



сообщения  
Объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

1864 / 2-80

21/4-80

P10 - 12990

И.Байла, М.К.Баранчук, Н.В.Барашенкова,  
Э.Д.Лапчик, Г.А.Ососков, Н.В.Шкунденков

ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА АЭЛТ-2/160

1980

Успешное применение автомата АЭЛТ-2/160<sup>1</sup> для решения задач обработки फिल्मовой информации определяется в конечном счете точностью измерений и ее стабильностью в процессе эксплуатации автомата. Наиболее полной точностной характеристикой АЭЛТ-2/160 принято считать величину остаточных ошибок калибровочного преобразования /т.е. преобразования нелинейной системы отсчета АЭЛТ-2/160 в прямоугольную - декартову - систему координат/ и их распределение по рабочему полю автомата.

Таким образом, калибровочное преобразование входит составной частью в комплекс программ обработки फिल्मовой информации и обеспечивает математическую коррекцию искажений /дисторсий и др./ рабочего поля автомата. При этом остаточные ошибки определяют точность представления результатов обработки в декартовой системе координат.

Исследование точностных характеристик автомата проведено на основе имеющегося математического обеспечения калибровок АЭЛТ-2/160 и дополнительно разработанной программы STATES.

## 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование точностных характеристик автомата включает проведение следующих работ:

1. Ежедневное выполнение калибровок с оперативным анализом получаемых результатов.

2. Проведение испытаний на кратковременную /в течение 1-2 часов/ стабильность среднеквадратической  $\sigma$  и максимальной  $D_m$  остаточных ошибок.

3. Проведение долговременных /в течение 9-10 и 24-25 часов/ испытаний стабильности  $\sigma$  и  $D_m$ .

4. Выявление нестабильности систематических смещений в отсчетной системе автомата во времени.

5. Нахождение зависимости  $\sigma$  и  $D_m$  от качества установки калибровочной решетки в फिल्मовом канале автомата.

Ежедневное выполнение калибровок /исследование по п.1/ позволяет оперативно контролировать точностные характери-



ки автомата, но не дает представления об их динамике, т.е. изменении во времени.

Поскольку АЭЛТ-2/160 предназначен для массовой обработки फिल्मовой информации, необходимо определить интервал времени, в течение которого можно пользоваться полученными калибровочными коэффициентами с остаточными ошибками, не превышающими наперед заданной величины. Ответ на этот вопрос дают исследования по пп. 2 и 3.

В соответствии с принятым разделением ошибок на систематические и случайные изменение точностных характеристик во времени может быть вызвано как теми, так и другими. Определение решающего вклада того или иного вида ошибок позволит правильно спланировать мероприятия по нахождению причин, вызвавших их появление. На этот вопрос отвечают исследования по п.4.

Наконец, исследования по п.5 дают возможность решить, является ли необходимым делать точную установку калибровочной решетки с помощью коллиматора или достаточно произвольной установки. Критерием выбора здесь служит зависимость  $\sigma$  и  $D_m$  от угловой ошибки установки калибровочной решетки.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Калибровка проводится в два этапа:

- получение массива координат центров крестов калибровочной решетки в системе отсчета АЭЛТ-2/160;
- нахождение по этому массиву калибровочных коэффициентов и оценок параметров распределения остаточных ошибок /  $\sigma$  и  $D_m$  /.

Математическое обеспечение первого этапа включает в себя стандартное математическое обеспечение ЭВМ БЭСМ-4-II, а также программы сканирования, фильтрации, расчета координат центров крестов методом наименьших квадратов, программы диалога оператор-ЭВМ. Результатом работы этого комплекса программ является записанный на магнитную ленту массив координат центров крестов и его распечатка на АЦПУ.

На втором этапе указанный массив перезаписывается на диск CDC-6500 по каналу связи и затем ведется счет по одной из модификаций программы ORC в зависимости от решаемой задачи.

Программы первого этапа хранятся на системной ленте ЭВМ БЭСМ-4-II и загружаются в режиме пакетной обработки. Программы второго этапа хранятся в перманентных файлах CDC-6500 и вызываются на счет с терминала.

В основу математического аппарата поиска калибровочного преобразования, реализуемого программой ORC, положены ре-

зультаты работы <sup>1/2/</sup>. В ней калибровочное преобразование определено для каждой из координат  $X, Y$  как наилучшая в смысле минимума остаточной суммы квадратов /  $L_2$  - норма / полиномиальная аппроксимация конечного числа центров эталонных крестов калибровочной решетки. При этом идеальные  $(X_i, Y_i)$  и измеренные  $(X_{ik}, Y_{ik})$  координаты центров крестов связаны соотношениями

$$X_{ik} = X_i + \Delta X_{ik} + SX_i, \quad /1/$$

$$Y_{ik} = Y_i + \Delta Y_{ik} + SY_i, \quad /2/$$

где  $\Delta X_{ik}, \Delta Y_{ik}$  - случайные отклонения координат центра  $i$ -го креста в  $k$ -м калибровочном измерении. Их распределение полагается нормальным с параметрами  $(0, \sigma_{X_i}); (0, \sigma_{Y_i})$ .  $SX_i, SY_i$  - систематические смещения координат центра  $i$ -го креста, вызванные нелинейностью отсчетной системы автомата.

Калибровочное преобразование в программе ORC находится в предположении о постоянстве  $SX_i, SY_i$  во всех калибровочных измерениях. Эта программа была модифицирована с целью программного обеспечения исследования стабильности точностных характеристик автомата. Модификации отличаются тем, что в варианте ORC, CY=2, находятся калибровочные коэффициенты и распределение остаточных ошибок по одному массиву центров крестов /одна калибровка/ с записью этих коэффициентов на диск. В модификации ORC, CY=3, те же выходные данные рассчитываются для каждой из 10 калибровок /независимо от других калибровок этого цикла/. Наконец, в программе ORC, CY=4, находятся распределения остаточных ошибок каждой из 10 калибровок с использованием калибровочных коэффициентов, записанных на диск программой ORC, CY=2.

Структура выдачи на печать всех перечисленных модификаций однотипна. Печатный документ включает в себя:

- перечень входных параметров;
- граничные значения координат центров крестов калиброванного поля;
- калибровочные коэффициенты;
- гистограмму распределения остаточных ошибок по всему калиброванному полю с вычисленными параметрами гистограммы;
- гистограммы распределения остаточных ошибок в каждом из 4 квадрантов калиброванного поля с вычисленными параметрами этих гистограмм.

Печатный документ может быть получен на АЦПУ или выведен на терминал.



Предположение о постоянстве систематических смещений  $SX_i$ ,  $SY_i$  во времени, т.е. в течение  $k$  калибровок, может быть проверено экспериментально. Этой цели и служит статистическая программа STATES - математическое обеспечение исследований по п.4.

Рассмотрим этот вопрос подробнее, исходя из соотношения /1/, т.е. для краткости ограничившись координатой  $X$ . Пусть калибровочная решетка измерена последовательно  $\ell$  раз. Если каждое наблюдение  $\bar{X}_{ik}(k=1 \div \ell)$  считать результатом измерения априорно неизвестного значения величины  $\bar{X}_i = X_i + SX_i$ , то можно выдвинуть гипотезу  $H_0$  об отсутствии изменения  $SX_i$  в наблюдениях  $\bar{X}_{i1}, \bar{X}_{i2}, \dots, \bar{X}_{i\ell}$ , т.е. во времени.

Поскольку в любом из  $k=1 \div \ell$  последовательных измерений идеальные значения  $X_i$  фиксированы, можно интерпретировать сдвиг в  $\bar{X}_{ik}$  как изменение во времени  $SX_i$ .

Действительно, если за время одной калибровки  $SX_i$  постоянно и определяется нелинейностью отсчетной системы автомата, то за время  $\ell$  калибровок на величину  $SX_i$  будут влиять изменения таких параметров автомата, как центровка рабочего поля и /или/ его масштаб. Эти параметры достаточно стабильны, и их изменения могут быть обнаружены лишь при большом числе калибровок /до 10/ и значительном интервале времени между последовательными калибровками /1 час и более/.

Таким образом, в наблюдениях, где гипотеза  $H_0$  будет отвергнута, можно с заданной ошибкой обнаружить изменение  $SX_i$  во времени.

Пусть  $\bar{X}_i$  обозначает оценку математического ожидания величины  $X_i$  в выборке  $(\bar{X}_{i1}, \bar{X}_{i2}, \dots, \bar{X}_{i\ell})$ . Определим статистику для проверки гипотезы  $H_0$ :

$$r_i = \frac{q_i^2}{p_i^2}; \quad /3/$$

где

$$q_i^2 = \frac{1}{2(\ell-1)} \sum_{k=1}^{\ell-1} (\bar{X}_{i, k+1} - \bar{X}_{ik})^2; \quad /4/$$

$$p_i^2 = \frac{1}{\ell-1} \sum_{k=1}^{\ell} (\bar{X}_{ik} - \bar{X}_i)^2. \quad /5/$$

Если в процессе измерений  $SX_i$  изменяется, то следует ожидать  $p_i^2 \gg q_i^2$ , т.е.  $r_i$  будет в среднем значительно меньше, чем в случае постоянного  $SX_i$ . Выбрав соответствующий квантиль порядка  $p$  /обычно  $p = 0,05$  /, сформулируем критерий значимости гипотезы  $H_0$ :

- гипотеза  $H_0$  отвергается, если  $r_i > r_{ip}$ , т.е. утверждается, что в  $i$ -м кресте обнаружено изменение  $SX_i$ ;

- при  $r_i \leq r_{ip}$  заключаем, что наблюдаемые значения  $r_i$  не противоречат гипотезе  $H_0$ .

Очевидно, что приведенный выше анализ справедлив и для координаты  $Y$ .

Таким образом, в результате обработки данных  $\ell$  калибровочных измерений с вероятностью  $p$  ошибки первого рода будут выявлены кресты, в которых происходит изменение  $SX_i, SY_i$  во времени.

Следует отметить, что в программе STATES не используется калибровочное преобразование и что обнаружение изменений  $SX_i, SY_i$  во времени не обязательно приведет к браковке калибровочных коэффициентов. Оно позволяет только утверждать, что изменение остаточных ошибок во времени определяется изменениями  $SX_i, SY_i$ , а не  $\Delta X_{ik}, \Delta Y_{ik}$  в /1,2/.

Программа STATES для данного числа  $\ell=10$  калибровочных измерений реализует для каждого  $L = 4, 5, \dots, \ell$  два алгоритма:

- вычисления статистических параметров  $L$  калибровочных измерений для каждого из  $i=1 \div n$  крестов калибровочной решетки ( $n=260$ );
- вычисления по формулам /3÷5/ и проверки гипотезы о стабильности систематического сдвига в каждом из  $i=1 \div n$  крестов.

Печатный документ программы STATES содержит:

- таблицы измеренных координат  $X$  и  $Y$  центров крестов;
- значения входных параметров /число измерений  $L$ , порядок  $p$  и значение  $q$  квантиля/;
- таблицы значений  $r_i$ ;
- таблицы оценок дисперсий для каждого креста;
- значение дисперсии, усредненной по всему калиброванному полю;
- схематическое изображение калибровочной решетки с отмеченными знаком "+" крестами, в которых обнаружено изменение  $SX_i, SY_i$  во времени;
- процент крестов с обнаруженными изменениями  $SX_i, SY_i$ .

### 3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении калибровочных измерений сканируются 260 крестов /13 столбцов по 20 крестов в каждом, столбцы расположены вдоль оси  $Y$  /. Поскольку расстояние между центрами соседних сканируемых крестов составляет 6 мм, калиброванное поле имеет размер  $114 \times 72$  мм<sup>2</sup>.

При ежедневных калибровках эталонная решетка устанавливается без помощи коллиматора перед началом каждой калибровки.



Результаты измерений обсчитываются по программе ORC,  $CU = 2$ . За полтора года, истекших с начала регулярных калибровок, среднеквадратическая ошибка  $\sigma$  оставалась в пределах  $1,4 \div 2,1$  мкм, а максимальная  $D_m$  - в пределах  $7 \div 11$  мкм\*.

Типичная гистограмма остаточных ошибок приведена на рис. 1. При исследовании стабильности  $\sigma$  и  $D_m$  проводились циклы из 11 калибровок. Калибровочная решетка устанавливалась без помощи коллиматора перед началом цикла и не переставлялась в течение всего цикла калибровок. Результаты первого калибровочного измерения цикла обсчитывались по программе ORC,  $CU = 2$ . Результаты последующих 10 измерений цикла - по программе ORC,  $CU = 4$ , а затем по программе ORC,  $CU = 3$ . В некоторых циклах калибровок по программе ORC,  $CU = 2$ , обсчитывались результаты последнего калибровочного измерения, а результаты предыдущих 10 - по программам ORC,  $CU = 4$ , и ORC,  $CU = 3$ . Исследование проводилось в течение первого полугодия 1979 года. Результаты представлены на рис. 2-4 /испытания на стабильность в течение 2, 9-10 и 24-25 часов соответственно/. На этих рисунках нижняя группа графиков отражает изменения  $\sigma$ , а верхняя -  $D_m$ , причем  $\sigma$  лежит в пределах  $1,3 \div 1,8$  мкм /рис. 2, один цикл, графики 1,3 построены по результатам обсчета по ORC,  $CU = 3$ , графики 2,4 - по результатам ORC,  $CU = 4$ /,  $1,4 \div 2,1$  мкм /рис. 3, два цикла, обсчет по ORC,  $CU = 2$ , первой и последней калибровок цикла, остальных - по ORC,  $CU = 4$ ; ORC,  $CU = 3$ / и  $1,25 - 2,3$  мкм /рис. 4, пять циклов, обсчет, как и на рис. 3/. При этом  $D_m$  лежит в пределах  $6,3 - 9,5$  мкм,  $7,0 - 11,5$  мкм и  $5,8 - 12,5$  мкм на рис. 2-4 соответственно.

С целью установить причину наметившейся тенденции к увеличению  $\sigma$  и  $D_m$  на графиках рис. 2-4, один из циклов калибровок рис. 3 был обсчитан по программе STATES. Результаты представлены на рис. 5, где по оси ординат отложен процент крестов, в которых обнаружено изменение  $SR = \sqrt{SX^2 + SY^2}$ . Относительное число таких крестов устойчиво увеличивается со временем. Пример их распределения по калиброванному полю схематически показан на рис. 6.

С целью установить влияние точности установки калибровочной решетки на  $\sigma$  и  $D_m$  сначала была проведена серия измерений разброса углов установки решетки относительно ее точного положения, получаемого при использовании коллиматора. Измере-

\*Текущим значением остаточной ошибки считается расстояние  $R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$  между точками идеальной решетки и преобразованными в декартову систему координат измеренными точками.

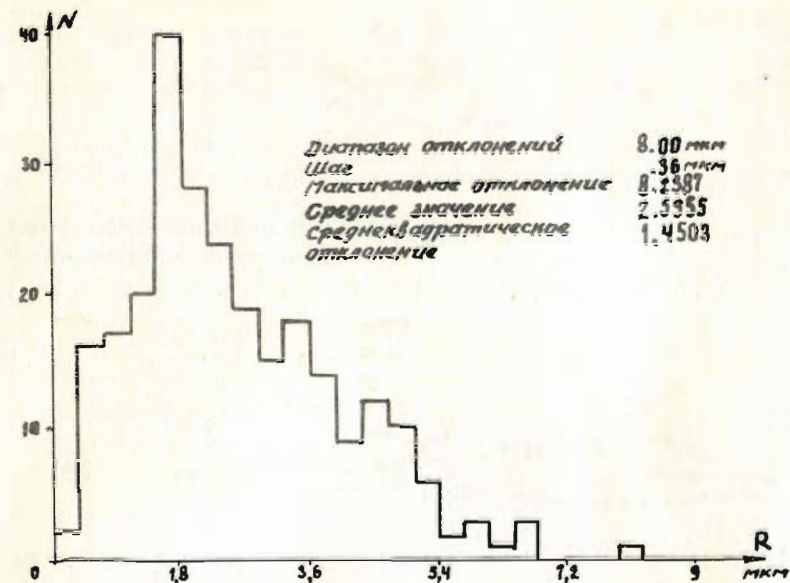


Рис. 1. Гистограмма остаточных ошибок.

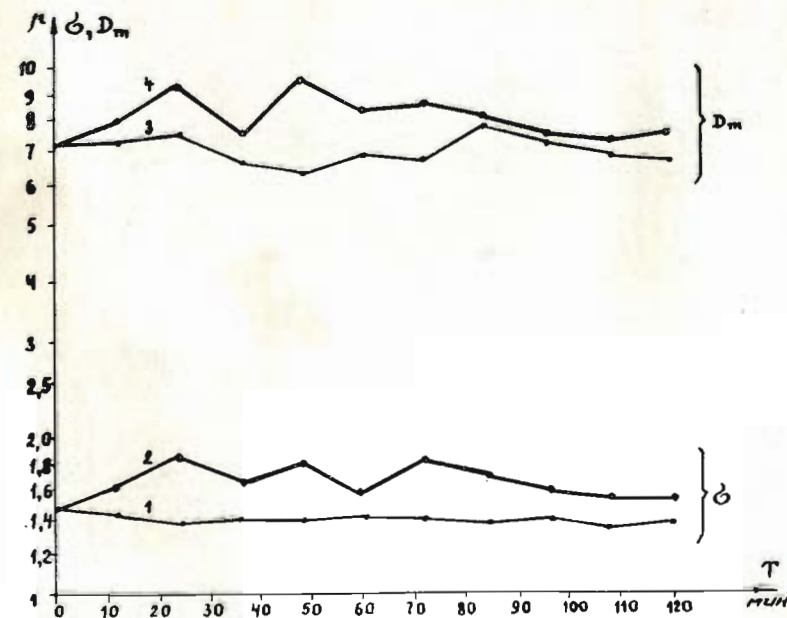


Рис. 2. Двухчасовая стабильность точностных характеристик.

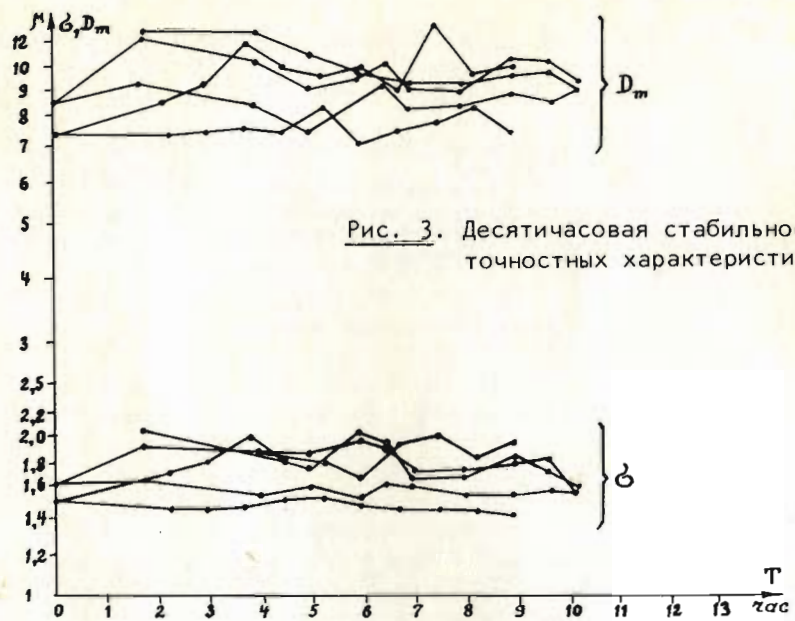


Рис. 3. Десятичасовая стабильность точностных характеристик.

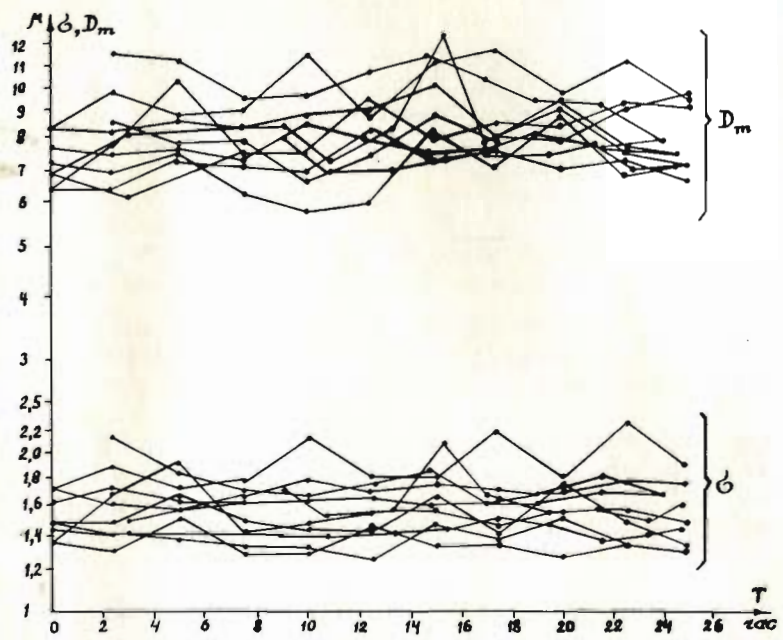


Рис. 4. Суточная стабильность точностных характеристик.

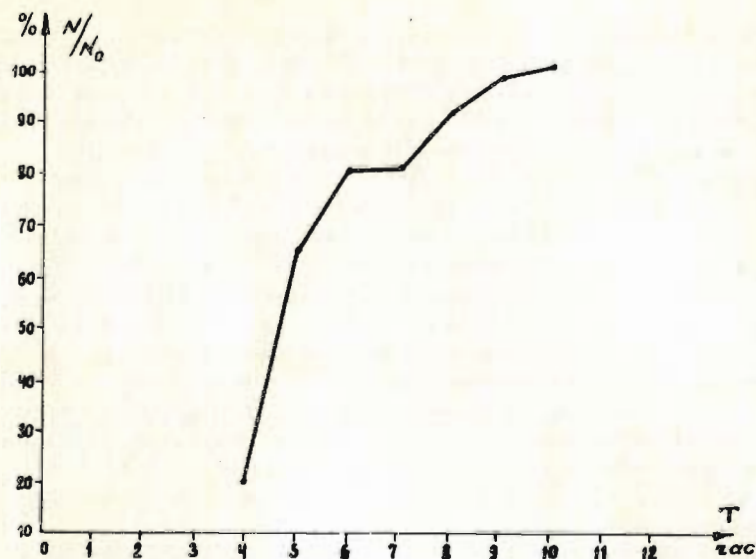


Рис. 5. Изменение во времени числа крестов с обнаруженным изменением систематического смещения.

Точки систематических отклонений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
13						+	+		+				+	+	+	+		+	+	
12		+						+			+	+		+	+	+	+	+	+	+
11													+	+	+	+	+	+	+	
10											+		+	+	+	+	+	+	+	+
9										+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
8								+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7								+	+			+			+	+		+	+	+
6							+		+	+	+	+	+	+	+		+	+		+
5							+		+	+	+	+	+	+		+		+	+	+
4							+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
3																				
2				+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1			+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+

Процент точек с систематическим отклонением — 56,15

Рис. 6. Схематическое распределение крестов с обнаруженным изменением систематического смещения по калиброванному полю.



ния проводились независимо двумя людьми, каждый из которых сделал по 40 замеров. При этом разброс углов составил 6 угловых минут в вертикальной плоскости и 4 - в горизонтальной.

Затем был проведен цикл из 11 калибровок в течение 11 часов. Результаты калибровочных измерений обсчитывались по программам ORC,  $CU = 2$ , и ORC,  $CU = 3$ , полученные данные представлены на рис. 7, где графики 1 и 3 отражают изменение  $\sigma$  и  $D_m$  соответственно при установке с помощью коллиматора /точность установки не хуже  $0,5'$ , а графики 2 и 4 - без коллиматора /произвольная установка/. В обоих случаях  $\sigma$  лежит в пределах  $1,7-1,9$  мкм, а  $D_m$  - в пределах  $8-10$  мкм.

Кроме этого цикла, были проведены две калибровки, в одной из которых решетка устанавливалась по коллиматору, а в другой - с максимально возможной ошибкой  $/8'$  по горизонтали и  $10'$  - по вертикали/. После обсчета результатов измерений по программе ORC,  $CU = 2$ , получены значения  $\sigma = 1,46$  мкм и  $\sigma = 1,47$  мкм,  $D_m = 8,73$  мкм и  $D_m = 8,64$  мкм для установки по коллиматору и без него соответственно.

Поскольку в последнем цикле калибровок эталонная решетка устанавливалась заново перед каждой калибровкой, ее линейные смещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях приводили к соответствующим смещениям калиброванного поля. Это в свою очередь приводило к резкому возрастанию остаточных ошибок, что и было обнаружено после обсчета по программе ORC,  $CU = 4$ . Так, например, сдвиг решетки на 58 мкм по горизонтали и на 26 мкм по вертикали относительно первоначальной установки приводит к увеличению  $D_m$  до 29,5 мкм и  $\sigma$  - до 5,8 мкм, а сдвиг в 68 мкм и 24 мкм - к увеличению  $D_m$  до 34 мкм и  $\sigma$  до 7,1 мкм. Это свидетельствует о невозможности вести обработку за пределами калиброванного поля.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволил наметить и осуществить комплекс организационно-технических мероприятий по эксплуатации автомата АЭЛТ-2/160, направленных на достижение достаточно высокой стабильности его точностных характеристик. На их основе можно сделать следующие выводы:

- точность измерений, получаемая на АЭЛТ-2/160 непосредственно после проведения калибровок, соответствует среднеквадратическому отклонению  $1,25 \pm 1,7$  мкм; при этом максимальная остаточная ошибка лежит в пределах  $5,8-8,5$  мкм;
- в течение двух часов работы автомата среднеквадратическая остаточная ошибка увеличивается типично не более чем на  $0,3$  мкм, а максимальная - не более чем на  $2,5$  мкм;

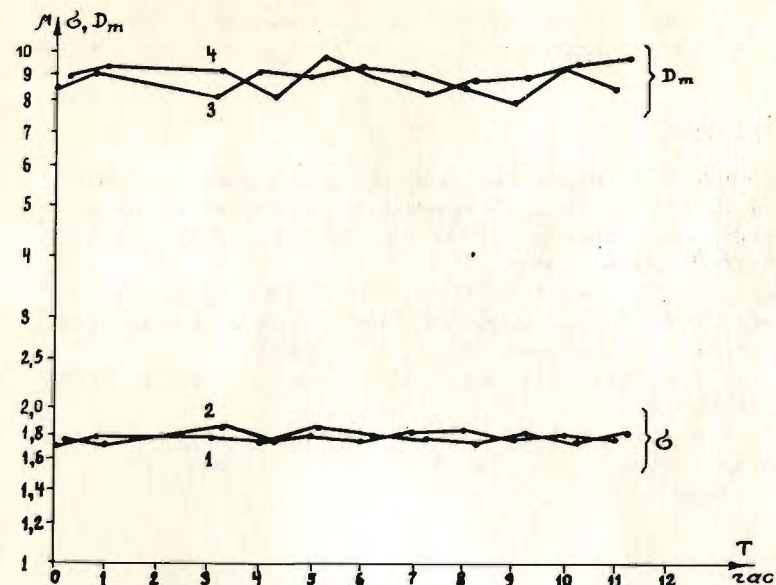


Рис. 7. Изменения остаточных ошибок при точной /графики 1,3/ и произвольной /графики 2,4/ установке калибровочной решетки.

- в течение 9-10 часов работы указанное увеличение составляет  $0,5$  и  $4$  мкм;
  - в течение 24-25 часов - соответственно  $0,6$  и  $5,5$  мкм;
  - величина остаточных ошибок не зависит от того, проводится калибровка в начале сеанса обработки или в конце его;
  - обработка фильмов в рабочем поле, даже незначительно превышающем калиброванное, приводит к резкому возрастанию остаточных ошибок и поэтому недопустима;
  - тенденция к увеличению остаточных ошибок во времени объясняется в первую очередь изменением систематического смещения измеренных центров крестов калибровочной решетки;
  - изменения величины остаточных ошибок в зависимости от качества угловой установки калибровочной решетки /по коллиматору или без него/ не обнаружено;
  - при массовой обработке снимков достаточно проводить калибровку раз в сутки. При этом среднеквадратическая ошибка составляет в среднем  $1,7$  мкм и не превышает  $2,3$  мкм, а максимальная - в среднем  $8,5$  мкм и не превышает  $12,5$  мкм.
- Полученные точностные характеристики автомата АЭЛТ-2/160 находятся на уровне лучших автоматов типа HPD<sup>/4/</sup> и ERASME<sup>/5/</sup>

и отвечают требованиям измерения фотоснимков с различных трековых камер в экспериментальной физике высоких энергий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранчук М.К. и др. Мониторный сканирующий автомат АЭЛТ-2/160. а/ Труды Семинара по обработке физической информации. Агверан, 1975. Изд-во ЕрФИ, 1976; б/ ОИЯИ, Р10-8861, Дубна, 1975.
2. Байла И., Ососков Г.А. ОИЯИ, Р10-11834, Дубна, 1978.
3. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. ГИФМЛ, М., 1962.
4. Powell B.W. Stability of Calibrations of HPD-1. CERN, DD/BA/67/21.
5. Anders H. et al. Description and Status Report of the ERASME System. CERN, DD-74-15, D.PH.11/inst. 74-5, May, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 декабря 1979 года.