

P13-2004-129

Ю. Г. Тетерев, Фи Тхань Хьонг

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОНИЗАЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА  
ПРОФИЛЯ ПУЧКА ДЛЯ ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА  
КОМБАС**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Тетерев Ю.Г., Фи Тхань Хьонг  
Модернизация ионизационного детектора профиля пучка  
для фрагмент-сепаратора КОМБАС

P13-2004-129

Приведены результаты модернизации ионизационного детектора профиля пучка, в конструкции которого кроме традиционного конденсатора, извлекающего продукты ионизации остаточного газа, использованы анализирующие конденсаторы. Основной целью модернизации являлось создание прибора с постоянным пространственным разрешением. Для этого между всеми конденсаторами детектора введены дополнительные напряжения (разности потенциалов), изменяя которые можно сканировать поперечное сечение области пучка. При этом напряженности полей в конденсаторах сохраняются постоянными.

Создан детектор для оперативного наблюдения, с помощью которого можно ежесекундно измерять вертикальное и горизонтальное распределение тока пучка в канале его транспортировки на площадке  $8 \times 8$  см с постоянным разрешением 1 мм.

Создан детектор для детального измерения профиля пучка с постоянным разрешением  $1 \times 1$  мм по всей области сканирования.

Экспериментально установлено, что предложенный метод сканирования дает хорошие результаты при измерении профиля пучка в случае извлечения ионной компоненты ионизированного остаточного газа. Результаты существенно хуже при извлечении электронной компоненты.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Teterev Yu. G., Phi Thanh Huong  
Modernization of the Ionization Detector of Beam Profile  
for the Fragment-Separator KOMBAS

P13-2004-129

Results of the development of an ionization detector for beam profile measurements are presented. Analyzing capacitors were used in the design of the detector besides a traditional extraction capacitor. The aim of the development was to create a detector with a constant space resolution. For this purpose additional voltages were applied among all the capacitors. Variation of the voltages was used for space scanning whereas the electric field strength inside all the capacitors was held permanent.

A detector for operational monitoring of the beam profile was created. This detector allows measuring the vertical and horizontal distribution of the beam in a beam transport system every second over the area  $8 \times 8$  cm with a constant resolution of 1 mm.

A detector for monitoring the beam profile in detail with a constant space resolution of  $1 \times 1$  mm was constructed.

It was experimentally shown that the proposed method of scanning provides excellent results of beam profile measurements if the ion component of the ionized residual gas is extracted. The method does not work well for the electron component.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

## ВВЕДЕНИЕ

Приведены результаты модернизации детектора профиля пучка, описанного в работе [1], в конструкции которого кроме традиционного конденсатора, извлекающего продукты ионизации остаточного газа, был использован еще и анализирующий конденсатор, предложенный в работе [2]. Принцип действия обоих ионизационных детекторов [1, 2] основан на том, что продукты ионизации ускоряются в электрическом поле извлекающего конденсатора и приобретают энергию, величина которой зависит от  $y$ -координаты заряженной частицы в направлении поля. Их отличие заключается в том, что в конструкции детектора работы [1] анализирующий конденсатор развернут на  $90^\circ$  вокруг оси  $y$ , так чтобы плоскости электродов анализирующего конденсатора были параллельны оси пучка. В результате этого число ионов, извлекаемых из области пучка, может быть увеличено примерно на два порядка. За счет увеличения появилась возможность отказаться от таких «деликатных» приборов, как микроканальные пластины, люминофор и телекамера. С помощью анализирующих конденсаторов продукты ионизации собирались просто на коллектор, но только из малой части всего пространства, через которое проходил пучок. Ток с коллектора измерялся с использованием усилителя постоянного тока. Для получения полной картины изображения пучка производилось двумерное сканирование по пространству. Сканирование осуществлялось путем изменения электрических полей в конденсаторах.

Это отличие позволило создать прибор, который не чувствителен к большим уровням радиации, имеет существенно больший срок службы и не подвержен разрушению при таких аварийных ситуациях, как большое содержание в вакууме паров масла или срыв вакуума. К сожалению, как показывает анализ уравнений, описывающих работу детектора, примененный способ сканирования приводит к тому, что пространственное разрешение прибора для различных областей сканируемого пространства может отличаться в несколько раз.

Другим стимулом для модернизации было желание, чтобы ионизационный прибор, который не воздействует на пучок и может работать в большом диапазоне интенсивностей, мог быть использован и оператором ускорителя во время настройки на производящую мишень, когда пучок еще не попадает в центр мишени и его размеры могут быть соизмеримы с размерами ионпровода. Прежний прибор позволял детально измерять профиль пучка, но процедура измерения занимала слишком много времени, и область сканирования была недостаточна для работы оператора.

## ДЕТЕКТОР ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Для быстрого оперативного наблюдения за пучком разработана конструкция ионизационного детектора, в котором сканирование пространства осуществляется послойно. Детектор состоит из извлекающего и анализирующего конденсаторов (рис. 1). Модернизация состоит в том, что между конденсаторами приложено напряжение  $U_1$ . Заряженные частицы из извлекающего конденсатора через сетчатый электрод попадают в анализирующий конденсатор, и часть из них собирается на коллектор, пройдя узкую щель.

Условие сохранения энергии при движении заряженных частиц от места их образования до анализирующего конденсатора и далее до места сбора на коллектор может быть записано в виде

$$(E_1 y + U_1) \cos^2 \alpha = E_2 x / 4 \sin \alpha,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — напряженности полей в извлекающем и анализирующем конденсаторах;  $U_1$  — разность потенциалов между этими конденсаторами;  $(\pi - \alpha)$  — угол между векторами напряженности  $E_1$  и  $E_2$ ;  $x$  и  $y$  — координаты места образования электрон-ионной пары.

На рис. 2 это линейное уравнение представлено в графическом виде. С помощью рисунка наглядно демонстрируется, что на коллектор собираются продукты ионизации только из области слоя, ширина которого определяется шириной щели. При этом постоянства пространственного разрешения детектора при сканировании всей области пучка можно достичь при постоянстве напряженности полей в конденсаторах. Сканирование анализируемой области можно производить путем изменения напряжения  $U_1$ , и это сканирование является линейным.

Второй вывод, который может быть сделан, исходя из вида уравнения, заключается в том, что, используя только один извлекающий конденсатор, можно измерять распределение пучка по двум взаимно перпендикулярным направлениям. С точки зрения математики это означает, что в уравнении необходимо определиться со знаком одного из коэффициентов перед переменными  $x$  или  $y$ , и в простейшем случае обеспечить условие  $E_2 = E_1 2 \sin^2 \alpha \cos \alpha$ . Это условие необходимо выполнить, чтобы тангенс наклона прямой был равен единице. С конструктивной точки зрения это означает, что около извлекающего конденсатора можно разместить еще один ана-

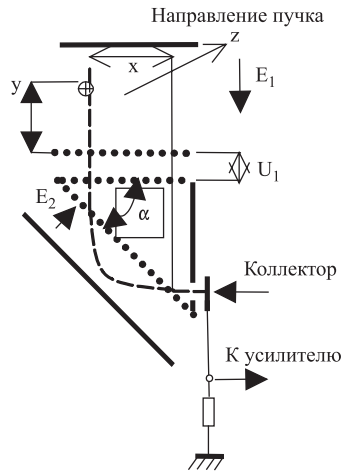


Рис. 1.

лизирующий. Чтобы изменить знак коэффициента перед переменной  $y$ , еще один анализирующий конденсатор необходимо разместить вблизи верхней пластины извлекающего, симметрично первому. В этом случае для измерения распределения в перпендикулярном направлении будут использованы продукты ионизации противоположного знака, следовательно, отклоняющее напряжение, приложенное к дополнительному анализирующему конденсатору, также должно иметь другой знак.

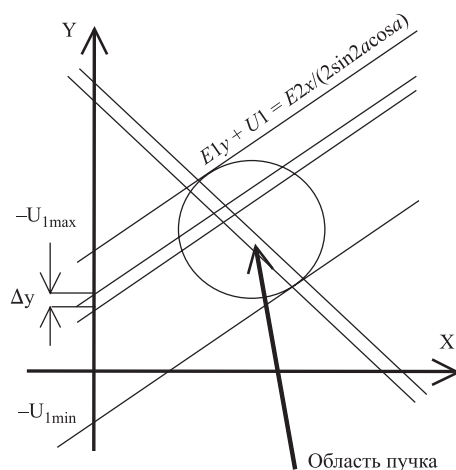


Рис. 2.

Для изменения знака коэффициента перед переменной  $x$  дополнительный анализирующий конденсатор необходимо разместить около той же нижней пластины далее по ходу пучка, но этот конденсатор необходимо развернуть на  $180^\circ$  так, чтобы щель, через которую собираемые ионы проходят на коллектор, оказалась с противоположной стороны. В этом случае для измерения распределения в перпендикулярном направлении будут использованы продукты ионизации того же знака.

Сканирование пучка только по слоям существенно более быстрая операция по сравнению со сканированием по узким пространственным областям, как это делалось в работе [1]. Это дает возможность наблюдать пучок на большой площади за короткое время. Такой метод наблюдения хотя и не дает детального изображения профиля, но вполне достаточен, чтобы при его использовании пучок мог быть направлен в центр мишени и сфокусирован до минимальных размеров.

В дальнейшем, когда пучок уже сформирован, можно изучать его детальное распределение. Детектор для изучения детального распределения конструктивно близок к описанному в работе [1], но и он модернизирован введением сканирующего напряжения между конденсаторами.

## ДЕТЕКТОР ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПУЧКА

На рис. 3 приведена схема ионизационного детектора пучка, позволяющая получить детальное изображение. Конструкция детектора состоит из извлекающего конденсатора и двух последовательно расположенных анализирующих. Заряженные частицы из извлекающего конденсатора через сетчатый

электрод попадают в первый анализирующий конденсатор и далее через щель и ускоряющий промежуток — во второй. Попадая во второй конденсатор, заряженные частицы пролетают в нем по параболической траектории, и часть из них собирается на коллектор, пройдя через вторую щель. Условия сохранения энергии при движении заряженных частиц от места их образования до щели первого анализирующего конденсатора и далее до места сбора на коллектор могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} (U_1 - E_1 y - U_2) \cos^2 \alpha &= E_2 x / 4 \sin \alpha; \\ (U_1 - E_1 y) \cos^2 \alpha &= E_3 b / 4 \sin \alpha, \end{aligned}$$

где  $E_1$  и  $E_2$ ,  $E_3$  — напряженности полей в извлекающем и анализирующих конденсаторах;  $U_1$  и  $U_2$  — разности потенциалов, приложенные между конденсаторами;  $b$  — расстояние между щелями.

Эта система уравнений легко разрешается относительно переменных  $x$  и  $y$ . Сканирование пространства по вертикали можно осуществлять, изменяя напряжение  $U_1$ , а по горизонтали —  $U_2$ . При этом пространственное разрешение детектора будет оставаться постоянным во всей области сканирования. Детальный профиль пучка может быть получен, если откладывая измеренные значения тока коллектора на координатной плоскости ( $U_1, U_2$ ).

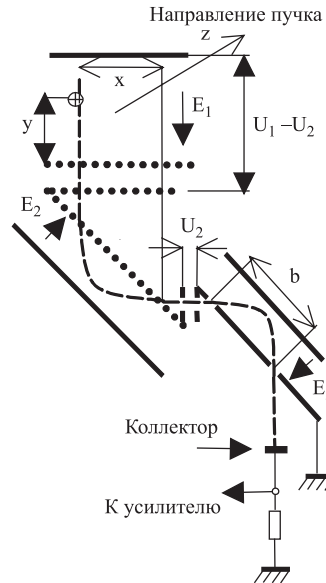


Рис. 3.

### ДЕТЕКТОР С ПЕРЕМЕННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Ионизационный детектор профиля пучка полезно использовать для настройки и в области промежуточного фокуса фрагмент-сепаратора КОМБАС. В этой области происходит фокусировка проходящих через сепаратор заряженных частиц по их импульсу. Первичный пучок, по которому происходит настройка, в оптимальном режиме работы сепаратора по условиям оптики сжимается в поперечном направлении примерно в три раза. В этом случае уже не достаточно, чтобы разрешение детектора профиля пучка определялось только размерами щели. Желательно, чтобы по мере улучшения степени настройки сепаратора разрешение детектора можно было плавно менять. Использование анализирующих конденсаторов позволяет это делать.

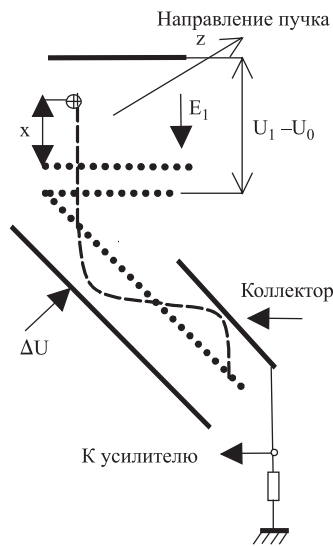


Рис. 4.

Схема прибора в этом случае выглядит, как это представлено на рис. 4. Здесь используется два анализирующих конденсатора, разделенных сеткой. На сетку подается некоторое отрицательное напряжение  $U_0$ . В качестве коллектора используется одна из пластин второго анализирующего конденсатора, находящаяся под потенциалом земли. В то же время симметричная ей пластина первого анализирующего конденсатора находится под некоторым потенциалом  $\Delta U$  относительно земли. Эта система конденсаторов работает на дифференциальном принципе. На коллектор соберутся только продукты ионизации в диапазоне энергий, пропорциональном  $\Delta U$ . Изменяя величину  $\Delta U$  можно менять пространственное разрешение детектора. Сканирование же области пучка, как и в описанных выше приборах, происходит путем изменения напряжения  $U_1$ . В данном случае сканирование производится только по одной интересующей нас координате  $x$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛОМЕТРА

Для измерения профиля первичного пучка, падающего на мишень, было изготовлено два детектора. Один из них предназначался для оперативного наблюдения за пучком, а другой для детального. В качестве основного конструкционного материала для их изготовления был использован стеклотекстолит, покрытый фольгой. Сетки были намотаны проволокой из бериллиевой бронзы толщиной 0,1 мм.

Апертура для прохождения пучка в обоих детекторах имела размер  $9 \times 9$  см. Сверху и снизу она была ограничена плоскостями извлекающего конденсатора, а по бокам были натянуты проволоки, формирующие однородное электрическое поле. Напряженность поля  $E_1$  была выбрана равной 200 В/см. Протяженность области, откуда извлекались продукты ионизации, по ходу пучка составляла 84 мм.

Детектор для оперативного наблюдения был изготовлен и исследован в двух вариантах. В первом анализирующие конденсаторы располагались с противоположных сторон извлекающего. Для измерения распределения пучка по двум взаимно перпендикулярным направлениям на один коллектор собира-

лись ионы, а на другой — электроны. Во втором варианте анализирующие конденсаторы располагались с одной стороны, но были развернуты друг относительно друга на  $180^\circ$ , а на коллекторы собирались только ионы. Ширины щелей во всех случаях были выбраны равными 1 мм. Детектор был установлен сразу после мишени. Размах амплитуды  $U_1$  был выбран таким, чтобы сканировать область, имеющую в плоскости, поперечной пучку, размер примерно  $8 \times 8$  см. Сканирующее напряжение имело пилообразную форму, с периодом около 2 с. Сканирование исследуемого пространства проходило за время, равное 1 с, на переднем и заднем фронтах по очереди.

Вследствие того, что сканирование происходит по слоям, направленным под  $45^\circ$  к плоскости пластин извлекающего конденсатора, весь детектор был повернут на  $45^\circ$  вокруг оси пучка, чтобы сканирование происходило по горизонтали и вертикали.

Детектор для детального измерения профиля пучка был установлен до мишени. С помощью этого детектора сканировалась только область, имеющая в плоскости, поперечной пучку, размер  $2 \times 2$  см. Время сканирования составляло 30 с. На коллектор собирались только ионы.

Источники пилообразного сканирующего напряжения  $U_1$  и  $U_2$  были изготовлены на базе микросхем. С помощью одной из микросхем типа ICL8038 генерировалась несущая частота 33 кГц для питания высоковольтного умножителя, а с помощью другой, аналогичной, модулирующая частота, определяющая период сканирования. Для модуляции был использован выход с пилообразным напряжением. В качестве модулятора использована микросхема AD633.

Для измерения токов с коллекторов были использованы серийные электрометрические усилители постоянного тока У5-11. Сигналы с контрольных выходов источников сканирующего напряжения, а также с выхода усилителей У5-11 подавались на входы АЦП. Информация записывалась в ЭВМ.

Работоспособность детекторов была проверена во время сеанса работы фрагмент-сепаратора КОМБАС на пучке ионов  $^{11}\text{B}$ , ускоренных на циклотроне У-400М ЛЯР ОИЯИ до энергии 35 МэВ/нуклон. Во время проведения эксперимента ток пучка на мишени менялся от 50 до 500 нА.

В результате проведения эксперимента была подтверждена работоспособность обоих детекторов профиля пучка и выявлены некоторые недостатки. Например, было установлено, что один из вариантов детектора для оперативного наблюдения, в котором анализирующие конденсаторы располагались с противоположных сторон извлекающего, не пригоден для использования. К сожалению, оказалось, что примененный нами вид сканирования дает плохие результаты, когда в качестве продуктов ионизации собирались электроны. На рис. 5 приведен фрагмент записанных в процессе эксперимента результатов измерения: тока ионов  $I_1$  с коллектора одного из анализирующих конденсаторов, тока электронов  $I_2$  с коллектора другого и сканирующего напряжения



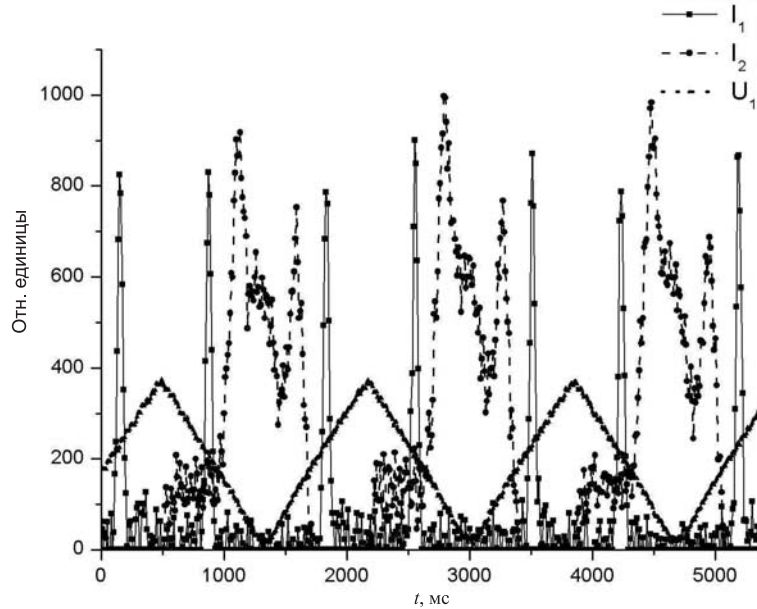


Рис. 5.

$U_1$ . Коэффициент преобразования тока с помощью усилителя У5-11 был установлен равным  $10^{11}$  В/А.

Видно, что хотя в процессе сбора электронов и был зарегистрирован пик распределения, приходящийся на область прохождения пучка, его ширина была большей по сравнению с шириной распределения, полученного при сборе ионов. Кроме того, в форме этого распределения наблюдались искажения, не связанные с распределением пучка. Было замечено, что искажения увеличивались с увеличением интенсивности пучка. Вероятно, электронная составляющая продуктов ионизации остаточного газа чувствительна к воздействию электромагнитного поля самого пучка.

Всего этого не наблюдалось во втором варианте, когда анализирующие конденсаторы располагались с одной стороны, но были развернуты друг относительно друга на  $180^\circ$ , а на коллекторы собирались только ионы. Результаты измерения видны на рис. 6. Здесь приведены значения токов на каждом из коллекторов в зависимости от величины сканирующего напряжения  $U_1$ . Каждая из приведенных зависимостей содержит результаты четырех последовательных измерений. Видно, что в каждом измерении пиковое значение остается в той же точке.

В результате того, что источник сканирующего напряжения имел достаточно хорошую линейность во времени, мы имели возможность подавать сигналы с выходов усилителей У5-11 на осциллограф. На двухканальном осцил-

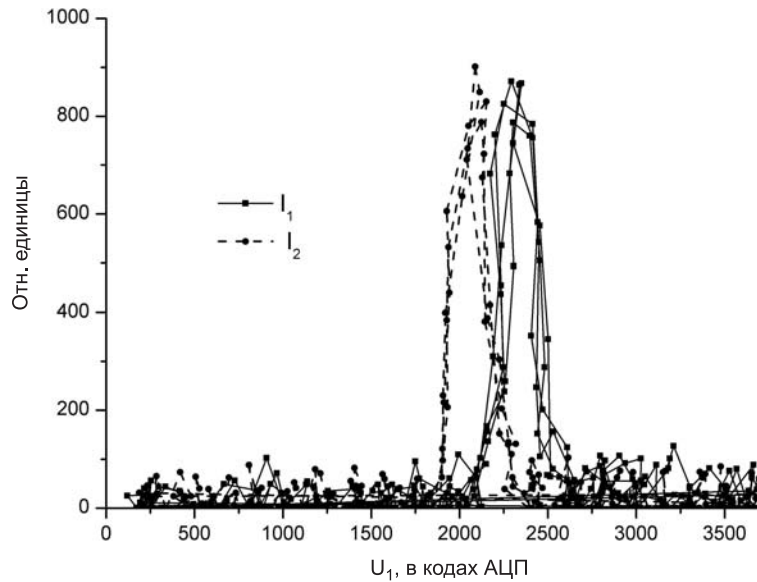


Рис. 6.

лографе мы каждую секунду наблюдали за распределением пучка по вертикали и горизонтали. Такой вариант наблюдения тоже является вполне приемлемым для работы операторов ускорителя.

С помощью детектора для детального измерения профиля пучка было получено изображение, аналогичное тому, которое приведено в работе [1]. Хотя процесс измерения детального распределения длится около 30 с, это время не столь большое для того, чтобы только следить за трансформацией пучка при последовательном прохождении им всех управляемых элементов сепаратора. Детектор с переменным пространственным разрешением в этом эксперименте испытан не был. Это планируется сделать позднее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были созданы и экспериментально испытаны модернизированные варианты ионизационных детекторов для измерения профиля пучка, основанные на сканировании пространственного распределения продуктов ионизации. Основной целью модернизации являлось создание прибора с постоянным пространственным разрешением. Для этого между всеми конденсаторами детектора введены дополнительные напряжения (разности потенциалов), изменяя которые можно сканировать поперечное сечение области пучка. При этом напряженности полей в конденсаторах сохраняются постоянными.

Создан детектор для оперативного наблюдения, с помощью которого можно ежесекундно измерять вертикальное и горизонтальное распределение тока пучка в канале его транспортировки на площадке  $8 \times 8$  см с постоянным разрешением 1 мм.

Создан детектор для детального измерения профиля пучка с постоянным разрешением  $1 \times 1$  мм по всей области сканирования.

Экспериментально установлено, что предложенный метод сканирования дает хорошие результаты при измерении профиля пучка в случае извлечения ионной компоненты ионизированного остаточного газа. Результаты существенно хуже при извлечении электронной.

Авторы благодарят Ю. М. Середу, давшего ценные советы в организации сбора информации, Нгуен Мань Шата, давшего ценные советы в разработке и изготовлении высоковольтных блоков, а также А. Г. Артюха за поддержку и интерес к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Тетерев Ю. Г., Косыцельняк Ф.* // ПТЭ. 2003. № 2. С. 12.
2. *Михайлов В. Г. и др.* // ПТЭ. 1995. № 6. С. 39.

Получено 11 августа 2004 года.

Корректор *Т. Е. Попеко*

Подписано в печать 10.03.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,68. Уч.-изд. л. 2,12. Тираж 310 экз. Заказ № 54311.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)