

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



Ц 8406

К-174

18/VIII-75

10 - 8808

3040/2-75

Л.П.Калмыкова, Г.А.Ососков, Г.А.Погодина,  
И.И.Скрыль

ПРОГРАММА КАЛИБРОВКИ  
БОЛЬШИХ ПРОСМОТРОВО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СТОЛОВ БПС-2 НА ЛИНИИ С ЭВМ ТРА-1001

**1975**

Л.П.Калмыкова, Г.А.Ососков, Г.А.Погодина,  
И.И.Скрыль

ПРОГРАММА КАЛИБРОВКИ  
БОЛЬШИХ ПРОСМОТРОВО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СТОЛОВ БПС-2 НА ЛИНИИ С ЭВМ ТРА-1001

## 1. Введение

Измерения камерных стереофотографий на больших просмотрово-измерительных столах БПС-2<sup>(1)</sup> производятся в декартовой системе координат  $(X, Y)_m$  по изображениям снимков, спроецированным на поверхность стола с увеличением примерно в 14,5 раз.

Система из шести БПС-2 работает под управлением малой ЭВМ ТРА-1001, которая осуществляет контроль работы операторов, сбор данных и их накопление на магнитной ленте (2,3). Для обеспечения нормального функционирования всей системы необходима периодическая проверка и определение точностных характеристик измерительных устройств каждого стола. Эти характеристики, помимо оценок значений единиц отсчетных систем по осям  $X$  и  $Y$  с указанием точностей таких оценок, должны содержать также параметры, характеризующие отсутствие в отсчетных устройствах систематических ошибок, и коэффициенты преобразования от декартовых координат стола к координатам в плоскости фильма.

Процедура для определения всех этих величин, называемая калибровкой, осуществляется следующим образом. В фильмный канал стола, подлежащего калибровке, помещается специальная калибровочная пластина с нанесенной на ней с высокой точностью прямоугольной сеткой прямых линий, отстоящих друг от друга на 5мм (рис.1). Оператор должен измерить какое-то количество  $N$  узлов изображения этой решетки, спроецированной на поверхность стола (нами было принято  $N=60$ ).

В процессе калибровки используются две декартовые системы координат (см.рис.1)  $(X, Y)_m$  - стола и  $(X, Y)_k$  - калибровочной пластины. Связь между этими системами предполагается афинной,<sup>\*</sup> т.е. описываемой уравнениями:

---

\*). Более сложной, нелинейной зависимости вводить не предполагалось, поскольку большей точности при использовании БПС-2 в режиме измерения "масок" <sup>1/1</sup> не требуется.

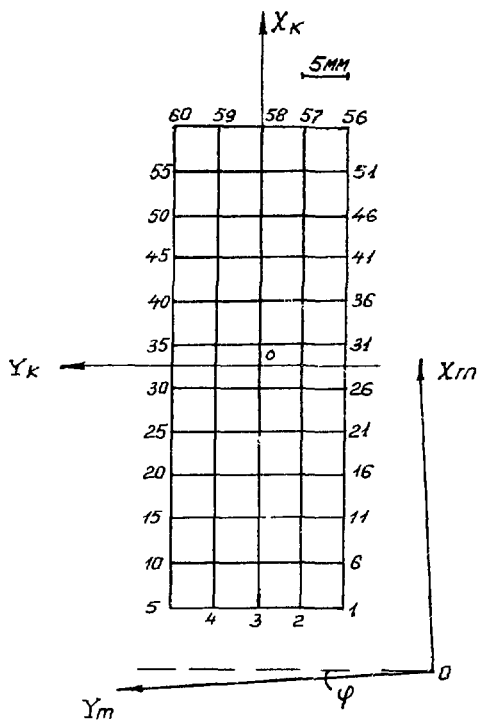


Рис. I

$$\begin{aligned}x_m &= ax_k + by_k + x_0, \\y_m &= cx_k + dy_k + y_0.\end{aligned}\quad (1)$$

Если допустить, что обе системы координат являются прямоугольными, то в таком случае общее аффинное преобразование (1) должно разлагаться на три элементарных: сдвиг начала координат в точку  $(X_0, Y_0)$ , поворот на угол  $\varphi$  и растяжение по осям соответственно в  $K_x$  и  $K_y$  раз.

Последние два преобразования означают, что коэффициенты преобразования (1) должны иметь вид:

$$\begin{aligned}a &= K_x \cos \varphi, \\b &= K_y \sin \varphi, \\c &= -K_x \sin \varphi, \\d &= K_y \cos \varphi.\end{aligned}\quad (2)$$

Формулы (2) позволяют легко найти  $K_x$  и  $K_y$ , а также сконструировать простейший критерий для проверки сделанного предположения о прямоугольности системы  $(X_m, Y_m)$ . Для этой цели можно, например, проверять близость к нулю так называемого параметра косоугольности

$$\gamma = \frac{c}{K_x} + \frac{b}{K_y}.\quad (3)$$

Используя 60 пар измеренных координат, мы должны тем или иным способом оценить значения шести параметров системы (1), т.е. найти шесть функций  $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{d}, \hat{x}_0, \hat{y}_0$  от 120 измеренных координат и по ним вычислить нужные точностные характеристики:

1. Среднеквадратичные ошибки  $\hat{\sigma}_x$  и  $\hat{\sigma}_y$ , характеризующие точность, с которой производились измерения (в предположении о нормальности закона распределения последних).

2. Цены отсчетов по осям

$$K_x = \sqrt{\hat{a}^2 + \hat{c}^2}, \quad K_y = \sqrt{\hat{b}^2 + \hat{d}^2}.\quad (4)$$

3. Параметр косоугольности

$$\gamma = \frac{\hat{c}}{K_x} + \frac{\hat{b}}{K_y}.\quad (3a)$$

Характеристики (4) и (3а) легко получаются из (2) и (3) при замене параметров  $a, b, c, d$  на их оценки.

Проверку предположения о нормальности закона распределения отклонений между правой и левой частями (I) при переходе от параметров к их оценкам можно провести, исследуя гистограммы таких отклонений. Несимметричность последних или какое-либо значимое несовпадение с гистограммой нормального распределения со средним (ноль) и среднеквадратичными значениями ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) является свидетельством неудовлетворительного состояния отсчетной системы стола.

В 1971г. Ю.А.Каржавиным и В.Н.Лысяковым был составлен первый вариант программы калибровки, реализующий в основном вышеизложенное. Однако этот вариант был неоптимальным как по времени (до 15мин. на каждый стол), так и по использованию всех возможностей системы, поскольку он осуществлял сепаратную калибровку каждого стола. Все вычисления проводились на той же малой ЭВМ ТРА-1001 в медленном режиме с плавающей запятой.

В этой связи был разработан настоящий вариант программы комплексной калибровки системы, в которой этап измерений и накопления калибровочных данных был отделен от этапа их обработки. Последний с целью ускорения вычислений был вынесен на большую ЭВМ СДС I604A. Поэтапность калибровки позволила проводить калибровочные измерения одновременно и параллельно на всех шести столах. При этом была использована такая возможность работы системы столов на линии с управляющей ЭВМ, как проверка действий операторов с текущим контролем снимаемых данных. Все это значительно ускорило процесс калибровки и повысило её надёжность.

Ниже, после изложения необходимых математических формул, приведены описания программ, реализующих оба этапа калибровки. В кон-

це приводятся примеры типовой выдачи и некоторые результаты калибровочных измерений.

Авторы выражают благодарность В.В.Ермолаеву за полезные обсуждения и советы, а также Л.В. Бубелевой и А.В.Кавченко за помощь в отладке на ЭВМ СДС 1604-А.

## 2. Метод вычисления точностных характеристик

Обозначим через  $(x_{ki}, y_{ki}) (i = \overline{1, N})$  координаты  $N$  узлов калибровочной пластины, а через  $(x_{mi}, y_{mi}) (i = \overline{1, N})$  — соответствующие  $N$  пар координат, измеренных на столе оператором с ошибкой, среднеквадратичные значения которой по осям мы условились обозначать через  $\sigma_x, \sigma_y$ .

Если предположить, что преобразование (I) сохраняет симметрию узлов калибровочной пластины (о случаях нарушения этого предположения мы сможем судить позже по асимметрии гистограмм отклонений и росту коэффициента косоугольности  $\gamma$ ), то мы сможем оценить параметры  $X_0$  и  $Y_0$  независимо от остальных путем усреднения координат измеренных узлов:

$$\begin{aligned} \hat{X}_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{mi}, \\ \hat{Y}_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{mi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ошибка такой оценки будет в  $\sqrt{N}$ , т.е. в нашем случае ( $N=60$ ) почти в 8 раз, меньше ошибки индивидуального измерения. Поэтому мы можем для упрощения (I) центрировать измеренные координаты на найденные величины  $\hat{X}_0$  и  $\hat{Y}_0$ :

$$x'_{mi} = x_{mi} - \hat{X}_0,$$

$$y'_{mi} = y_{mi} - \hat{Y}_0.$$

Подставляя  $(x'_{mi}, y'_{mi})$  и  $(x_{ki}, y_{ki})$  в (I), получим  $N$  уравнений, выполняемых с точностью до ошибки измерения и с четырьмя неизвестными параметрами:

$$\begin{aligned} x'_{mi} &= ax_{ki} + by_{ki}, \\ y'_{mi} &= cx_{ki} + dy_{ki}, \end{aligned} \quad (i = \overline{1, N}) \quad (6)$$

определение которых, как принято в подобных случаях, проводилось по методу наименьших квадратов (м.н.к.) (4).

Среди всех возможных значений параметров  $a, b, c, d$  ищутся те, которые дают минимум функционалу  $S$ , составленному из квадратов невязок уравнений системы (6):

$$S = \sum_{i=1}^N [(x'_{mi} - ax_{ki} - by_{ki})^2 + (y'_{mi} - cx_{ki} - dy_{ki})^2].$$

Для определения значений параметров, дающих минимальное значение функционалу  $S$ , приравняем нулю частные производные  $S$  по этим параметрам. Мы получим систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными и определителем:

$$D^2 = [\sum x_{ki}^2 \sum y_{ki}^2 - (\sum x_{ki} y_{ki})^2]^2. \quad (7)$$

Решением этой системы и будут искомые оценки параметров:

$$\begin{aligned} \hat{a} &= \frac{1}{D} (\sum y_{ki}^2 \sum x'_{mi} x_{ki} - \sum x_{ki} y_{ki} \sum x'_{mi} y_{ki}), \\ \hat{b} &= \frac{1}{D} (\sum x_{ki}^2 \sum x'_{mi} y_{ki} - \sum x_{ki} y_{ki} \sum x'_{mi} x_{ki}), \\ \hat{c} &= \frac{1}{D} (\sum y_{ki}^2 \sum x_{ki} y'_{mi} - \sum x_{ki} y_{ki} \sum y_{ki} y'_{mi}), \\ \hat{d} &= \frac{1}{D} (\sum x_{ki}^2 \sum y'_{mi} y_{ki} - \sum x_{ki} y_{ki} \sum x_{ki} y'_{mi}). \end{aligned} \quad (8)$$

Величины  $\hat{\sigma}_x$  и  $\hat{\sigma}_y$  могут быть найдены через значение функционала  $S$  в точке минимума:

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum \delta_{ix}^2}{N-2}}, \quad \hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum \delta_{iy}^2}{N-2}}, \quad (i = \overline{1, N}), \quad (9)$$

где обозначено:

$$\delta_{xi} = (x'_{mi} - \hat{a}x_{ki} - \hat{b}y_{ki}), \quad (10)$$

$$\delta_{yi} = (y'_{mi} - \hat{c}x_{ki} - \hat{d}y_{ki}).$$

Согласно теории м.н.к. могут быть найдены также ошибки оценок (8) и вычисленных по ним значений для цены отсчетов по оси  $y$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{KX} &= \sigma_x \sqrt{\frac{\sum y_{ki}^2}{D}}, \\ \sigma_{Ky} &= \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x_{ki}^2}{D}}, \quad (i = \overline{1, N}). \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично можно подсчитать теоретические значения среднеквадратичного отклонения для коэффициента косугольности  $\gamma$ , однако



в силу громоздкости этих формул допустимый интервал значений выбирался эмпирически. На основании имевшейся статистики значений было выбрано критическое значение  $\gamma_{крит} = 0,01$ , которое в "нормальных" случаях не должно превышаться.

Для построения гистограмм отклонений ( $IO$ ) отрезок  $(-I20, +I20)$  мм, охватывающий область всех допустимых значений  $\delta_x$  и  $\delta_y$ , был разбит на 20 интервалов.

На рис. 5 приведен пример типичных гистограмм для  $\delta_x$  и  $\delta_y$ , на рис. 8 дан пример гистограмм, значительно отклоняющихся от нормальных.

### 3. Описание программного обеспечения

Программное обеспечение состоит из двух частей: программы приема калибровочных данных со столов и накопления их на семидорожечной магнитной ленте магнитофона СДС-608, соединенного с ЭВМ ТРА-1001, и программы последующей обработки накопленных данных для вычисления калибровочных констант на ЭВМ СДС-1604А.

Прием и накопление координат узлов калибровочной пластины осуществляется с помощью программы "DATREC", работающей на управляющей ЭВМ ТРА-1001 при одновременной калибровке всех шести столов БПС-2. Программа "DATREC" написана на языке "SLANG-I"<sup>(5)</sup> и состоит из набора подпрограмм, приведенных на блок-схеме рис. 2. Эти подпрограммы выполняют следующие функции:

- поочередный опрос всех столов;
- прием координат со стола, если есть вызов;
- контроль координат на *max* и *min*;
- контроль на монотонное возрастание координат;
- формирование массивов в памяти ТРА-1001 и запись их на магнитную ленту СДС-608.

Кроме этого, программа информирует оператора, ведущего калиб-

ровку, о допущенных ошибках фразой на световом табло и звуковым сигналом.

Выходная магнитная лента содержит массивы данных калибровочных измерений со всех калибруемых столов. Формат данных при записи на ленту приведен на рис. 3.

Программа "CALBPS" работает на ЭВМ СДС-1604А, написана на языке *FORTRAN*.

Программа вычисляет коэффициенты преобразования (6) и соответствующие точностные характеристики (3). Блок-схема программы представлена на рис. 4.

Программой "CALBPS" предусмотрено построение гистограммы распределения отклонений координат X и Y. Данные, выдаваемые на печать, представлены на рис. 5. Кроме этого, выдается перфолента в кодах ASCII <sup>(5)</sup> с калибровочными константами  $K_x$ ,  $4K_y$  и служебными данными для ввода в память ТРА-1001 (рис. 6).

#### Результаты калибровки и некоторые выводы

Результатом данной работы явилось сокращение времени калибровки с 10-15 минут на каждый стол (в эксплуатации находится в настоящее время 6 столов БПС-2) до 10-15 минут на все 6 столов. При этом время накопления в памяти ТРА-1001 и запись на магнитную ленту магнитофона СДС-608 калибровочных данных со столов составляет 3-5 минут, остальное время приходится на обработку на большой ЭВМ СДС-1604А.

На рис. 5 приведен пример данных калибровки для одной из проекций прибора БПС-2N в виде выдачи на широкую печать ЭВМ СДС-1604А. На рис. 6 представлен пример данных калибровки, указывающих на неудовлетворительное состояние измерительной системы.

С точки зрения удобства пользования системой, территориально удаленной от ЭВМ СДС-1604А, представляется разумным проверить

возможность определения калибровочных характеристик на той же управляющей машине ТРА-1001. В силу малой вычислительной мощности этой ЭВМ необходимо предусмотреть возможность сокращения вычислений (без потери точности), а также ускорение расчетов путем использования пакета стандартных подпрограмм, осуществляющих операции с плавающей запятой на базе блока расширенной арифметики (который должен быть включен в конфигурацию ЭВМ).

В этой связи был использован метод укрупнения 60 измеренных координат калибровочной сетки путем центрирования и сокращения их до 8, как показано на рис. 9.

Соответствующие преобразования выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{1}{9} (X_{m1} + X_{m2} + X_{m3} + X_{m6} + X_{m7} + X_{m8} + X_{m11} + X_{m12} + X_{m13}), \\
 Y_1 &= \frac{1}{9} (Y_{m1} + Y_{m2} + Y_{m3} + Y_{m6} + Y_{m7} + Y_{m8} + Y_{m11} + Y_{m12} + Y_{m13}), \\
 X_2 &= \frac{1}{9} (X_{m3} + X_{m4} + X_{m5} + X_{m8} + X_{m9} + X_{m10} + X_{m13} + X_{m14} + X_{m15}), \\
 Y_2 &= \frac{1}{9} (Y_{m3} + Y_{m4} + Y_{m5} + Y_{m8} + Y_{m9} + Y_{m10} + Y_{m13} + Y_{m14} + Y_{m15}).
 \end{aligned}$$

Затраты машинного времени на расчет по методу наименьших квадратов пропорциональны квадрату количества точек ( $N^2$ ). Таким образом, метод укрупненных точек должен дать сокращение машинного времени на вычисление коэффициентов  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$ ,  $\hat{c}$ ,  $\hat{d}$  в 8 раз.

Был произведен подсчет калибровочных констант по 8 парам укрупненных координат  $X_i, Y_i (i=1, \dots, 8)$ .

Сравнение с результатами калибровки для 60 точек показало, что  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  отличаются меньше чем на 0,1 мкм (рис. 5 и рис. 7).

Машинное время при калибровке всех 6 столов на ЭВМ СДС-1604А с учетом работы остальных блоков программы при введении укрупненных узлов сократилось на 50%.

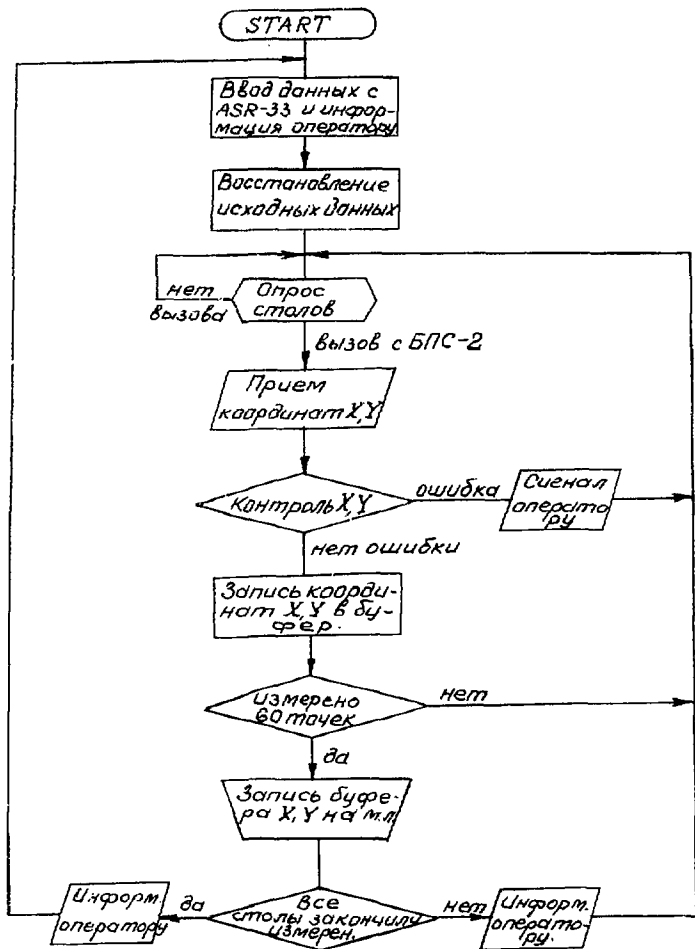


Рис. 2. Блок-схема программы "DATREC".

Номер слова	Содержание слова										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Количество калибруемых проекций (NREC)										
.											
.											
121											
1	Номер проекции (NV)					Номер стола (NS)					
2	Координата Y										
3	Координата X										
.											
.											
.											
120	Координата Y										
121	Координата X										
1	Номер проекции (NV)					Номер стола (NS)					
2	Координата Y										
	Координата X										
.											
.											
.											
120	Координата Y										
121	Координата X										
и т.д. За (NREC+1) <sup>го</sup> рекорда											

Рис. 3. Формат данных при записи на м.л. СДС-608.

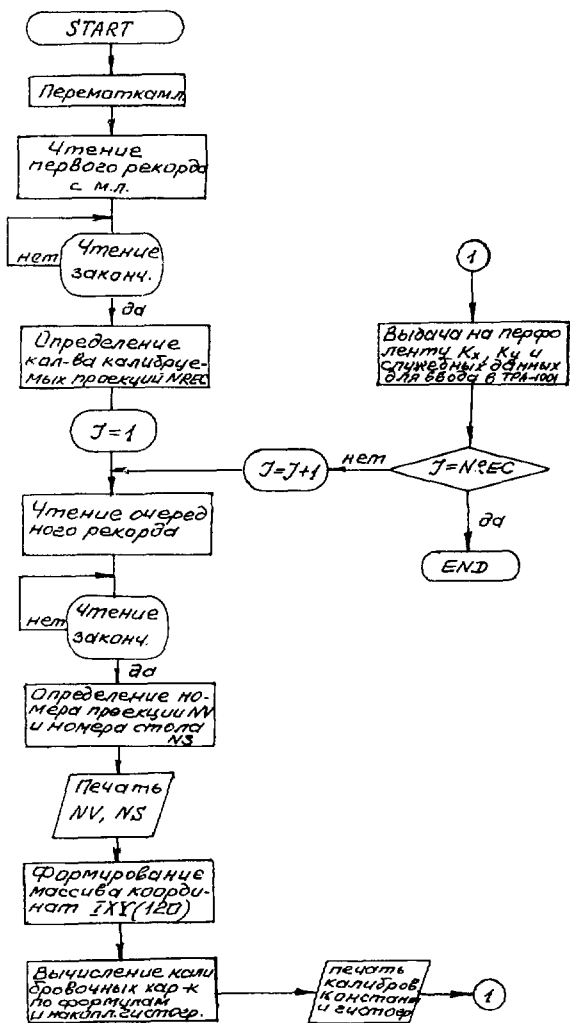


Рис.4. Блок-схема программы "CALBPS"



DATE 10.11.74  
VIEWS=20

NB.TABLE3,NB. VIEW1  
COEFF.KX= 4.05576E 01 KY= 1.12385E 01

NB.TABLE4,NB. VIEW1  
COEFF.KX= 4.07465E 01 KY= 1.14259E 01

.

:

.

NB.TABLE2,NB. VIEW2  
COEFF.KX= 4.01263E 01 KY= 1.09941E 01

Рис. 6.





```

YC= 1.5654E 03      YC= 2.0061E 03
KX= 4.01116E 01      KY= 1.10593E 01
ГАННА=-6.00592E-03   С1= 1.20716E-01
B1=-3.49374E-02

```

```

С101Y= 7.20003E 02   С101Y= 1.528764E 02

```

```

**** СРОС. Y

```

```

1 -120.00 7 *****
2 -100.00 7
3 -80.00 5 *****
4 -60.00 3 ***
5 -40.00 1
6 -20.00 5 *****
7 0.00 8 *****
8 20.00 3 *
9 40.00 1 *
10 60.00 8 *****
11 80.00 6 *****
12 100.00 3 ***
13 120.00 1
14 140.00 13 *****

```

```

**** СРОС. Y

```

```

1 -120.00 7 ***
2 -110.00 7
3 -100.00 7
4 -90.00 7
5 -80.00 7
6 -70.00 7 *
7 -60.00 7
8 -50.00 7
9 -40.00 7
10 -30.00 4 ****
11 -20.00 16 *****
12 -10.00 2 **
13 0.00 3 ***
14 10.00 4 ****
15 20.00 4 ****
16 30.00 7 **
17 40.00 1 *
18 50.00 7 *****
19 60.00 7 *****
20 70.00 8 *****
21 80.00 2 **
22 90.00 4 ****
23 100.00 3 **
24 110.00 1
25 120.00 1
26 130.00 1

```

Рис. 8. Пример данных калибровки, указывающих на неудовлетворительное состояние измерительной системы.

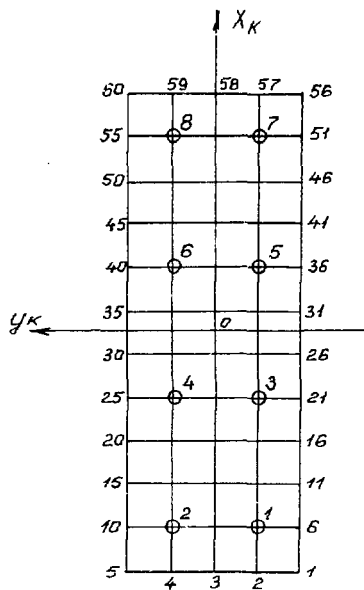


Рис. 9.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.А.Алмазов и др. Препринт ОИЯИ IO-4513, Дубна, 1969.
2. В.В.Ермолаев и др. Сообщение ОИЯИ IO65I6, Дубна, 1972.
3. В.В.Ермолаев и др. Сообщение ОИЯИ IO65I7, Дубна, 1972.
4. Б.Л.Ван дер Варден, Математическая статистика, ИЛ, Москва, 1960.
5. **TRAP. SLANG. PROGRAMMING LANGUAGE.**  
**Munkacsy: KFKI 3819 Budapest, 1968.**

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 апреля 1975 г.