

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2320/82

17/1-82

1-81-827

Е.М.Андреев, Ю.Бер, Г.Бом¹, И.Гальм¹,
В.М.Суворов², В.Фрибль¹, А.Э.Швинд

РЕПЕРНАЯ СИСТЕМА
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ
СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЫ.

Измерение координат реперной системы
установки РИСК

¹ ИФВЭ АН ГДР, Берлин-Цойтен.

² ЛИЯФ АН СССР, Ленинград.

1. ВВЕДЕНИЕ

Реперная система установки РИСК ^{1/1}, подробное описание которой дано в ^{2/2}, служит для реконструкции треков заряженных частиц, прошедших через стримерную камеру, в объеме камеры. Треки образуются из цепочки отдельных стримеров диаметром около 1 мм и длиной 10 мм. Как показывает опыт, центр стримера и геодезические метки удается определить с точностью около одной десятой доли основного размера, а достигаемая точность многократных измерений на пленке - 5 мкм.

Отсюда вытекает требование к точности измерения реперной системы: x, y - координаты /в горизонтальной плоскости/ всех реперных меток должны быть известны с точностью, лучшей, чем 0,1 мм, а z - координаты /по высоте/ - 0,5 мм. При этом вклад погрешности определения реперных меток должен составлять незначительную долю ошибки определения координат треков.

Для осуществления этих требований все основные длины нужно измерить с точностью $0,01 \pm 0,1$ мм, а основные углы - с точностью $1'' \div 10''$.

2. ИНСТРУМЕНТЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

2.1. Инварная лента

Для измерения расстояний от 1,5 м до 12 м использовалась инварная лента. Инвар имеет низкий коэффициент теплового линейного расширения, равный $1,5 \cdot 10^{-6}$. Сила натяжения инварной ленты составляла 10 кг. Единица измерения ленты - 1 мм, но многократные измерения и оценка десятых долей миллиметра при отсчете позволяют получить точность измерения в несколько десятых миллиметра.

2.2. Теодолит

Главным инструментом для измерения углов служил теодолит типа ТБ-1. С его помощью определялись все горизонтальные углы реперной системы и углы привязки верхней и нижней реперных рам. Данные теодолита: увеличение телескопа 25,6; наименьшее расстояние визирования 1,2 м; минимальная единица отсчета составляет одну секунду по углу, что обеспечивает достаточную точность в определении координат.

2.3. Нивелир

Для определения всех координат в вертикальном направлении /ось z / использовали нивелир типа Ni-007. У него нет собственной шкалы отсчета, поэтому точность определения искомого уровня в значительной степени зависит от расстояния между нивелиром и измеряемым объектом. Используя стальную линейку при многократном отсчете соответствующих значений в данных условиях, удалось определить координаты z с точностью до десятой доли миллиметра.

2.4. Линейки и автоколлиматор

Эти приборы служат для определения декартовых координат в (x,y) - плоскости нижней реперной рамы путем измерения линейкой расстояния между двумя центрами крестов и измерения при помощи линейки с призмой и автоколлиматора углов отклонения центров крестов от прямой. Линейка содержит прямоугольный брусок из стали с посадочными отверстиями, индикатор и прямоугольную призму /рис.1/. Две вспомогательные вставки из латуни со стальным шариком /d=10,00 мм/ фиксируют положение линейки относительно крестов. Вставки помещают цилиндрической частью в соответствующее центральное отверстие креста. В посадочные отверстия линейки помещают шарики. Отверстия на линейке сверлились таким образом, чтобы расстояния между ними (АВ, АС,...) соответствовали, с точностью в несколько миллиметров, заданным конструкцией расстояниям между крестами на реперной раме. Применялись еще две аналогичные линейки, но без призм, позволяющие измерять большие расстояния.

При измерении применялся индикатор и использовались отверстия в линейках. Крайнее отверстие (А), паз длиной 20 мм вдоль оси ножки индикатора, соответствует измерительному ходу индикатора 10 мм. Общее расстояние L между двумя центрами крестов вычисляется с помощью двух составляющих:

- переменной ΔL , которая образуется в результате отличия действительного расстояния между крестами на раме от расстояния, предусмотренного конструкцией. При точности в 0,01 мм она возникает неизбежно и измеряется с помощью индикатора;

- постоянной L_0 - расстоянием от центра нужного отверстия /В,С или т.д./ до отверстия А, когда в нем находится вставка в самом крайнем, отдаленном от индикатора, положении. Отсчет индикатора в этом положении ΔL_0 вычисляется от калибровочной длины L_K , а половина диаметра шарика вставки $d_{ш}/2$ прибавляется к ней. Таким образом,

$$L_0 = L_K - \Delta L_0 + d_{ш}/2$$

$$L = L_0 + \Delta L,$$

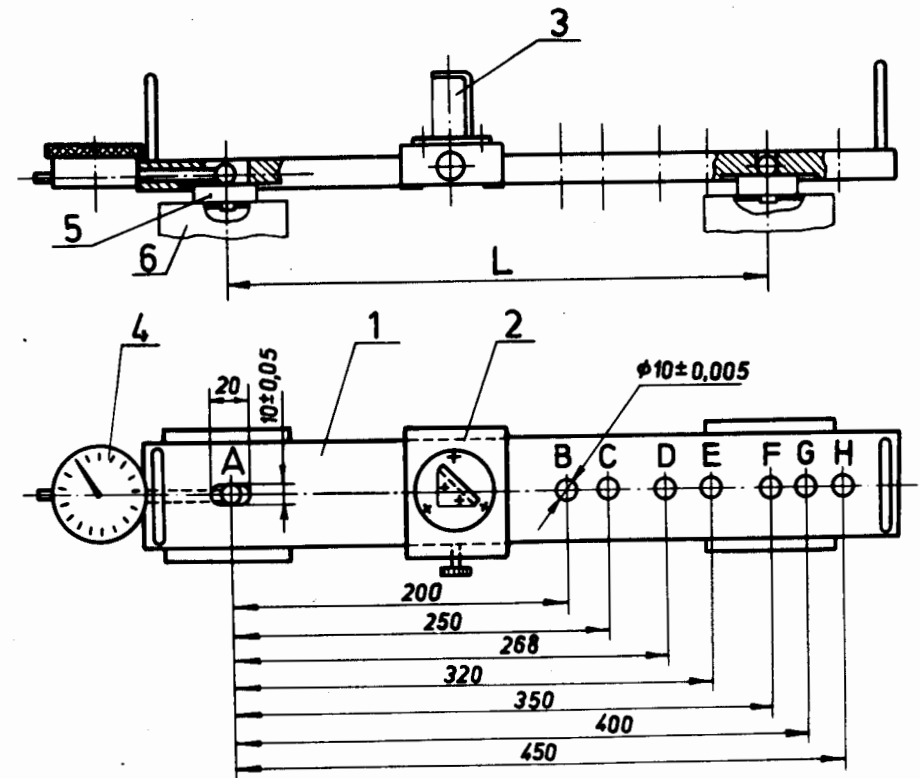


Рис.1. Линейка с призмой: 1 - брусок; 2 - подставка призмы; 3 - призма; 4 - индикатор; 5 - вставка; 6 - крест.

где ΔL - отсчет индикатора в данном измерении. Калибровка L_K для каждого отверстия осуществляется при помощи компаратора. Это стандартный геодезический прибор, который состоит из двух микроскопов и откалиброванного инварного эталона. Он работает по принципу сравнения искомой длины с откалиброванной и дает точность измерения около одного микрона. Таким образом, расстояния между центрами крестов L можно измерить с точностью 0,02-0,04 мм.

Для измерения отклонения оси центров крестов от прямой линии применяется линейка, на которой над пазом А закреплена прямоугольная отражающая призма и автоколлиматор, его ось направлена вдоль линии крестов на призму /рис.2/. Коллиматор

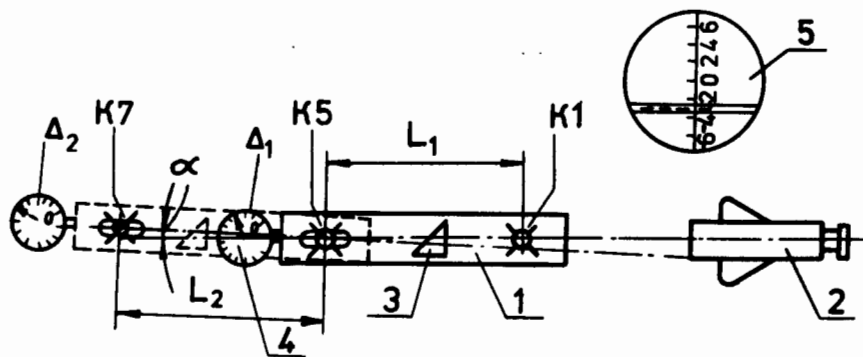


Рис.2. Линейка и автоколлиматор в рабочем положении: 1 - линейка; 2 - автоколлиматор; 3 - призма; 4 - индикатор линейки; 5 - шкала в окуляре автоколлиматора.

испускает луч света, который отражается от призмы и опять попадает в него. На шкале автоколлиматора отсчитывается угол отражения луча. На тех местах рамы, где определяются углы, близкие к 90° /направление в последовательности крестов № /7,9,10/, /10,9,13/.../, к измеренному углу необходимо прибавить угол, образованный соответствующими отражающими плоскостями призмы. Величина угла призмы определяется в процессе калибровки призмы при помощи теодолита, на котором она закреплена, и автоколлиматора с точностью до нескольких десятых долей секунды. Для измерения использовался автоколлиматор АК F516 /производство ГДР/: фокусное расстояние 516 мм; отверстие 49 мм; диапазон измерения углов до 8 минут; единица отсчета 1 секунда. Ограничение поля зрения автоколлиматора требует предварительного закрепления крестов с точностью ~ 1 мм во всех направлениях координат.

2.5. Микроскоп

Компаратор /рис.3/ для измерения расстояний между соседними нитями верхней реперной рамы состоит из двух микроскопов и подставки. Расстояние между объективом и реперной рамой равно 80 мм. В микроскопе находится винтовой окулярный микрометр с отсчетным устройством. Расстояние между осями микроскопов равно $100 \pm 0,3$ мм и соответствует расстоянию между нитями рамы. Подставка закрепляется на реперной раме. Окулярная шкала имеет 40 делений, каждая из которых соответствует 100 делениям

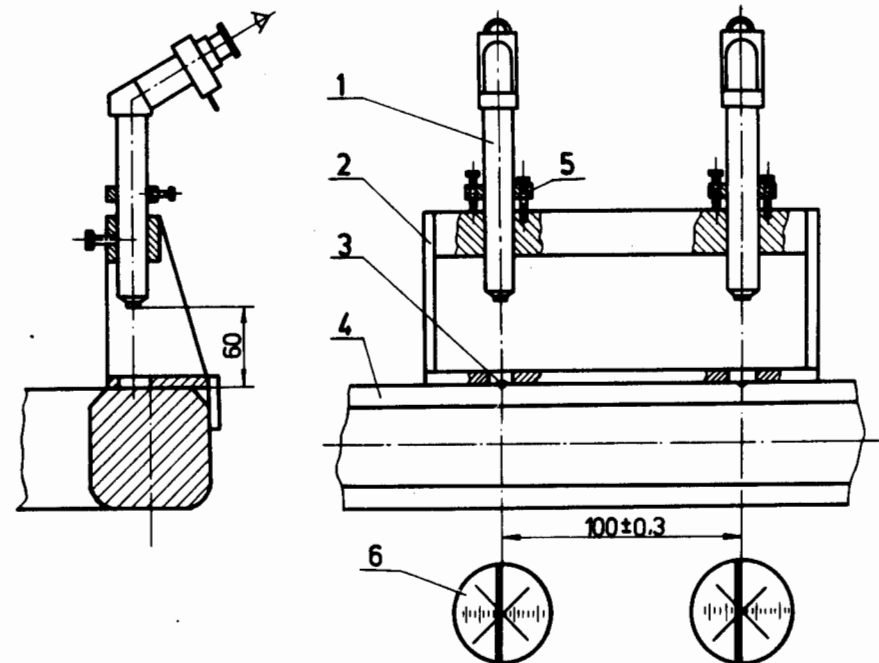


Рис.3. Микроскоп: 1 - тубус микроскопа; 2 - подставка; 3 - нить верхней реперной рамы; 4 - верхняя реперная рама; 5 - юстировочное приспособление микроскопа; 6 - шкала в окуляре микроскопа.

барабана. Расстояние между оптическими осями, окулярные шкалы и барабаны калибруются с помощью стеклянной масштабной линейки измерительного микроскопа с делением в 1 мкм, точность калибровки 3 мкм. Микроскопы имеют такую глубину резкости, чтобы после калибровки не нужно было двигать трубки микроскопов.

3. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ

3.1. Определение координатной системы

Координатная система установки РИСК принята такой, что центр креста K35 имеет координаты $(x, y, z)_{35} \equiv /0, 0, 0/$ и ось крестов K35-K1 имеет направление по оси x , то есть $(x, y, z)_1 \equiv (x_1, 0, z_1)$. Таким образом, ось x - направление по пучку, ось y перпендикулярна пучку в горизонтальной плоскости и ось z , определяющая высоту, перпендикулярна плоскости xy .

3.2. Измерение нижней рамы

Сначала по очереди на одну из двух передних и на одну из двух задних тумб ставится нивелир и с его помощью юстировочными винтами выравливается в горизонтальной плоскости с точностью 0,1 мм нижняя рама, держащая реперные кресты. После этого все реперные кресты выравнивают в горизонтальной плоскости уровнем и одновременно по высоте нивелиром так, чтобы их z-координаты были одинаковы с точностью $\pm 0,2$ мм. Тем же способом выставляются z-координаты всех восьми прицельных цилиндров, служащих для привязки реперной системы к неподвижной системе магнита. Затем производится измерение расстояний между крестами и центрами прицельных цилиндров Z1...Z8, а также углов между ними. Для этого устанавливают автоколлиматор на подставку /допустим, перед крестом №1/, выравнивают автоколлиматор в горизонтальной плоскости и по высоте. В центральное отверстие двух соседних крестов /например, №1 и №5/ устанавливают вставки и на них кладут линейку с призмой /рис.2/. В окуляр автоколлиматора попадает отраженный от призмы луч. После того как увидели отраженный луч, определяют угол между осью коллиматора и осью, проходящей через 2 креста, и одновременно с помощью отсчета индикатора определяют расстояние между крестами. Затем переставляют линейку вместе со вставками на другие соседние кресты /например, №5 и №7/ и процедура повторяется. Из разности этих отсчетов вычисляется угол образованный тремя последовательными крестами.

Измерение близких к 90° углов возможно, потому что призма так установлена на линейке, что отражение происходит с одной и, после поворота линейки по 90° , с другой стороны прямоугольной призмы.

Кроме расстояния между соседними крестами, с помощью линеек без призмы, измеряются и диагонали различных прямоугольников, образованных четырьмя крестами. Типы измеряемых отрезков следующие:

а/ диагонали прямоугольников, положение которых определено поперечными швеллерами рамы /например, K1-K12/, всего 8 диагоналей;

б/ диагонали прямоугольников, которые можно образовать из 4 ближайших друг к другу крестов /например, K1-K6, K4-K5/ /рис.2/2/ /;

в/ диагонали, а также расстояния между самыми крайними крестами /K1-K38, K4-K35 и т.д./. Эти измерения сделаны инварной лентой. Кроме того, линейки позволяют измерить расстояния не только между соседними крестами, но и через один. Эти измерения позволяют получить координаты по осям x, y всех крестов нижней рамы. Каждый угол и расстояние измеряется, как минимум, 6 раз.

3.3. Измерение верхней рамы

Для измерения верхней рамы применялись 3 вида приборов: а/ микроскоп-компаратор для измерения расстояний между соседними нитями;

б/ инварная лента для измерения расстояний между крайними нитями рамы;

в/ теодолит для измерения углов между нитями.

Измерение расстояний между соседними нитями в продольном и поперечном направлениях верхней рамы происходит вне магнита. Каждое расстояние измеряется 6 раз, причем каждый раз нить снимается и кладется опять в канавку. Расстояние вычисляется по формуле

$$P = 100,000 \text{ мм} - K + \Delta D,$$

$$\Delta D = D_{л} - D_{п},$$

$$D_{л,п} = (O_{л,п} - H_{л,п}) / M_{л,п},$$

где P - расстояние между соседними нитями; K - отклонение расстояния от 100,00 мм между оптическими осями; $O_{л,п}$ - отсчет левого /правого/ микроскопа по середине нити; $H_{л,п}$ - отсчет на барабанах левого /правого/ микроскопа при нулевом положении стрелки окулярного микрометра; $M_{л,п}$ - множитель перечисления делений барабана в микрометры левого /правого/ микроскопа. Величины K, $H_{л,п}$ и $M_{л,п}$ определяются во время калибровки компаратора.

Ошибка измерения расстояний в случае неподвижной нити - 6 мкм, а в случае, когда нити помещаются в канавку несколько раз, - 8 мкм. Измерение расстояний между нитями с помощью инварной ленты сделано по 6 раз.

При сравнении результатов измерений с помощью микроскопа и инварной ленты видно хорошее совпадение значений:

	микроскоп	инварная лента
левая сторона	4200,38 \pm 0,05 мм	4200,32 \pm 0,05 мм
правая сторона	4200,13 \pm 0,05 мм	4200,31 \pm 0,18 мм

3.4. Привязка координат верхней и нижней рамы к магниту

Для определения x, y-координат точек пересечения светящихся нитей верхней рамы на тумбы A-D устанавливается теодолит и измеряются углы $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$ /рис.4/. Каждую цель наблюдали и производили отсчет с каждой тумбы по 4 раза. Проводя

измерения прицельных цилиндров $Z_1...Z_8$, можно "привязать" реперную систему к магните.

z - координаты верхней рамы измерялись нивелиром и линейкой в 16 местах.

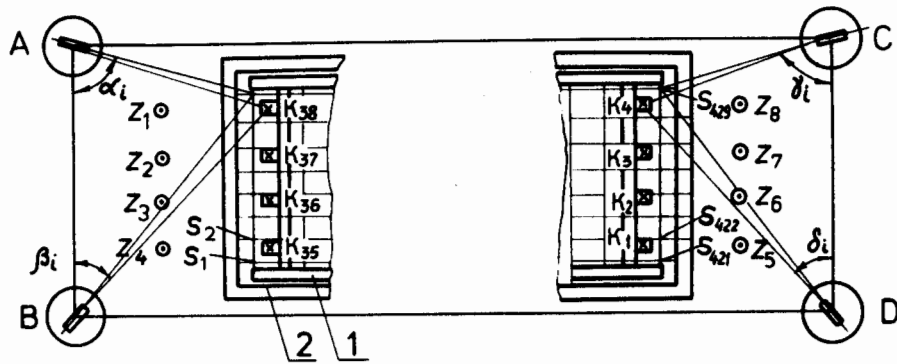


Рис.4. Привязка реперных рам теодолитом: 1 - нижняя реперная рама; 2 - верхняя реперная рама.

4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПОСЛЕ ИЗМЕРЕНИЯ

После калибровки измерительных приборов, измерений и коррекции измеренных величин производилась их обработка с целью получения x, y -координат.

Программа INTRAU создана на основе программ TL-PACKAGE, разработанных в ЦЕРНе, и методом наименьших квадратов определяет на машине CDC-3600 координаты точек из комплекта предварительно вычисленных координат и комплекта измеренных длин и углов.

Минимизируется величина

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \left(\frac{d(\vec{x}_i, \vec{x}_j) - d_{ij}}{\Delta_{ij}} \right)^2 + \sum_{i,j,k} \left(\frac{a(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{x}_k) - a_{ijk}}{\Delta_{ijk}} \right)^2,$$

где $d_{ij}, \Delta_{ij}, a_{ijk}, \Delta_{ijk}$ - измеренные расстояния и углы с учетом соответствующих ошибок; $d(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$ и $a(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{x}_k)$, вычисленные из плоскостных координат $\vec{x}_i = \{x_i, y_i\}$ расстояния и углы. Место \vec{x}_{35} определяет начало координат и поэтому выпадает из фита. Ось x вычисляется при условии $y_1=0$. При требовании, что χ^2 - минимум, получается нелинейная переопределенная система уравнений с одним условием. Исходя из

начальных значений эта система уравнений решается стандартным итерационным методом.

Ошибки фитированных координат \vec{x}_i определяются из матрицы смешанных вторичных моментов.

Обработка данных по этой программе происходит в такой последовательности, чтобы данные меньшей точности не влияли в процессе фитирования на данные большей точности. Последовательность определения координат для разных типов геодезических целей:

- 1/ нижняя рама;
- 2/ геодезические тумбы;
- 3/ верхняя рама;
- 4/ прицельные цилиндры, закрепленные на магните.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Общие результаты приведены в двух следующих таблицах.

Таблица 1

Средние остаточные отклонения P с ошибкой $\sigma(P)$, $P=(x_n - x)/\Delta x$, x_n - измеренное значение; x - вычисленное значение; Δx - ошибка измерения этого значения

Геодезическая цель	Прибор	P	$\sigma(P)$
длины	нижняя рама	линейки	0,7 0,5
углы	нижняя рама	линейка	0,7 0,5
длины	до тумб	инварная лента	0,6 0,4
углы	тумбы	теодолит	0,5 0,4
длины	верхняя рама	инварная лента	0,6 0,5
длины	верхняя рама	микроскоп	0,2 0,15
углы	верхняя рама	теодолит	0,6 0,4
длины	прицельные цилиндры	инварная лента	0,5 0,3
длины	прицельные цилиндры	линейки	0,6 0,5
углы	цилиндры	теодолит	0,5 0,4

Таблица 2

Средние ошибки координат в миллиметрах $\overline{\Delta x}$, $\overline{\Delta y}$, $\overline{\Delta z}$
и минимальные и максимальные ошибки координат

Геодезическая цель	$\overline{\Delta x}$	$\Delta x_{\text{мин.}}$	$\Delta x_{\text{макс.}}$	$\overline{\Delta y}$	$\Delta y_{\text{мин.}}$	$\Delta y_{\text{макс.}}$	$\overline{\Delta z}$
нижняя рама тумбы	0,02	0,013	0,028	0,03	0,015	0,05	0,08
верхняя рама	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	-
прицельные цилиндры	0,09	0,06	0,12	0,035	0,03	0,05	0,18
	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	-

Из результатов обработки измерений следует, что у всех значений не существует систематических отклонений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bohm G. et al. ANL-8055, 1975, p. 117.
2. Андреев Е.М. и др. ОИЯИ, 1-81-686, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 декабря 1981 года.