

Б-903

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ПТЭ, 1967, №1, с. 61-66

2 5 1 8



Ю.А. Будагов, В.А. Бычков, А.Г. Володько,
В.П. Джелепов, В.Г. Иванов, Ю.Ф. Ломакин,
И. Паточка, Н.С. Толстой, В.Б. Флягин,
Н.И. Фролов, П.В. Шляпников

СИСТЕМА ФОТОГРАФИРОВАНИЯ МЕТРОВОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

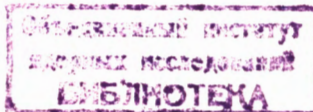
1965

2 5 1 8

Ю.А. Будагов, В.А. Бычков, А.Г. Володько,
В.П. Дзедзепов, В.Г. Иванов, Ю.Ф. Ломакин,
И. Паточка, Н.С. Толстой, В.Б. Флягин,
Н.И. Фролов, П.В. Шляпников

СИСТЕМА ФОТОГРАФИРОВАНИЯ МЕТРОВОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ

Направлено в ПТЭ



3961/3 48

В в е д е н и е

Создание системы фотографирования большой пузырьковой камеры всегда является трудной задачей. Ее решение существенно усложняется, когда съемка производится через несколько сред с различными показателями преломления — n , включая воздух, а путь светового луча в воздухе сравним или меньше его пути в средах с $n > 1$. При съемке в таких условиях нельзя получить неискаженные изображения снимаемых треков, не прибегая к специальным мерам (расчет и конструирование новых объективов, коррекция уже существующих и т.п.).

В настоящей работе рассматривается конструкция шестиобъективного стереофотоаппарата для метровой пузырьковой камеры^{1/} и тот круг вопросов, которые решались в ходе его создания. Анализируются также результаты трудоемких экспериментальных исследований точности восстановления пространственной картины событий в рабочем объеме камеры.

1. Вопросы, рассматривавшиеся при создании системы фотографирования

Фотографирование треков в метровой пузырьковой камере Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ^{1/} производится через воздух, стекла, воду и рабочую жидкость (пропан) объективами, оптические оси которых перпендикулярны поверхностям раздела этих сред (рис. 1). Размеры рабочего объема камеры 105 x 50 x 40 см.

Анализ влияния различных элементов конструкции камеры на качество изображения и точность восстановления пространственной картины событий показал, что:

Во-первых, при использовании для съемки широкоугольных серийных аэрофотообъективов ("Руссар-33", "Руссар-29" и т.п.) изображения предметов, расположенных в рабочем объеме камеры, сильно искажаются. Эти искажения могут существенно усложнить просмотр и обработку стереоснимков^{2/}.

Во-вторых, даже небольшие перекосы (5–10 мин) стекол относительно оптических осей объективов и т.п. вызывают смещения пространственных координат на 3–5 мм^{3/}.

Последнее обстоятельство накладывает жесткие требования на точность изготовления стекол и посадочных плоскостей.

Кроме того, в принципе к искажениям изображений траекторий частиц могут привести:

- а) Разброс в значениях показателей преломления стеклянных пластин.
- б) Температурные градиенты в воде и рабочей жидкости.
- в) Искривления поверхностей стекол вследствие пластичности оргстекла (для обеспечения безопасности при работе установки фотографирование производится через пластины из органического стекла).

Как будет показано ниже, последние три фактора при существующей конструкции камеры не приводят к заметным искажениям следов.

Для получения на снимках неискаженных изображений треков были рассчитаны и изготовлены специальные фотообъективы "Гидро-Руссар-4". На рис. 2 приведены графики остаточных аберраций этих объективов, рассчитанные для съемки через следующие вещества: воздух ($d_0 = 20$ мм; $n = 1,000$), дистиллированную воду ($d_2 = 675$ мм, $n_2 = 1,3270$), стекло ($d_1 = 120$ мм; $n_1 = 1,5163$) и пропан ($Z = 185$ мм, $n = 1,23$). Из этих рисунков видно, что фотообъективы "Гидро-Руссар-4" позволяют получать почти неискаженные изображения снимаемых треков высокого качества. Принимаемые нами фотообъективы правильнее называть фотограмметрическими камерами, так как для каждого из них экспериментально найдены все характеристики (см. п. "а" следующего раздела), необходимые для проведения точных фотограмметрических съемок^{4,5/}.

Расчет и изготовление широкоугольных объективов, исправленных на аберрации, вносимые водой, стеклами и пропаном, является достаточно сложной задачей. При этом заранее трудно оценить характеристики будущей фотокамеры. В связи с этим было решено фотографировать рабочий объем камеры шестью однотипными объективами с тем, чтобы в дальнейшем выбрать оптимальное число фотокамер, обеспечивающих хорошую точность восстановления геометрии событий.

2. Стерефотоаппарат

Устройство стерефотоаппарата показано на рис. 3. Фотокамеры-4 установлены на массивной металлической плите-1. Фотографирование производится на две параллельные перфорированные фотопленки шириной 80 мм. Размеры снимков: 137x70 для средней стереопары и 80x70 мм для крайних (рис. 4). Транспортировка фотопленок производится двумя лентопротяжными механизмами-2, установленными на плите и соединенными с подъемными механизмами-3.

Последние позволяют быстро поднимать лентопротяжные механизмы при смене кассет с фотопленкой (смена кассет занимает 3-4 мин). Монтаж всех узлов стерефотоаппарата на крышке пузырьковой камеры занимает 40-60 мин.

а) Характеристики фотокамер "Гидро-Руссар-4"

Основные характеристики фотокамер: расчетное значение фокусного расстояния - 95,6 мм, угол зрения $2\beta = 87^\circ$, диаметр диафрагмы плавно изменяется от 1,14 до 11,4 мм, увеличение для средней плоскости рабочего объема пузырьковой камеры - 0,13^x.

На предметных стеклах нанесены специальные перекрестия, определяющие положение главной точки снимка (центр симметрии объектива), - точка 0 на рис. 5.

Для каждой фотокамеры были определены:

1. Координаты главной точки снимка x_0 и y_0 (рис. 4).
2. Зависимость β (ρ), здесь: β - угол между оптической осью объектива и главным лучом из некоторой точки в пространстве предметов, а ρ - радиус - вектор ее изображения.

3. Зависимость продольной сферической аберрации зрачка входа от угла β

4. Реальное фокусное расстояние - f .

Погрешности определения Z -ых координат за счет несовершенства объективов не превышают 0,3 мм для углов зрения $\beta \geq 10^{\circ/6}$.

б) Плита для фотокамер

Плита (970 x 700 x 115), на которой установлены фотокамеры, изготовлена из дюралюминия Д16А-Т. Она выставляется параллельно опорной плоскости крышки камеры, которая в свою очередь параллельна границам раздела различных сред, и фиксируется в этом положении. Площадка для уровня, по которому производится регулировка, и посадочные поверхности для объективов находятся в одной плоскости.

Чистовая обработка посадочных мест и расточка отверстий для объективов производились на координатно-расточном станке с одной установки. При юстировке фотокамеры выставлялись на плите таким образом, чтобы три перекрестия (M_1, M_2, M_3) лежали на прямой, параллельной одной из координатных осей станка. Плита была установлена так, что центры отверстий для фотокамер находились на двух прямых, также параллельных этой оси.

Заданные расстояния между оптическими осями фотокамер (400 и 335 мм) были выдержаны с точностью $\pm(10-15)$ мкм, и только в одном случае (V_2 /2/) отклонение достигает 32 мкм.

Как показали специальные исследования, перекося оптических осей камер мал и его можно не учитывать при вычислении пространственных координат.

в) Лентопротяжный механизм

На рис. 6 и 7 показан общий вид лентопротяжного механизма (л.м.) и его схематическое устройство. ЛМ смонтирован в корпусе -1с откидной крышкой -2 (рис. 6). На стенке корпуса установлено приводное устройство, с торцов - приспособления для соединения его с подъемником-3. Основными узлами механизма, помимо указанных, являются: распределительный механизм, блок из трех столиков и кассеты.

В момент фотографирования электромотор -11, приводящий механизм в движение, выключен, а столики-3 плотно прижимают фотопленку к стеклам фотокамер -4. Сразу после фотографирования включается питание электромотора-11 и начинается подъем пластин прижимных столиков-7. Одновременно с ним начинается вращение приемного -14 и подающего-2 зубчатых барабанов и ведущего фрикциона-15. После подъема пластин-7 включается зубчатый барабан-26, который протягивает 325 мм фотопленки, после чего снова опускаются прижимные столики и кулачком-8 размыкается цепь питания электромотора. Время протяжки можно регулировать величиной напряжения, подаваемого на электромотор, в интервале от 3 до 10 сек.

Для контроля за работой ЛМ в корпусе установлены контакты, включающие сигнал обрыва или конца пленки. Другие контакты, включенные в цепь питания лампочки пульта управления, позволяют контролировать протяжку пленки.

В корпусах прижимных столиков смонтированы счетчики кадров -6. Номер кадра впечатывается на пленку с помощью системы, состоящей из лампочки, поворотной призмы и фокусирующей линзы. Каждый счетчик снабжен устройством установки на нуль.

Стереоснимки располагаются на фотопленке подряд с промежутками в 3 мм. Снимки, относящиеся к одному циклу срабатывания пузырьковой камеры, отстоят друг от друга на 325 мм, а между ними находятся три снимка, относящиеся к другим циклам.

В фотоаппарате применяются закрытые кассеты двух типов (1, 16) различающиеся расположением входной щели (рис. 7). Из-за зеркальной симметрии лентопротяжных механизмов приемные кассеты одного являются подающими другого и наоборот. Вместимость кассет 120 м фотопленки.

3. Результаты исследования точности восстановления пространственной картины событий в метровой пузырьковой камере^{/3/}

Для исследования влияния реальных характеристик оптической системы пузырьковой камеры на точность вычисления пространственных координат производилось фотографирование перекрестий, нанесенных на стекла, которые ограничивают рабочий объем пузырьковой камеры по вертикали. Расстояния между этими перекрестиями (≥ 50 мм) были известны с точностью не хуже 0,1 мм. Фотографирование производилось в рабочих условиях при $i = 60^\circ$ и $P = 21$ атм.

Обмер снимков производился на микроскопе УИМ-21.

Эти исследования позволяли установить погрешности в определении пространственных координат, показали необходимость учета усадки фотопленки при ее старении и выявили ошибки, дополнительно вносимые "сшиванием" координат, получаемых на снимках различных стереопар.

Специально исследовался вопрос о точности метода восстановления пространственных координат путем поиска соответствующих точек на снимках стереопары^{/7,8/}. Этот метод используется в геометрической программе вычислений координат на электронно-вычислительной машине^{/8/}.

Основные результаты этих исследований сводятся к следующему:

1. Наилучшая точность получается в том случае, когда измерения производятся на снимках крайних стереопар (B_1 ^{/1/} и B_1 ^{/3/} рис. 4). В связи с этим в настоящее время снимки средней стереопары используются для просмотра и обмера только тех треков, которые параллельны основным базам.

2. Среднеквадратичные ошибки определения пространственных координат на границах рабочего объема камеры (с учетом погрешностей метода поиска соответствующих точек) составляют 0,3–0,4 мм для X-ых и Y-ых координат и 0,7 – 1,0 мм для Z-ой координаты.

3. Стрелка прогиба прямых линий, обусловленная погрешностями оптической системы камеры, не превышает ошибок определения X-ых и Y-ых координат (т.е. не больше 0,4), что соответствует радиусу ложной кривизны для треков длиной 100 см $R = 300$ м.

4. Разности между значениями координат одних и тех же точек, измеренных на дополнительных (продольных) и основных (поперечных) стереопарах, не выходят за пределы тройных ошибок определения X, Y и Z на снимках основных стереопар.

Кроме этих исследований, проводились контрольные эксперименты на реальных треках. Для этой цели на полуавтоматических измерительных приборах /10,11/ производились измерения первичных треков, пересекающих камеру по всей ее длине. Другой способ заключался в определении масс зарегистрированных в камере Λ^0 - и K_1^0 -частиц. Результаты измерений как первичных треков, так и продуктов распада V^0 -частиц об-считывались по специально разработанным программам на электронной счетной машине.

Таким способом удалось установить, что:

1. Не наблюдается каких-либо дополнительных искажений следов, вносимых неоднородностями оптических сред, в частности, температурными градиентами или какими-либо другими причинами.

2. Ошибки, вносимые "сшиванием" треков при обработке их на снимках двух основных стереопар, практически не выходят за пределы погрешности определения пространственных координат и составляют: $\overline{\Delta X} = 0,12$ мм, $\overline{\Delta Z} = 0,8$ мм.

3. Среднее значение импульса пучка по камерным измерениям $\bar{p} = 5,01 \pm 0,01$ Гэв/с) после учета ионизационных потерь в стенках и рабочей среде камеры ($\overline{\Delta p} = -100$ Мэв/с) хорошо согласуется с результатами его определения /12/ методом токнесущей нити ($\bar{p} = 5,10 \pm 0,02$ Гэв/с).

4. Средние значения масс Λ^0 - и K_1^0 -частиц, зарегистрированных в камере, равны 1118 ± 2 Мэв и 494 ± 3 Мэв, что находится в хорошем согласии с табличными значениями масс этих частиц $1115,4 \pm 0,12$ Мэв и $497,7 \pm 0,3$ Мэв.

З а к л ю ч е н и е

1. Разработанная система фотографирования оказалась достаточно удобной и надежной в работе. С ее помощью уже получено около 100000 стереофотографий на пучке π^- -мезонов синхрофазотрона ОИЯИ.

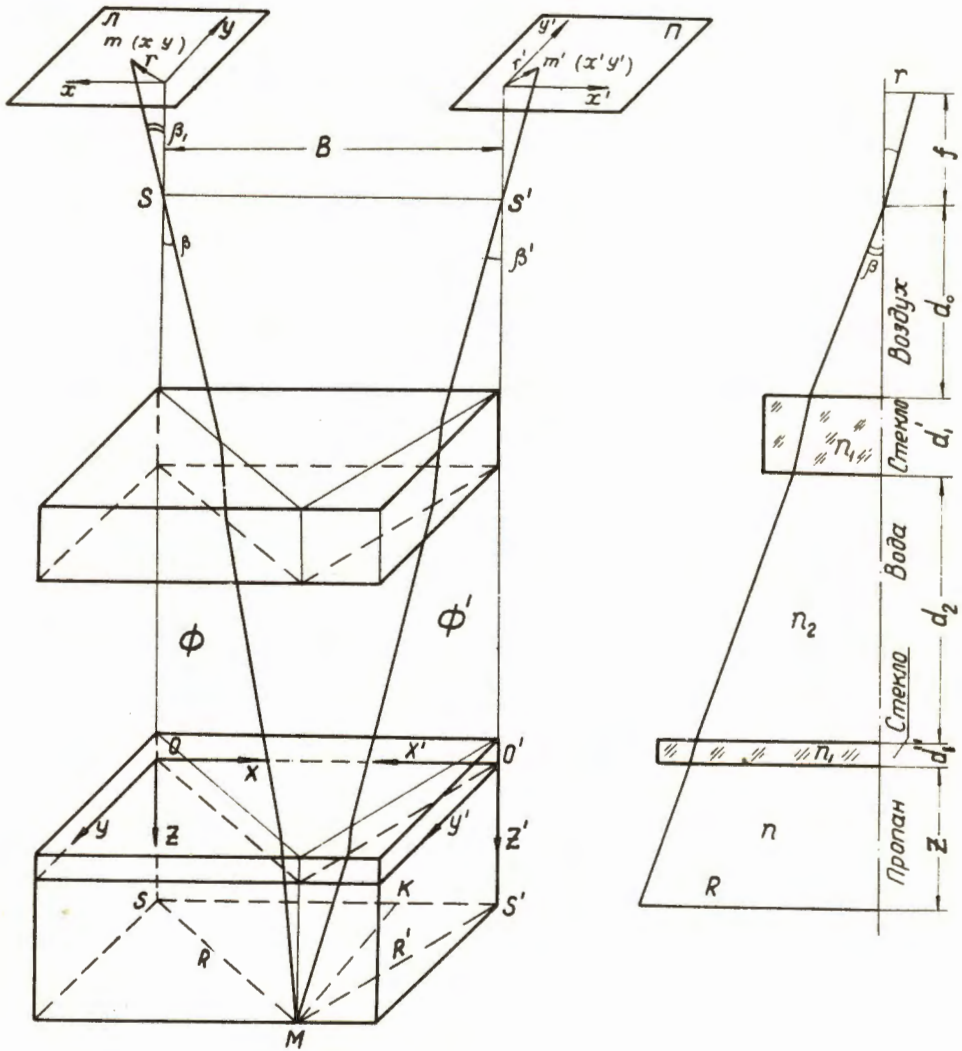
2. Приведенные выше сведения об ошибках восстановления пространственной картины событий в реальных рабочих условиях свидетельствуют о высокой точности реконструкции событий, получаемой с помощью системы фотографирования метровой пузырьковой камеры.

В заключение авторы выражают благодарность Э.М. Лившицу за помощь и полезные советы при проектировании системы, В.Б. Виноградову за помощь при исследовании ее характеристик, К.А. Байчеру, В.К. Филимонову, А.Ф. Александрову, Н.А. Морозову за изготовление стереофотоаппарата, В.И. Лепилу за конструирование приводного устройства, С.П. Жунину, Н.П. Мошкову и В.А. Лебедеву за монтаж и наладку системы фотографирования.

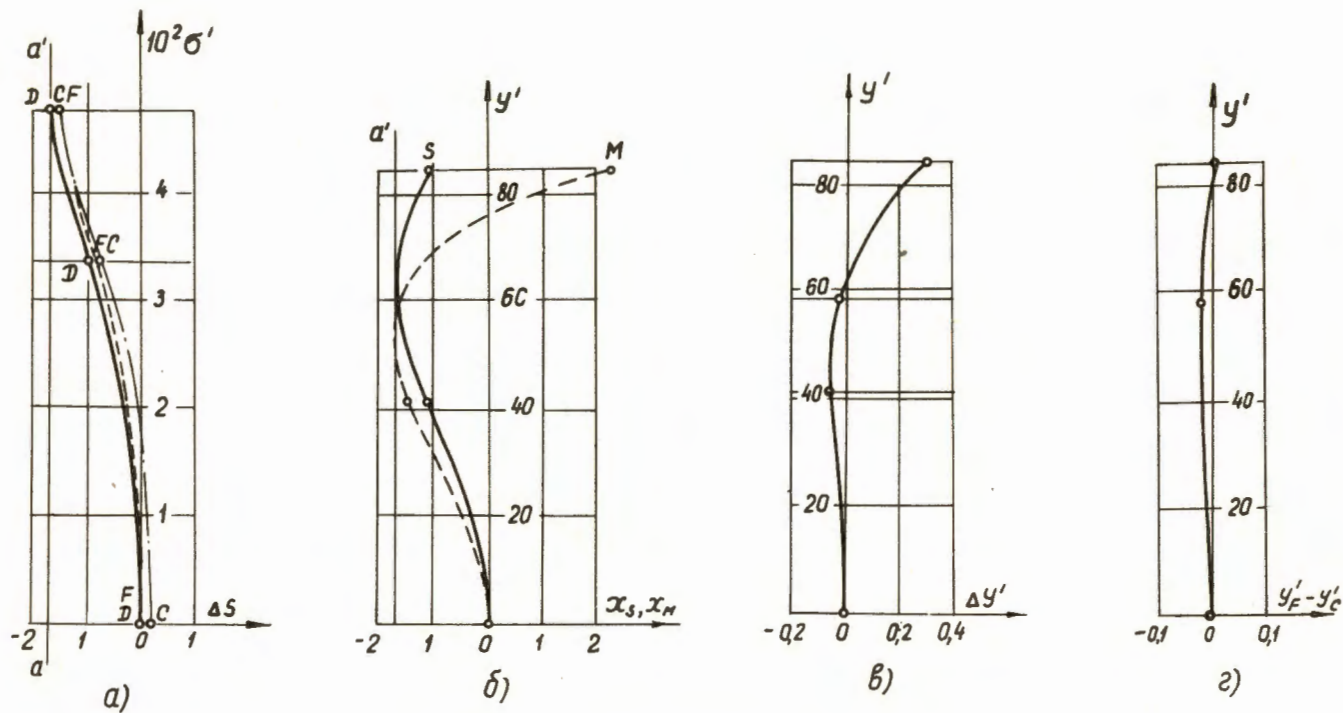
Л и т е р а т у р а

1. А.В. Богомолов, Ю.А. Будагов, А.Т. Василенко, В.П. Желепов, Н.И. Дьяков, В.Г. Иванов, В.С. Кладницкий, В.И. Лепилов, Ю.Ф. Ломакин, В.И. Москалев, В.Б. Флягин, П.И. Шетет, П.В. Шляпников. ПТЭ, № 1, 61 (1964).
2. Е.А. Андреев, В.Г. Иванов. Об искажениях изображений, возникающих при фотографировании треков через среды с различными оптическими характеристиками. Препринт ОИЯИ, 2053, Дубна, 1965.
3. В.Г. Иванов, И. Паточка, Ю.Ф. Ломакин, А.Г. Володько, В.Б. Виноградов. Методика и результаты исследования точности восстановления пространственной картины событий, регистрируемых в метровой пропановой пузырьковой камере ОИЯИ. Б1-2477, Дубна, 1965.
4. Э.М. Лившиц. Вопросы физики элементарных частиц. Ереван, Из-во АН Арм.ССР, 1965, стр. 559.
5. М.М. Русиянов. Фотограмметрическая оптика. Москва. Геодезиздат, 1962.
6. Е.М. Андреев, Л.С. Вертоградов, В.Г. Иванов. Исследование некоторых характеристик фотообъективов "Гидро-Руссар-4", используемых для фотографирования треков в метровой пропановой пузырьковой камере ОИЯИ. Препринт ОИЯИ, 2051, Дубна, 1965.
7. Е.Н. Кладницкая. Препринт ОИЯИ, 796, Дубна, 1961.
8. Н.Н. Говорун, Е.П. Жидков и др. Препринт ОИЯИ, 1102, Дубна, 1962.
9. Н.А. Буздавляч, З.М. Иванченко и др. Препринт ОИЯИ, 2095, Дубна, 1965.
10. Е.М. Андреев и др. ПТЭ № 3, 52 (1961).
11. Ю.Л. Каржавин, И.В. Чувило и др. ПТЭ, № 5, 54 (1963).
12. В.С. Кладницкий, В.Б. Флягин. ПТЭ, № 1, 24 (1965).

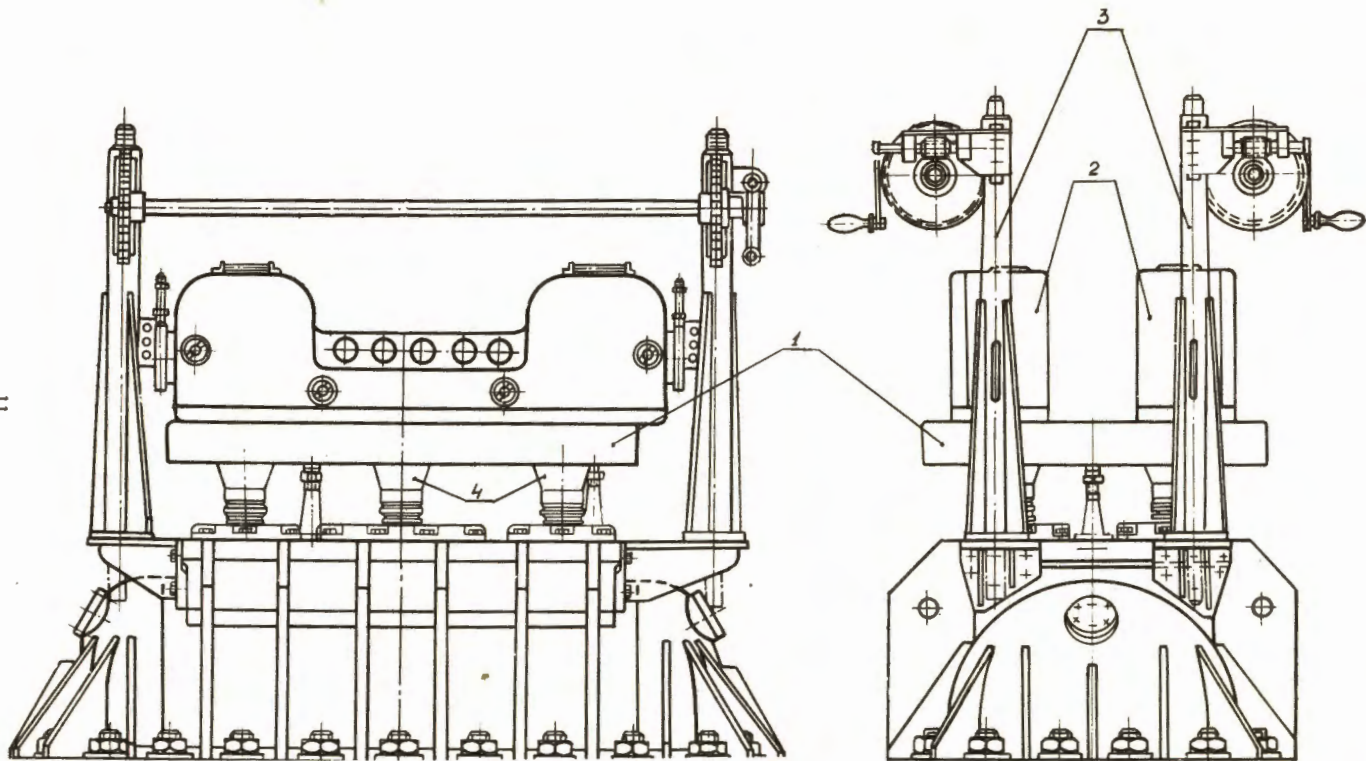
Рукопись поступила в издательский отдел
27 декабря 1965 г.



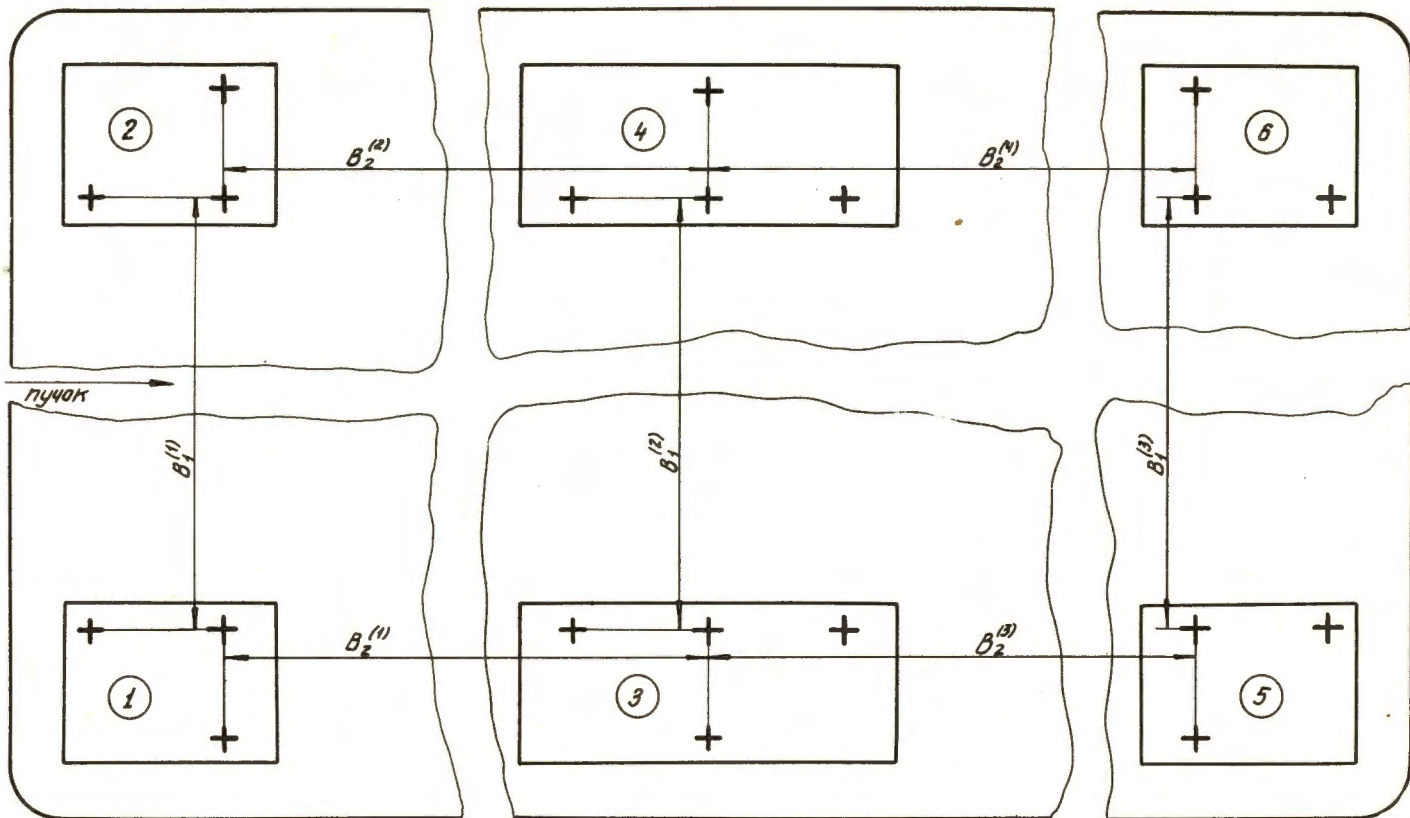
Р и с. 1. Оптическая схема камеры.



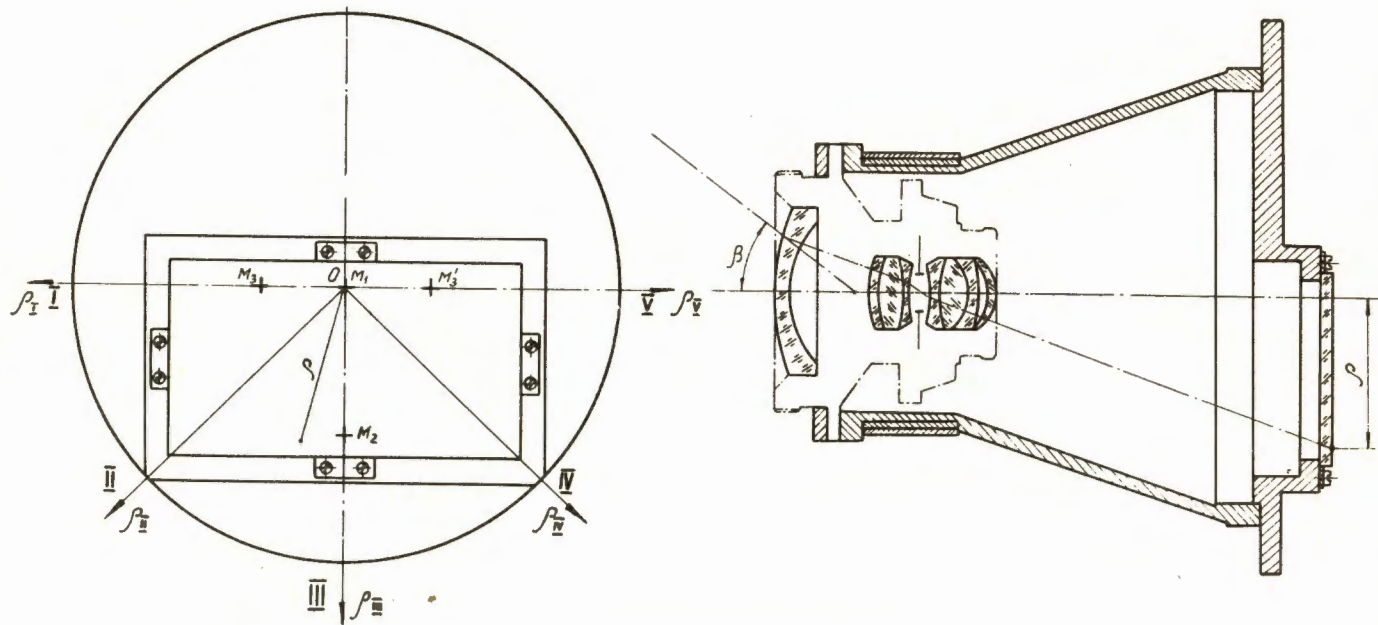
Р и с. 2. Графики остаточных aberrаций фотокамер "Гидро-Руссар-4".
 а) сферическая aberrация и хроматизм положения, б) астигматизм и кривизна положения, в) дисторсия, г) хроматизм увеличения, ΔS - продольная сферическая aberrация зрачка входа для различных длин волн ($\lambda_0 = 8563 \text{ \AA}^0$, $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}^0$, $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}^0$), y' - величина изображения, $\sigma' = \frac{y'}{f'}$ (где f' - заднее фокусное расстояние, $\Delta y'$ - дисторсия, x_s и x_M - астигматизм в сагитальной и меридиональной плоскостях, $y'_F - y'_C$ - хроматизм увеличения.



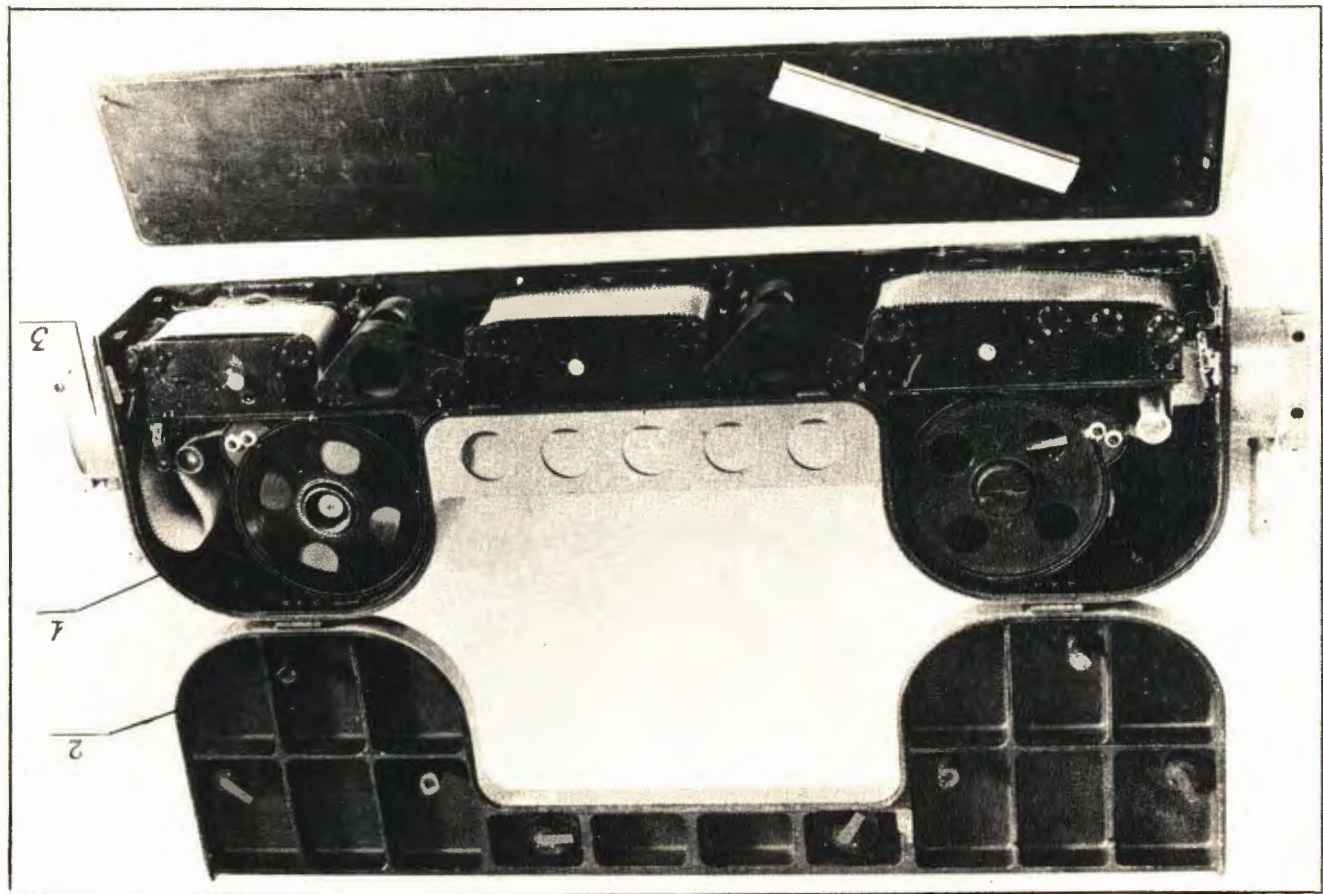
Р и с. 3. Стерефотоаппарат.



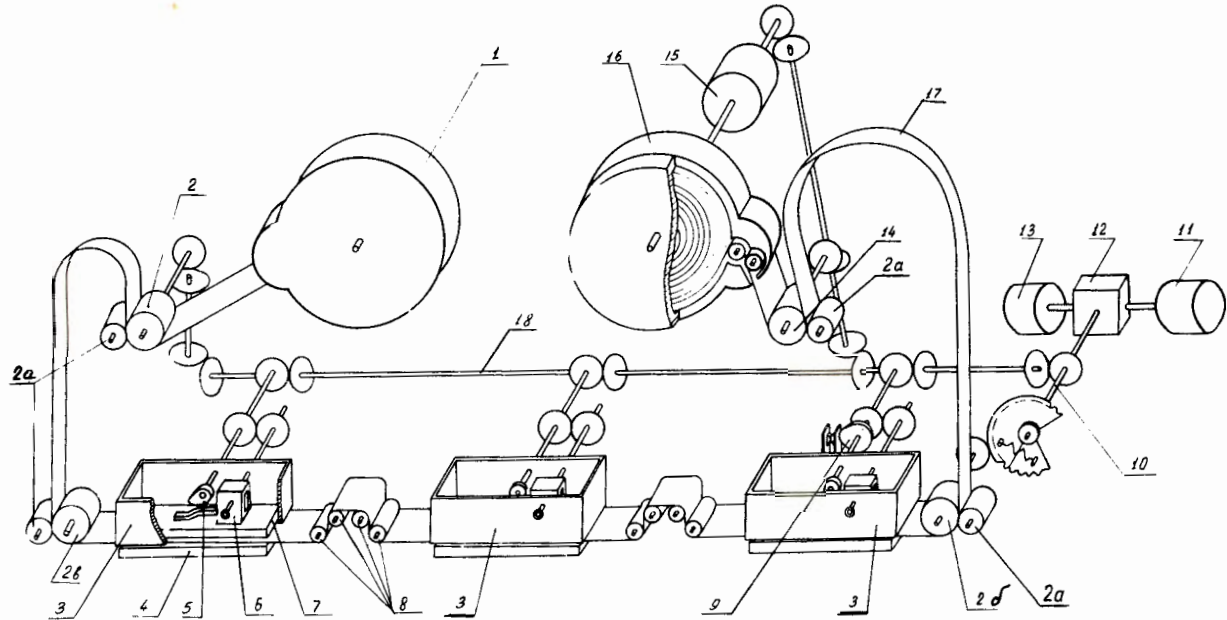
Р и с. 4. Схема расположения фотокамер на плите. $B_1^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) - базы основных (поперечных) стереопар. $B_2^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3, 4$) - базы дополнительных (продольных) стереопар.



Р и с. 5. Фотокамера "Гидро-Руссар-4".



Р и с. 8. Лентопротяжный механизм.



Р и с. 7. Принципиальная схема лентопротяжного механизма. 1 - подающая кассета, 2 и 2б - подающие барабаны, 2а - прижимной ролик, 2в - ролик, 3 - корпус прижимного столика, 4 - стекло фотокамеры, 5 - кулачок, 6 - нумератор кадров, 7 - подвижная пластина, 8 - обводные ролики, 9 - кулачок выключения электромотора, 10 - выходной вал приводного устройства, 11 - электромотор, 12 - редуктор, 13 - тормоз, 14 - приемный барабан, 15 - ведущий фрикцион, 16 - приемная кассета, 17 - фотопленка, 18 - вал распределительного механизма.