

Распознавание и определение параметров траекторий, регистрируемых установкой с распределённой мишенью

З.М. Иванченко, И.М. Иванченко, Н.Н. Карпенко
Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ

Аннотация

Представлены методы и средства реконструкции траекторий заряженных частиц, зарегистрированных установкой, включающей систему координатных детекторов в распределённой мишени. В рамках регрессионного анализа разработаны алгоритмы определения импульсов частиц. Получены количественные точностные характеристики разработанных алгоритмов.

Methods and means for reconstruction of the charged particles trajectories registered by experimental complex, including system of coordinate detectors in the distributed target are presented. Within the frames of the regression analysis algorithms estimation of momenta particles are developed. Quantitative characteristics of the developed algorithms are analysed.

1 Введение

В статье представлены алгоритмы и средства анализа траекторной информации, зарегистрированной установкой, включающей систему дрейфовых камер в распределённой мишени. Установка представляет собой регулярный набор из 36 модулей, каждый из которых имеет неоднородную структуру. Эта установка, мишень-калориметр, была создана в составе экспериментального комплекса “Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ” /рис.1/, для использования в нейтринных пучках, генерируемых на протонном ускорителе У-70 ИФВЭ (г. Протвино) [1].

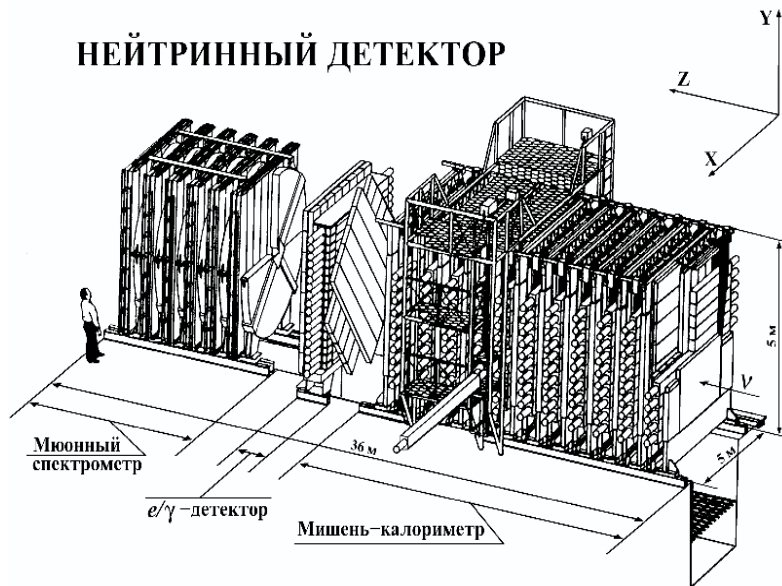


Рис. 1: Общий вид экспериментального комплекса “Нейтринный детектор”

Для проведения методических разработок и реализации нового направления физических исследований весь экспериментальный комплекс, включая нейтринный канал ускорителя У-70, был существенно модифицирован. В процессе модернизации учитывалось требование повышения точностных характеристик и эффективности процессов детектирования и регистрации информации. Стремление реализовать потенциальные возможности нового канала, нового варианта установки, радикально изменившейся операционной среды программирования и компьютерного обеспечения, с одной стороны, и опыт применения разработанной ранее методики моделирования и обработки данных, с другой, предопределили создание нового варианта математического и программного обеспечения [2].

Реконструкция зарегистрированных событий имеет существенную специфику в связи с бестриггерным режимом работы экспериментального комплекса. Элементарная единица исходной информации на уровне процессов анализа - совокупность данных, зарегистрированных в течение одного сброса на мишень пучка ускоренных протонов, может содержать несколько перекрывающихся событий. Поэтому в задачи математической обработки траекторной информации входит распознавание и классификация сигнальных событий не только в пространстве, но и во времени. Для декомпозиции данных, регистрируемых дрейфовыми камерами в течение одного сброса пучка, используется информация, зарегистрированная сцинтилляционными счётчиками - детекторами с высоким временным разрешением. На этапе разработки и тестирования алгоритмов распознавания и анализа траекторной информации использовалось программное обеспечение визуализации событий, созданное на базе системы ROOT.

Распознавание траекторий.

На Рис. 2. показан результат распознавания типичного события, зарегистрированного экспериментальным комплексом.

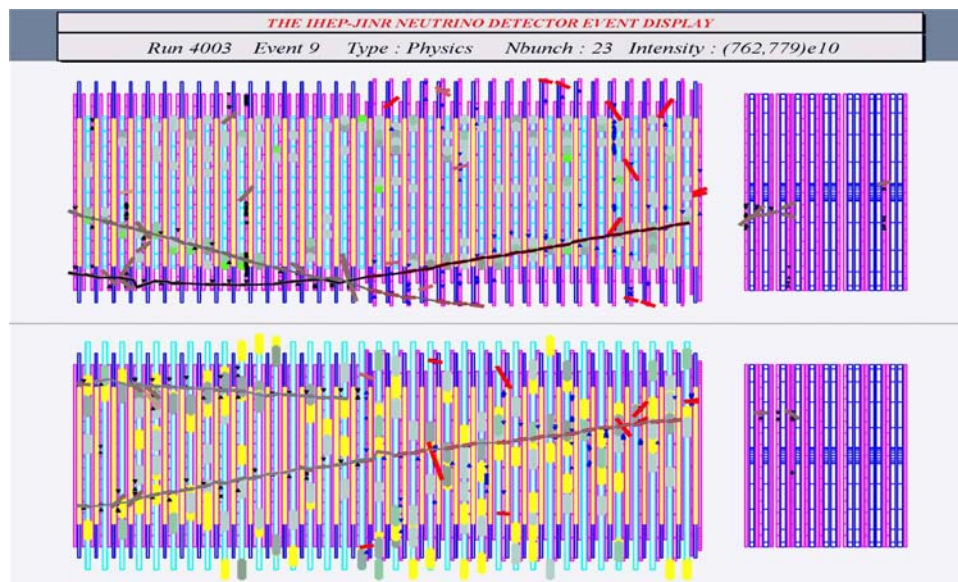


Рис. 2: Проекция события

С учётом предыдущего опыта [3,4] реализован метод слежения по траектории отдельно для каждой проекции XZ и YZ. Слежение ведётся в направлении обрат-

ном направлению движения частиц: при удалении от вершины плотность траекторий многолучевых событий снижается, т.о. уменьшается вероятность статистической ошибки второго рода. В качестве базового элемента траектории используется стринг, описываемый линейной и угловой координатами, вычисленными по методу наименьших квадратов. При слежении прогноз-экстраполяция проводится по параболе по трём стрингам, реализуется локальная аппроксимация найденных точек. Параметризация опорной функции выбрана на основе обработки моделированных и экспериментальных данных. Если в текущей камере стринг на траектории отсутствует или прогнозируемая точка попадает в магнитную оболочку установки, то границы области поиска расширяются. Процесс распознавания фрагмента прекращается, если более чем в трёх камерах подряд не найдены стринги или прогноз выходит за пределы рабочей области детектора.

Найденный фрагмент должен удовлетворять ряду критериев. Они учитывают длину фрагмента, относительное количество пропусков. Если фрагмент удовлетворяет всем критериям, то найденные стринги в дальнейшем в распознавании не участвуют.

После нахождения всех фрагментов они объединяются в проекции траекторий по следующим правилам:

1. Координаты и угловые наклоны фрагментов в точках объединения должны быть достаточно близкими: требование непрерывности аппроксимирующих функций и их производных.
2. Количество отсутствующих стрингов между концом одного фрагмента и началом другого не превышает заданной величины.

Если фрагмент не объединяется с другими, то он рассматривается в качестве проекции траектории. На заключительном шаге этого этапа применяется критерий количества найденных и потерянных стрингов. Такая многоступенчатая многопараметрическая процедура, требующая тщательной оценки пороговых констант, вызвана прохождением частиц в тормозящей среде и в магнитной оболочке, предназначенной для обеспечения эффективной регистрации частиц и определения их импульса.

Для распознавания пространственных траекторий используются два метода, основанные на анализе информации из двух взаимодополняющих типов детекторов. Один тип обеспечивает высокое пространственное разрешение и эффективность регистрации, а второй – высокое временное разрешение.

Для нахождения соответствующих пар проекций, образующих пространственные траектории, используется информация со сцинтилляционных счётчиков (критерий согласованности во времени) и данные с дрейфовых камер - прецизионных координатных детекторов (критерий согласованности в пространстве - относительного перекрытия и множественности). Две проекции (X-проекция и Y-проекция) образуют пространственный трек, если они одновременно зарегистрированы достаточным числом сцинтилляционных счётчиков. Для самых коротких траекторий (три стринга) требуется срабатывание хотя бы одного счётчика. Для более длинных - число сработавших сцинтилляционных счётчиков должно быть не менее половины числа стрингов, образующих данную траекторию. Эффективность распознавания траекторий оценивалась по результатам обработки моделированной информации и в рассматриваемых условиях составила 95-97%.

Оценка параметров траекторий.

Исходной информацией для определения кинематических параметров частиц служат зарегистрированные дрейфовыми камерами координаты точек траекторий и физические характеристики рабочей среды.

Основные особенности данной задачи состоят в наличии неоднородного магнитного поля, в существенных рассеивающих свойствах рабочей среды и сравнительно невысокой энергии частиц.

Введём правую декартову систему координат XYZ такую, что ось OZ направлена по пучку и проходит через центр установки, ось OX направлена горизонтально, а ось OY – вверх /Рис.1/.

Рассмотрим вектор параметров $\vec{P}(x_0, y_0, a_x, a_y, p)$ в точке $z = z_0$, где

x_0 – x -координата траектории;

y_0 – y -координата траектории;

a_x – угловой коэффициент в плоскости XOZ;

a_y – угловой коэффициент в плоскости YOZ;

p – значение импульса в точке (x_0, y_0, z_0) .

Для решения задачи используется метод, модификации которого отличаются алгоритмами учёта различных возмущающих факторов и аппроксимантами траекторий и широко применяются при обработке траекторной информации [5-8].

Система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающая движение частицы в магнитном поле, решалась методом последовательных приближений. Для построения итерационного процесса используется система уравнений:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + a_x z + \frac{1}{p} A_1(z), \\ y &= y_0 + a_y z + \frac{1}{p} A_2(z); \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} A_1(z) &= \int_{u=z_0}^{u=z} \int_{v=z_0}^{v=u} F(v) dv du, \\ A_2(z) &= \int_{u=z_0}^{u=z} \int_{v=z_0}^{v=u} G(v) dv du, \\ F(z) &= \frac{f(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z)/p}, \\ G(z) &= \frac{g(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z)/p}, \end{aligned} \quad (2)$$

$E(p, z)$ – функция энергетических потерь, B_x, B_y, B_z – компоненты магнитного поля,

$$f(x', y', B_x, B_y, B_z) = \frac{e}{c} (1 + x'^2 + y'^2)^{1/2} [y' B_z - (1 + x'^2) B_y + x' y' B_x],$$

$$g(x', y', B_x, B_y, B_z) = \frac{e}{c} (1 + x'^2 + y'^2)^{1/2} [(1 + y'^2) B_x - x' B_z - x' y' B_y]$$

(e – заряд частицы, c – скорость света).

Для вычисления \vec{P} на каждом шаге итерационного процесса применяется метод наименьших квадратов. Начальные оценки x', y', B_x, B_y, B_z, p для вычисления повторных интегралов $A_1(z)$ и $A_2(z)$ получаем, применяя аппроксимацию траектории на плоскости XOZ, YOZ полиномами не выше третьего порядка. Текущее значение \vec{P} вычисляется в результате решения системы нормальных уравнений

$$\left[E^T \cdot D^{-1}(\vec{V}) \cdot E \right] \cdot \vec{P} = E^T \cdot D^{-1}(\vec{V}) \cdot \vec{V}^T,$$

где

E – структурная матрица, соответствующая системе (1);

$D(\vec{V})$ – весовая матрица измерений \vec{V} ;

$$\vec{V} = \vec{X} \cup \vec{Y}.$$

Найденное значение \vec{P} используется для уточнения $A_1(z)$ и $A_2(z)$, после чего выполняется следующая итерация и т.д. до достижения необходимой точности

Исследуемые частицы могут полностью потерять энергию в рабочей области установки. Для учёта таких случаев выражение $1 - E(p, z)/p$ в формулах (2) заменяется на $1 + E(p, z)/p$ с ограничением на p снизу и выполняется численное интегрирование для вычисления $A_1(z), A_2(z)$ от последнего модуля к первому. Для упрощения вычислительной процедуры в качестве варьируемого параметра выбирается величина обратная импульсу. Это обеспечивает линейную зависимость функционального аргумента от искомых параметров.

Точностные характеристики полученной оценки представлены на Рис. 3.

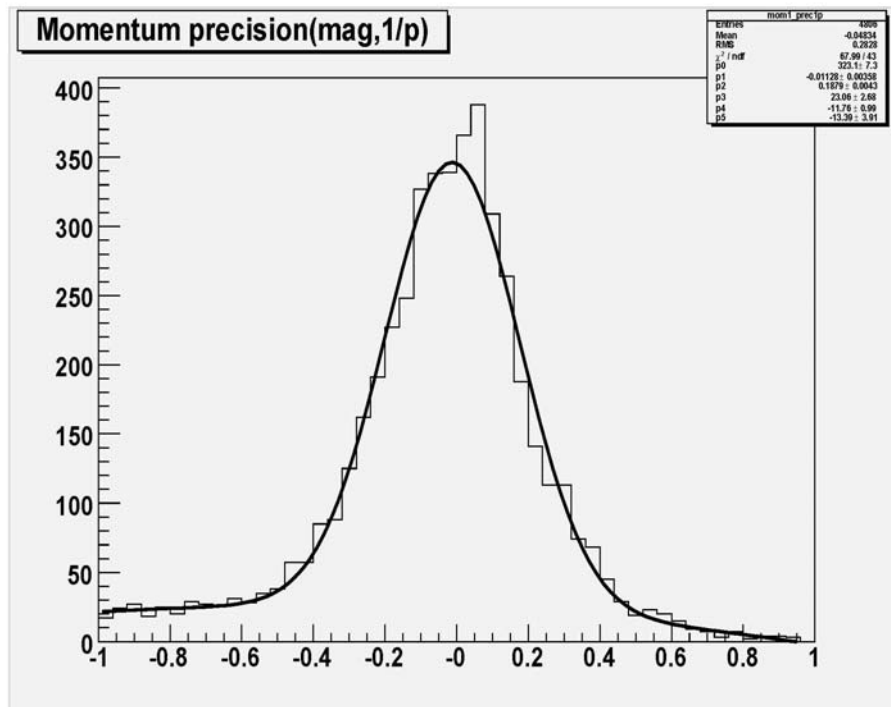


Рис. 3: Распределение относительной погрешности оценки величины, обратной импульсу, полученной с использованием решения уравнений движения частиц в магнитном поле

Для частиц, не выходящих за пределы рабочей области, импульс определялся по пробегу в веществе. При этом применялся традиционный алгоритм. Для определения потерь энергии на каждом однородном участке использовались табулированные функции, применяемые в программе моделирования GEANT. Двигаясь вдоль траектории, вычисляем длины пробегов в каждом веществе. Искомое значение импульса находим, используя соответствующие найденным длинам значения потерь энергии. Характеристики алгоритмов оценки импульса определялись на выборке моделированных мюонных траекторий с импульсом в интервале 0,5-3 ГэВ/с. Исследования точностных характеристик вышеуказанного алгоритма определения импульса по пробегу показали значимое систематическое отклонение найденных значений от ожидаемых:

$\langle dP/P \rangle = \langle (P_{rec} - P_{mc})/P_{mc} \rangle = 14\%$ (P_{mc} – исходный импульс, P_{rec} – восстановленный импульс). Кроме этого, распределение относительной погрешности существенно отличалось от нормального. Это стимулировало поиск других подходов для определения импульса. Мы остановились на разработке алгоритмов в рамках регрессионного анализа [9]. При таком подходе решение прямой задачи моделирования, которое обычно используется как средство тестирования, применяется непосредственно для высокоавтоматизированного конструирования алгоритмов определения параметров траекторий. Такой подход успешно применялся, например, в [10-12] при решении аналогичных задач. В рассматриваемой области обработки экспериментальных данных эти методы получили названия: метод обучающей статистической выборки, метод табулированных траекторий и т.п. Для численного и графического представления функции регрессии используются соответствующие статистические объекты HBOOK/ROOT. На одном из этапов разработки была выбрана регрессия, позволяющая получить оценку импульса в виде $P_2 = P_1 * Q_n(P_1)$, где P_1 – восстановленная традиционным методом оценка импульса, Q_n – алгебраический полином степени n . Графическая интерпретация выбранной функции одномерной многопараметрической ($n=8$) регрессии представлена на Рис. 4.

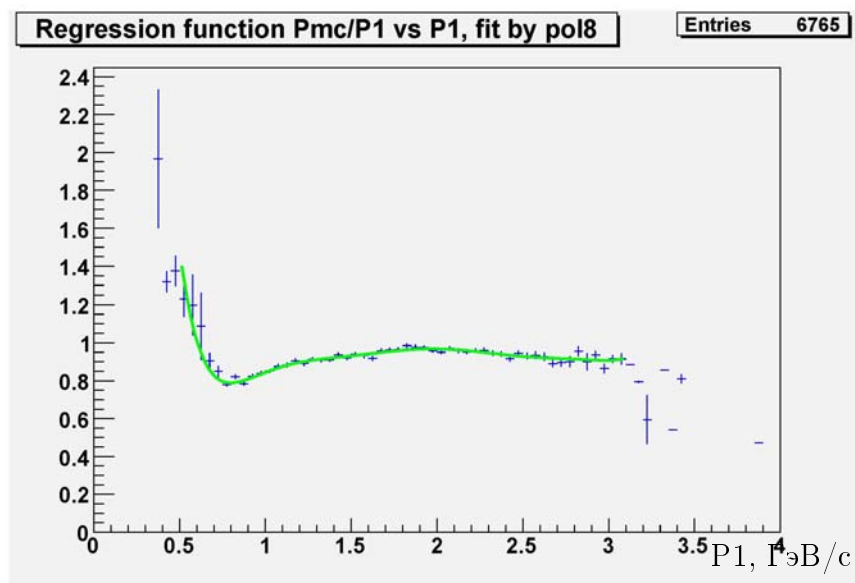


Рис. 4: Регрессия P_{mc}/P_1 vs P_1 на обучающей статистической выборке

Значения предиктора отложены по оси абсцисс, отклика – по оси ординат. Значение отклика – математическое ожидание функции на множестве значений, соответствующих дискретности предиктора. В качестве ошибки функции выбирается стандартное отклонение математического ожидания. Значение предиктора в процессе аппроксимации – центр канала.

Полученная формула определяет оценку импульса, свободную от указанных ранее недостатков. Найденная функция регрессии представляет одномерную функцию, что обеспечивает, в частности, её графическое представление стандартными средствами, созданными для статистического анализа данных в области физики частиц.

Целью дальнейших разработок было редуцирование размерности пространства параметров. Была построена регрессия P_{mc}/P_1 vs N_{mod} . В результате была найдена оценка импульса в виде $P_2 = P_1 * Q_n(N_{mod})$, где $n=1$, N_{mod} - длина проекции траектории. Значения коэффициентов определены по методу наименьших квадратов и величина оценки импульса определяется выражением:

$$P_2 = P_1 * (0.732 + 0.01 * N_{mod}).$$

Точностные характеристики полученной оценки представлены на Рис. 5. Интегральные параметры распределения относительной погрешности импульса совпадают с соответствующими параметрами нормального распределения. Оценка математического ожидания – состоятельная, стандартное отклонение - менее 15%.

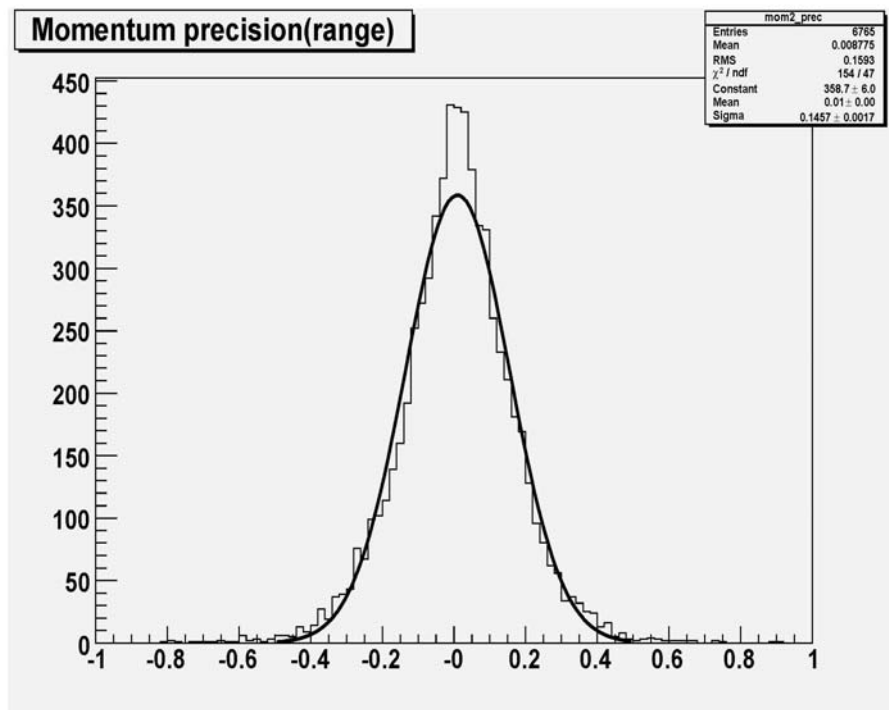


Рис. 5: Распределение относительной погрешности оценки импульса на тестовой статистической выборке. Аппроксимирующая кривая – график нормального распределения

Исследования альтернативной функции регрессии, не зависящей от P_1 - начального приближения оценки импульса, позволяют сделать вывод, что погрешность оценки импульса определяется погрешностью методов измерения и распознавания.

2 Заключение

Разработано математическое обеспечение, создан комплекс программ для анализа траекторной информации, зарегистрированной установкой, включающей систему координатных детекторов в распределённой мишени.

Программный комплекс реализован на платформе, структурными звеньями которой являются OS Scientific Linux, среда программирования на C++, система ROOT. Созданы программы моделирования на основе универсального пакета GEANT, дополненного программной оболочкой AGI (Advanced GEANT Interface), обеспечивающей диалоговый режим и расширенные графические возможности. Роль средств сопровождения многовариантных программ в условиях коллективных разработок выполняет CVS (Concurrent Versions System).

В рамках регрессионного анализа для реальной конфигурации установки разработаны алгоритмы, найдена параметризация и определены значения параметров функции для определения импульса. Получены количественные точностные характеристики разработанных алгоритмов.

Для создания программного обеспечения, обработки и хранения данных используются компьютерные средства Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ.

Разработки выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект *06-07-89035*.

Список литературы

- [1] Барабаш Л.С. и др., Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ на нейтринных пучках ускорителя У-70 (Протвино) // ПТЭ, 2003, Т.46. В.3. с.20.
- [2] Бунятов С.А. и др., Реконструкция траекторий заряженных частиц в Нейтринном Детекторе ИФВЭ-ОИЯИ // ОИЯИ, Дубна, 2007, P10-2007-43.
- [3] Жигунов В.П. и др., Распознавание траекторий в мишенной части нейтринного детектора // ОИЯИ, Дубна, Материалы V рабочего совещания по “Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ”, 1984, Д1,2,13-84-332, с.157.
- [4] Иванченко И.М. и др., Распознавание траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора // ОИЯИ, Дубна, Материалы VIII рабочего совещания по “Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ”, 1988, Д1,2,13-88-90, с.192.
- [5] Иванченко И.М. и др., Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора обобщённым методом наименьших квадратов // ОИЯИ, Дубна, Материалы VIII рабочего совещания по “Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ”, 1988, Д1,2,13-88-90, с.197.
- [6] Иванченко И.М. и др., Алгоритмы определения эффективной массы B_d^0 в исследованиях CP-несохранения // ОИЯИ, Дубна, 1991, P11-91-357.
- [7] Бонюшкина А.Ю. и др., Алгоритм определения эффективной массы K_S^0 и Λ^0 , регистрируемых спектрометром ЭКСЧАРМ // ОИЯИ, Дубна, 1993, P1-93-168.
- [8] Нефёдов Ю.А., Программа восстановления импульса мюона в нейтринном детекторе ИФВЭ-ОИЯИ // ОИЯИ, Дубна, Материалы XVII рабочего совещания по “Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ”, 1995, Д1-95-305, с.94.
- [9] Феллер В., Введение в теорию вероятностей и её приложения // М.,МИР, 1984.
- [10] И.М., Мойсенз П.В., Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора методом обучающей статистической выборки // ОИЯИ, Дубна, Материалы VIII рабочего совещания по “Нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ”, 1988, Д1,2,13-88-90, с.187.
- [11] Aleev A.N. et al., Searches for the Pentaquark States. $\Xi(1860)^0$ and $\Xi(1860)^{--}$ in Neutron–Carbon Interactions via the EXCHARM Experiment // Physics of Atomic Nuclei, 2007, Vol. 70, No.9, pp. 1527-1533.
- [12] Aleev A.N. et al., Correlation Femtoscopy of Neutral Kaons in the EXCHARM Experiment // Physics of Atomic Nuclei, 2007, Vol. 70, No.7, pp. 1208-1215.