnothing 0.8$  мм, перекрывавшая пучок по вертикальной оси  $z$ . Коэффициент уменьшения оптики равнялся 1:2.6, т.е. маска перекрывала область в пределах  $\pm 5 \sigma_z$  от оси пучка. Изображение пучка переносится объективом оптической диагностики (ОД) в точку расположения маски. «Хвосты» изображения с помощью линз Л1÷Л3 строятся на ПЗС-матрице. Диафрагмы, расположенные в точках построения изображения апертуры объектива ОД, понижают уровень рассеянного света. Во время эксперимента независимо производились и измерения поперечных размеров пучка.

Автоматизация установки реализована на базе операционной системы Linux. Программа управления установкой дает возможность устанавливать время накопления сигнала, коэффициент усиления и пороговое значение ПЗС-матрицы. Максимальная чувствительность матрицы дает возможность регистрировать излучение около  $10^3$  электронов, циркулирующих в накопителе. Графический интерфейс позволяет визуализировать двумерное, а также вертикальное и горизонтальное поперечные интегральные распределения. Типичные распределения, зарегистрированные коронографом, представлены на рис. 3.



*Рис.3. Панель графической визуализации программы управления коронографом с типичной картиной распределения плотности электронного пучка.*

Проверка контрастности прибора проводилась на испытательном стенде, при этом пучок имитировался диффузно рассеивающей щелью с размерами  $0.8 \times 3$  мм. В качестве объектива, строящего изображение щели в месте расположения маски коронографа, использовался аналог объектива ОД ВЭПП-3, также соблюдались все геометрические размеры. Результаты измерений показаны на рис.4. Коронограф на пять порядков подавляет свет, испускаемый щелью, при этом уровень фоновой засветки ПЗС-матрицы в области, где производятся измерения “хвостов”, составляет  $10^{-4}$  от интенсивности источника. Вообще говоря, желательно увеличение контрастности прибора еще хотя бы на порядок, однако и достигнутая величина оказалась достаточной для проведения наших экспериментов, а также является приемлимой для экспериментов с коронографом, планируемых на ускорителе ВЭПП-4М



*Рис. 4. Тестирование контрастности коронографа. Пунктирная кривая – изображение прямоугольной щели в отсутствии маски. Нижняя кривая – изображение той же щели, закрытое маской.*

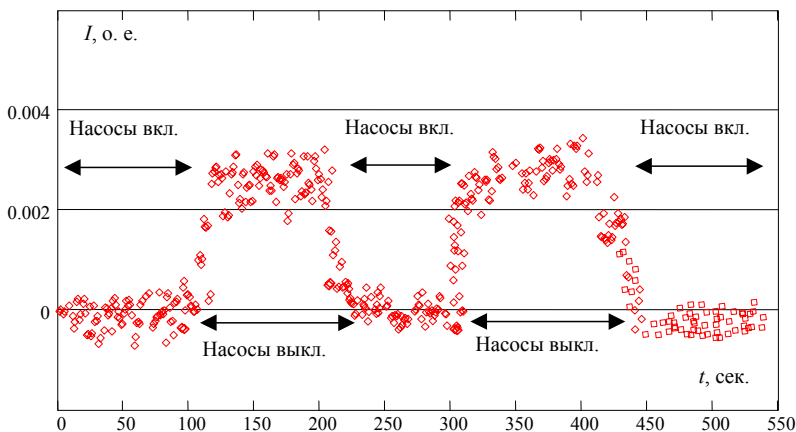
## 5. Эксперимент: измерения с помощью коронографа

Тестирование системы проводилось с помощью изучения рассеяния пучка электронов на атомах остаточного газа в вакуумной камере ускорителя. С одной стороны, данный процесс может быть рассчитан с использованием существующих методик (см. Главу 7), с другой – давлением остаточного газа на ВЭПП-3 можно легко управлять.

Влияние вакуумных условий на «хвосты» пучка изучалось на энергиях 350 (энергия инжекции), 600, 1200 МэВ. Вакуум изменялся от начального уровня  $2 \cdot 10^{-9}$  Торр до  $3 \cdot 10^{-9}$  Торр путем отключения распределенных магниторазрядных насосов. Следует отметить, что приведенные числа характеризуют средний вакуум в кольце и получены по показаниям манометрических ламп, расположенных в нескольких точках вдоль вакуумной камеры.

Экспериментальный цикл состоял в следующем. При заданной энергии пучка электронов  $E$  и токе около  $J_e \approx 10$  мА насосы отключались в течение нескольких секунд, при этом вакуум в ускорителе ухудшался до нового постоянного значения за приблизительно такое же время.





**Рис. 5.** Интегральный сигнал с коронографа в зависимости от времени при энергии 356 МэВ и токе 10 мА. Видны модуляции, связанные с изменением вакуума в ускорителе.

Измерения при заданном уровне вакуума продолжались в течение нескольких минут, затем насосы включались снова и измерения повторялись. На рис.5 показан интегральный нормированный сигнал с коронографа

$$I_c(t) = \frac{\sum_{i,j} p_{i,j}(t)}{J(t)} \cdot I_0^{-1}(0),$$

где  $p_{i,j}(t)$  – сигнал  $ij$  – пиксела матрицы ПЗС. Нормировка производилась

на начальное отношение:  $I_0(0) = \frac{\sum_{i,j} p_{i,j}(0)}{J(0)}$ . Энергия пучка электронов составляла  $E = 356$  МэВ. При двух других энергиях пучка влияние вакуума на «хвосты», регистрируемые коронографом, никак не проявлялось.

## 6. Эксперимент: измерения с помощью датчика потерь

Измерения поперечного распределения частиц в пучке проводились также традиционным способом – с помощью скрепера и датчика потерь. Скрепер вводился в вакуумную камеру в месте инъекции пучка из бетатрона Б-4. Датчик потерь (ФЭУ с пластиковым сцинтиллятором) располагался на внутреннем радиусе вакуумной камеры напротив каналов вывода синхротронного излучения. Датчик регистрировал частицы пучка, попадавшие на стенку вакуумной камеры вследствие рассеяния на скрепере. Результаты измерений, нормированные на ток пучка, приведены на рис. 6. Как и в случае

использования коронографа, наблюдается влияние вакуумных условий на «хвосты» пучка. Это влияние проявляется только при  $E=356$  МэВ и не регистрируется при  $E=600$  и  $1200$  МэВ. За  $x=0$  на рисунке принята точка гибели пучка. Измерения прекращались, при лавинообразном росте числа импульсов ФЭУ и превышении разрядности пересчетной схемы.

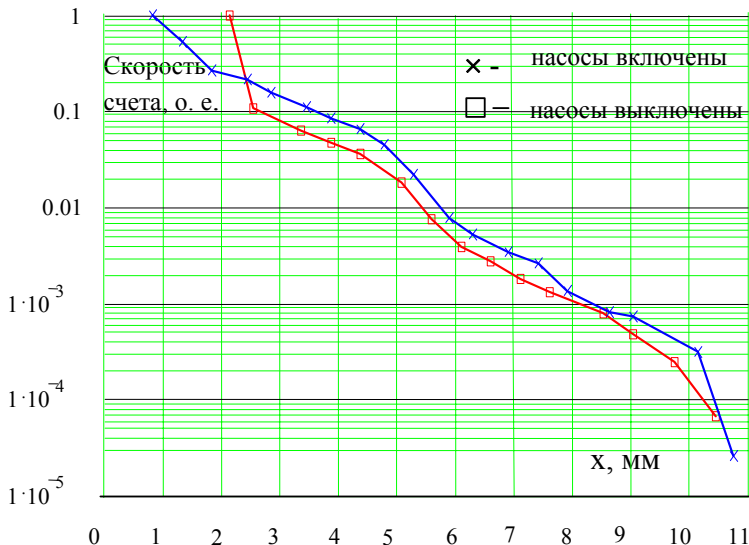


Рис. 6. Потери частиц вследствие рассеяния на скрепоре, регистрируемые датчиком потерь. Энергия электронов  $E=356$  МэВ, вертикальный размер пучка  $\sigma_y = 0.2$  мм.

## 7. Моделирование рассеяния пучка на остаточном вакууме

Часто предполагается, что функция распределения электронного пучка имеет гауссовский вид. Однако, при изучении «хвостовой» области пучка необходимо учитывать отклонение распределения от нормального. Негауссовское распределение электронов возникает по ряду причин. Простейшим примером некогерентного процесса является рассеяние электронов на атомах остаточного газа. Рассмотрим этот процесс более подробно, при проведении аналитических и численных расчетов будем руководствоваться общим подходом, который подробно изложен в [7], и который основан на использовании теоремы Кэмпбелла-Райса для нахождения характеристической функции плотности вероятности распределения частиц в пучке по известному дифференциальному сечению некоторого статистического процесса.

Если в качестве последнего рассмотреть малоугловое рассеяние частиц пучка на атомах остаточного газа, то дифференциальное сечение такого процесса имеет вид:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \pi \left( \frac{2Zr_e}{\gamma} \right)^2 \frac{1}{(\theta^2 + \theta_{\min}^2)^{3/2}},$$

где  $\theta_{\min}$  определяется формулой:  $\theta_{\min} = \frac{Z^{1/3}\alpha}{\gamma}$ ,  $Z$  – число протонов в ядрах атомов остаточного газа,  $\gamma$  – лоренц-фактор релятивистского электрона,  $r_e = 2.8 \cdot 10^{-15}$  м – классический радиус электрона,  $\alpha = 1/137$  – постоянная тонкой структуры. Полное сечение при этом равно

$$\sigma_{tot} = 4\pi \frac{r_e^2 Z^2}{\gamma^2 \theta_{\min}^2} \approx 2.5 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2.$$

Кроме дифференциального сечения в расчете фигурируют два параметра:

$$N_d = N\tau \quad \text{и} \quad \Theta = \frac{\theta_{\min}}{\sigma'_0},$$

где  $N$  – число рассеяний в секунду (напрямую связано с глубиной вакуума в накопителе),  $\tau$  – время бетатронного затухания,  $\sigma'_0 = \sigma_0/\beta$  – размер пучка. С учетом того, что  $N = Q\sigma_{tot}c$ , где  $Q$  – концентрация атомов остаточного газа,  $c$  – скорость света, получаем эмпирическую зависимость:

$$N = 5.3 \cdot 10^8 \cdot P \text{ (Торр)}.$$

Для накопительного кольца ВЭПП-3 характерный усредненный вакуум имеет значение  $P = 2 \cdot 10^{-9}$  Торр. Остальные необходимые для расчета параметры приведены в таблице:

	E=350 МэВ	E=2000 МэВ
$\tau$ , с	0.87	0.0043
$\varepsilon$ , рад·м	$0.00905 \cdot 10^{-6}$	$0.292 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_0$ , мм	0.2	1.27
$\theta_{\min}$ , рад	$2 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-6}$
$N_d$	0.9	0.005
$\Theta$	0.5	0.015

Соответствующие этим параметрам распределения частиц в пучке электронов имеют вид, представленный на рис. 7. С ростом энергии плотность электронов в «хвостовой» области резко падает.

Действительно, при энергии инжекции ВЭПП-3 ( $E=356$  МэВ) ухудшение вакуума от  $10^{-9}$  Торр до  $2 \cdot 10^{-9}$  Торр приводит к заметному изменению плотности распределения «хвостовых» областей пучка, что отображено на рис. 8.

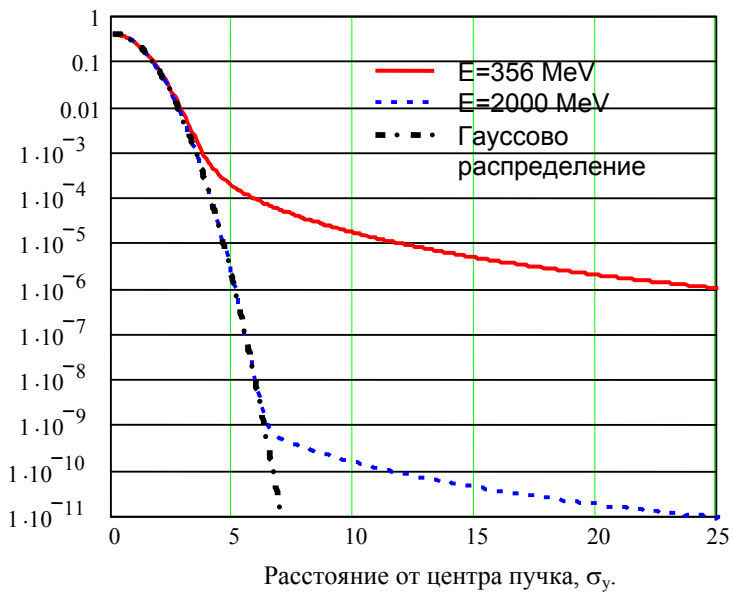


Рис. 7. Распределение электронов в пучке для разных энергий ВЭПП-3.

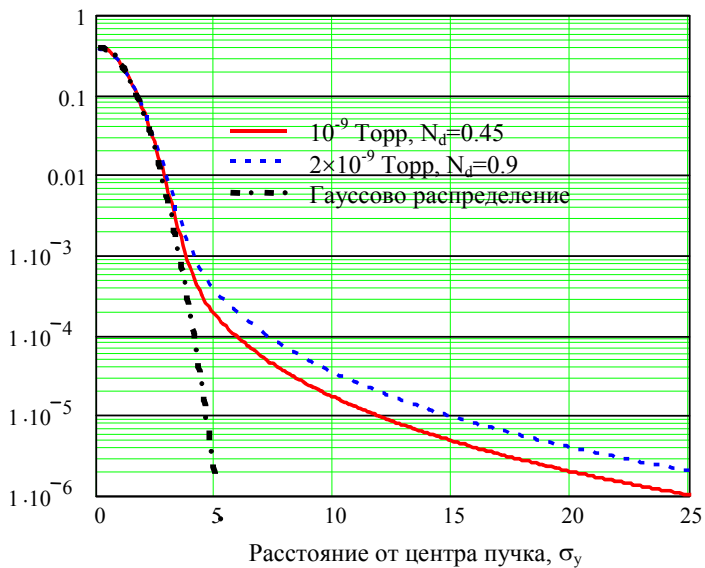
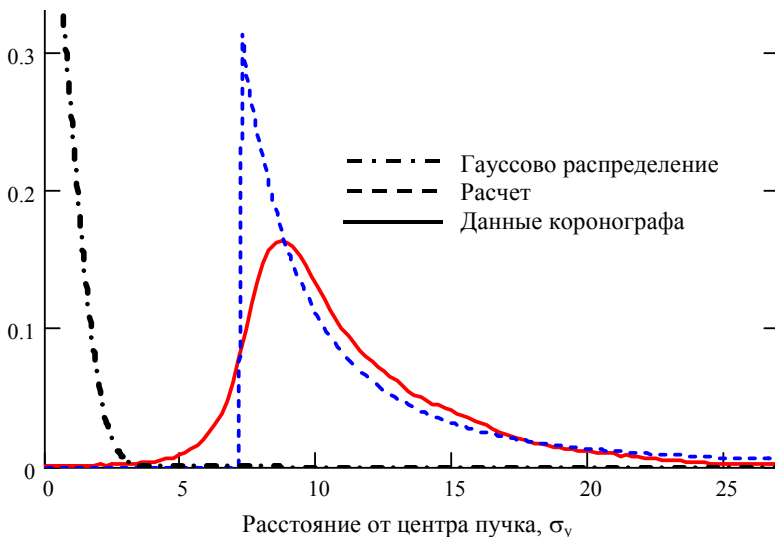


Рис. 8. Распределения электронов в пучке при энергии  $E=356$  МэВ и разных значениях вакуума.

Проведем сравнение измеренных и расчетных распределений. Типичное распределение, которое регистрировалось коронографом представлено на рис. 4 (см. нижний левый квадрант). Изучение оптики коронографа позволило установить, что изображение левой половины «хвостового» распределения более контрастно и менее подвержено влиянию паразитных засветок и бликов. Изобразим на одном рисунке (см. рис. 9) идеальный гауссовский пучок, «хвост» зарегистрированный коронографом и «хвост» полученный в результате расчета, все эти функции нормируем на единицу для удобства сравнения



*Рис. 9. Измеренное и расчетное распределение в «хвостовой» области пучка. Для сравнения приведено гауссово распределение.*

.Для того, чтобы отметить принципиальное согласие между расчетом и измерениями проведем сравнение разностного эффекта при одной и той же энергии, но разных значениях вакуума. Вычитая одну функцию распределения из другой, получаем графики, которые изображены на рис. 10.

Из их сравнения очевидно, что рост плотности электронов в «хвостах» пучка при изменении величины вакуума удовлетворительно (критерий согласия  $\chi^2 \approx 0.8$ ) описывается примененным расчетом. Поскольку в реальном эксперименте существовала возможность изменять вакуум только между двумя значениями (включено/выключено), то попытаемся предсказать поведение «хвостовых» распределений при других значениях вакуума. Для этого вычислим интегральные плотности распределения электронов в пучке за пределами «луны» коронографа. Полученная функциональная зависимость изображена на рис. 11.

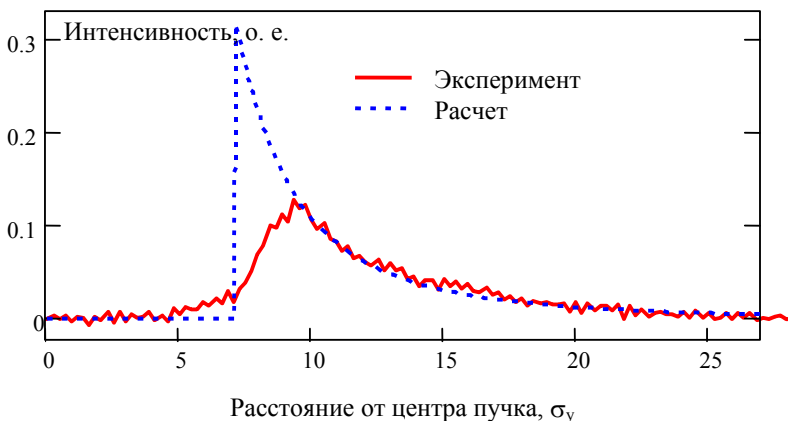


Рис. 10. Разность измеренных функций распределения и расчетных функций распределения при двух различных значениях вакуума  $10^{-9}$  Торр и  $2 \cdot 10^{-9}$  Торр.

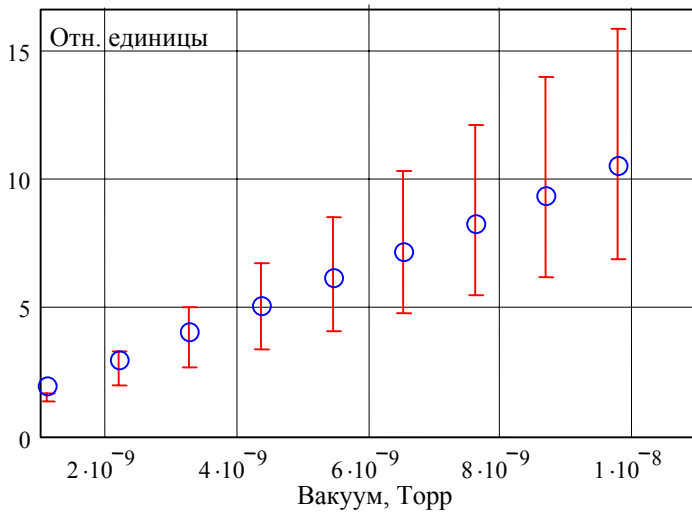


Рис. 11. Зависимость интегральной плотности электронов в «хвостах» пучка от давления в вакуумной камере ВЭПП-3 при энергии  $E=356$  МэВ.

## 8. Выводы

Влияние вакуумных условий на распределение частиц в пучке изучено на накопителе ВЭПП-3 с помощью оптической диагностики – коронографа. Проведено сопоставление полученных результатов с аналитическими расчетами. Данные диагностики находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими вычислениями.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность И.Н. Нестеренко за консультации по поводу конструкции коронографа.

## Литература

1. <http://vepp4-pult1.inp.nsk.su/vepp3/index.html>.
2. *H. Burkhardt et al.* Beam tails in LEP // Proc. Of the 5<sup>th</sup> Europe Particle Accelerator Conference, v.2, p.1152-1154, 1996.
3. *J.D. Gilpatrick et al.* Beam-profile instrumentation for a beam-halo measurements: overall description, operation and beam data. // DIPAC 2001 Proceedings – ESRF, Grenoble.
4. *N.Y. Mutchnoi, M.G. Fedotov, D.S. Filimonov, S.E. Karnaev, V.A. Kiselev, O.I. Meshkov, N.Y. Mutchnoi, A.N. Selivanov.* Transverse Beam Profile Measurement at the VEPP-4M Collider // EPAC02 Proceedings, p.2040-2043, Paris, 2002.
5. *E. I. Zinin, S. E. Karnaev, V. A. Kiselev, O. I. Meshkov, N. Y. Mutchnoi, N. Selivanov, E. A. Simonov, A. A. Valishev, M. G. Fedotov.* Status and further development of the optical diagnostics of the VEPP-4M storage ring // Proceedings of PAC-01 Conference, Chicago, 2001, p.2438-2440.
6. *Koomen M.J., et al.* White light coronagraph in OSO-7 // Appl. Opt., 14, p.743, 1975.
7. *K. Hirata and K. Yokoya.* Non-Gaussian Distribution of Electron Beams due to Incoherent Stochastic Processes // Particle Accelerators, 1992, v.39, p.147–158.

*Е.В. Кремьянская, Е.Б. Левичев, О.И. Мешков,  
Н.Ю. Мучной, Ю.А. Пахотин*

**Применение коронографа для исследования  
поперечного распределения плотности электронного пучка  
в накопителе ВЭПП-3**

*E.V. Kremyanskaya, E.B. Levichev, O.I. Meshkov,  
N.Yu. Muchnoi, Yu.A. Pakhotin*

**Application of the optical coronagraph  
for studying of the “tails” of electron beam  
at the VEPP-3 storage ring**

ИЯФ 2004-33

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 19.05.2004

---

Сдано в набор 20.05.2004

Подписано в печать 21.05.2004

Формат 60x90 1/16 Объем 1.3 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.

Тираж 135 экз. Бесплатно. Заказ № 33

---

*Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротаприте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*